

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño de un sistema de control de eficiencia para una caldera de gas o bunker en NV
Tecnologías**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniería Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Jose Daniel Núñez Varela

Cartago, 19 de junio, 2017

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos y resultados experimentales propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de tesis realizado y por el contenido del presente documento.

Jose Daniel Núñez Varela

Cartago, 19 de junio de 2017

Céd: 2-0716-0385

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

Proyecto de graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Ana Lucía Morera Barquero
Profesora Lectora



Ing. Paola Monge Chanto
Profesora Lectora



Dr. Juan Luis Crespo Mariño
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 13 de junio de 2017

a mis queridos padres...

Agradecimientos

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de mi familia y mis amigos.

Jose Daniel Núñez Varela

Cartago, 19 de junio de 2017

Índice general

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Objetivos y estructura del documento	2
1.1.1 Objetivo General.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.1.3 Estructura del documento	2
Capítulo 2 Fundamentos de una caldera.....	3
2.1 Historia del control de calderas	3
2.2 Fundamentos básicos	4
2.2.1 Funcionamiento básico de una caldera.....	4
2.2.2 Tipos de calderas y clasificaciones.....	9
2.2.3 Proceso de combustión	10
2.2.4 Presión dentro de una caldera y corrientes de aire	17
2.2.5 Quemadores	18
2.2.6 Eficiencia de una caldera.....	20
2.2.7 Seguridad en una caldera.....	25
2.3 Principales lógicas de control	31
2.3.1 Control de combustible y aire.....	31
2.3.2 Control de nivel de agua.....	35
2.3.3 Control de presión de horno	38
2.4 Equipo de control	39
2.3.4 MicroMod.....	39
2.3.4 Cleaver Brooks	42
Capítulo 3 Sistema de control de caldera	43
3.1 Lógicas de control	43
3.1.1 Control de combustión	43
3.1.2 Control de nivel de agua.....	45
3.1.3 Control de presión de horno	47
3.1.4 Lógicas de monitoreo adicionales	47
3.2 Selección del equipo.....	49
3.2.1 Requerimientos del equipo	49
3.2.2 Selección del controlador e interfaz	52
3.2.4 Selección de los equipos del gabinete de control	55
3.2.5 Selección de la instrumentación	56

3.3 Interfaz implementada	63
3.4 Programa implementado.....	72
Capítulo 4 Verificación del sistema.....	76
4.1 Modelo de la simulación	76
4.2 Programa de simulación	80
4.3 Resultados de la simulación	82
Capítulo 5 Análisis económico.....	96
5.1 Selección del controlador e interfaz	96
5.2 Inversión de la empresa	98
5.3 Inversión por la implementación	98
Capítulo 6 Conclusiones.....	102
Bibliografía.....	104
Apéndices	105

Índice de figuras

Figura 2. 1. Circulación del agua en una caldera de un domo [7].	5
Figura 2. 2. Funcionamiento de dos domos en una caldera [8].	6
Figura 2. 3. Efecto de hinchazón y encogimiento en el domo de agua [9].	7
Figura 2. 4. Equipo de alimentación de agua [8].	8
Figura 2. 5. Equipos usados para la distribución de gas hacia la caldera [8].	11
Figura 2. 6. Distribución y tratamiento de los combustibles líquidos antes de la caldera [8].	12
Figura 2. 7. Viscosidad del fueloil en función de la temperatura [8].	13
Figura 2. 8. Efectos del exceso de oxígeno en la temperatura de los gases de combustión [8].	16
Figura 2. 9. (a) Curva característica de un dámper, (b) señal de control de un dámper [8].	18
Figura 2. 10. Quemador de gas de tipo boquilla [8].	19
Figura 2. 11. Quemador de combustible líquido [8].	19
Figura 2. 12. a) Balance de masas en el sistema vapor-agua. b) Balance de masas en el sistema combustible-aire [8].	20
Figura 2. 13. Balance de energías en la caldera [8].	21
Figura 2. 14. Efecto de la capacidad de la caldera en varias pérdidas de calor [8].	24
Figura 2. 15. Equipo de seguridad en los quemadores de una caldera [8].	25
Figura 2. 16. Lógica de seguridad de la purga de combustible [8].	27
Figura 2. 17. Lógica de seguridad del cabezal del encendedor [8].	28
Figura 2. 18. Lógica de seguridad del cabezal de combustible principal [8].	29
Figura 2. 19. Lógica de seguridad de los quemadores de combustible [8].	30
Figura 2. 20. Lógica de seguridad de disparo del combustible principal [8].	31
Figura 2. 21. Lógica de control de un eje [9].	32
Figura 2. 22. Lógica de control de ejes paralelos [9].	33
Figura 2. 23. Lógica de control de dos actuadores con ajuste de oxígeno [9].	34
Figura 2. 24. Lógica de control de límites cruzados [9].	35
Figura 2. 25. Lógica de control por un elemento [9].	36
Figura 2. 26. Lógica de control de dos elementos [9].	37
Figura 2. 27. Lógica de control de tres elementos [9].	38
Figura 2. 28. Lógica de control de la presión de horno [9].	39
Figura 2. 29. Sistema de varillaje de una caldera.	40
Figura 2. 30. Imágenes del controlador TrimPak [12].	41
Figura 2. 31. Interfaz de usuario del controlador MeterPak [13].	41
Figura 3. 1. Lógica de control implementada para la combustión.	45
Figura 3. 2. Lógica de control implementada para el nivel de agua.	46
Figura 3. 3. Lógica de control implementada para la presión de horno.	47
Figura 3. 4. Equipo Unistream de 7 pulgadas.	52
Figura 3. 5. Equipo Schneider (a) PLC M221 (b) Pantalla Magelis (c) Procesador de Magelis.	53
Figura 3. 6. Equipo siemens (a) PLC 1214C AC/DC/RLY (b) Pantalla KTP700 Basic.	54
Figura 3. 7. Medidores de temperatura (a) TSP100 de ABB (b) PFH7069 de Herten.	57
Figura 3. 8. Medidor de presión manométrica 266GDT de ABB.	57

Figura 3. 9. Medidores de diferencial de presión (a) 266DRH de ABB (b) 266DSH de ABB (c) DH3 de Dwyer.	58
Figura 3. 10. Analizadores de oxígeno (a) AZ de ABB (b) XZR de Michell.	58
Figura 3. 11. Actuadores para d�mper (a) DDD de Dwyer (b) ACT-MD de Dwyer.....	59
Figura 3. 12.. Variadores de frecuencia Altivar de Schneider.....	60
Figura 3. 13. Medidores de flujo (a) FPD500 (b) FSV430 (c) FCB300.	61
Figura 3. 14. Válvulas de control (a) WE4 de Dwyer (b) GLS de Valtek.	62
Figura 3. 15. Ventana principal. (Tomado de TIA Portal V13)	64
Figura 3. 16. Estaciones de manual-automático.	65
Figura 3. 17. Ventanas emergentes de PIDs.....	66
Figura 3. 18. Tabla de alarmas.	67
Figura 3. 19. Ventana de alarmas 1 y 2.	67
Figura 3. 20. Menú de configuración.	68
Figura 3. 21. Configuración de entradas.	68
Figura 3. 22. Ventana de salidas.....	69
Figura 3. 23. Ventanas de calibración de las salidas.	69
Figura 3. 24. Configuración de combustible.	70
Figura 3. 25. Configuración del nivel de agua.	71
Figura 3. 26. Configuración de la presión de hogar.	71
Figura 3. 27. Menú de históricos y ventana de gráfica.....	72
Figura 3. 28. Interpolación por rangos lineales.	74

Figura 4. 1. Simulación del control de nivel por un elemento usando el control de combustión de un eje.	83
Figura 4. 2. Simulación del control de nivel por un elemento usando el control de combustión de dos actuadores.	84
Figura 4. 3. Simulación del control de nivel por dos elementos usando el control de combustión de un eje.	85
Figura 4. 4. Simulación del control de nivel por dos elementos usando el control de combustión de dos actuadores.	86
Figura 4. 5. Simulación del control de nivel por tres elementos usando el control de combustión de un eje.	87
Figura 4. 6. Simulación del control de nivel por tres elementos usando el control de combustión de dos actuadores.	88
Figura 4. 7. Simulación del control de combustión de un eje usando el control de nivel de un elemento.	89
Figura 4. 8. Simulación del control de combustión de dos actuadores usando el control de nivel de un elemento.	90
Figura 4. 9. Simulación del control de combustión de un eje usando el control de nivel de dos elementos.	91
Figura 4. 10. Simulación del control de combustión de dos actuadores usando el control de nivel de dos elementos.....	92
Figura 4. 11. Simulación del control de combustión de un eje usando el control de nivel de tres elementos.	93
Figura 4. 12. Simulación del control de combustión de dos actuadores usando el control de nivel de tres elementos.	94

Figura A. 1. Plano de dimensiones del gabinete.....	106
Figura A. 2. Plano de componente del panel de control.....	107
Figura A. 3. Programa principal.	108
Figura A. 4. Programa de escalamiento de entradas.	109
Figura A. 5. Programa de escalamiento de salidas.	110
Figura A. 6. Programa de estación manual-automático.	110
Figura A. 7. Programa de interpolación.	111
Figura A. 8. Programa de escalamiento de entradas y salidas.....	114
Figura A. 9. Programa de control de combustión.....	117
Figura A. 10. Programa de control de la válvula de combustible.	118
Figura A. 11. Programa de control del actuador de forzado.....	118
Figura A. 12. Programa de control de nivel de agua	120
Figura A. 13. Programa de control de un elemento.....	121
Figura A. 14. Programa de control de dos elementos.....	122
Figura A. 15. Programa de control de tres elementos.	123
Figura A. 16. Programa de control de presión de horno.....	125
Figura A. 17. Programa de control del actuador de inducido.....	125
Figura A. 18. Programa general de entradas digitales.....	126
Figura A. 19. Programa de cálculo de la eficiencia.....	129
Figura A. 20. Programa de cálculo del flujo másico de vapor a partir de un diferencial de presión.	130
Figura A. 21. Programa de cálculo del flujo másico de agua a partir de un diferencial de presión.	130
Figura A. 22. Programa de la simulación.	131

Índice de tablas

Tabla 2. 1. Compuestos más comunes en los combustibles [8].	14
Tabla 2. 2. Poder calorífico y cantidad de aire de varios combustibles [8].	15
Tabla 2. 3. Características de la línea de equipos Hawk de Cleaver Brooks [6].	42
Tabla 3. 1. Lista de alarmas de variables de medición.	48
Tabla 3. 2. Lista de señales analógicas.	50
Tabla 3. 3. Lista de señales digitales.	50
Tabla 3. 4. Instrumentación necesaria para el control.	51
Tabla 3. 5. Equipo Unitronics seleccionado.	52
Tabla 3. 6. Equipo Schneider seleccionado.	53
Tabla 3. 7. Equipo Siemens seleccionado.	54
Tabla 3. 8. Equipo necesario para el gabinete de control.	55
Tabla 3. 9. Carga de torque de acuerdo a las especificaciones del dámper.	59
Tabla 3. 10. Instrumentación necesaria para el control de combustión.	62
Tabla 3. 11. Instrumentación necesaria para el control de nivel de agua.	62
Tabla 3. 12. Instrumentación necesaria para el control de presión de horno.	63
Tabla 3. 13. Instrumentación necesaria para el equipo de monitoreo.	63
Tabla 3. 14. Datos de la gráfica de las pérdidas por radiación en función de la capacidad de la caldera.	76
Tabla 4. 1. Concentraciones de compuestos en gas natural [5].	77
Tabla 4. 2. Concentraciones de compuestos en fueloil.	78
Tabla 4. 3. Parámetros de sintonización determinado para la simulación.	95
Tabla 5. 1. Costo de los sistemas de control propuestos.	97
Tabla 5. 2. Inversión por parte de la empresa.	98
Tabla 5. 3. Costos de armado del sistema.	99
Tabla 5. 4. Precios de la instrumentación para el control de combustión.	100
Tabla 5. 5. Precios de la instrumentación para el control de nivel de domo.	101
Tabla 5. 6. Precios de la instrumentación para el control de presión de hogar.	101
Tabla 5. 7. Precios de la instrumentación de solo monitoreo.	102

Capítulo 1

Introducción

Las calderas son máquinas que existen desde principios de los años 1700[4]. Estas fueron utilizadas principalmente en motores de vapor y, a pesar de tener más de 3 siglos de antigüedad, siguen siendo usadas para un amplio rango de aplicaciones. En la actualidad se usan para la generación de energía eléctrica, la esterilización, la cocción de alimentos, la producción de cartón, el calentamiento de espacios, etc. Algunos tipos de calderas no generan vapor, sino que se usan para generar agua caliente, principalmente para el calentamiento de lugares espaciosos.

En Costa Rica el uso de calderas es muy amplio, se usan en los hospitales para el lavado de la ropa, en los ingenios principalmente para la generación de electricidad y otros procesos de producción del azúcar, en la industria alimenticia y la industria química se usa para el calentamiento indirecto, en los mataderos se usa para cocinar los restos de los animales, etc. Todas estas industrias requieren que una caldera opere de manera eficiente y constante. Una producción constante significa mantener la presión de vapor independientemente del flujo requerido por la planta. Una producción eficiente permite disminuir los gastos en combustible. Actualmente existen controles para calderas que logran este objetivo, como el TrimPak, MeterPak, DrumPak y SteamPak de MicroMod o la serie de controles Hawk de Cleaver Brooks.

Estos controles representan una alta inversión para las empresas dueñas de calderas, ya que su precio está entre \$5000 a \$40000. Además, la empresa debe tener personal calificado en la configuración de estos equipos y debe contar con un equipo de respaldo debido a que el soporte no es inmediato. Un repuesto para estos equipos puede durar de 2 a 4 semanas en ser entregado.

La empresa NV Tecnologías es una empresa costarricense fundada en el año 1998 que se dedica a la automatización de procesos y a la venta de instrumentación. Inició sus servicios en venta de instrumentación y fue creciendo hacia el área de proyectos industriales, principalmente en ingenios. Recientemente, la empresa ha ampliado las áreas de proyectos a la industria médica, generación de energía, industria de alimentos, hospitales, etc. Dentro de estas áreas el uso de calderas es muy común y se ha visto una oportunidad de desarrollar un control maestro, que puede ser más barato que los existentes en el mercado y con la ventaja de proveer soporte y repuestos de forma casi inmediata.

El sistema de control desarrollado funciona en las calderas aplicando diferentes estrategias de control, adaptándose al tipo de caldera según la instrumentación con la que cuenta. Es configurable sin necesidad de realizar cambios en el programa, con el objetivo de que cualquier persona pueda configurarlo.

El diseño del sistema de control propuesto inició con el estudio de los fundamentos básicos de una caldera, con base a los cuales se propuso tres tipos de control para lograr mejorar la eficiencia de una caldera. El control de combustión realiza los ajustes necesarios en la cantidad de combustible y aire que son inyectados a la caldera, el control de nivel de agua

ayuda a mantener las condiciones de operación en el domo de la caldera y el control de presión de hogar disminuye las pérdidas por fugas de aire. Las lógicas escogidas se basan en lo que comúnmente se usa para el control de calderas. La implementación de estas lógicas se realizó en un PLC junto con una interfaz táctil, tomando en cuenta las capacidades de estos equipos y la inversión económica necesaria para su selección. La selección de la instrumentación a implementar se realizó con base al tipo de medidor usado comúnmente, al equipo disponible en la empresa y al costo económico del instrumento.

El sistema propuesto inicialmente tenía como objetivo realizar un control que sirviera para calderas con diferentes características. Sin embargo, la verificación de esta característica no se demostró durante la realización del proyecto. Además, no se realizó el plan de mantenimiento propuesto para el equipo, debido a que el tiempo de desarrollo de la aplicación tomó más tiempo de lo previsto.

1.1 Objetivos y estructura del documento

1.1.1 Objetivo General

El presente trabajo tiene como objetivo general diseñar un sistema que controle los parámetros principales para mantener la eficiencia de una caldera de gas y bunker.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Identificar las variables de control requeridas para mantener una buena eficiencia en una caldera.
2. Determinar el equipo correcto para la automatización de una caldera.
3. Diseñar el sistema de control con base a la lógica y equipo escogido.
4. Formular un plan de mantenimiento para la instrumentación y equipo electrónico.
5. Demostrar el correcto funcionamiento del sistema de control.
6. Realizar el análisis económico y financiero de la propuesta.

1.1.3 Estructura del documento

En este documento se detalla el proceso de diseño y comprobación de un sistema de control para una caldera de bunker o gas. Los temas abordados en el capítulo 2 son el contexto actual del control de calderas, los fundamentos básicos del funcionamiento de una caldera, las principales lógicas de control usadas en la industria y los principales controladores comerciales existentes.

En el capítulo 3 se presenta la solución implementada. En esta sección se muestran las lógicas escogidas para el control junto con diagramas, realizados con base a la norma SAMA, de las lógicas que se implementaron en el sistema diseñado. Con base a estas lógicas, se determinaron los requerimientos de los equipos. Para la instrumentación, se delimitó el rango de operación de los equipos, con el objetivo de establecer condiciones de selección. Esta sección también detalla acerca del equipo escogido y el programa implementado. Para el equipo escogido, se presentan las diferentes alternativas consideradas y sus características.

El programa implementado se divide en dos, el programa en el PLC S7-1214 y el programa de la interfaz KTP700 Basic.

La verificación del sistema propuesto se realizó por medio de una simulación. El modelo de la simulación y los resultados obtenidos son presentados en el capítulo 4. También se discute acerca de las limitaciones de la simulación y del comportamiento del sistema ante diferentes tipos de control bajo las mismas condiciones.

En el capítulo 5 se realiza un análisis económico de la inversión que debió realizar la empresa NV Tecnologías para el desarrollo de este sistema y la inversión que debe realizar una empresa dueña de una caldera para implementarlo.

Por último, se presentan las conclusiones del proyecto en el capítulo 5. Se discute los principales logros del proyecto, cuáles son las ventajas y limitaciones del sistema desarrollado y cuales mejoras pueden ser realizadas. Las últimas dos secciones del documento son la bibliografía y los apéndices.

Capítulo 2

Fundamentos de una caldera

En esta sección se van a discutir los fundamentos básicos de una caldera. Primero se aborda el contexto histórico del control de calderas, donde se habla acerca de cuándo inicio el control automático para estas máquinas, cuáles fueron los avances en el tiempo y cuáles son los retos actuales. La siguiente sección trata acerca de los fundamentos técnicos que explican el funcionamiento óptimo de una caldera. Los temas abordados son el funcionamiento básico de una caldera, los tipos de calderas, el proceso de combustión dentro del horno, la presurización de una caldera, el tipo de equipo usado para generar la llama, la eficiencia de una caldera y los tipos de seguridad.

Las siguientes dos secciones tratan acerca del control de calderas. La primera aborda las principales lógicas utilizadas en la industria para controlar los diversos procesos que afectan la eficiencia. A partir de estas lógicas, se diseñó el sistema de control. La última sección es acerca de equipos de control comerciales usados por la mayoría de industrias. Esta información fue usada para determinar los requerimientos del sistema para ser competitivo.

2.1 Historia del control de calderas

El control de calderas es casi tan antiguo como las calderas mismas. De acuerdo a Dukelow [5], se cree que su inventor fue James Watt, quien en 1785 aplicó un regulador centrífugo al control de velocidad de los primeros motores rotativos de velocidad. En los siguientes años, utilizó este principio para implementar un control automático con retroalimentación al nivel del agua de la caldera y posteriormente al control de la presión de vapor por corriente de aire forzado.

A pesar de que la implementación del control automático inicio con James Watt en 1785, no fue hasta el periodo de 1910 en adelante que se empezaron a realizar avances en el área. Inicialmente solo existían seguridades automáticas de enclavamiento por condiciones inseguras. Los demás procesos como el arranque, apagado y operación de la caldera se hacían de manera manual. Mucho del equipo usado era neumático y los principales controles se realizaban por conexiones neumáticas que pronto se volvieron muy complejas.

A partir del año 1950, hubo un avance mayor en el control. Se empezaron a usar técnicas de encendido y apagado de los quemadores junto con sistemas de seguridad, los cuales fueron implementados por medio de relés mecánicos. Los resultados de tales sistemas fueron bien recibidos, y rápidamente se empezaron a buscar mejoras en los todos los equipos. De acuerdo a Dukelow [5], en los años 60s, hubo un gran cambio del control neumático al control electrónico, se empezaron a usar componentes de estado sólido y elementos discretos.

Ante los grandes avances que se empezaron a realizar en el control de calderas y debido al incremento en la complejidad de los controles, surgieron los sistemas de diagramación. El primero fue el sistema SAMA (Scientific Aparatus Makers Association), el cual fue desarrollado a mediados de los 60s. Luego, a finales de los 60s, apareció el sistema ISA. Según dice Dukelow [5], entre los años 60s y 70s hubo una baja en el precio del combustible, lo cual causo un declive en la implementación de los controles.

A partir de los años 70s, el precio de los combustibles empezó a subir, de tal manera que a partir de los años 80s la implementación de controles automáticos volvió a ser una solución viable para la industria. Además, los grandes avances en el área de la electrónica hacia sistemas digitales generaron un mayor interés y una mayor facilidad en la implementación de nuevas lógicas de control.

Actualmente ha habido una gran modernización en el tipo de controles para calderas. La disponibilidad de controladores digitales, interfaces táctiles y dispositivos de medición con electrónica incorporada ha permitido integrar sistemas que permiten operar y diagnosticar una caldera de manera automática. Estos tipos de controles buscan principalmente disminuir el consumo de combustible de una caldera y prolongar su vida útil por medio de una correcta operación.

2.2 Fundamentos básicos

2.2.1 Funcionamiento básico de una caldera

El funcionamiento básico de una caldera se puede describir en dos sistemas, el sistema de agua-vapor y el sistema de combustible-aire-gases, de acuerdo a Dukelow [5]. El sistema de agua-vapor comprende la inyección de agua a la caldera, el espacio para almacenarla mientras el calor es transferido a través de barreras metálicas y la salida de vapor de la caldera.

Dukelow [5] dice que el sistema de agua-vapor está compuesto principalmente por uno o dos domos de agua según el tipo de caldera y tuberías. Un domo es el tanque o espacio de

almacenamiento del agua dentro de la caldera. En las calderas acuotubulares, el agua es recirculada a través de tubos que son calentados por la radiación de las llamas y la convección de los gases de combustión. La circulación del agua a través de estos tubos puede ser natural o forzada. La circulación natural ocurre por la evaporación del agua en los tubos. La circulación forzada se realiza por medio de una bomba. En la figura 2.1 se muestra un diagrama de la circulación del agua en una caldera con un domo.

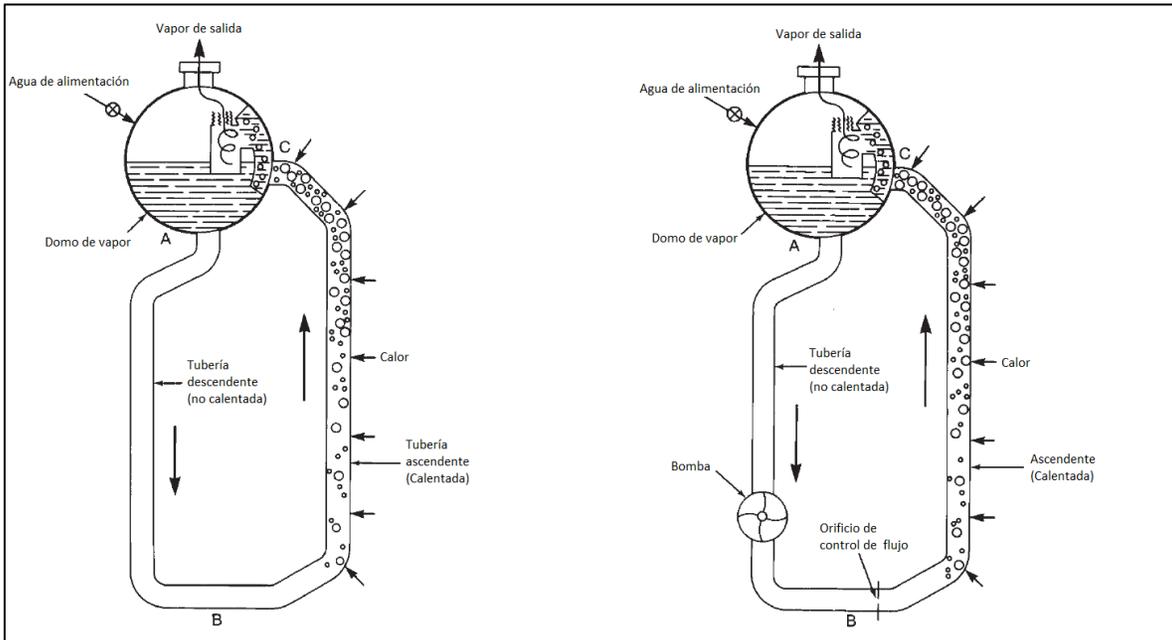


Figura 2. 1. Circulación del agua en una caldera de un domo [7].

En el caso de dos domos, uno de ellos está totalmente lleno de agua y se encuentra a una menor altura que el otro. Este domo se usa para almacenar las impurezas químicas, comúnmente llamada lodos, en el agua, y se le llama el domo de lodo o purga. Tiene una tubería de descarga de agua usada cuando la concentración de impurezas llega a un nivel por encima del especificado por el fabricante, la cual es controlada por una válvula que puede ser manual o automática. En la figura 2.2 se muestra un diagrama de una caldera de dos domos.

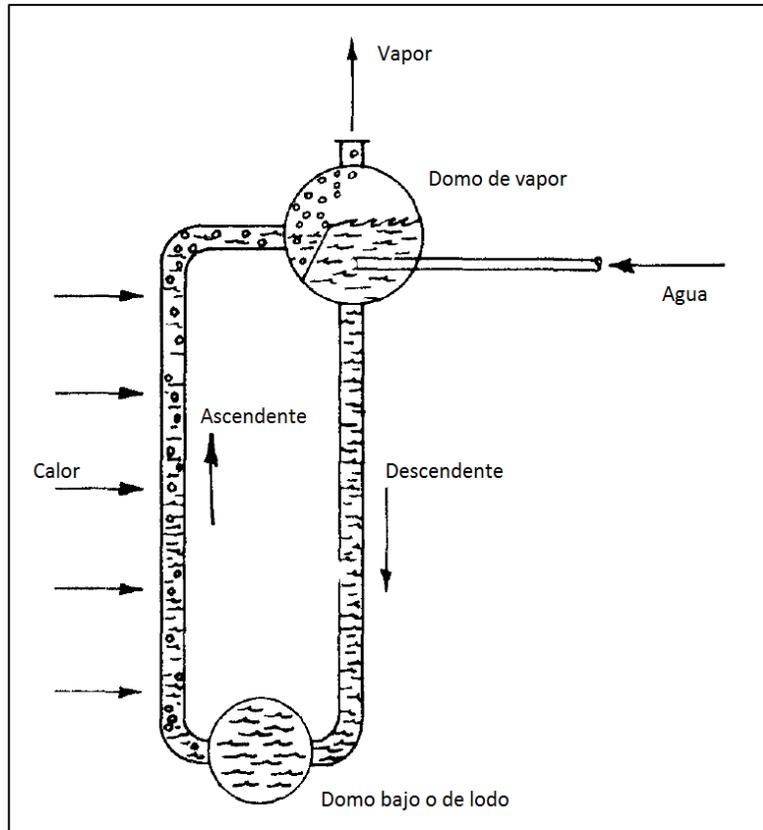


Figura 2. 2. Funcionamiento de dos domos en una caldera [8].

El otro domo es el domo de agua-vapor y está colocado a una altura mayor que el domo de lodo. Este domo debe estar lleno de agua hasta un nivel especificado por el fabricante de la caldera. Cuando hay dos domos, ambos están conectados por tuberías. Estas tuberías se clasifican en tuberías ascendentes y descendentes. Las tuberías ascendentes son las que están en primer contacto con el calor de las llamas y gases de combustión, de manera que es donde se produce el vapor principalmente. El agua evaporada es transportada al domo de agua-vapor, donde el agua que no se evapora es separada del vapor. Este domo se divide en el espacio de entrada de vapor y en el espacio de agua.

El nivel de agua de la caldera se mide en el domo agua-vapor. Dentro de este, existen burbujas producidas por la misma evaporación del agua. Según Gilman [6], estas burbujas pueden afectar las mediciones de nivel debido a los efectos conocidos como hinchazón y encogimiento. Si la carga de vapor aumenta, la cantidad de burbujas producidas va a aumentar, a esto se le llama hinchazón. De igual manera, si la carga de vapor disminuye, la cantidad de burbujas producidas va a disminuir, por lo que el nivel se encoge. Como consecuencia, la mezcla de agua y burbujas puede tener un volumen mayor o menor a causa de cambios en la carga de vapor, generando perturbaciones en la medición de nivel. En la figura 2.3 se muestra el efecto de la hinchazón y encogimiento.

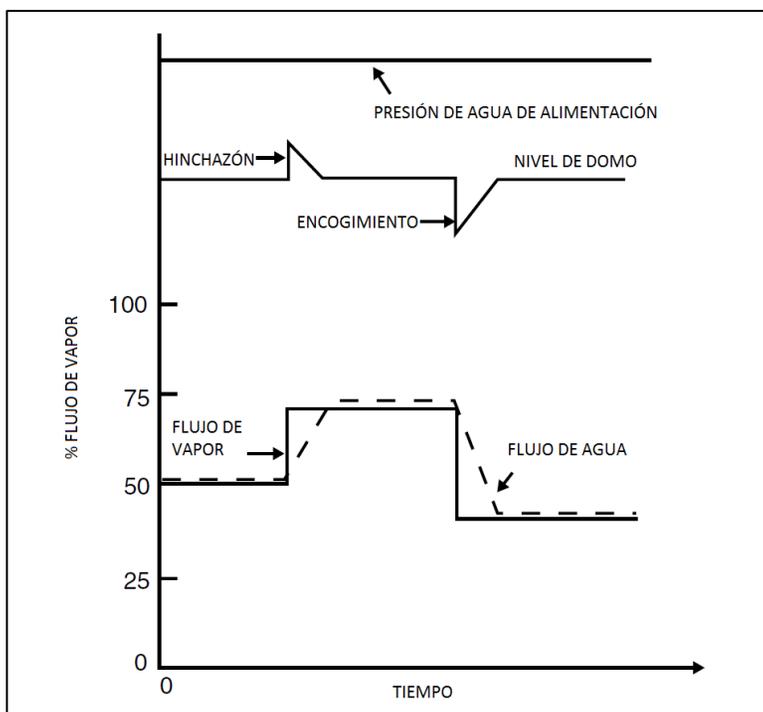


Figura 2. 3. Efecto de hinchazón y encogimiento en el domo de agua [9].

Independientemente si la caldera tiene uno o más domos, el domo debe tener un balance químico establecido por el fabricante. De acuerdo a Dukelow [5], se debe realizar el proceso de purga de agua de la caldera cuando la concentración de los químicos ha llegado a un nivel determinado. La purga debe ser controlada de alguna manera para evitar pérdidas de calor innecesarias. La válvula de purga puede ser controlada manual y periódicamente por un operador, o automáticamente midiendo la conductividad del agua para estimar la concentración de químicos.

Este sistema trabaja junto con el sistema de alimentación de agua para controlar el nivel del domo. El sistema de alimentación de agua está formado por las bombas, válvulas, tuberías, cabezales, calentadores y desaireadores de agua de alimentación. En la figura 2.4 se muestra un diagrama del equipo de alimentación de agua. El calentador se usa para disminuir las pérdidas de calor por temperatura del agua, mientras que el desaireador es para eliminar los gases como el dióxido de carbono o el oxígeno en el agua, que pueden corroer las tuberías.

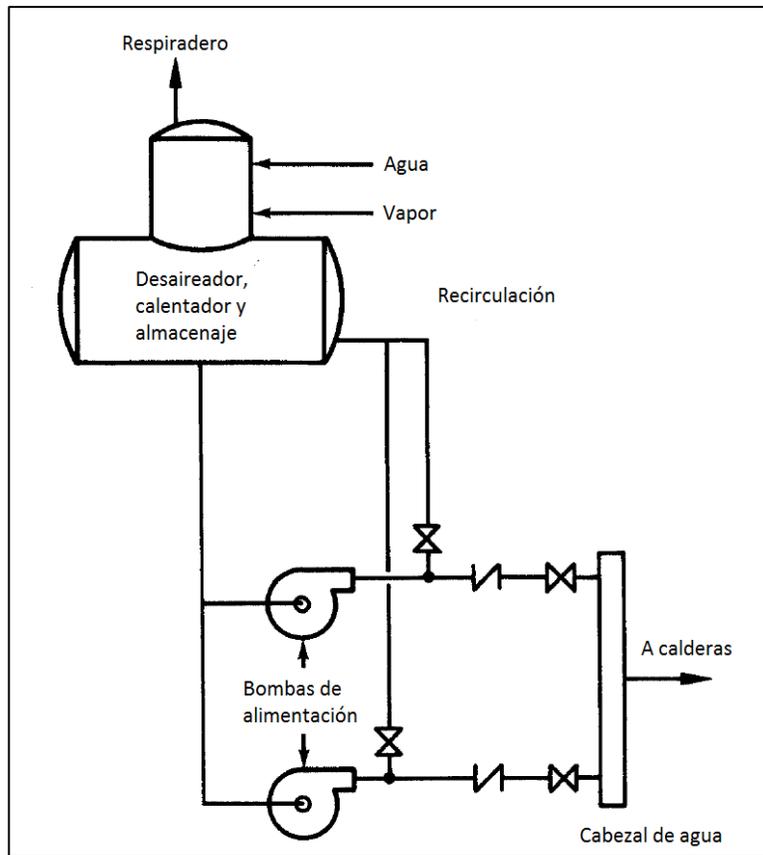


Figura 2. 4. Equipo de alimentación de agua [8].

El sistema de combustible-aire-gases, es el que comprende los equipos para el control de estas variables, provee el calor con el que se evapora el agua y contiene la tubería que lleva los gases fuera de la caldera, de acuerdo Dukelow [5]. En este sistema se combinan el combustible y el aire para convertir la energía química del combustible en calor.

Los gases producidos por la combustión son dirigidos hacia las superficies de contacto con el agua donde, por medio de la convección, el agua es evaporada. Entre menor sea la temperatura de los gases en la chimenea, mejor es la transferencia de calor hacia el agua. Es por esto que se agregan intercambiadores de calor para aumentar la transferencia de calor. Uno de estos es el precalentador de aire, el cual se encarga de calentar el aire de combustión antes de entrar a la caldera. Con esta técnica, se puede ahorrar hasta un 1% de combustible por cada aumento de 40 °C en la temperatura del aire de combustión, de acuerdo a Dukelow [5].

Otro método utilizado para recuperar el calor de los gases es el uso de un economizador. El economizador es un intercambiador de calor entre los gases de combustión y el agua de alimentación. Por medio de este sistema, la transferencia de calor del agua dentro de la caldera hacia el agua entrante es menor, lo que reduce la cantidad de combustible y aire requeridos. Según Dukelow [5], con el economizador se puede ahorrar alrededor de 1% de combustible por cada 10 °F que se aumente el agua de alimentación. En calderas con

precalentador de aire y economizador, los gases pasan primero por el economizador y luego por el precalentador de aire.

El proceso de adición de calor al agua tiene una constante de tiempo que depende de las características específicas de la caldera. Según Dukelow [5], algunos de los factores que afectan la transferencia de calor incluyen el sistema de almacenamiento de calor (estructura metálica), los coeficientes de transferencia en diferentes partes del sistema, las masas de metal o refractario y su configuración, etc. En general, la transferencia de calor en una caldera puede tardar unos minutos. Lograr un 63% de la respuesta total en un quinto de la constante de tiempo, es suficiente para lograr un control efectivo en una caldera.

2.2.2 Tipos de calderas y clasificaciones

Sam G. Dukelow [5] clasifica las calderas en dos tipos principales, acuotubulares o pirotubulares. Además, normalmente se suelen clasificar según alta presión (mayor a 15 psig) o baja presión (menor a 15 psig). Las calderas de alta presión son usadas principalmente en la generación de energía debido a la cantidad de energía que puede almacenar el vapor a altas presiones, mientras que las calderas de baja presión son usadas para el calentamiento por transferencia.

Otra clasificación comúnmente usada es la de caldera de vapor o caldera de agua caliente. La principal diferencia entre estas es que la caldera de agua caliente no evapora el agua, sino que produce agua caliente. Debido a que su funcionamiento es prácticamente igual, ambas se consideran calderas. Las calderas de agua se pueden clasificar en calderas de alta temperatura (mayor a 121 °C) y de baja temperatura (menor a 121 °C).

Calderas pirotubulares

Las calderas pirotubulares consisten en calderas con tuberías por las que circulan los gases de combustión y que están rodeadas por agua. La transferencia de calor hacia el agua es por medio de los gases de combustión hacia las tuberías y de las tuberías hacia el agua. Según Dukelow [5], los principales factores que afectan la transferencia de calor son la conductividad de calor de las tuberías y superficies, el área de transferencia de calor y el tiempo de contacto entre los gases de escape y la superficie de las tuberías.

Las calderas pirotubulares tienen varios diseños. Inicialmente eran esféricas o cilíndricas, pero han ido cambiando su forma para mejorar la eficiencia. Los principales diseños, descritos por Dukelow [5], son el diseño tubular con retorno horizontal y el tipo caja de fuego. Su principal diferencia es que, en el tipo de caja de fuego, el agua rodea a las tuberías y al horno, mientras que en el tubular con retorno horizontal el agua solo rodea las tuberías. Otros tipos de calderas son el tipo Scotch Marine y las calderas para locomotoras.

Las calderas pirotubulares pueden ser tipo “wetback” o dryback. Las del tipo “wetback” tienen el retorno de gases sumergido en agua, de manera que la transferencia de calor es mayor. Las del tipo “dryback” tienen el retorno de gases sin sumergir, debido a esto son más fáciles de dar mantenimiento.

La cantidad de pasadas de las tuberías gases de combustión por el espacio de agua también es un factor que influye en la transferencia de calor, aunque no necesariamente tiene un efecto positivo. Entre más pasadas tiene la caldera, los gases circulan a una velocidad alta, por lo que el tiempo de contacto con la superficie es muy poco. Además, los gases tienden a resistirse al flujo, por lo que el soplador de aire debe invertir más energía.

Las calderas pirotubulares son unidades pequeñas o medianas. Operan a presiones de vapor de hasta 300 psig, con flujos de vapor de hasta 35 000 lb/hr.

Calderas acuotubulares

Los tipos de calderas acuotubulares se diferencian en que las tuberías usadas están llenas de agua y no de gases de combustión. El calor transferido al agua es por medio de la radiación de las llamas y por la convección de los gases de escape con las tuberías. En este tipo de calderas, normalmente existen dos o más domos llenos de agua conectados por tuberías. Existe un domo alto llamado domo de vapor, y un domo bajo llamado domo de lodo. Según Dukelow [5], el objetivo de este arreglo es que el agua se evapore en las tuberías y fluya hacia el domo de vapor. El domo de lodo almacena todas las impurezas y suciedades que se almacenan en el agua del domo de vapor, que luego bajan para ser purgadas.

Las calderas acuotubulares pueden ser del tipo de una pasada. Este tipo consiste en que, a diferencia del diseño común, esta caldera no cuenta con ningún domo, solo cuenta con una tubería de agua que pasa por el horno una sola vez. El agua entra a la tubería y sale en forma de vapor, por lo que se requiere que el calor sea lo suficiente para evaporar el agua en una sola pasada. Este tipo de calderas se emplea en presiones de vapor de alrededor de 2 750 psig.

El rango de operación es mucho más amplio que las pirotubulares, desde presiones de vapor de hasta 5000 psig y de flujos de vapor de hasta 250 000 lb/hr, según Dukelow [5].

2.2.3 Proceso de combustión

El proceso de combustión de una caldera consiste en mezclar el combustible junto con una cantidad específica de aire para producir el calor necesario según la demanda de vapor requerida. En este proceso, las características del combustible y la cantidad de aire son factores determinantes para generar una buena combustión. Una buena combustión genera ahorros de combustible, disminuye la cantidad de contaminación emitida y aprovecha al máximo la energía en el combustible.

Los combustibles normalmente usados en las calderas pueden ser del tipo sólido, líquido o gaseoso. El presente trabajo es acerca de calderas de bunker o gas, por lo tanto, se omitirán los detalles de los combustibles sólidos. En el caso de los combustibles gaseosos, se suele usar gas natural, gas residual, gases producidos como un derivado de otros procesos o una mezcla de propano y aire. Este tipo de combustible normalmente tiene un poder calorífico de entre 950 a 1100 BTU/ft³.

La preparación del combustible gaseoso para ser agregado a la caldera es muy simple, solo requiere de una válvula de reducción de presión del suministro de gas. Después de esta

válvula el combustible es enviado a cada caldera por medio del cabeza de combustible. En la figura 2.5 se muestra un diagrama con el equipo necesaria para la distribución y preparación del gas.

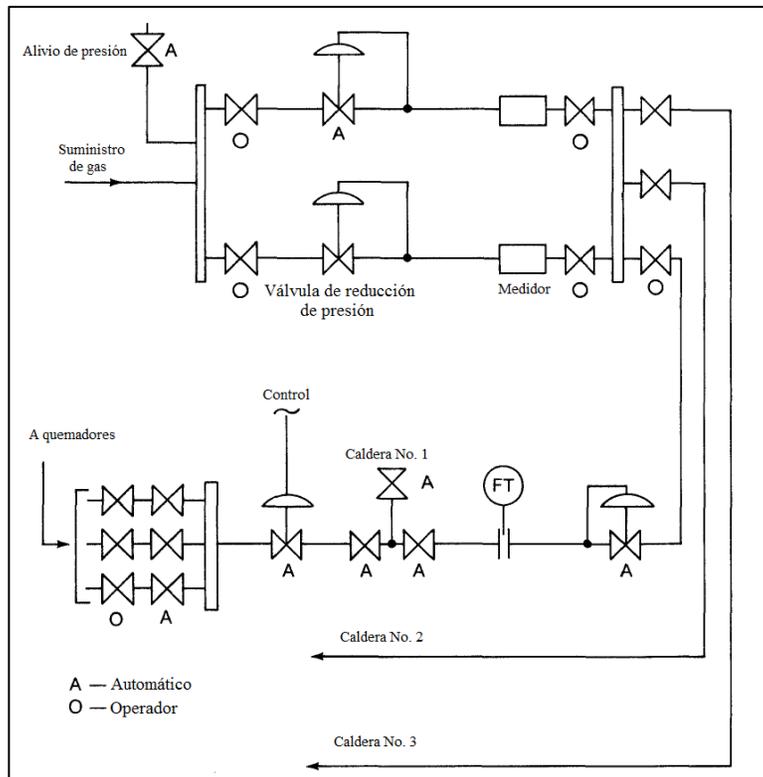


Figura 2. 5. Equipos usados para la distribución de gas hacia la caldera [8].

En el caso del combustible líquido, Dukelow [5] dice que los combustibles más usados son el fueloil No. 2 al No. 6, un derivado del petróleo conocido como bunker y productos derivados de otros procesos. Este tipo de combustibles son comprados a una distribuidora, y llevados a la planta por medio de un camión de carga. En la planta, el combustible es almacenado en un tanque de combustible, luego es llevado a una estación de preparación o a un tanque de suplado diario. En la figura 2.6 se puede ver un diagrama con el equipo necesario para la distribución y preparación del fueloil.

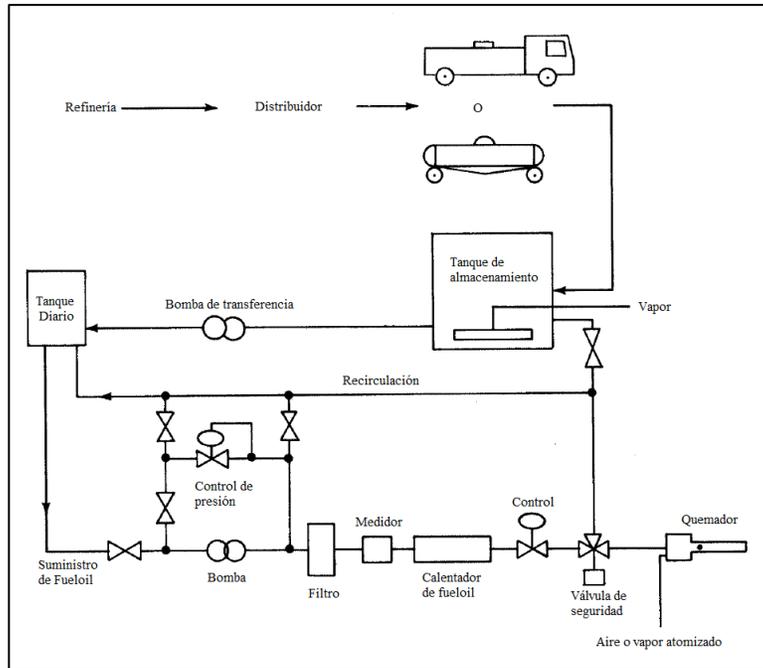


Figura 2. 6. Distribución y tratamiento de los combustibles líquidos antes de la caldera [8].

El combustible líquido puede requerir una preparación previa antes de ser quemado en la caldera dependiendo de la viscosidad. Si esta es muy alta, es necesario realizar un precalentamiento. Si el combustible es muy viscoso y no es calentado durante mucho tiempo, este se vuelve muy espeso para ser removido con facilidad, y puede generar paros en la caldera por atascamientos en la tubería.

Además de la temperatura, el combustible líquido debe ser llevado a una presión específica, ya que este debe ser atomizado dentro de la caldera para lograr una correcta combustión. En la figura 2.7 se muestra una gráfica de la viscosidad del fueloil en función de la temperatura. En los quemadores, normalmente se usan combustibles con viscosidades de 135 a 150 SSU, de acuerdo a Dukelow [5], por lo que para fueloil No. 6 se necesita de aproximadamente 220 °F para conseguir 150 SSU.

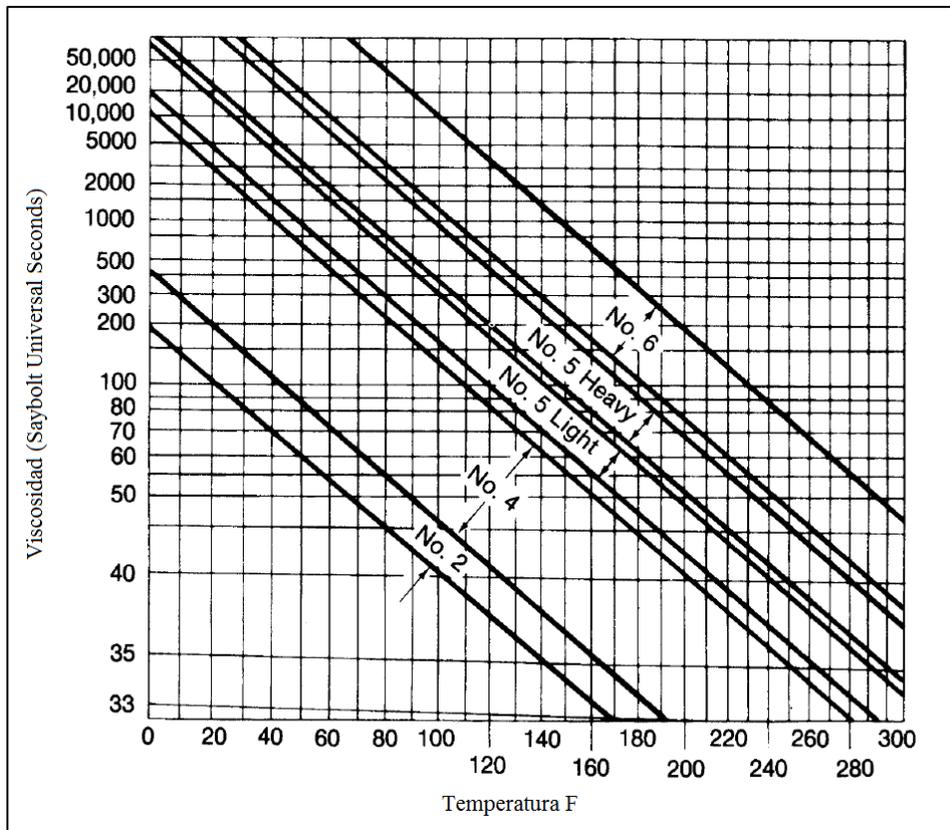


Figura 2. 7. Viscosidad del fueloil en función de la temperatura [8].

Estos combustibles una vez son inyectados a la caldera, son mezclados junto con el aire y la llama para producir una oxidación rápida que genera calor. De acuerdo a Dukelow [5], en este proceso los factores más importantes son llamados las 3 Ts, tiempo, temperatura y turbulencia. Cuando la mezcla entre combustible y aire es óptima, el tiempo de combustión es corto, y la temperatura es alta. Para lograr una buena mezcla, se necesita de un cierto grado de turbulencia dentro de la caldera, lo cual permite quemar el combustible por completo. En algunos casos, menos turbulencia puede causar una producción menor de contaminantes en los gases de escape.

En el proceso de combustión, las principales fuentes de energía son el carbono y el hidrógeno, según lo demuestra Babcock & Wilcox [4]. Estos se oxidan para formar dióxido de carbono y agua. Otros productos como el nitrógeno y el sulfuro también se oxidan y producen calor, pero el producto de estas reacciones genera óxidos nitrosos y sulfúricos, que contaminan el aire y pueden corroer la caldera.

Lograr una buena oxidación requiere de una específica cantidad de oxígeno en la mezcla y, por lo tanto, una cantidad específica de aire, según Babcock & Wilcox [4]. Cuando la cantidad de aire no es la suficiente para realizar la oxidación, se producen monóxidos de carbono e hidrógenos como un producto de la reacción. En la tabla 2.1 se muestra cuáles son los principales componentes de una reacción de combustión, cuáles son los productos generados luego de la combustión y la cantidad de calor generada.

Tabla 2. 1. Compuestos más comunes en los combustibles [8].

Combustible	Reacción	Moles	Libras	Calor de combustión BTU/lb de combustible
Carbón (a CO)	$2C+O_2=2CO$	2+1=2	24+32=56	4 000
Carbón (a CO ₂)	$C+O_2=CO_2$	1+1=1	12+32=44	14 100
Monóxido de carbón	$2CO+O_2=2CO_2$	2+1=2	56+32=88	4 345
Hidrógeno	$2H_2+O_2=2H_2O$	2+1=2	4+32=36	61 100
Sulfuro (a SO ₂)	$S+O_2=SO_2$	1+1=1	32+32=64	3 980
Metano	$CH_4+2O_2=CO_2+2H_2O$	1+2=1+2	16+64=80	23 875
Acetileno	$2C_2H_2+5O_2=4CO_2+2H_2O$	2+5=4+2	52+160=212	21 500
Etileno	$C_2H_4+3O_2=2CO_2+2H_2O$	1+3=2+2	28+96=124	21 635
Etano	$2C_2H_6+7O_2=4CO_2+6H_2O$	2+7=4+6	60+224=284	22 325
Sulfato de hidrógeno	$2H_2S+3O_2=2SO_2+2H_2O$	2+3=2+2	68+96=164	7 100

Dependiendo de la composición química de los combustibles, así va a ser la eficiencia del combustible al ser quemado. En general, el combustible líquido tiene una mayor eficiencia que el gas, debido a que tiene una menor cantidad de hidrógeno. Como se muestra en la tabla 2.1, cuando el hidrógeno se oxida produce agua. El agua producida por esta reacción es evaporada casi inmediatamente, generando una pérdida por calor latente que depende de la concentración de hidrógenos dentro del combustible.

La cantidad de aire requerido para una buena combustión puede ser calculado si se conoce la composición química del combustible a partir de las siguientes fórmulas:

$$\alpha = \frac{BTU \text{ de combustible}}{\text{volumen de combustible}} = \sum \% \text{ Compuesto} * \frac{BTU \text{ de compuesto}}{\text{volumen de compuesto}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\text{volumen de aire}}{\text{volumen de combustible}} = \sum \% \text{ Compuesto} * \frac{\text{volumen de aire de compuesto}}{\text{volumen de combustible}} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\text{volumen de aire}}{BTU} = \frac{\beta * BTU}{\alpha} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\text{cantidad de aire}}{BTU} = \frac{\gamma}{\text{volumen específico de aire}} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{BTU}{\text{cantidad de aire}} = \frac{1}{\delta} \quad (5)$$

Es posible calcular el poder calorífico de un combustible con base a la tabla A.1 mostrada en el apéndice y la composición del combustible. Según Dukelow [5], el valor de la variable ϵ , la cantidad de aire por BTU de combustible, es prácticamente la misma para varios tipos de combustibles. Por lo tanto, la cantidad de aire requerido por cantidad de calor puede ser aproximada fácilmente. En la tabla 2.2 se muestra el poder calorífico del combustible con base a su cantidad y a la cantidad de aire.

Tabla 2. 2. Poder calorífico y cantidad de aire de varios combustibles [8].

Combustible	BTU/lb de combustible	BTU/lb de aire
Carbón bituminoso	12 975	1 332
Carbón subbituminoso	9 901	1 323
Fueloil No. 6	18 560	1 351
Fueloil No. 2	19 410	1 376
Gas natural	23 170	1 393

En el proceso de combustión, existe una cantidad específica de aire requerido para lograr una combustión óptima. Esta cantidad específica es llamada la cantidad de aire teórico, según Babcock & Wilcox [4]. Si la combustión es alimentada con esta cantidad, no todo el combustible sería quemado, debido que no es posible alcanzar una mezcla al 100% de aire y combustible. Es por eso que siempre se debe agregar una cantidad de exceso de aire. Al existir este exceso, no todo el oxígeno se va a usar, pero se va a asegurar una combustión más completa. Si se mide la cantidad de oxígeno presente en los gases de escape, es posible medir la cantidad de exceso de aire.

Se debe tener cuidado con la cantidad agregada a la combustión, ya que un incremento en la cantidad de aire significa un incremento en las pérdidas de calor al calentar este aire. En la figura 2.8 se muestra el efecto de una alta cantidad de exceso de aire en la temperatura de los gases de escape.

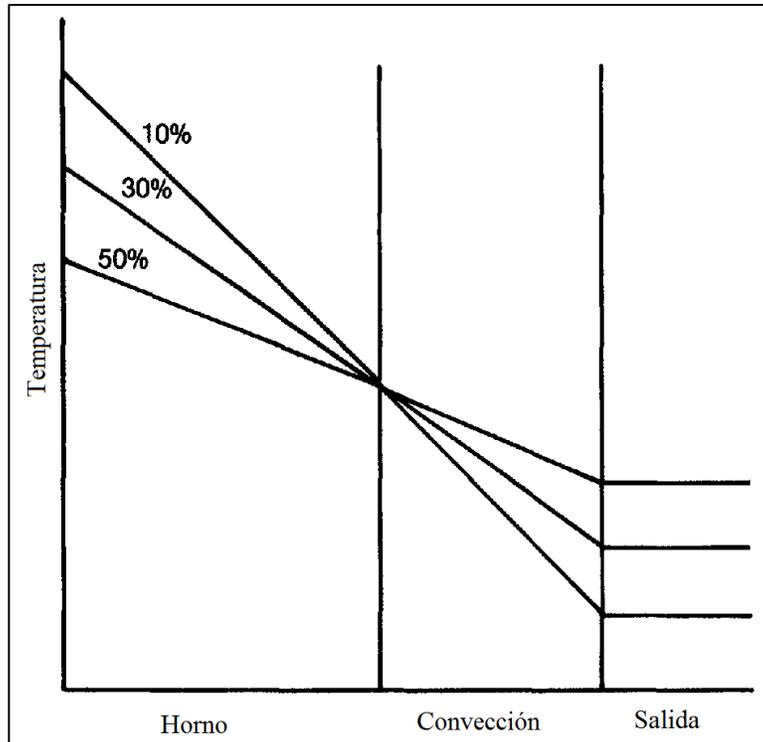


Figura 2. 8. Efectos del exceso de oxígeno en la temperatura de los gases de combustión [8].

Según Dukelow [5], la determinación del exceso de aire puede aproximarse por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Exceso de aire (\%)} = K \left(\frac{21}{21 - \% \text{ Oxígeno}} - 1 \right) * 100 \quad (6)$$

Donde K puede ser 0.9 para gas, 0.94 para combustible líquido o 0.97 para combustible sólido. La determinación del exceso de aire solo es posible por medio de la medición del oxígeno, ya que otras mediciones como el dióxido de carbono no proporcionan la información necesaria para el cálculo. Para este tipo de mediciones, los analizadores de oxígeno de zirconio son los más usados en la industria, de acuerdo a Dukelow [5].

Existe una cantidad de exceso de aire que es la indicada para cada el proceso. Menos aire significa combustible sin quemar, y más aire significa perdidas de calor. Según Dukelow [5], la cantidad de exceso de aire depende del tipo de combustible, el diseño del quemador, las características del combustible, el diseño del horno, y muchos otros. Por lo tanto, la cantidad de exceso de aire por cantidad de combustible en la caldera debe ser determinado por pruebas en cada caldera.

2.2.4 Presión dentro de una caldera y corrientes de aire

Una caldera puede tener hasta 3 corrientes de aire, la corriente natural, la corriente forzada y la corriente inducida, según Dukelow [5]. La corriente natural consiste en la corriente que es producida debido a los gases de combustión. Cuando los gases de combustión llegan a la chimenea, estos tienden a salir por una diferencia de densidad, lo que produce una succión en la chimenea. Esta succión causa el ingreso de aire, por cualquier abertura, hacia la caldera.

La corriente natural sola no es capaz de suplir la caldera con el aire de combustión necesario, por lo que se agrega un ventilador a la caldera para forzar una corriente de aire hacia adentro. A esta corriente de aire se le llama corriente forzada, y puede ser controlada ya sea por medio de un dámper en el ducto de entrada o controlando la velocidad del ventilador.

En algunas calderas, es necesario mantener una presión negativa en el horno debido a que se producen fugas de aire que generan pérdidas de calor. Además, el aire en estas fugas está a altas temperaturas, por lo que genera condiciones de operación muy peligrosas para los operadores de la caldera. Para solucionar esto se agrega un ventilador que empuja el aire hacia afuera. A esta corriente de aire se le llama corriente de aire inducido.

De acuerdo a Dukelow [5], a este tipo de calderas se les conoce como calderas de corrientes balanceadas. Existe también otro tipo de caldera que no requiere de una corriente de aire inducido, las cuales se llaman presurizadas. Este tipo de calderas son herméticas, y pueden operar a presiones positivas. Esta presión no se mantiene a un valor fijo como en el caso de las calderas de corrientes balanceadas, sino que la presión cambia dependiendo de la carga de la caldera.

Como se mencionó anteriormente, las corrientes de aire forzado e inducido pueden ser controladas de dos maneras, por medio de un dámper en el ducto de aire o por medio del control de velocidad del ventilador. La principal diferencia es que un control de velocidad tiene un costo mayor al de un dámper, pero tiene un retorno de la inversión por el ahorro en el consumo de energía de los ventiladores.

Una desventaja del uso de dámpers es la no linealidad del flujo con respecto a la apertura del dámper. En la figura 2.9 se puede ver una gráfica del comportamiento del flujo en función de la apertura en la gráfica izquierda. En la gráfica derecha se puede ver cuál es el flujo deseado por el sistema de control. Debido a esto, Gilman [6] recomienda que se debe acondicionar la señal de apertura para que el flujo de aire a través del ducto sea lineal.

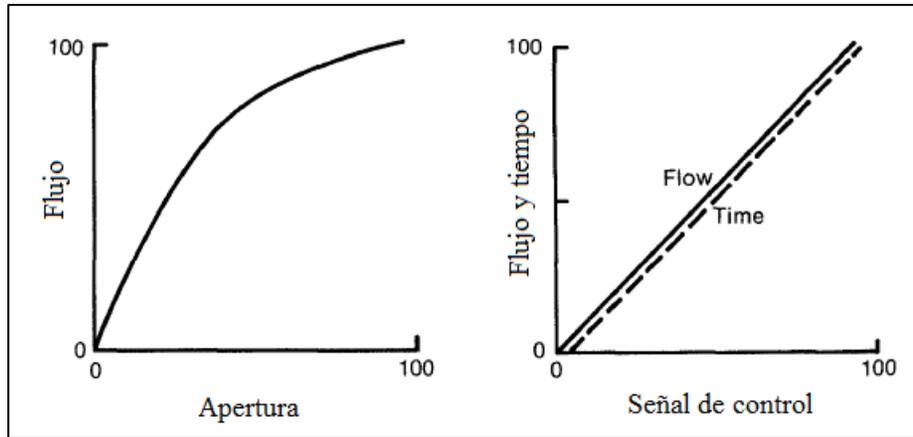


Figura 2. 9. (a) Curva característica de un dámper, (b) señal de control de un dámper [8].

2.2.5 Quemadores

De acuerdo a Dukelow [5], las principales funciones de los quemadores son las siguientes:

1. Inyectar el combustible a la cámara de combustión
2. Inyectar el aire de combustión a la cámara
3. Mezclar el combustible y el aire
4. Encender y quemar la mezcla
5. Eliminar los productos de la combustión

La inyección se logra aumentando la velocidad del fluido a través de la reducción del área de la tubería del quemador. Para cada combustible, las características del quemador son diferentes. En el caso de los combustibles gaseosos, el tipo de quemador más utilizado es el de tipo boquilla. En la figura 2.10 se muestra una imagen de este tipo de quemador. El combustible ingresa por una tubería pequeña hacia un componente del quemador llamado windbox, o caja de viento. En la caja de viento, el aire entra por las aspas colocadas a los costados, las cuales inducen un vórtice en la corriente de aire. Dentro de la caja de viento, el vórtice de aire se mezcla junto con el combustible, generando la mezcla que luego va a ser encendida. El aire que entra a la caja de aire proviene del ventilador de aire forzado.

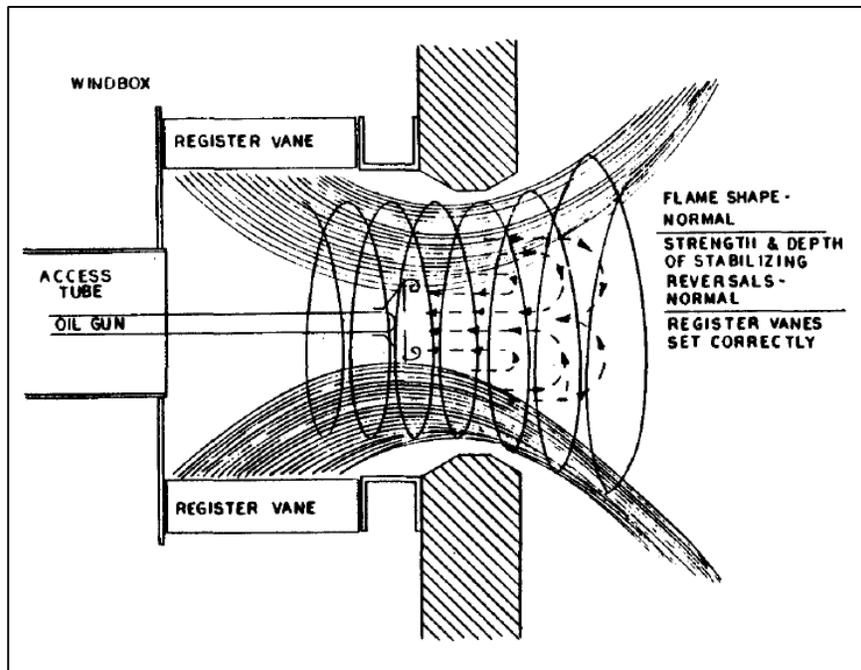


Figura 2. 10. Quemador de gas de tipo boquilla [8].

Para el caso de los quemadores de combustible líquido, el funcionamiento es muy parecido. La principal diferencia es que, como requisito para la ignición, el combustible debe ser gasificado. Es por eso que el combustible líquido es atomizado y esparcido en la caja de viento. Otra diferencia es la separación del aire entrante en aire primario y aire secundario, por medio de un difusor. El aire primario se usa para crear la primera mezcla junto con el combustible. Esta mezcla es mayormente combustible, y luego es combinada junto con el aire secundario para crear la mezcla de ignición. En la figura 2.11 se muestra una imagen de un quemador de combustible líquido.

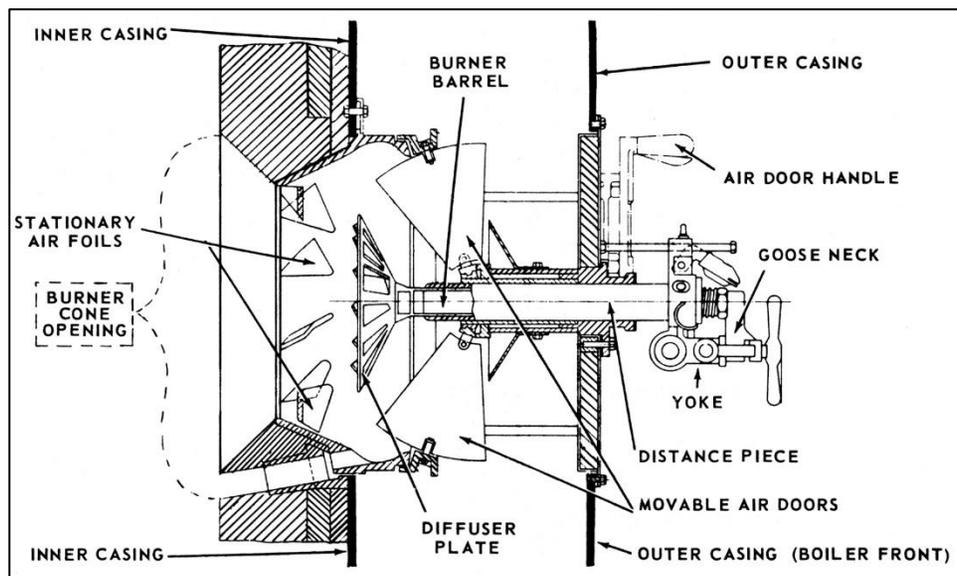


Figura 2. 11. Quemador de combustible líquido [8].

2.2.6 Eficiencia de una caldera

La eficiencia de una caldera se refiere a la capacidad de transferir la energía química del combustible, en forma de calor, hacia el agua, manteniendo siempre las especificaciones de operación. La eficiencia de una caldera incluye varios factores de operación de la caldera. Según Dukelow [5], estos factores son la capacidad de operación, la presión de vapor, la calidad de agua, las temperaturas en la caldera, las presiones en la caldera, las corrientes de aire en la caldera, análisis de gases, análisis de combustible y el combustible quemado. En general, en una caldera existen 8 factores principales que generan pérdidas de calor, los cuales son:

1. Pérdida de calor sensible en los gases secos de combustión
2. Pérdida de calor sensible por agua en el aire de combustión
3. Pérdida de calor sensible por el agua en el combustible
4. Pérdida por calor latente por el agua en el combustible
5. Pérdida por calor latente por el agua formada por la combustión de hidrógeno
6. Pérdida por carbón sin quemar en los desperdicios
7. Pérdida por gas combustible sin quemar en los gases de combustión
8. Pérdida de calor por radiación

El sistema de control es el que mantiene el balance de masa y energía dentro de la caldera. En las figuras 2.12 y 2.13 se muestran los principales factores que afectan los balances de masa y energía respectivamente. En el control de una caldera, se debe establecer primero una demanda requerida de vapor. Esta demanda define la cantidad de combustible y aire a agregar. Con base a las especificaciones de operación y a la demanda de vapor, se debe regular la cantidad de agua que ingresa al sistema.

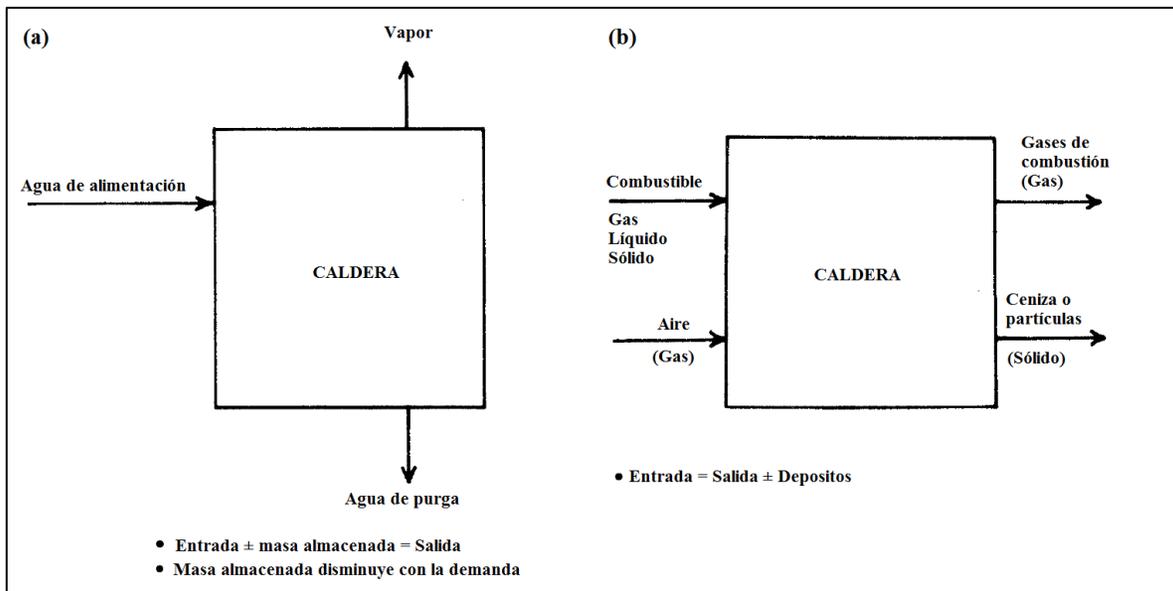


Figura 2. 12. a) Balance de masas en el sistema vapor-agua. b) Balance de masas en el sistema combustible-aire [8].

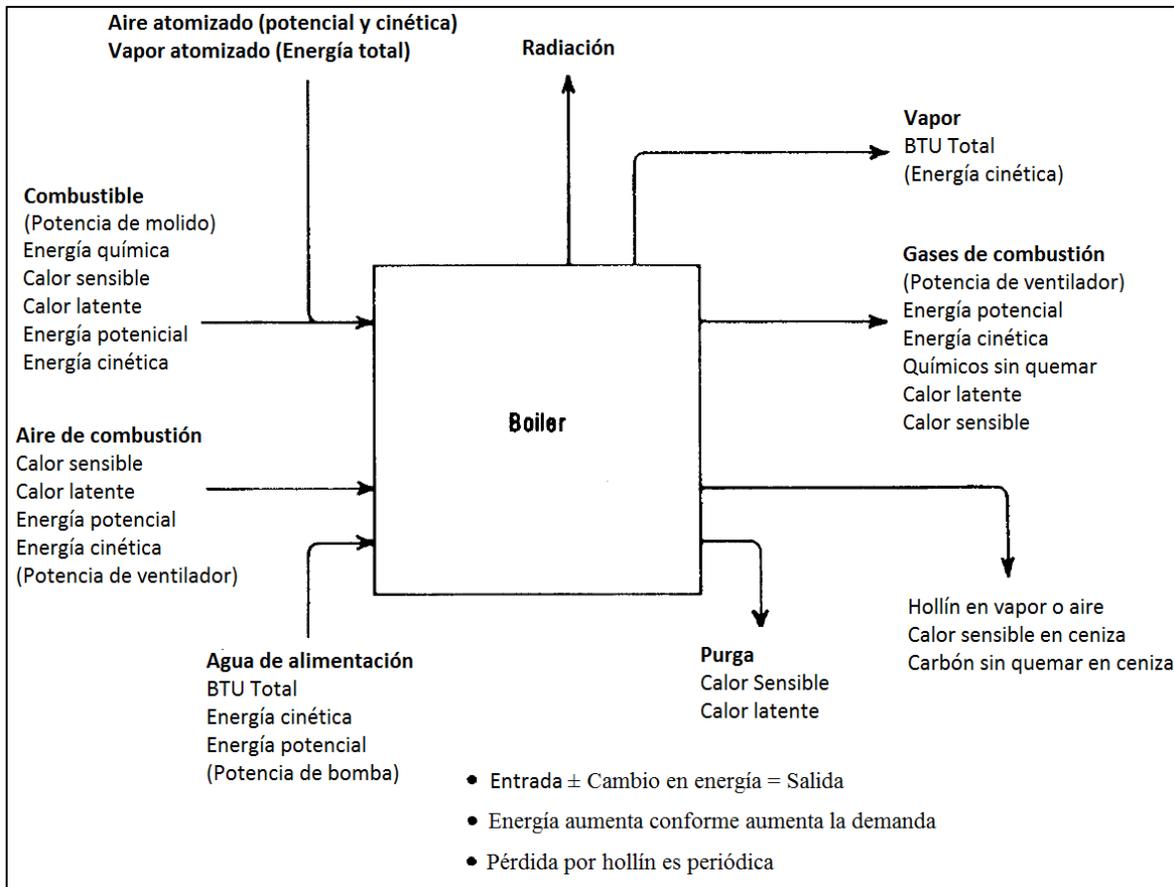


Figura 2. 13. Balance de energías en la caldera [8].

De acuerdo a Dukelow [5], existen 3 métodos para calcular la eficiencia de la caldera. Uno es conocido como el método entrada/salida o método directo. La ecuación usada para el cálculo del método directo depende de las mediciones en el agua de alimentación, el agua de purga, el vapor y combustible. En modo general, la ecuación para el método directo es:

$$\text{Eficiencia de la caldera} = \frac{\text{Calor agregado al agua de alimentación}}{\text{Calor de combustible}} \quad (7)$$

Este método requiere de la medición del flujo de vapor, el flujo de agua de alimentación, el flujo de purga de agua y el flujo de combustible, además del poder calorífico de cada uno de estos flujos. Si se conoce el flujo de vapor y el flujo de agua de alimentación, es posible calcular el flujo de purga de agua. El poder calorífico puede ser determinado por medio de la presión y la temperatura a través de una tabla de propiedades del vapor. El poder calorífico del combustible puede ser determinado por un calorímetro.

La precisión de este método no es tan buena comparada con los demás, debido a las imprecisiones de las mediciones. Este método puede tener una precisión de ± 1 a 5%, según Dukelow [5]. La fórmula para calcular la eficiencia por el método directo es la siguiente:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{A * B + E * F - C * D}{G * H} * 100 \quad (8)$$

Donde:

- A. Flujo másico de vapor [lbs/hr]
- B. Entalpía del vapor [BTU/lb]
- C. Flujo másico del agua de alimentación [lbs/hr]
- D. Entalpía del agua de alimentación [BTU/lb]
- E. Flujo másico del agua de purga [lb/hr]
- F. Entalpía del agua de purga [BTU/lb]
- G. Flujo másico de combustible [lb/hr]
- H. Poder calorífico del combustible [BTU/lb]

Si solo se conocen dos de los tres flujos, se puede estimar el tercer flujo con la siguiente fórmula:

$$E = C - D \quad (9)$$

Este método requiere de los siguientes instrumentos de medición:

1. Flujo de vapor
2. Flujo de agua de alimentación
3. Flujo de agua de purga
4. Flujo de combustible
5. Calorímetro de combustible o su análogo

En el caso de que las mediciones sean por diferencial de presión, se deben agregar medidores de temperatura y presión para calcular el flujo másico.

El método indirecto o método de las pérdidas de calor calcula cada una de las pérdidas de calor que existen en la caldera, las cuales se suman y luego se restan a 100. Este método tiene una mayor precisión, pero es más complejo, requiere de más trabajo y de muchos más instrumentos de medición. Las pérdidas a calcular son las siguientes:

1. Pérdida de calor sensible por los gases de escape secos:

$$\text{Masa (gases de combustión secos)} * \Delta T * M_{cp} \quad (10)$$

2. Pérdida de calor sensible por agua en el aire de combustión:

$$\text{Masa (humedad en el aire)} * \Delta T * M_{cp} \quad (11)$$

3. Pérdida de calor sensible por agua en el combustible:

$$\text{Masa (agua en el combustible)} * \Delta T * M_{cp} \quad (12)$$

4. Perdida de calor latente por el agua en el combustible

$$\text{Masa (agua en el combustible)} * 1040 \quad (13)$$

5. Pérdida de calor latente por el agua formada por la combustión de hidrógeno

$$\text{Masa (vapor)} * 1040 \quad (14)$$

6. Pérdida de calor por carbón sin quemar en los desperdicios

$$\text{Masa (por unidad de combustible)} * 14100 \text{ BTU/lb} \quad (15)$$

7. Pérdida de calor por combustible sin quemar en los gases de escape

$$\text{Masa (por unidad de combustible)} * \text{Contenido BTU de gases} \quad (16)$$

8. Pérdida de calor por radiaciones y otros

Donde M_{cp} es el calor específico promedio y 1040 es el valor estándar de poder calorífico.

El tercer método es un derivado del segundo método y toma en cuenta solo las principales pérdidas dentro de la caldera. Este método es mucho más práctico que los demás, debido a que requiere menos información. Requiere del porcentaje de oxígeno, las temperaturas de gases de escape y aire de combustión, el tipo de combustible, la capacidad de la caldera y el porcentaje de trabajo sobre el valor nominal de la caldera. Este método se calcula de la siguiente manera:

1. Pérdidas por calor sensible

$$\Delta T_{\text{gases-aire}} * [0.023 + 0.00011 * (\%O_2 + 1)^2] \quad (17)$$

2. Pérdidas por calor latente

Gas natural=9%
Fueloil No. 2=5.5%

Fueloil No. 6=5.0%

3. Pérdidas por radiación

Por medio de la figura 2.14.

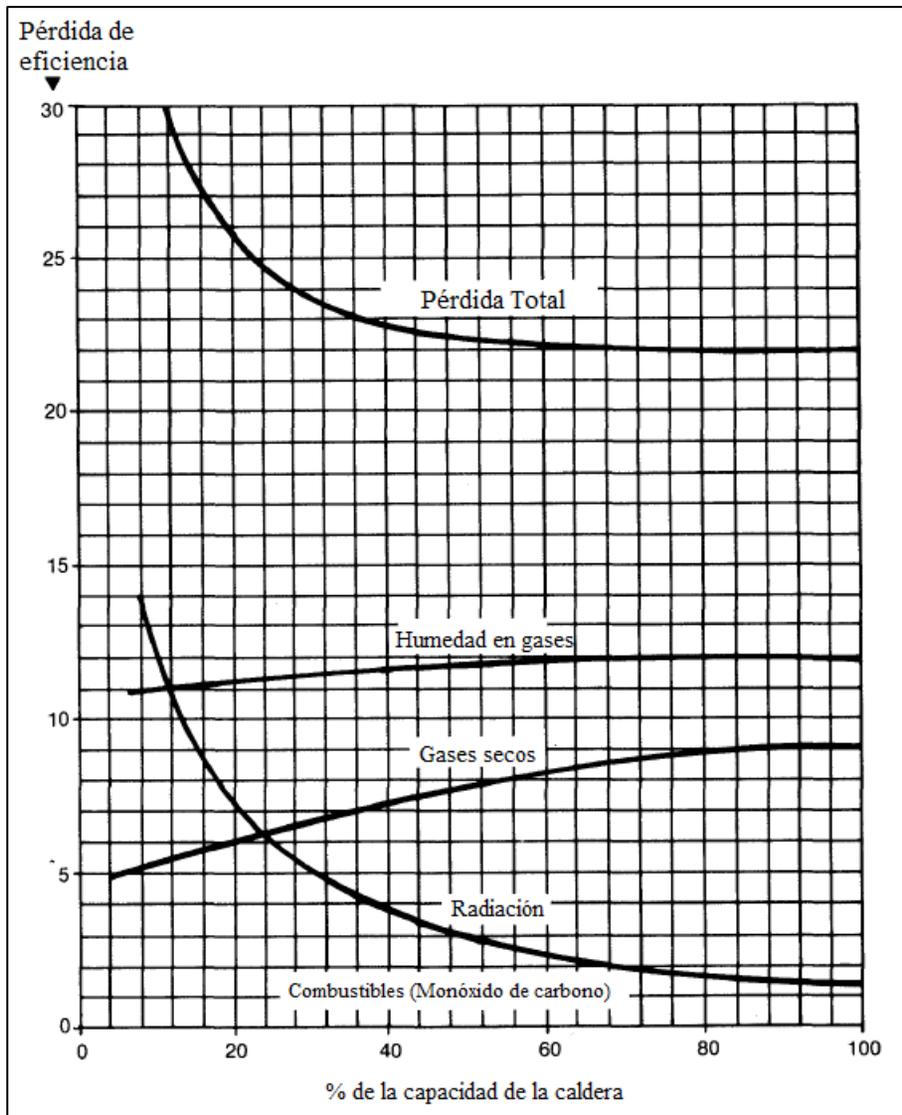


Figura 2. 14. Efecto de la capacidad de la caldera en varias pérdidas de calor [8].

2.2.7 Seguridad en una caldera

Uno de los peligros más grandes en las calderas son las explosiones por mal manejo del combustible. Para evitar esto, se han diseñado lógicas de seguridad y sistemas que controlan el encendido, apagado y operación de la caldera. Una caldera de gas debe contar con el equipo mostrado en la figura 2.15 para evitar las explosiones. Para las calderas de combustible líquido, el equipo es similar. Este sistema consiste en los quemadores, el encendedor, una línea de gas de encendido y una línea de gas principal. La línea de combustible principal está conformada por la válvula de seguridad principal, la cual impide el flujo de gas hacia la caldera; la válvula de control, usada por el sistema de control para regular la cantidad de gas que entra la caldera; la válvula de ventilación en el cabezal de gas, usada para remover el gas sobrante; las válvulas de seguridad de cada quemador y la válvula de ventilación del quemador. La línea de gas de encendido es similar, con la diferencia de que no se usa una válvula de control, debido a que esta línea solo se usa durante el arranque de la caldera.

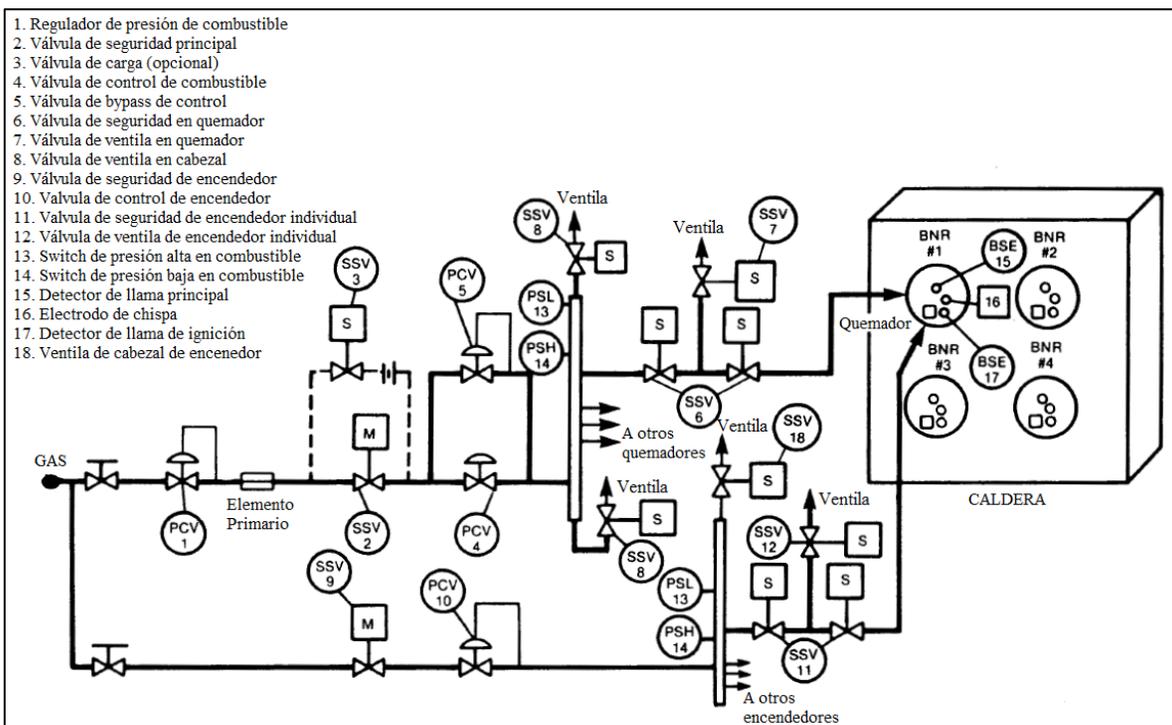


Figura 2. 15. Equipo de seguridad en los quemadores de una caldera [8].

La norma que rige la seguridad de una caldera es dictada por la NFPA (National Fire Protection Association). Según la NFPA [7]:

“La principal causa de las explosiones en el horno es la ignición de combustible acumulado dentro de espacios confinados en el horno o tuberías, ductos y ventiladores asociados a la chimenea.”

“Numerosas situaciones pueden surgir durante la operación del horno de la caldera que pueden producir explosiones. Las más comunes son:

1. Una interrupción del combustible o aire o energía de ignición en los quemadores, suficiente para causar una pérdida momentánea de la llama, seguida por una restauración y una reignición retrasada de la acumulación.
2. Fugas de combustible dentro del horno y la ignición del acumulado por una chispa o cualquier fuente de ignición.
3. Intentos repetidos sin éxito de encender la caldera sin aplicar la purga apropiada, resultando en la acumulación de una mezcla explosiva.
4. La acumulación de una mezcla explosiva de combustible y aire como resultado de la pérdida de la llama o una combustión incompleta en un o más quemadores en la presencia de otros quemadores operando normalmente o durante el encendido de quemadores adicionales.
5. La acumulación de una mezcla explosiva de combustible y aire como resultado de un apagón completo del horno y la ignición del acumulado por una chispa u otra fuente de ignición, como intentar prender los quemadores.”

De acuerdo a Dukelow [5], existen 4 secuencias que deben cumplirse para poder encender los quemadores en una caldera. Estas lógicas actualmente son realizadas por un equipo de control conocido como BMS (Burner Management System), el cual es el encargado de encender y apagar una caldera de manera segura. Las secuencias de encendido de una caldera son:

1. Secuencia de purga: se realiza para asegurar que no exista ningún tipo de combustible dentro del horno. Se aplica cuando la caldera ha estado apagada después de mucho tiempo o cuando el combustible principal se ha disparado. El BMS indica el inicio de la purga con la activación del estado de alto bajo fuego, con lo que se abren los dámpers de aire forzado e inducido para dejar circular cualquier residuo de combustible. El diagrama de la secuencia se puede ver en la figura 2.16.

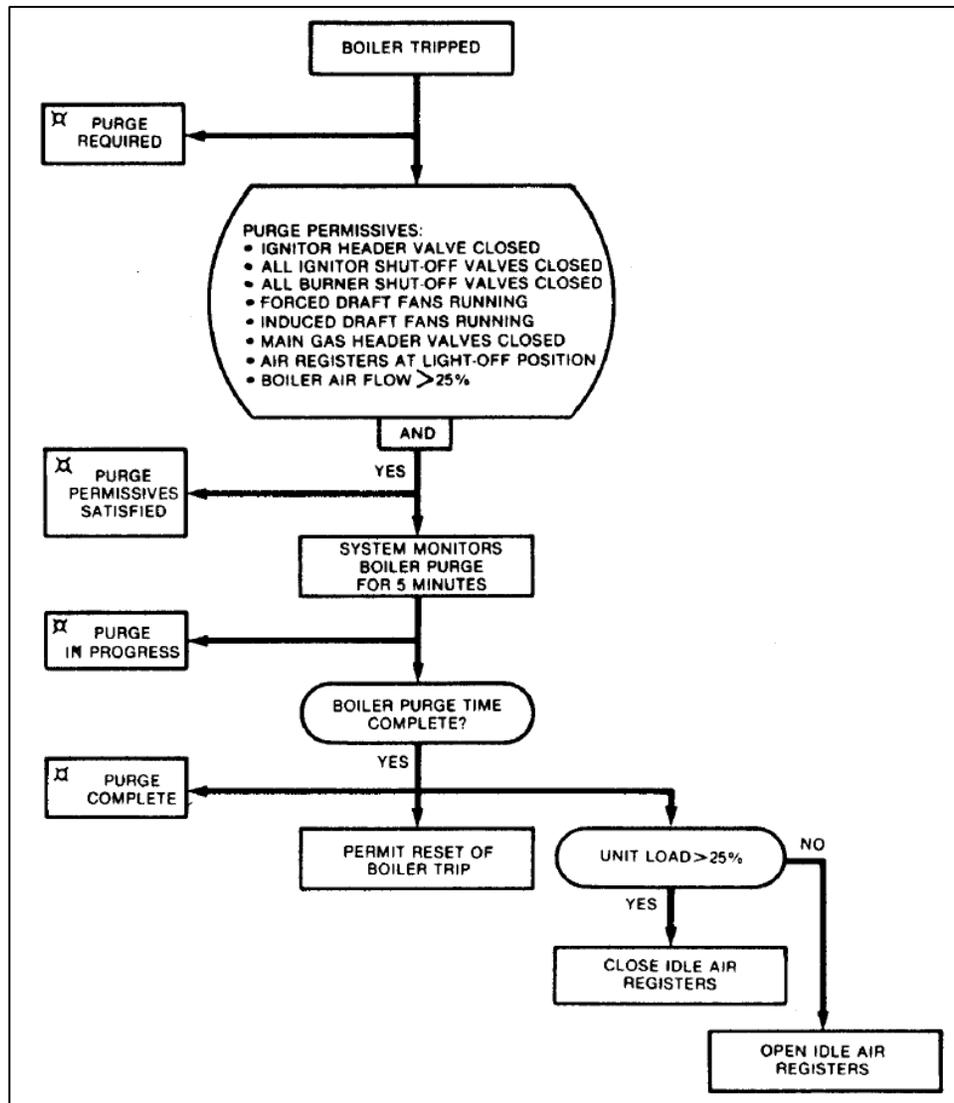


Figura 2. 16. Lógica de seguridad de la purga de combustible [8].

2. Secuencia de revisión del cabezal del encendedor: se usa para asegurar que la presión en el cabezal del encendedor cumple con los límites bajo y alto de presión. Cumplir con esta secuencia garantiza que el gas puede ser distribuido a cada caldera. El diagrama de la secuencia se puede ver en la figura 2.17.

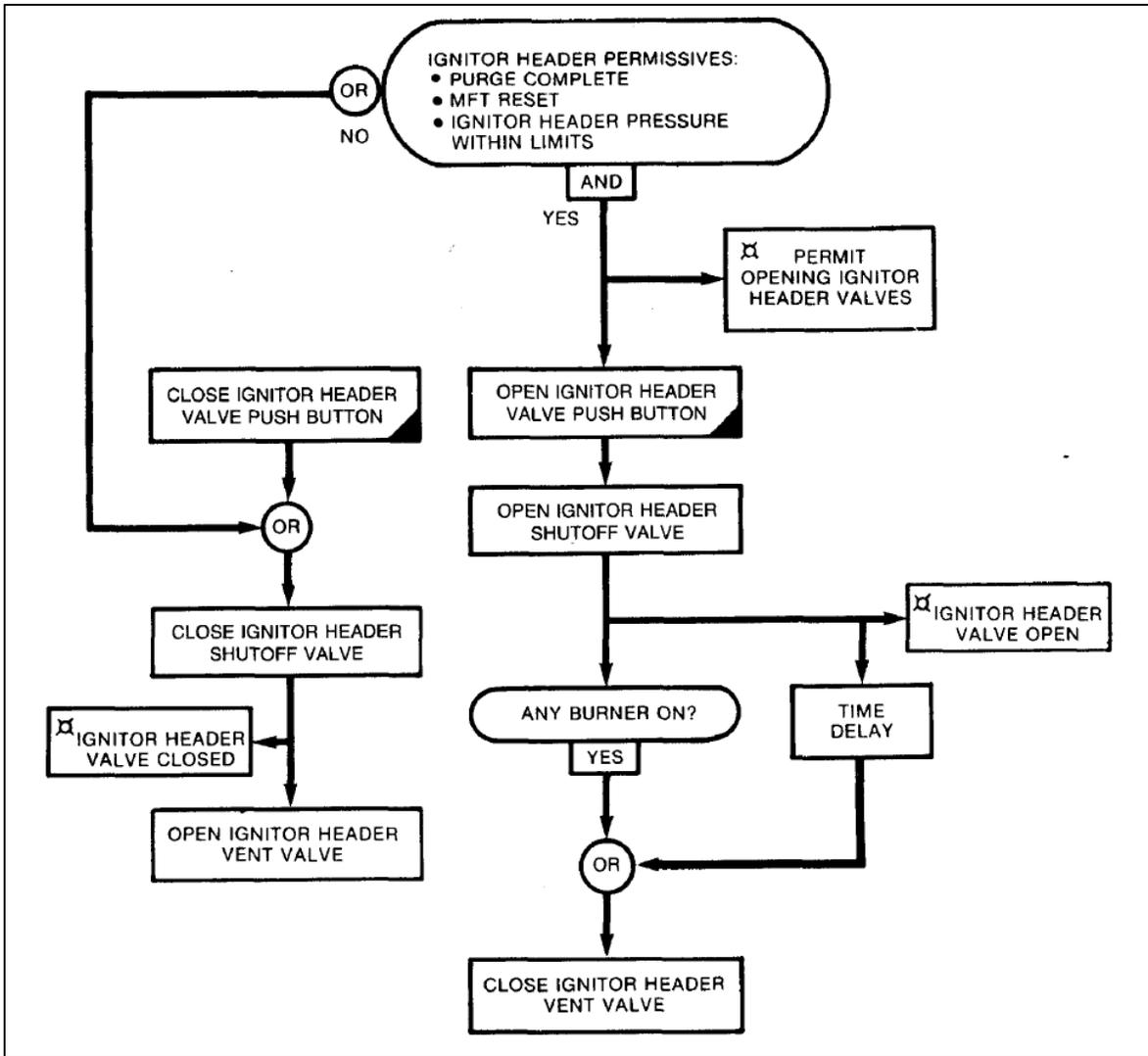


Figura 2. 17. Lógica de seguridad del cabezal del encendedor [8].

3. Secuencia de revisión del cabezal de combustible principal: de manera similar a lógica anterior, se usa para asegurar que la presión en el cabezal de combustible principal se encuentra entre un rango deseado. Garantiza que el combustible puede ser distribuido a todas las calderas. El diagrama se muestra en la figura 2.18.

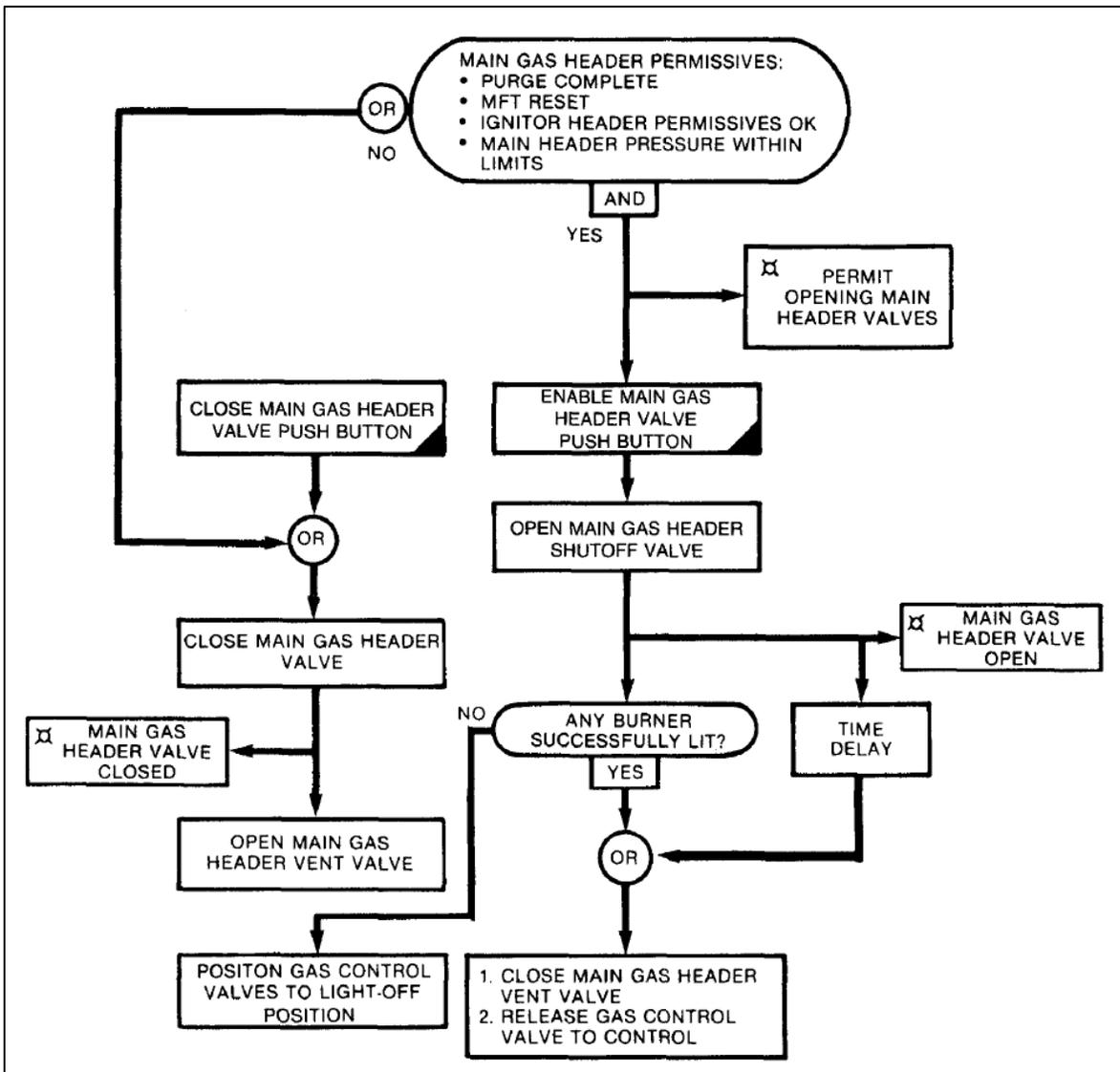


Figura 2. 18. Lógica de seguridad del cabezal de combustible principal [8].

4. Secuencia de encendido de los quemadores de combustible: se usa para asegurar una correcta ignición en los quemadores. Esta se enciende cuando se han cumplido todas las demás y es la que genera la llama. El BMS indica el comienzo de esta lógica por medio del estado de bajo fuego, donde se cierran los dámpers de aire forzado e inducido para poder prender la llama usando el gas de encendido. Una vez que se ha encendido la llama, el BMS libera el control de la caldera a los operadores y equipos de control de operación. El diagrama de la secuencia se muestra en la figura 2.19.

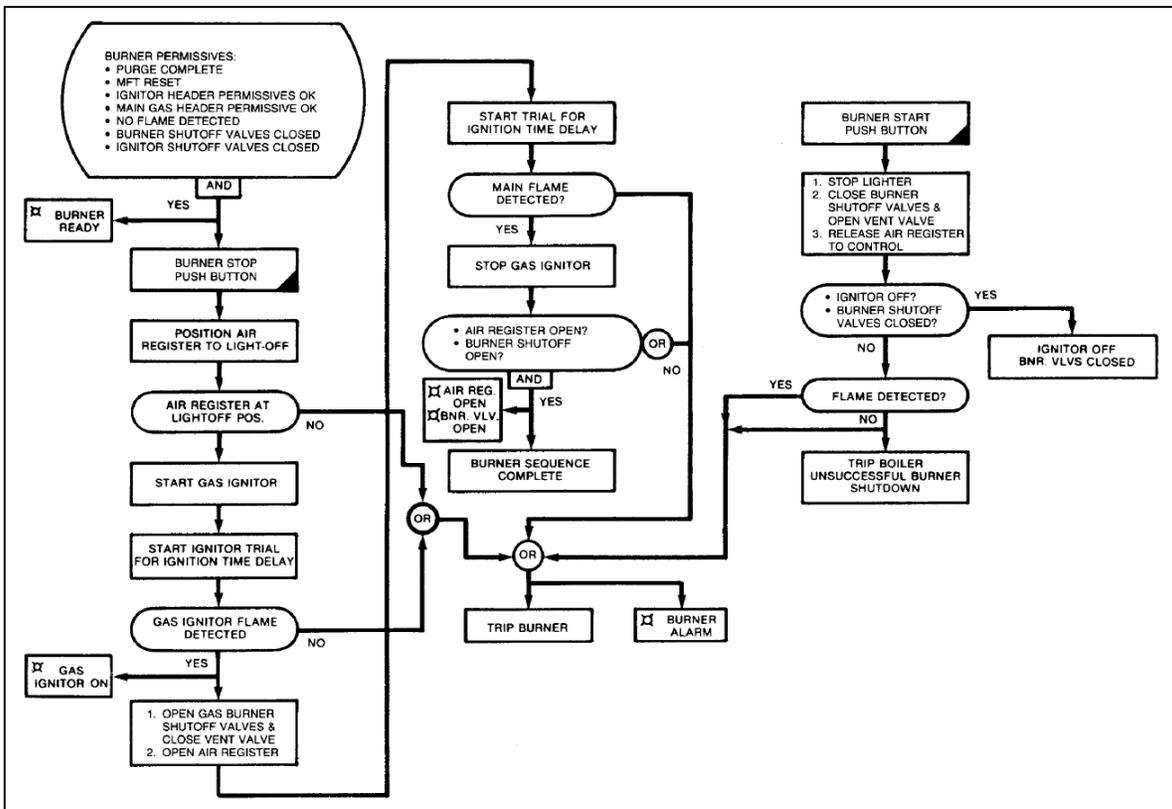


Figura 2. 19. Lógica de seguridad de los quemadores de combustible [8].

5. Secuencia de disparo del combustible principal: esta lógica funciona durante la operación de la caldera, y se encarga de apagarla cuando las condiciones de seguridad no se cumplen. El diagrama de la secuencia se puede ver en la figura 2.20.

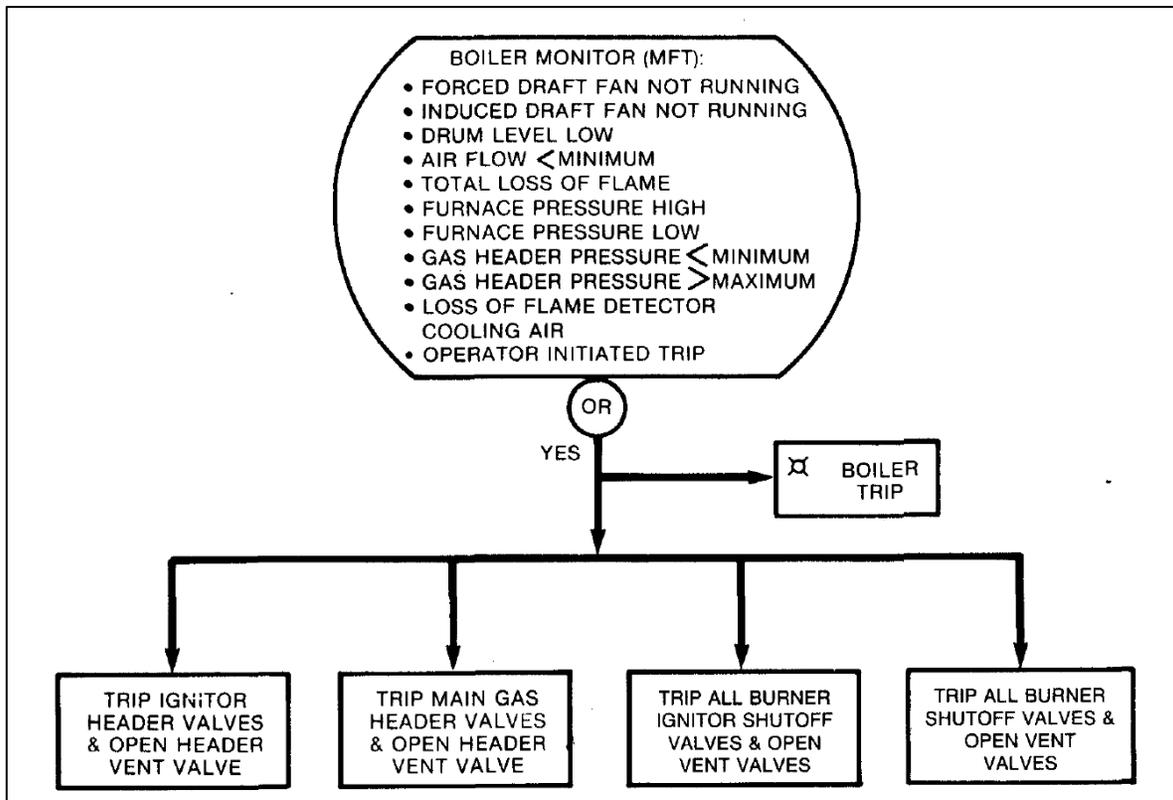


Figura 2. 20. Lógica de seguridad de disparo del combustible principal [8].

2.3 Principales lógicas de control

De acuerdo a J. Gilman [6], la eficiencia de una caldera se puede controlar por medio de 4 principales lazos de control, de aire de horno, de agua de alimentación y de combustible-aire. Existe un cuarto control, el de temperatura de vapor, pero este no determina la eficiencia de una caldera, sino que se usa principalmente para cumplir con condiciones de proceso, por lo que no se tomará en cuenta en este trabajo. Por medio de estos controles, se logra satisfacer la demanda de vapor requerida, operando la caldera dentro de las condiciones de operación especificadas por el fabricante. A continuación, en las siguientes secciones se presentan las principales lógicas usadas para el control de cada proceso.

2.3.1 Control de combustible y aire

Con este control se genera una mayor eficiencia de combustión dentro de la caldera. La combustión dentro de una caldera es controlada con base a la demanda de presión de vapor de la planta, la cual se debe interpretar como un requerimiento de combustible y aire. Dependiendo del equipo con el que cuente la caldera, se pueden incorporar 4 tipos de controles, de acuerdo a J. Gilman [6]. El más sencillo consiste en el control de un eje. Este requiere de un instrumento de medición de presión de vapor, una válvula automática de combustible y un actuador o variador de frecuencia de aire forzado. El diagrama de control de este tipo de lógica se puede ver en la figura 2.21. Por medio de un control PID, se establece una consigna de presión deseada. El PID regula el flujo de combustible y el flujo de aire forzado en relación a una proporción especificada por el operador.

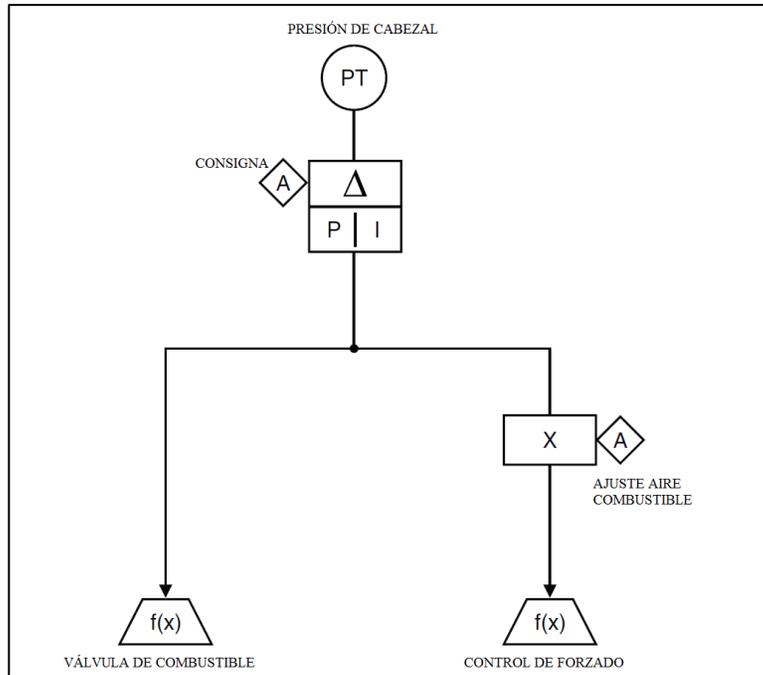


Figura 2. 21. Lógica de control de un eje [9].

El segundo tipo de control es el de ejes paralelos. Este realiza un control de la válvula de combustible y del dämper de aire forzado de acuerdo a la demanda de vapor requerida, y usando controles independientes. La cantidad de aire se ajusta de acuerdo a un desfase en la cantidad de aire que debe determinarse con base a la cantidad de combustible. Este ajuste no es muy efectivo, ya que no hay una retroalimentación acerca de que tan buena es la mezcla entre aire y combustible. Este control requiere de un medidor de flujo de combustible y de aire, adicional al equipo necesario para el control por un eje. Un diagrama de este control se muestra en la figura 2.22.

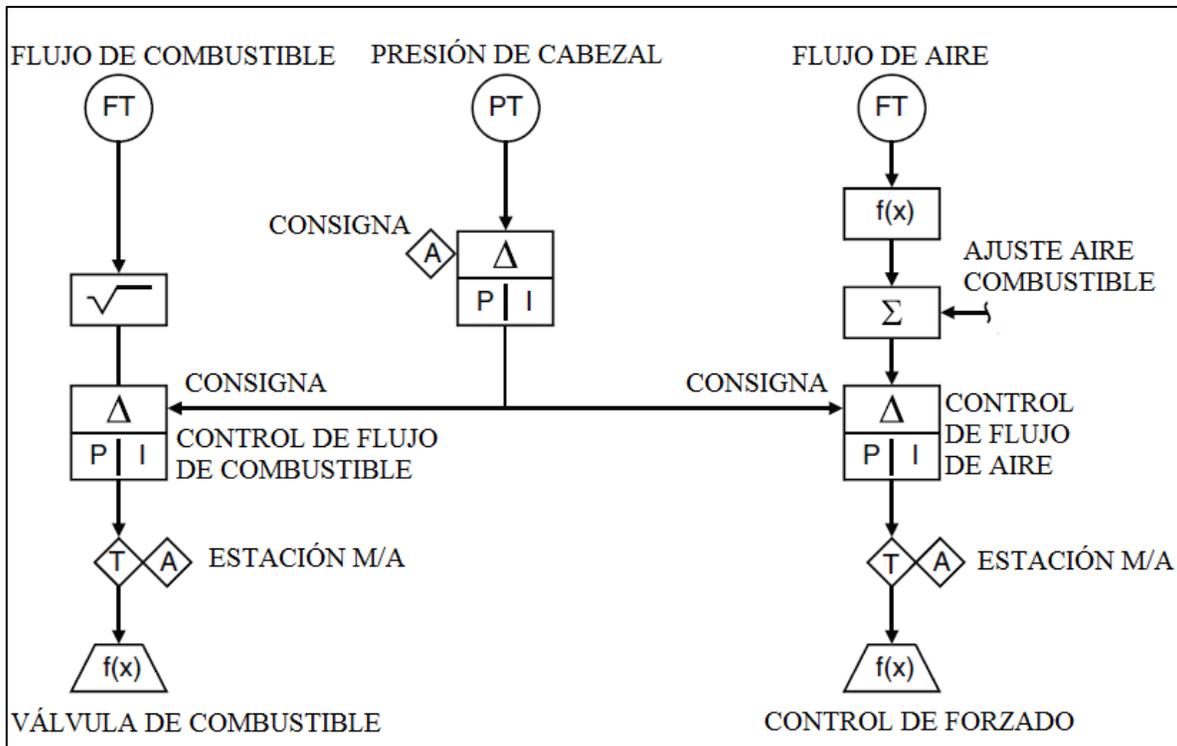


Figura 2. 22. Lógica de control de ejes paralelos [9].

El tercer tipo de control es el de dos actuadores con ajuste de oxígeno. En este se regula la válvula de combustible de acuerdo a la demanda de vapor, y el dámper de aire forzado con base a la cantidad de combustible. El flujo de combustible se puede determinar indirectamente a partir de la apertura de la válvula. Por lo tanto, de acuerdo a la apertura de la válvula, se puede determinar el exceso de aire necesario. Este control es muy eficaz debido a la retroalimentación por oxígeno, y requiere de un medidor de oxígeno en los gases de combustión de la chimenea, adicional al equipo del control por un eje. El diagrama de control de dos actuadores con ajuste de oxígeno se muestra en la figura 2.23.

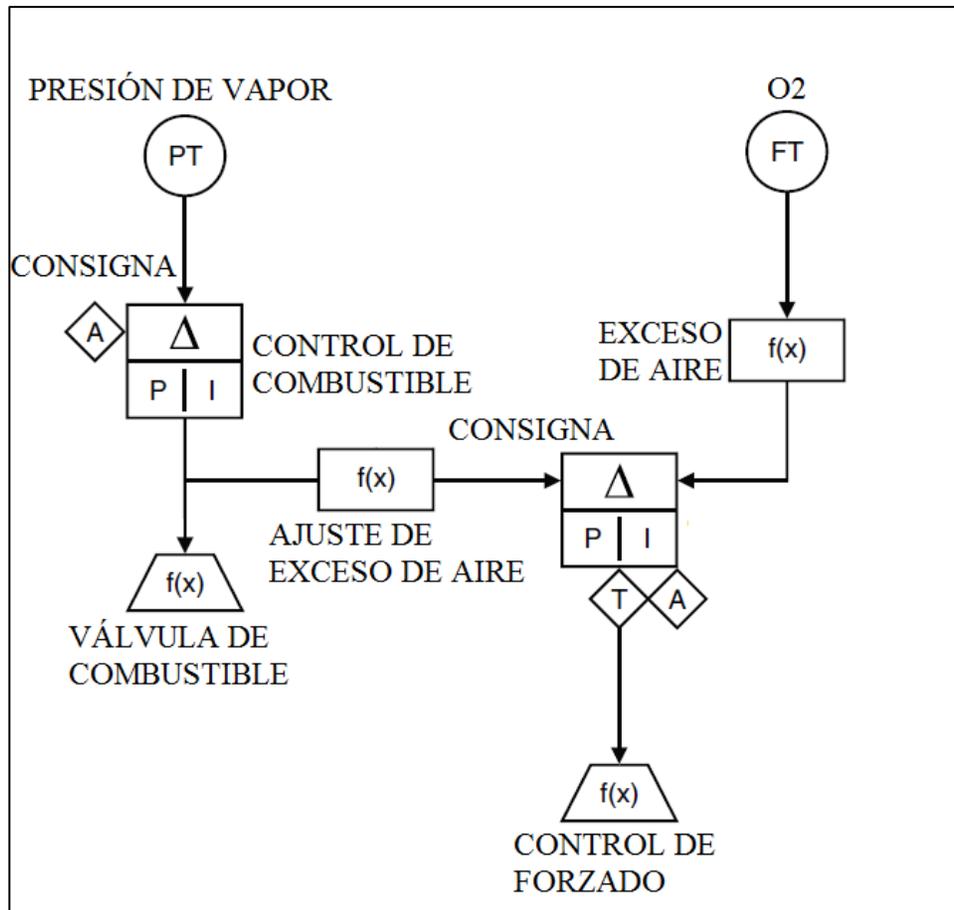


Figura 2. 23. Lógica de control de dos actuadores con ajuste de oxígeno [9].

El control más completo es el de límites cruzados. Este se basa en la relación de que el flujo de aire nunca debe ser menor al flujo de combustible. Además, tiene un ajuste por oxígeno que ayuda a realizar el cálculo de exceso de aire necesario para la combustión. Este control es el mejor de los tres, pero su desventaja es que el costo es mayor a todos los demás. Necesita de un medidor de flujo de combustible, un medidor de flujo de aire y un medidor de oxígeno, adicionales a los del control de un eje. La lógica de control para límites cruzados se puede ver en la figura 2.24.

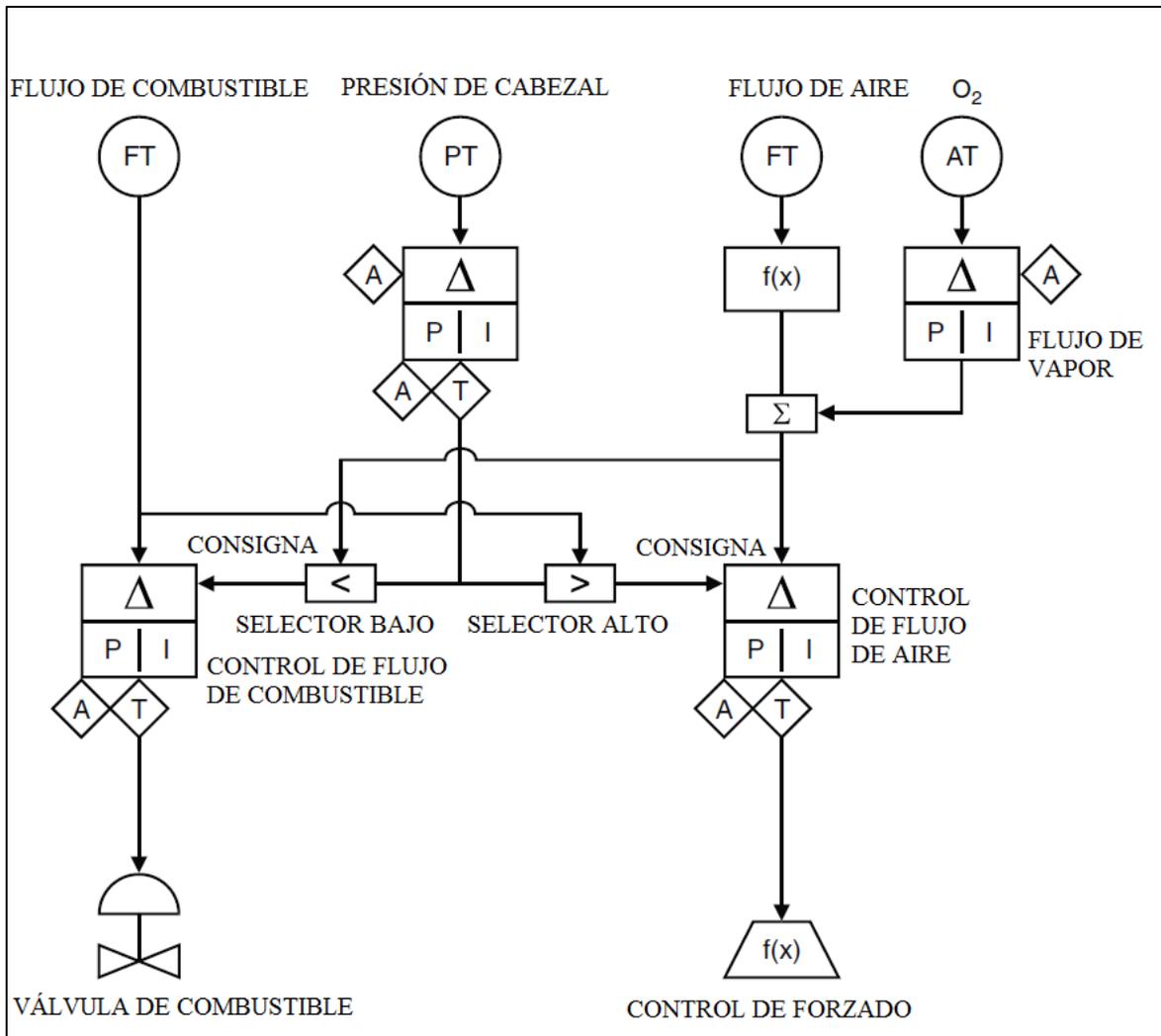


Figura 2. 24. Lógica de control de límites cruzados [9].

2.3.2 Control de nivel de agua

El control de nivel de agua dentro del domo ayuda a mantener una producción de vapor constante, además de ser un requisito de operación de la caldera. Un nivel muy alto genera humedades altas en el vapor producido, mientras que un nivel muy bajo sobrecalienta el equipo de la caldera y puede generar daños con considerables pérdidas por reparación. Los fabricantes de calderas siempre especifican un valor de nivel óptimo para trabajar, fuera de este rango se producen daños en la caldera. De acuerdo a Gilman [6], este control se puede realizar a uno, dos o tres elementos.

El control por un elemento consiste en el control de la válvula de agua de acuerdo al nivel de domo. Este es un control simple, de bajo costo, que funciona cuando la demanda de vapor es baja y relativamente constante. A este tipo de control se le debe agregar una compensación por los errores de medición que producen la hinchazón y el encogimiento. Según Gilman [6] esto se realiza por medio de la medición de la presión del domo, la cual cambia el valor del nivel de acuerdo a un multiplicador cercano a 1, que debe determinarse para cada caldera. En la figura 2.25 se muestra la lógica de control de un elemento.

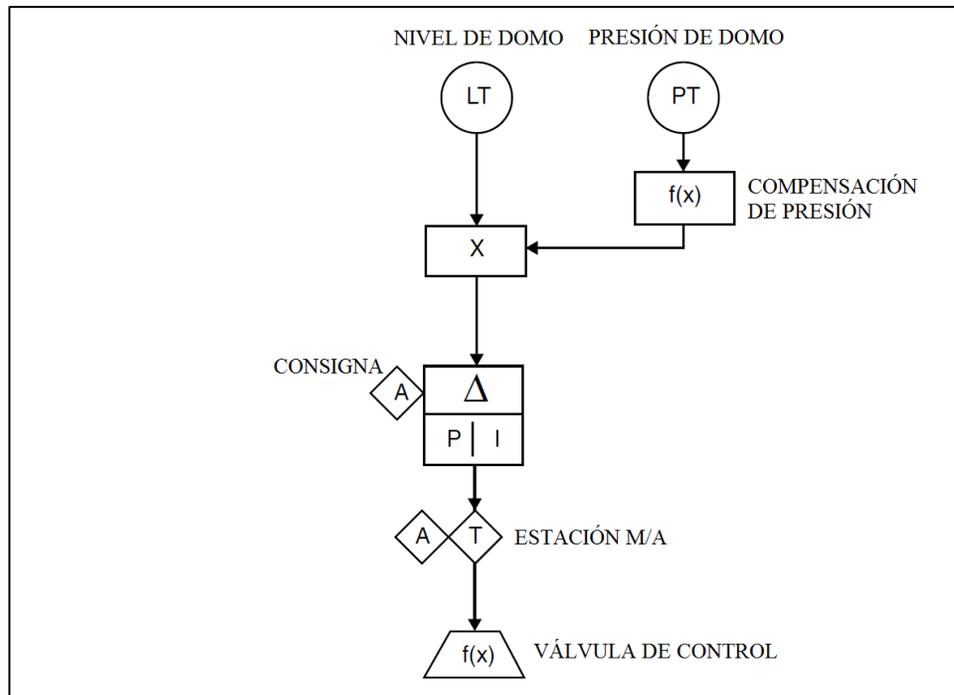


Figura 2. 25. Lógica de control por un elemento [9].

Cuando se tiene una demanda cambiante, es necesario añadir otro elemento, el flujo másico de vapor que sale de la caldera. Por medio del control de dos elementos, se obtiene un mejor control, que reacciona con base al flujo de vapor producido. Este control es más eficiente y tiene una mejor respuesta ante cambios bruscos en la demanda de vapor. El flujo de vapor debe convertirse a flujo másico, en el caso de tener un medidor de diferencial de presión. El flujo másico es escalado en un rango de 0 a 100, que luego es sumado a la apertura de la válvula determinada por el control de nivel de un elemento. La lógica de control de dos elementos se puede ver en la figura 2.26.

Según Acedo [1], la compensación de flujo másico de vapor se puede calcular con base a la siguiente ecuación:

$$Q_M = F_C * K * \sqrt{\Delta P} \quad (18)$$

$$F_C = \sqrt{\frac{(P_{operación} + 1) * (T_{diseño} + 273)}{(T_{operación} + 273) * (P_{diseño})}} \quad (19)$$

Las ecuaciones 18 y 19 se realizan bajo un flujo de diseño, a una temperatura de diseño y a una presión de diseño. El vapor debe operar cerca de esa zona para garantizar un error pequeño en la ecuación. El factor K corresponde al flujo de diseño dividido entre 10. La diferencia de presión ΔP es un porcentaje de medición de acuerdo a los rangos del medidor.

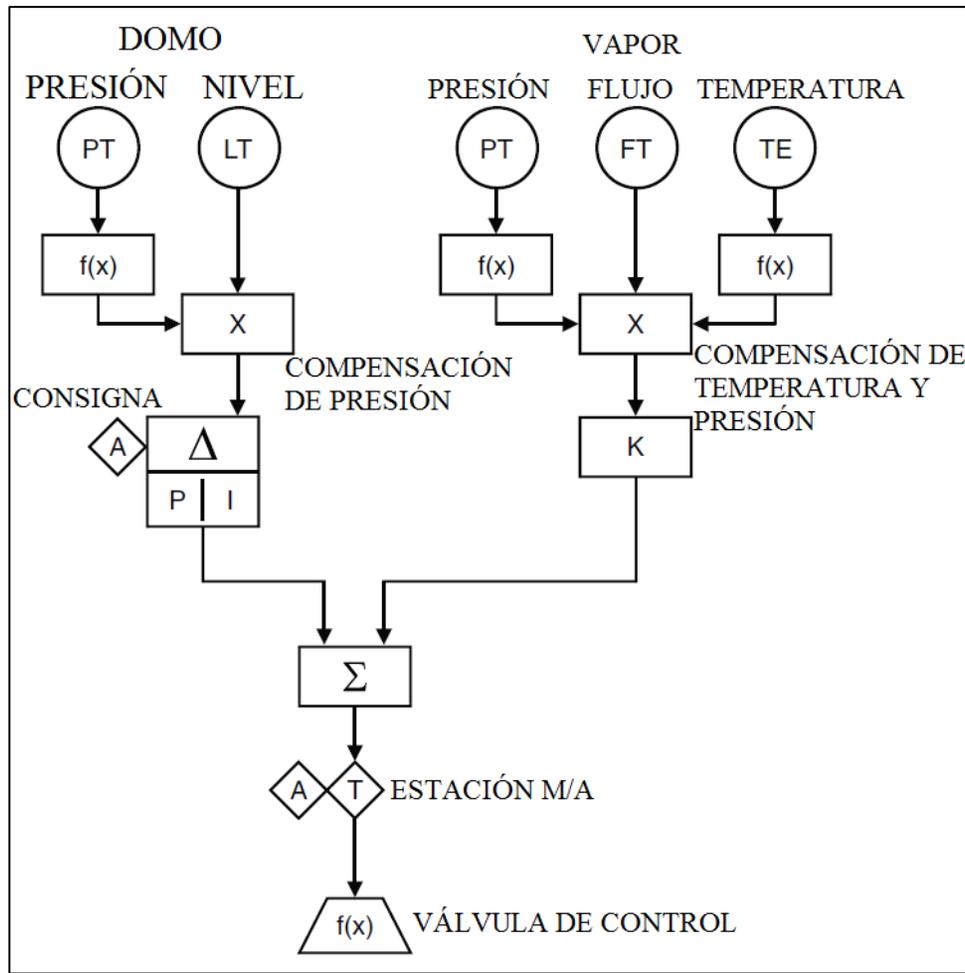


Figura 2. 26. Lógica de control de dos elementos [9].

El control de tres elementos añade el flujo másico de agua como una tercera variable de medición, de manera que se consigue un mejor balance de masas dentro del domo. Estos últimos controles son más costosos, debido a que deben instalarse sensores de temperatura y presión para convertir el flujo de agua o vapor en flujo de másico, pero son mucho más eficaces, especialmente para calderas de alta presión. En este tipo de control, la lógica de dos elementos no controla la válvula, sino que determina el valor de flujo de agua que se debe conseguir para mantener el nivel. Un control PI de flujo de agua controla la válvula de apertura de acuerdo a la cantidad de agua requerida y la medición del flujo de agua. En la figura 2.27 se muestra la lógica de control de tres elementos. De acuerdo a Acedo [1], la compensación por temperatura en el flujo de agua se puede calcular con las siguientes ecuaciones:

$$Q_M = F_C * K * \sqrt{\Delta P} \quad (20)$$

$$F_C = \sqrt{\frac{\rho_{operación}}{\rho_{diseño}}} \quad (21)$$

$$\rho_{operación} = 1000 * \left(1 - \left[\frac{T_{operación} + 288.9414}{508929 * (T_{operación} + 68.129630)} \right] * (T_{operación} - 3.9863)^2 \right) \quad (22)$$

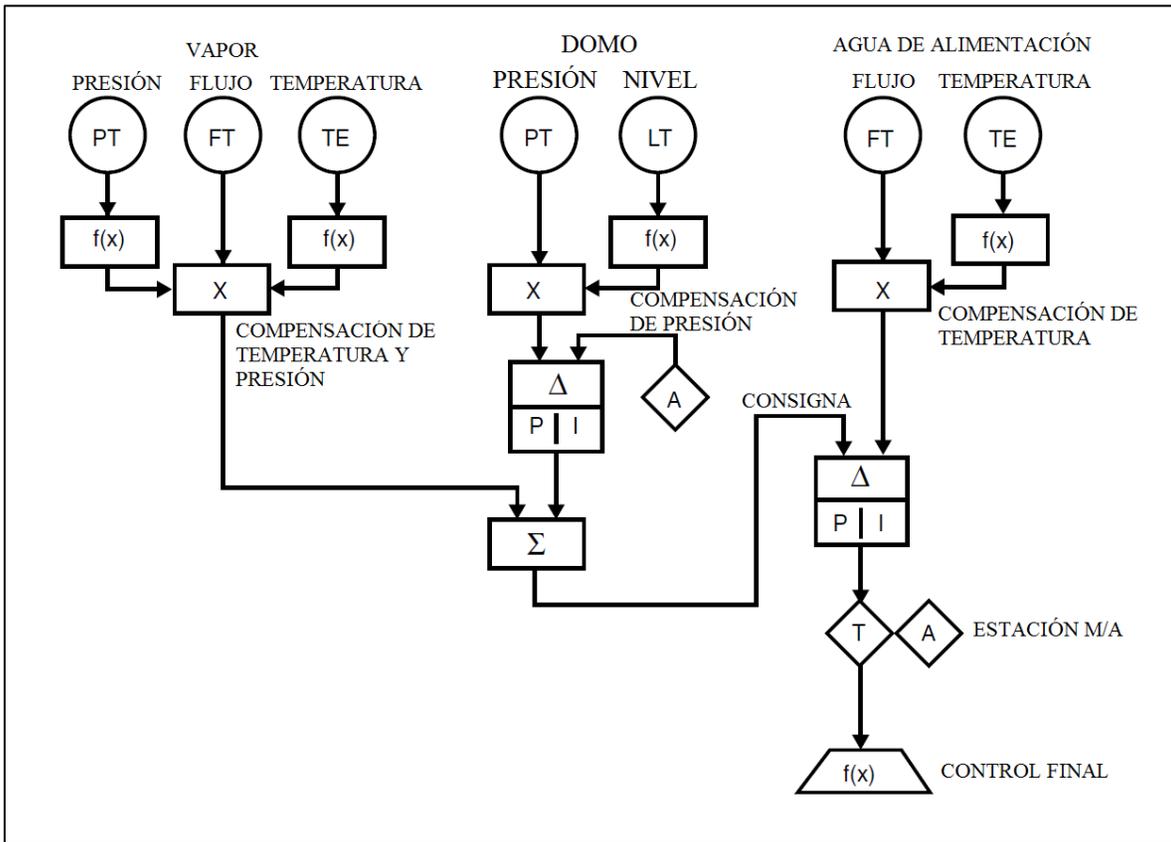


Figura 2. 27. Lógica de control de tres elementos [9].

2.3.3 Control de presión de horno

La presión de la caldera es muy importante para mantener una alta eficiencia y para la seguridad de los operadores en calderas de corriente balanceadas. Se debe mantener un valor negativo, comúnmente de -0.5 inWC, de acuerdo a J. Gilman [6]. Un valor positivo muy alto puede producir el escape de aire caliente, lo cual genera pérdidas de calor en la caldera. Aún más importante, estos escapes de aire caliente pueden venir acompañados de llamas y al ser completamente impredecibles, son peligrosos para los operarios de la caldera y para las instalaciones de la misma.

El control de la presión de la caldera se puede realizar principalmente con los ventiladores de aire forzado e inducido. El ventilador de aire forzado inyecta aire dentro del horno de la caldera, por lo que aumenta la presión, mientras que el ventilador de aire inducido saca los gases de escape, disminuyendo la presión. Aunque se puede realizar el control con ambos, J. Gilman [6] recomienda solo usar el ventilador de aire inducido, ya que el de aire forzado se usa principalmente para el control de la combustión. En la figura 2.28 se muestra la lógica de control de presión de horno.

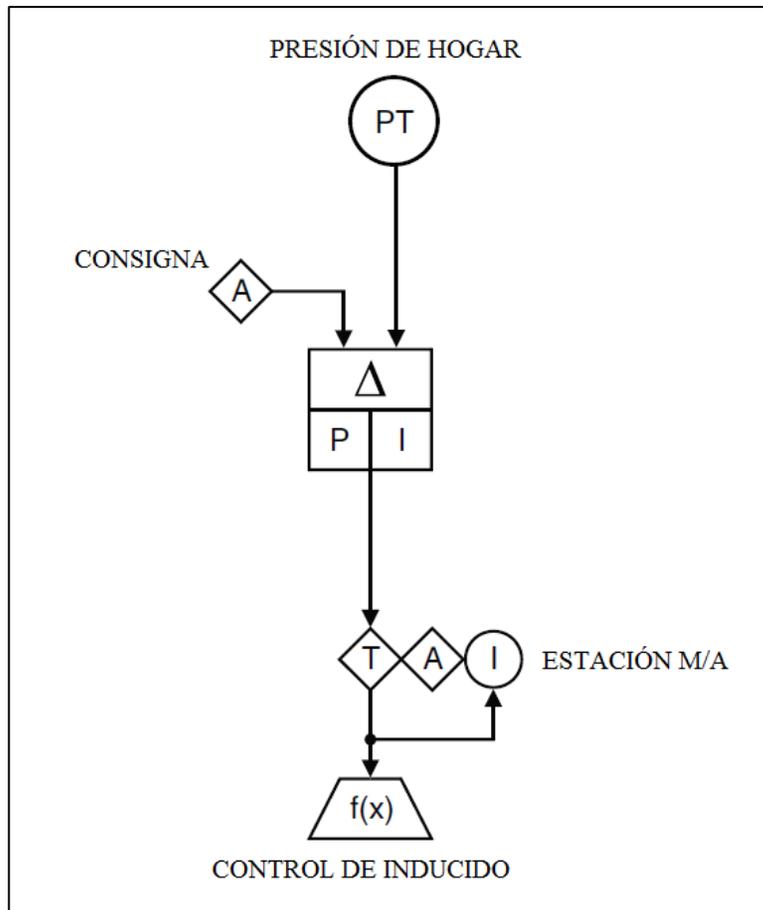


Figura 2. 28. Lógica de control de la presión de horno [9].

2.4 Equipo de control

El control de una caldera se puede dividir en dos tipos, el control maestro de los quemadores comúnmente llamado BMS (Burner Management System), y el control de operación de la caldera. El BMS es el que se encarga de realizar el encendido y apagado de una caldera, junto con el monitoreo de seguridad. Tiene a cargo las secuencias de seguridad descritas anteriormente y está por encima del control de operación. El control de operación es el que se encarga de controlar la eficiencia y las condiciones de operación de la caldera. En este documento, se exploran dos tipos de marcas comerciales, MicroMod y Cleaver Brooks, principalmente porque son las más usadas en el país. En las siguientes secciones se detallan las características de estos equipos.

2.3.4 MicroMod

El equipo de MicroMod cuenta con tres productos diseñados para el control de una caldera, el TrimPak y el MeterPak para el proceso de combustión, y el DrumPak para el nivel de agua. La principal diferencia entre el TrimPak y el MeterPak es que el primero se usa para calderas con varillaje, mientras que el MeterPak se usa para calderas de control paralelo. Las calderas con varillaje son calderas que tienen el equipo del quemador acoplado a un solo servomotor, el cual recibe la señal del sistema de control. En la figura 2.29 se muestra una imagen de una

caldera con varillaje, el cual consiste de un eje que tiene acoplado dos varillas que deben controlar la apertura de la válvula de combustible y la corriente de aire forzado. Este tipo de sistemas requieren un mayor mantenimiento, ya que debe revisarse con frecuencia el correcto ajuste de todo el varillaje.



Figura 2. 29. Sistema de varillaje de una caldera. (Tomado de <https://www.youtube.com/watch?v=Md6irOOEB2k>)

El dispositivo TrimPak es capaz de generar esta señal de acuerdo a la presión de vapor en la planta. Cuenta con un ajuste de oxígeno en la señal de control y el cálculo en línea de la eficiencia de la caldera. Se puede configurar para controlar el variador de frecuencia del ventilador de aire forzado, así como el dámper de los gases de combustión. Cuenta con alarmas y salidas de disparo por condiciones de oxígeno, temperatura, y desviación en los actuadores. Se comunica con el BMS por medio de las entradas de bajo fuego, purga y modulación. Toda la configuración se realiza por una pantalla monocromática con botones. La memoria usada es del tipo no volátil, la cual permite guardar toda la configuración cuando pierde la energía. Existe una versión mejorada llamada TrimPak Plus, la cual incluye una interfaz táctil a color y se puede usar para controlar hasta 2 calderas. En la figura 2.30 se muestra una imagen del TrimPak.

El control de nivel DrumPak cuenta con lógicas de control de uno, dos y tres elementos, y es capaz de controlar la presión del horno. Su apariencia, características de hardware y configuración son similares al controlador TrimPak. Incluye un totalizador de combustible y monitoreo del economizador.

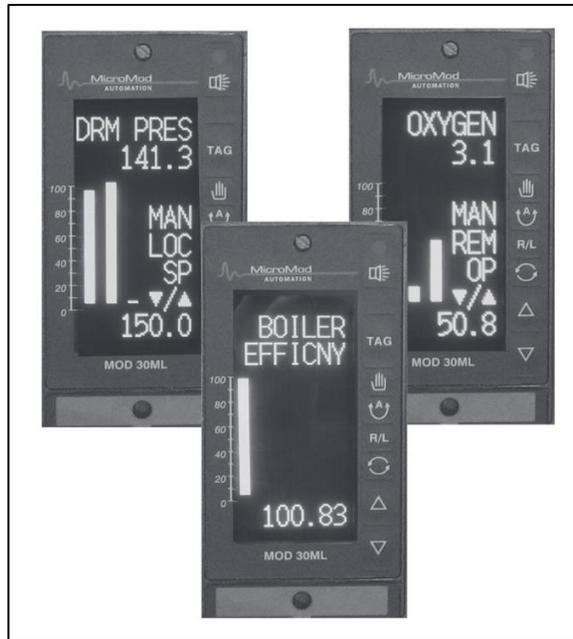


Figura 2. 30. Imágenes del controlador TrimPak [12].

El controlador MeterPak es similar al TrimPak pero permite un control más completo por medio de límites cruzados. Cuenta con entradas de retroalimentación de flujo de combustible o de la válvula, retroalimentación del flujo de aire, del dámper o del variador de frecuencia y temperatura de aire. Se usa principalmente para calderas sin varillaje, para lo cual usa una señal de control para cada equipo. Cuenta con una interfaz táctil a color. En la figura 2.31 se muestran imágenes del controlador MeterPak.

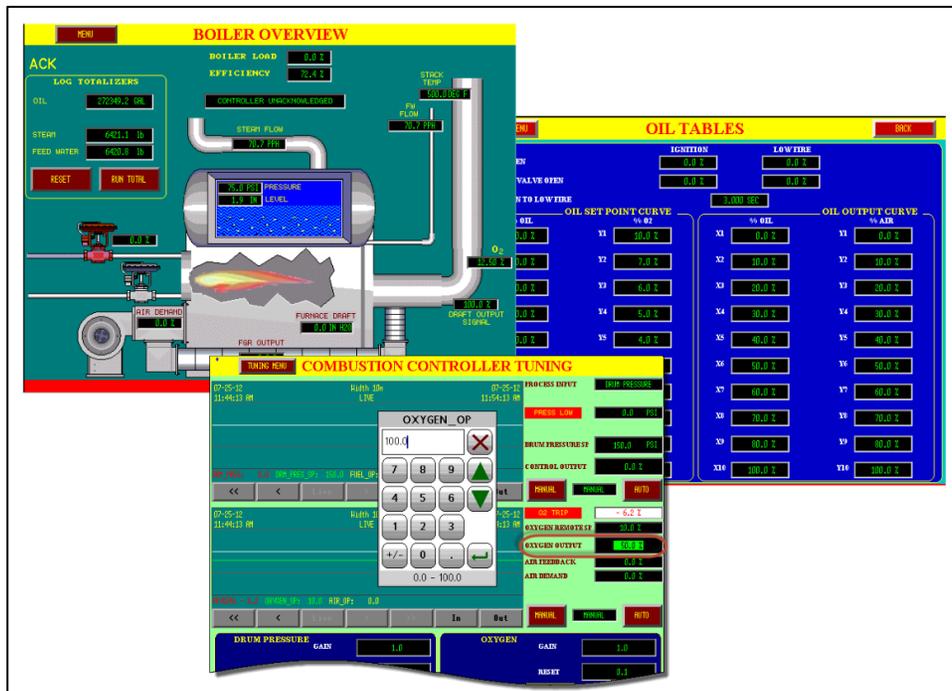


Figura 2. 31. Interfaz de usuario del controlador MeterPak [13].

La empresa NV Tecnologías distribuye los controles de MicroMod, los cuales tienen un precio de \$5000 para el TrimPak y \$3200 para el DrumPak.

2.3.4 Cleaver Brooks

La línea de controles de Cleaver Brooks se llama Hawk, y se divide en los controles 1000, 4000 y 5000. Las líneas 4000, 5000 y 6000, a diferencia de MicroMod, son controles completos de una caldera. Incluyen control de combustión para calderas con o sin varillaje. También incluyen control de nivel de agua, control de presión de horno, monitoreo completo de la caldera, y un BMS marca Honeywell. En la tabla 2.3, se presentan las características principales de los controles Cleaver Brooks.

Tabla 2. 3. Características de la línea de equipos Hawk de Cleaver Brooks [6].

Característica	Hawk 1000	Hawk 4000	Hawk 5000
Pantalla táctil	4" o 6"	7" o 10"	10"
BMS	Honeywell o Fireye	Honeywell o Fireye	Honeywell o Fireye
Ajuste de oxígeno	Si	Si	Si
Control de combustión paralelo	Si	Si	Si
Control de varillaje	Si	Si	Si
Control de variadores de frecuencia	Si	Si	Si
Control de presión de horno	No	Si	Si
Control de nivel de agua a uno, dos o tres elementos	No	Si	Si
Eficiencia en tiempo real	Si	Si	No
Monitoreo completo	No	Si	Si
Monitoreo del economizador	No	Si	Si

Este tipo de controles es mucho más caro que los de MicroMod, ya que cuentan con más características en un solo controlador.

Los conceptos descritos en este capítulo son importantes para la determinación de un sistema de control de calderas. Con base a esta teoría se determinó el método de la simulación, basándose principalmente en el balance de masas y de energía. También, se determinó que el control de combustión debe considerar la cantidad de oxígeno presente para garantizar una buena combustión, mientras que los de nivel de agua y presión de horno se basan en mantener un balance de la masa en el domo y en el horno.

Se estudiaron los procedimientos de seguridad de una caldera, bajo los cuales debe operar el sistema de control de operación. En una caldera, el sistema BMS está por encima del sistema de control, de manera que el sistema de control opera siempre y cuando el BMS lo permita. El estudio de los equipos de control usados comúnmente en la industria permite tener una idea de cuáles son las características que se deben lograr en el sistema a diseñar para ser competente en el mercado.

Estos sistemas son distribuidos en Costa Rica por la empresa Sisten S.A. y tienen un valor que ronda entre \$36000 y \$40000 para un sistema de una caldera sin varillaje y de \$20000 para una caldera con varillaje.

Capítulo 3

Sistema de control de caldera

En este capítulo se detalla cual fue la solución realizada para el sistema de control. Primero, se explicarán cuáles fueron las lógicas de control seleccionadas. Esta sección se divide en tres partes, el control de combustión, el control de nivel de agua y el control de presión de horno. En cada una de estas partes se detalla cuáles son los requerimientos por parte del equipo y del sistema para poder ser implementados.

La siguiente sección aborda el procedimiento de selección del equipo, donde se determina cuáles son los equipos necesarios para la medición de cada una de las variables. Luego, se hace una breve explicación acerca del proceso de selección para la instrumentación, el controlador e interfaz y gabinete de control. Las últimas secciones explican la manera en que fue implementado el sistema en el controlador y la interfaz.

3.1 Lógicas de control

3.1.1 Control de combustión

Para el control de combustión existen cuatro posibles lógicas capaces de controlar el proceso. Según la teoría presentada en la sección 2.2.4, lograr una buena combustión depende de lograr una buena mezcla de aire y combustible. La cantidad de aire por combustible se puede medir a través de un analizador de oxígeno en los gases de combustión, por lo tanto, la lógica que se debe implementar debe incluir este ajuste.

De las cuatro lógicas presentadas en la sección 2.3.1, se implementaron solo dos, el control por un eje y el control con dos actuadores con ajuste de oxígeno. El principio de implementación de estas lógicas se usa principalmente en calderas muy grandes, donde el cálculo del exceso de aire se vuelve más impreciso, por lo que la implementación de la lógica de dos actuadores con ajuste de oxígeno se vuelve ineficiente.

La primera lógica de control y la más simple es la de un eje. Esta lógica de control se llama así porque el control de la válvula de combustible y el de dámper de aire forzado se realiza con un mismo control PID. Este tipo de control se usa cuando no hay medición de oxígeno en los gases de la chimenea. La ventaja principal de esta lógica es la poca cantidad de equipos necesarios para realizar el control. Se necesita de un medidor de presión manométrica de vapor, una válvula modulable de combustible y un dámper en el ducto de aire forzado o variador de frecuencia del ventilador. Su desventaja es la poca precisión que tiene en calcular la cantidad de aire requerido en relación a la cantidad de combustible.

El segundo tipo de control es el de dos actuadores con ajuste de oxígeno. La apertura de la válvula de combustible se controla de acuerdo a la demanda de vapor, mientras que el equipo de control del dámper de aire forzado depende de la cantidad de exceso de aire presente. El exceso de aire se calcula por la medición de oxígeno en los gases de escape, y la cantidad de exceso de aire requerido debe ser determinada de acuerdo a pruebas durante la puesta en marcha. La principal ventaja de este tipo de control es un ahorro mayor en la cantidad de combustible utilizado, ya que el ajuste de oxígeno permite una mejor combustión. También se disminuyen la cantidad de emisiones en los gases de combustión. Se necesita un analizador de oxígeno adicional a los equipos de un eje.

La lógica implementada se muestra en la figura 3.1. En esta lógica, se usa la señal de selección de control para escoger entre controlar el aire forzado por medio la lógica de un eje o por dos actuadores con ajuste de oxígeno. También es posible seleccionar entre la consigna remota o local del control de exceso de aire. Cada uno de los equipos de control cuenta con una estación manual-automático que, al ser activada en automático, permite el seguimiento de la salida por parte del valor manual. Cada uno de los valores automáticos pueden ser controlados por medio de un bias a la señal automática del control respectivo.

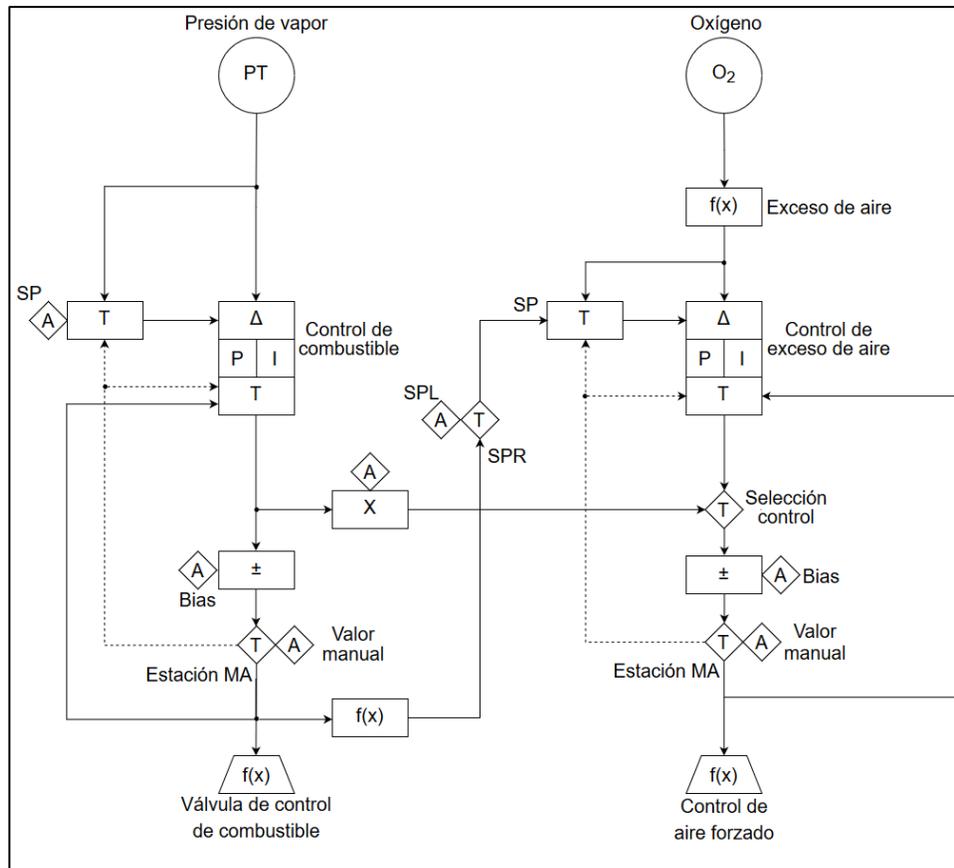


Figura 3. 1. Lógica de control implementada para la combustión.

3.1.2 Control de nivel de agua

El control de nivel de agua se puede realizar de acuerdo a 3 lógicas diferentes. La selección de cada una de estas lógicas depende de que tan cambiante es la demanda de vapor. El control por un elemento tiene un PID que se ajusta dependiendo del nivel de agua actual. Es recomendable que el nivel de agua sea compensado por la presión de domo. No usar este tipo de compensación puede causar cambios bruscos en el nivel de agua que desestabilizan el control. Para la implementación de este control es necesario usar un medidor de nivel de agua, comúnmente es un medidor de presión diferencial entre el fondo y el tope del domo, y una válvula modulable de alimentación de agua. Para la compensación de vapor, es necesario un medidor de presión manométrica en el domo.

Cuando la carga de vapor cambia con regularidad, es necesario anticipar estos cambios por medio de una compensación por flujo de vapor. Este se realiza por el control de dos elementos y se ajusta mejor a aplicaciones donde el consumo de vapor no es continuo. Se necesita un medidor de flujo másico de vapor. De acuerdo a la teoría descrita en la sección 2.3.2, es posible calcular el flujo másico de vapor con un medidor por diferencial de presión. Sin embargo, esta compensación no fue implementada debido a que la validez de estas ecuaciones debe verificarse.

3.1.3 Control de presión de horno

La presión del horno depende de la cantidad de aire que se inyecta a la caldera y de la cantidad de los gases que salen por la chimenea. Como se mencionó en la sección 2.3.3, este control se puede realizar por medio de la corriente de aire forzado y/o la corriente de aire inducido, debido a que el aire forzado es controlado por el sistema de combustión, el aire inducido es más usado para regular la presión de horno. El control implementado es un control simple, se mide la presión de hogar, se compara con la consigna deseada y se determina un valor de control del equipo del aire inducido con base a un PID. En la figura 3.3 se muestra la lógica implementada para este lazo de control.

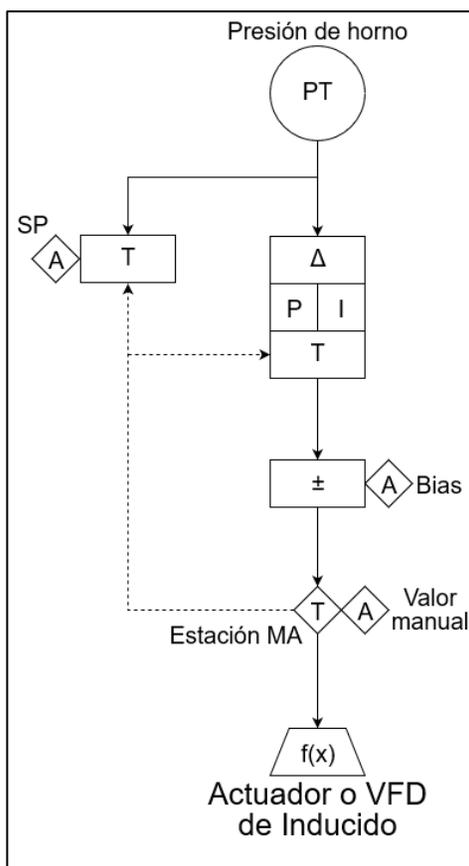


Figura 3. 3. Lógica de control implementada para la presión de horno.

3.1.4 Lógicas de monitoreo adicionales

Como se mencionó en la sección 2.2.7, la seguridad de una caldera es un aspecto fundamental en su operación. Los equipos de seguridad por enclavamiento instalados junto con el sistema BMS son suficientes para lograr una operación segura, sin embargo, es importante contar con diagnósticos de la caldera que ayuden a solucionar eventuales problemas. En este sistema de control, se han añadido lógicas de monitoreo de acuerdo a las mediciones analógicas en la caldera y un sistema de diagnóstico con base a las secuencias de seguridad del BMS.

Para el monitoreo de las variables de medición se agregaron alarmas por limites bajos, altos, muy bajo, muy altos y por desviación. Estas variables indican una condición peligrosa dentro de la caldera e incluso pueden indicar el disparo de la caldera bajo ciertas condiciones. Un ejemplo de este tipo de alarmas es el nivel de agua, el cual requiere de cuatro alarmas en total. Dos son las alarmas de nivel bajo y nivel alto, las cuales indican que el nivel está en un rango inseguro de operación. Las otras dos son las alarmas de nivel muy bajo y nivel muy alto, los cuales son valores en los que la caldera debe parar. En la tabla 3.1 se muestran las alarmas de entradas analógicas implementadas en el sistema junto con la acción tomada por el sistema.

Tabla 3. 1. Lista de alarmas de variables de medición.

Alarma	Acción
Presión de vapor alta	Aviso
Presión de vapor baja	Aviso
Oxígeno bajo	Aviso Disparo de caldera
Temperatura de combustible alta	Aviso
Temperatura de combustible baja	Aviso
Presión de combustible alta	Aviso
Presión de combustible baja	Aviso
Temperatura de chimenea alta	Aviso
Presión de atomización alta	Aviso
Presión de atomización baja	Aviso
Nivel de agua alto	Aviso
Nivel de agua muy alto	Aviso Disparo de caldera
Nivel de agua bajo	Aviso
Nivel de agua muy bajo	Aviso Disparo de caldera
Presión de horno alta	Aviso
Presión de horno baja	Aviso
Temperatura de horno alta	Aviso
Temperatura de horno baja	Aviso
Desviación de actuador o variador de frecuencia de aire forzado	Aviso Disparo de caldera
Desviación de actuador o variador de frecuencia de aire forzado	Aviso Disparo de caldera

En el BMS, se conectan un grupo de interruptores por medición que se activan al medir un valor que puede ser configurable. Un ejemplo de esto es el interruptor de presión de combustible, el cual se configura para activarse cuando la presión se encuentra por encima de un límite especificado por el usuario. O el interruptor de baja temperatura de bunker, activado para prevenir que el combustible se vuelva muy viscoso. Las condiciones determinadas por medio de estos equipos son las siguientes:

- Botón de emergencia presionado
- Alta temperatura de combustible
- Baja temperatura de combustible
- Baja presión de aire de instrumentación
- Baja presión de atomización
- Alta presión de combustible
- Baja presión de combustible
- Presión de aire de purga alcanzada
- Presión de aire mínimo de bajo fuego alcanzada
- Bajo nivel de agua
- Válvulas de combustible cerradas
- Motor de forzado en marcha
- Motor de forzado disparado
- Interruptor de arranque de caldera
- Compresor de aire de atomización arrancado

3.2 Selección del equipo

3.2.1 Requerimientos del equipo

Para la implementación de la lógica, es necesario un controlador y una interfaz de usuario. El controlador debe ser capaz de leer todas las señales analógicas de las variables a controlar en la caldera, debe leer los equipos de estado del BMS y debe poder controlar los actuadores o válvulas necesarios. Además, debe procesar controles PID, realizar cálculos con variables de coma flotante, contar con una memoria suficiente para implementar el programa y contar con una memoria no volátil para guardar la configuración. De acuerdo a las lógicas de control descritas, en las tablas 3.2 y 3.3 se muestran las entradas y salidas necesarias para la implementación.

Tabla 3. 2. Lista de señales analógicas.

No.	Tipo	Descripción
1	Entradas Analógicas	Presión de vapor
2		Oxígeno
3		Retroalimentación de equipo de control de aire forzado
4		Flujo de combustible
5		Temperatura de combustible
6		Presión de combustible
7		Presión de atomización
8		Temperatura de chimenea
9		Nivel de agua
10		Presión de domo
11		Flujo de vapor
12		Temperatura de vapor
13		Flujo de agua de alimentación
14		Temperatura de agua de alimentación
15		Retroalimentación de válvula de combustible
16		Retroalimentación de válvula de agua
17		Presión de horno
18		Retroalimentación equipo de control de aire inducido
19		Temperatura de horno
20		Temperatura de aire
1	Salidas Analógicas	Equipo de control de aire forzado
2		Actuador de válvula de combustible
3		Válvula de alimentación de agua
4		Equipo de control de aire inducido

Tabla 3. 3. Lista de señales digitales.

No.	Tipo	Descripción
1	Entradas Digitales	Señal de bajo fuego
2		Señal de alto fuego
3		Modulación
4		Botón de emergencia
5		Alta temperatura de bunker
6		Baja temperatura de bunker
7		Baja presión de aire de instrumentación
8		Baja presión de aire de atomización
9		Baja presión de bunker
10		Alta presión de gas
11		Baja presión de gas
12		Presión de aire de purga alcanzado
13		Presión de aire mínimo de bajo fuego
14		Bajo nivel de agua
15		Todas las válvulas de bunker cerradas
16		Todas las válvulas de gas cerradas
17		Motor de forzado en marcha
18		Motor de forzado disparado
19		Interruptor de arranque de caldera
20		Compresor de aire de atomización arrancado
1	Salidas Digitales	Disparo de caldera por condiciones inseguras

En esta lista de equipos, se agregaron cuatro señales analógicas que no pertenecen a ningún lazo de control, estas son la presión de atomización, la temperatura de la chimenea, la temperatura de horno y temperatura de aire. Se agregaron con el propósito de tener un mejor monitoreo de la operación de la caldera. Cuando la presión de atomización baja, el combustible líquido no es bien atomizado, por lo que puede ocurrir una combustión incompleta. Usando la temperatura de chimenea y la temperatura del aire, se monitorea la eficiencia de la caldera utilizando el método simplificado de las pérdidas de calor. Con la temperatura de horno, se tiene un indicador directo acerca del proceso de combustión.

Con base a estas entradas y salidas, es necesario el equipo que se muestra en la tabla 3.4. Los rangos de los equipos fueron determinados con base a las especificaciones de las calderas CBND de Cleaver Brooks [4] y [5], y son considerados los rangos en los que trabaja el sistema de control.

Tabla 3. 4. Instrumentación necesaria para el control.

Equipo	Rango
Medidor de presión de vapor	0 a 300 psig
Analizador de oxígeno	0 a 25%
Medidor de flujo de combustible	500 gph de fueloil 63 000 cfh de gas
Sensor de temperatura de combustible	0 a 150°C
Sensor de presión de combustible	0 a 100 psig
Sensor de presión de atomización	0 a 200 psig
Sensor de temperatura de chimenea	0 a 500°C
Medidor de diferencial de presión para el nivel de agua	3 psi (60 in)
Sensor de presión de domo	0 a 300 psi
Medidor de flujo de vapor	0 a 200 000 lb/hr
Sensor de temperatura de vapor	0 a 250°C
Medidor de flujo de agua	0 a 200 000 lb/hr
Sensor de temperatura de agua	0 a 100°C
Sensor de presión de horno	-2.5 a 2.5 inWC
Sensor de temperatura de horno	0 a 1 500°C
Sensor de temperatura de aire de combustión	0 a 100°C
Válvula modulable de combustible	--
Dámper o variador de frecuencia de aire forzado	--
Válvula modulable de agua	--
Dámper o variador de frecuencia de aire inducido	--

La interfaz debe poder registrar los datos en una memoria externa, de por lo menos 5 variables. Debe contar con elementos de visualización de histórico, botones, indicador de barra, despliegue de las variables del controlador, tabla de avisos y alarmas, configuración de usuarios y seguridad de elementos por clave, comunicación por cable ethernet y memoria suficiente para implementar el programa.

3.2.2 Selección del controlador e interfaz

Para la selección del controlador e interfaz hubo tres opciones escogidas por ser las marcas más baratas manejadas por la empresa, los equipos Unitronics, Schneider y Siemens. Los equipos Unitronics se distinguen de los demás porque el CPU va incorporado a la interfaz, de manera que son menos espaciosos. Además, el precio de estos equipos es considerablemente menor que las otras dos marcas. La línea seleccionada de esta marca fue la Unistream, debido a que es más apta para controles de tipo continuo. La pantalla seleccionada fue de 7 pulgadas. El CPU no cuenta con entradas y salidas, de manera que se agregaron tres módulos de 8 entradas analógicas, uno de 6 salidas analógicas, uno de 8 entradas y 8 salidas digitales, y uno de 16 entradas digitales. Para programar el PLC y la pantalla se usa un solo software llamado UniLogics, el cual es gratuito y descargable desde la página oficial. En la tabla 3.5 se muestra el equipo escogido de Unitronics y en la figura 3.4 se muestra una imagen del equipo.

Tabla 3. 5. Equipo Unitronics seleccionado.

Descripción	Código	Cantidad
Panel HMI UniStream de 10.4"	USC-070-B10	1
CPU para panel UniStream	USC-P-B10	1
Unidad de 8 entradas analógicas no aisladas	UIA-0800N	3
Unidad de 6 salidas analógicas	UIA-0006	1
Unidad de 8 entradas digitales y 8 salidas digitales de relé, a 24 V	UID-0808R	1
Unidad de 16 entradas digitales a 24 V	UID-1600	1



Figura 3. 4. Equipo Unistream de 7 pulgadas. (Tomado de la página oficial de Unitronics)

El equipo Schneider seleccionado fue el controlador M221, el cual es la gama más baja de Schneider. El M221 seleccionado cuenta con 24 entradas y 16 salidas digitales, por lo que solo fue necesario agregar tres módulos de 8 entradas analógicas y un módulo de 4 salidas analógicas. La interfaz seleccionada fue el modelo Magelis de 7 pulgadas, junto con su procesador correspondiente. El software necesario para programar el PLC se llama SoMachine y se puede conseguir de manera gratuita en la página de Schneider. El software para la pantalla Magelis es el Vijeo Designer y debe ser comprado. La empresa cuenta con una licencia vigente, por lo que no se debe invertir en este software. En la tabla 3.6 se muestra el equipo de Schneider seleccionado y en la figura 3.5 se muestra una imagen del PLC M221, la pantalla Magelis de 7 pulgadas y el procesador de la pantalla.

Tabla 3. 6. Equipo Schneider seleccionado.

Descripción	Código	Cantidad
Panel Magelis de 7"	HMIDT351	1
Systema operativo de Magelis	HMIG3U	1
Schneider PLC M221 con 24 entradas digitales y 16 salidas digitales, de 100 a 240 V	TM221CE40R	1
Unidad de 8 entradas analógicas no aisladas	TM3AI8	3
Unidad de 4 salidas analógicas	TM3AQ4	1

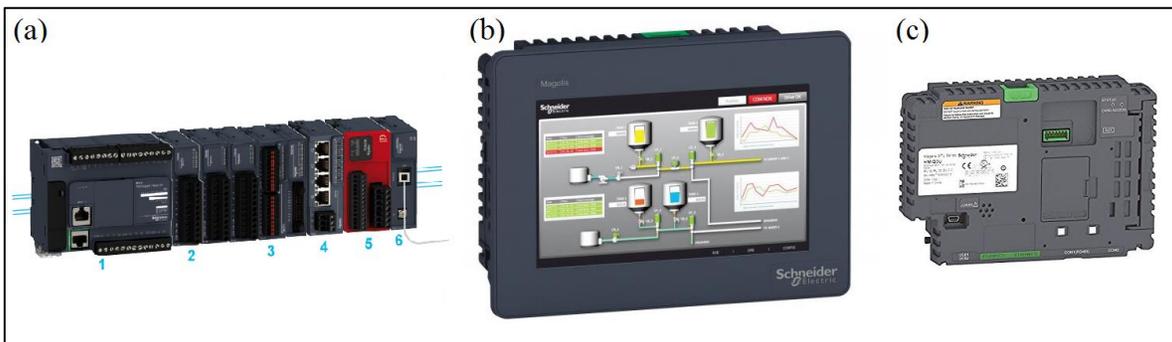


Figura 3. 5. Equipo Schneider (a) PLC M221 (b) Pantalla Magelis (c) Procesador de Magelis. (Tomado de la página oficial de Schneider)

El equipo Siemens escogido fue un PLC 1200 y una pantalla Basic. El PLC escogido fue un 1214, el cual cuenta con 14 entradas y 10 salidas digitales. Se le agregó un módulo tipo signal board con 4 entradas digitales, para completar las 18 necesarias. También fueron agregados 3 módulos de 8 entradas analógicas y un módulo de 4 salidas analógicas. La pantalla seleccionada fue una KTP700 Basic. El software requerido para la programación del PLC y de la pantalla es el TIA Portal, el cual es pago. La empresa ya cuenta con una licencia de TIA Portal, por lo que no debe invertir en este costo adicional. En la tabla 3.7 se muestra el equipo seleccionado de Siemens y en la figura 3.6 se muestra una imagen de una configuración diferente del PLC 1214C y de la pantalla KTP700 Basic.

Tabla 3. 7. Equipo Siemens seleccionado.

Descripción	Código	Cantidad
Panel Simatic Basic de 7"	KTP700 Basic	1
CPU Simatic S7-1200, con 14 entradas digitales y 10 salidas digitales a relé, de 24 V, 2 entradas analógicas y 2 salidas analógicas	1214C AC/DC/RLY	1
Unidad de 4 entradas digitales a 24 V	SB1221	1
Unidad de 8 entradas analógicas no aisladas	SM1231	3
Unidad de 4 salidas analógicas a 24 V	SM 1232	1

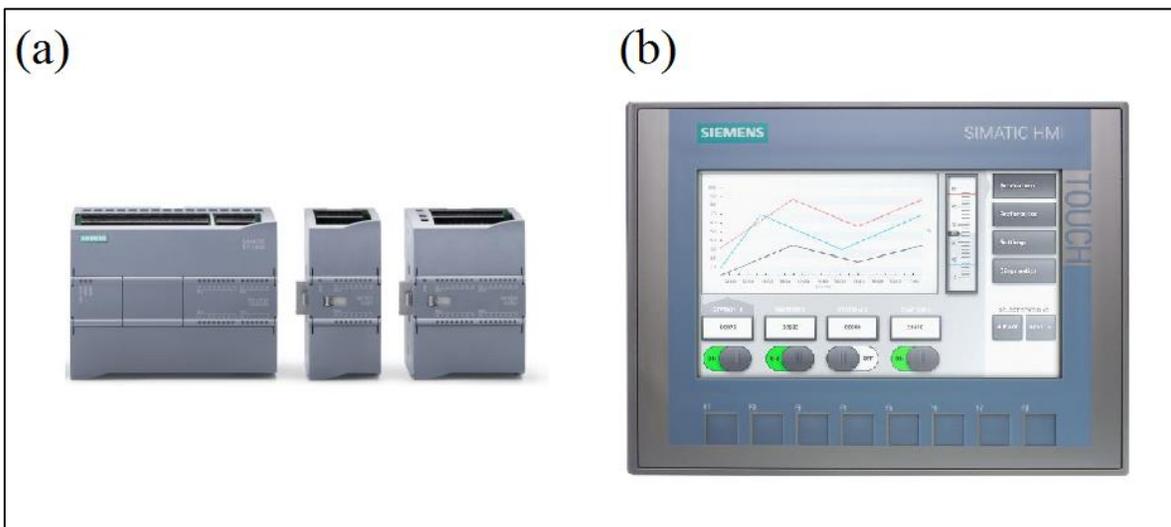


Figura 3. 6. Equipo siemens (a) PLC 1214C AC/DC/RLY (b) Pantalla KTP700 Basic. (Tomado de la página oficial de Siemens)

El equipo seleccionado inicialmente fue el de marca Unitronics, principalmente por contar con casi las mismas características que los demás equipos a un precio más bajo. Una comenzó probar el programa, se determinó que el tipo de control continuo que realizan estos PLCs no es el indicado para el control de calderas. Los parámetros de control de los PIDs solo pueden ser del tipo entero, por lo que la sintonización es más limitada. En el caso de la presión de horno, que puede variar entre -2.5 inWC a 2.5 inWC, no es posible realizar el control usando estos PIDs.

El equipo Schneider fue descartado debido a que los controles PID funcionan de una manera similar a Unitronics. El equipo seleccionado fue el de marca Siemens. Inicialmente el equipo de Siemens fue propuesto con una pantalla TP700 Comfort, razón por la cual inicialmente era el más caro de los tres. Una vez que se desarrolló el programa en la plataforma de Siemens, se determinó que la pantalla KTP700 Basic si cuenta con las características para la implementación, por lo que se migró el programa hacia esta otra interfaz.

3.2.4 Selección de los equipos del gabinete de control

El controlador e interfaz deben ir dentro de un gabinete de control junto con todo el equipo necesario para ser conectado a la caldera. Para conectar la entradas y salidas analógicas, es conveniente agregar bornes de conexión entre el PLC y el equipo de campo. En total, se necesitan 20 entradas analógicas y 4 salidas. Adicionalmente, se desea tener unos cuantos bornes que estén conectados a 24 V, por lo que se decidió agregar 34 bornes, 24 para entradas y salidas, y 10 para conexiones a 24 V. La marca seleccionada para bornes fue Allen Bradley, debido a que es el que se usa comúnmente en la empresa. Las entradas y salidas digitales son a 120 V, por lo que debe conectarse un relé entre el equipo de campo y el PLC. En total se seleccionaron 19 relés de marca Schneider, igual al número de entradas y salidas digitales.

Para alimentar los relés, es necesario agregar una fuente de 24 V. La marca seleccionada fue Phoenix Contact, la cual cuenta con 3 líneas de fuentes de alimentación, UNO, TRIO y QUINT. Se seleccionó una fuente de 5 A de la línea TRIO, que cuenta con mayor protección que la línea UNO. La fuente QUINT fue descartada debido a que se usar principalmente para equipos que están conectados a líneas de corriente con mucho ruido. Como protecciones adicionales se agregó un supresor de corrientes marca BKS y un interruptor termo magnético marca Schneider.

Para la selección del gabinete, la canaleta y el riel DIN, se realizó un plano para diferentes tamaños, el plano final se puede ver en la sección de apéndices en las figuras A.1 y A.2. Se determinó que un gabinete de 700x500x250 mm es el indicado para colocar el equipo seleccionado, con 4 metros de longitud de canaleta y 1 metro de riel DIN. Al gabinete se le agregó un botón de emergencia que desenergiza el gabinete por completo. Para realizar las conexiones internas se necesita cable y anillos numerados. La cantidad de estos dos componentes se estimó en 500 anillos y 20 metros de cable. En la tabla 3.8 se muestra el equipo necesario para armar el gabinete de control.

Tabla 3. 8. Equipo necesario para el gabinete de control.

Descripción	Código	Cantidad
Fuente de alimentación Phoenix Contact TRIO 24VDC/5A	TRIO-PS-2G/1AC/24DC/5-2903148	1
Gabinete Huffman de 700x500x250 mm	M700x500x250G	1
Borne Allen-Bradley 2.5 mm	1492J3	34
Relé y conector hembra de tornillo Schneider, 24VDC	RSL1PVBU	1
Relé y conector hembra de tornillo Schneider, 110 VAC/VDC	RSL1PVFU	18
Supresor de transientes BKS, línea y neutro	BKS-A-2 Polos	1
Interruptor termo magnético Schneider de 6 A	A9F74106	1
Botón de emergencia Schneider	XB4 BS542	1
Switch de dos posiciones, encendido/apagado, Schneider	XB4 BD25	1
Canaleta EFAPEL 40x40 mm/2 m	13020	4
Riel DIN acero galvanizado amarillo 2 m	TS-35/7.5-2.0m	1
Anillo numerado KSS #0 para cable Φ 3-4.2 mm	EC1-0YM	500
Cable flexible 1.5x1mm ² 500V Negro	H05Z1-KNG	20

3.2.5 Selección de la instrumentación

La instrumentación se determinó con base al estándar industrial usado para cada tipo de medición, las marcas disponibles en la empresa y de acuerdo a los requerimientos técnicos de cada instrumento. Uno de los aspectos generales que deben tener los instrumentos es la capacidad de comunicarse por una señal de 4-20 mA, 0-20 mA o 0-10 V, con el objetivo de integrarlos fácilmente al sistema de control. Todos los instrumentos son normalmente instalados lejos de los procesos, a excepción del medidor de temperatura de horno, por lo que no requieren operar a condiciones especiales.

Para el caso de los sensores de temperatura, el aspecto más importante para la selección es determinar el rango de operación y precisión del sensor. Estas dos características son las que definen el tipo de sensor que se va a usar. Para medir temperatura existen tres tipos, RTDs, termocuplas y termistores. Las RTDs se usan principalmente para proceso cuyo rango de medición es por debajo de los 500 °C, mientras que las termocuplas tienen rangos de medición más grandes, pero son menos precisas. Los termistores son usados principalmente cuando se requiere una alta precisión, pero tienen rangos de medición más bajos que las RTDs. El material de fabricación puede ofrecer características adicionales como la resistencia a la corrosión, a las sustancias abrasivas o una mayor temperatura de operación para el instrumento en general. La selección del material se realiza con base al material de las partes en contacto con el proceso y el material de encapsulamiento. Las dimensiones del instrumento deben determinarse de acuerdo al tipo de tubería, tipo de fluido y la resistencia mecánica deseada en el instrumento, si lo requiriera. El tipo de conexión al proceso puede ser de tres tipos diferentes, soldado, roscado o bridado. El tipo soldado se usa principalmente cuando se quiere una alta resistencia mecánica en el acople, mientras que el tipo roscado o bridado se usa para remover fácilmente el equipo.

Los rangos de temperatura para la mayoría de las mediciones se encuentran entre 0 y 200°C, para lo cual es más adecuado un sensor tipo RTD. Para el caso de la chimenea y la temperatura de horno, puede seleccionarse una termocupla tipo J o K, dependiendo de las especificaciones del fabricante de la caldera. El material utilizado para las partes mojadas fue acero inoxidable 316 Ti. La conexión al proceso se realiza por medio del termo pozo, el cual se escogió del tipo roscado y recto, debido a la facilidad para reemplazar el equipo. Las características dimensionales del instrumento deben determinarse de acuerdo a las condiciones de instalación en la caldera. El rango de medición de la RTD es de -50°C a 400°C preferiblemente a 4 hilos. Para una termocupla, el rango de medición es de -40°C a 750°C para el tipo J, y de -200°C a 1350°C para el tipo K. El transmisor debe poder funcionar a una temperatura de por lo menos 50°C.

Para las características antes descritas se escogieron dos opciones, la serie TSP121 de ABB y las RTDs marca Herten. La marca Herten se escogió para las mediciones por debajo de 200°C debido a que es mucho más barata. Para las aplicaciones de temperaturas mayores, es mejor usar el equipo ABB. Ambos equipos cuentan con transmisores que envían una señal de 4-20 mA de acuerdo a la temperatura a la que se han calibrado. En la figura 3.7 se muestra una imagen con los medidores de la familia TSP100 de ABB y los medidores Herten.

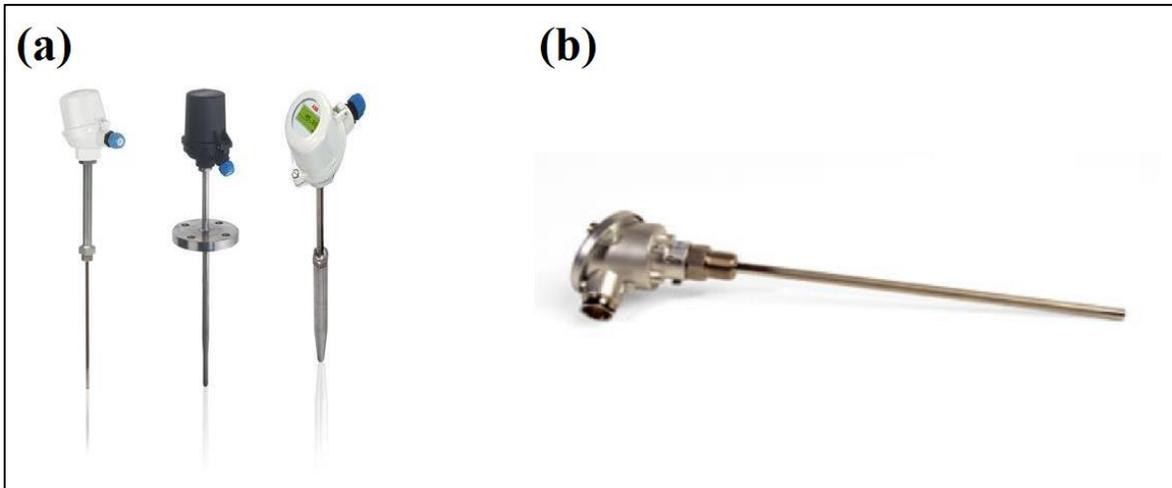


Figura 3. 7. Medidores de temperatura (a) TSP100 de ABB (b) PFH7069 de Herten.

Para los instrumentos de presión, las características más importantes son el tipo de medidor, el rango de medición y la conexión al proceso. El tipo de medidor puede ser absoluto, manométrico o diferencial. La conexión al proceso puede ser directa al lugar de medición o por medio de tuberías acopladas al proceso que permiten alejar el instrumento en caso de altas temperaturas.

En las mediciones de una caldera se necesitan solo los tipos manométrico o diferencial. Para la presión de vapor, la presión de atomización, la presión de combustible y la presión de domo se necesita de un medidor manométrico cuyo rango de medición debe ser de hasta 300 psi. La conexión al proceso generalmente es bridada y se puede realizar medio de una tubería acoplada para alejarlo de las altas temperaturas en caso de que se requiriera. El equipo seleccionado fue el 266GDT de ABB, el cual puede medir hasta 245 psi o 435 psi, de acuerdo al rango necesario. En la figura 3.8 se muestra una imagen del medidor 266GDT.



Figura 3. 8. Medidor de presión manométrica 266GDT de ABB.

La caldera necesita de dos medidores de presión diferencial, el de presión de horno y el de nivel de domo. Estos son escogidos con base a la diferencia de presión que pueden medir. Se seleccionó el medidor de ABB 266DRH para la medición de nivel de agua. Para la presión

de hogar se puede escoger el medidor 266DSH de ABB o DH3 de Dwyer, dependiendo de qué tan robusto se necesita que sea el medidor. En la figura 3.9 se pueden ver los medidores de diferencial de presión escogidos.

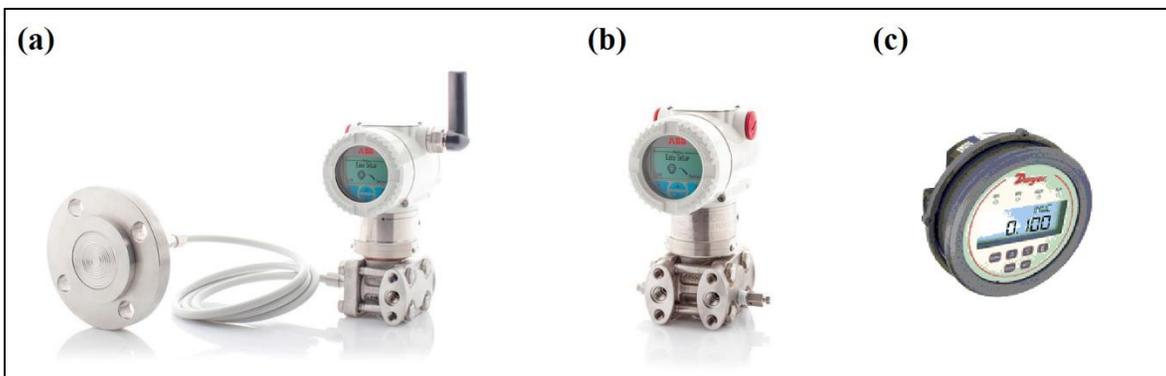


Figura 3. 9. Medidores de diferencial de presión (a) 266DRH de ABB (b) 266DSH de ABB (c) DH3 de Dwyer.

Para el analizador de oxígeno, las características más importantes son el rango de medición, las condiciones de operación y el precio. El rango de medición necesario debe ser de hasta 25%. Este sensor se instala en la chimenea, donde los gases de combustión han perdido calor por el calentador de aire y/o economizador. La temperatura de operación varía con cada caldera, pero en general, se requiere que el sensor pueda operar a 500 °C.

Para la selección del analizador de oxígeno se escogieron los medidores XZR de Michell Instruments y AZ de ABB. Ambos cuentan con un rango de medición de 0 a 25%, permiten enviar una señal de 4 a 20 mA y las condiciones de operación pueden ser de hasta 700°C. El equipo de ABB es superior al Michell, aunque el analizador XZR200 es mucho más barato y cumple con las características deseadas para calderas pequeñas o medianas. El tipo de conexión al proceso es por medio de un acoplamiento roscado a la tubería del proceso. El tipo de calibración de estos instrumentos puede ser por medio de aire o, si se quiere una medición más precisa, por medio de un gas cuya concentración de oxígeno es conocida. En la figura 3.10 se muestra el analizador de oxígeno AZ de ABB y el analizador XZR de Michell.

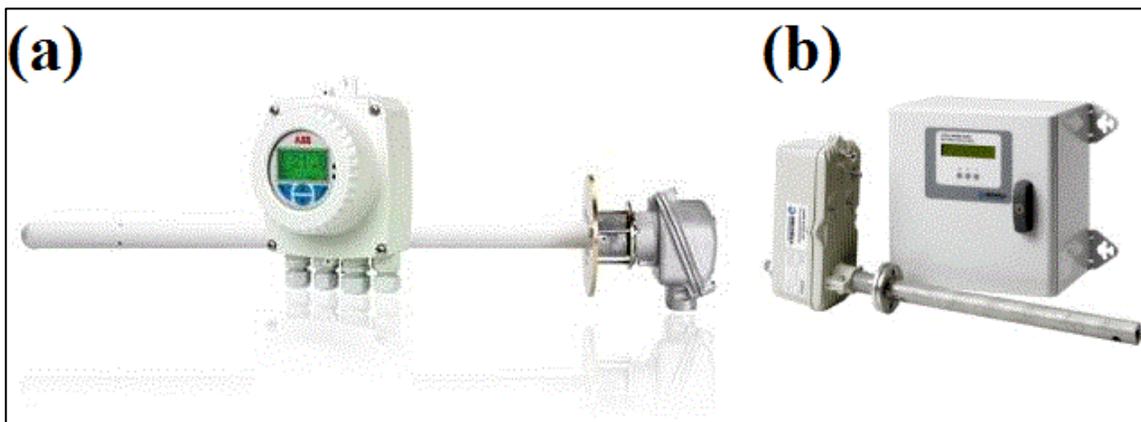


Figura 3. 10. Analizadores de oxígeno (a) AZ de ABB (b) XZR de Michell.

Para seleccionar un actuador de d mper es necesario conocer el torque necesario, el tipo de movimiento del actuador y el tipo de control. El torque necesario se determina con base al flujo de aire máximo que circula por el ducto, al tipo de d mper usado y al área transversal del ducto. Con base a esta información y la tabla 3.9, es posible encontrar el torque requerido por el actuador. El tipo de movimiento para los dámpers es normalmente rotativo, y se requiere que el ángulo de rotación pueda ser controlado por una señal de 4-20 mA, 0-20 mA o 0-10 V.

Tabla 3. 9. Carga de torque de acuerdo a las especificaciones del d mper.

Tipo de hojas en el d�mper	Carga de torque lb-in/ft ²		
	<1000 fpm	1000-2500 fpm	2500-3500 fpm
Hojas paralelas con sellos	7	10.5	14
Hojas opuestas con sellos	5	7.5	10
Hojas paralelas sin sellos	4	6	8
Hojas opuestas sin sellos	3	4.5	6
Redonda	10	14	20

Los actuadores de d mper seleccionados fueron el actuador DDD, para calderas pequeñas, y ACT-MD para las demás aplicaciones. El tipo de movimiento de estos actuadores es rotativo de hasta 95 , modulable con una señal de 4 a 20 mA. Estos actuadores también cuentan con señales de retroalimentación de su posición. La conexión al proceso es por medio de un acople mecánico. El d mper es capaz de soportar hasta 50 C, las cuales son condiciones suficientes para trabajar fuera de una caldera. En la figura 3.11 se muestran los actuadores escogidos.

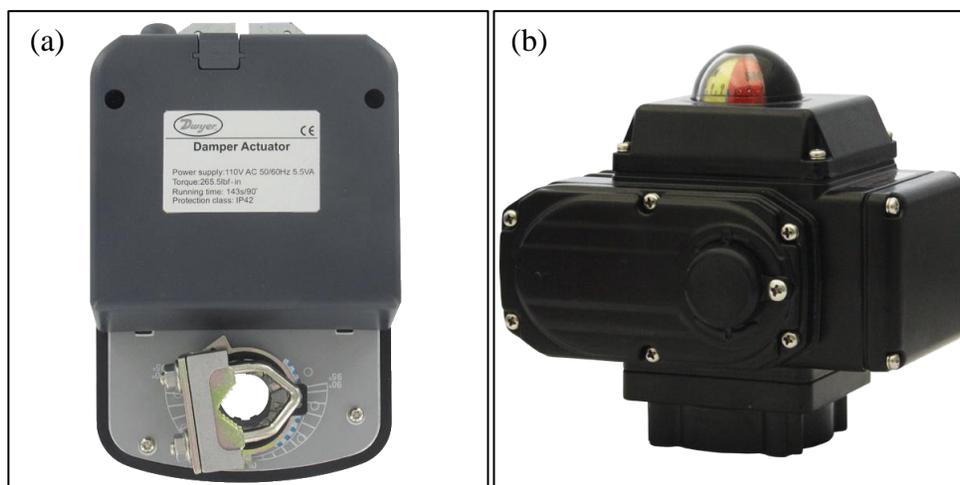


Figura 3. 11. Actuadores para d mper (a) DDD de Dwyer (b) ACT-MD de Dwyer.

La determinación de los variadores de frecuencia depende de cada motor individualmente. Se escogió la línea Altivar de Schneider debido a que cumple con un gran rango de tamaños según la aplicación necesaria. Las características que se deben tomar en cuenta para la selección de un variador de frecuencia son:

1. Potencia del motor
2. Voltaje del motor
3. Número de fases
4. Frecuencia

En la figura 3.12 se muestran los variadores de frecuencia Altivar.



Figura 3. 12.. Variadores de frecuencia Altivar de Schneider.

Para los medidores de flujo, se considera que el rango de medición, la caída de presión, el tipo de medidor y la conexión al proceso son las principales características de selección. Para las aplicaciones requeridas, existen 3 tipos de medidores que se pueden implementar, de placa de orificio, de vortex o del tipo coriolis. Los medidores de placa de orificio son mejores que los demás cuando se busca una solución a un bajo precio, pero su principal desventaja es que tienen una alta caída de presión en el fluido y una menor precisión que los demás. Los medidores tipo vortex son una solución balanceada en cuanto a precio, caída de presión y precisión. Este tipo es mejor para la medición de vapor, para evitar una alta caída de presión y conseguir una mejor precisión. El medidor del tipo coriolis, se usa principalmente cuando se quiere una alta precisión en la medición. En el caso de las calderas, se usa principalmente para la medición del flujo de combustible, con el objetivo de calcular con mejor precisión el consumo de combustible.

Los equipos escogidos para esta medición son el medidor de placa de orificio FPD500, el medidor de vortex FSV430 y el medidor de coriolis de FCB300, todos de la marca ABB. Los medidores FSV430 y FCB300 tienen la ventaja de que pueden incluir la compensación de

flujo másico por temperatura y presión. En la figura 3.13 se muestran los medidores seleccionados.

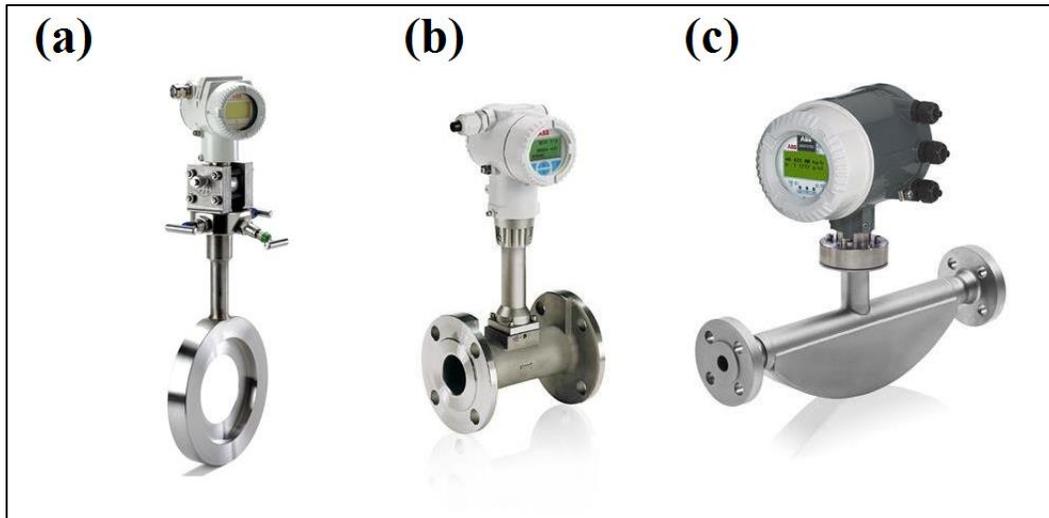


Figura 3. 13. Medidores de flujo (a) FPD500 (b) FSV430 (c) FCB300.

Para la selección de una válvula de control se debe considerar el coeficiente de caudal, el tipo de válvula, el material y la conexión al proceso. El coeficiente de caudal es el valor con el que se selecciona una válvula, y es calculado con base a la caída de presión requerida en la válvula, la cual depende de la bomba, la altura de la tubería y la presión de la caldera. El tipo de válvula deseado es de bola, ya que cuenta con una caracterización lineal con respecto a la señal de control. Las válvulas de mariposa también pueden ser usadas, pero no son recomendables debido a que su comportamiento no es lineal con respecto a la señal de control. La conexión al proceso de las válvulas es bridada, y debe ser determinada de acuerdo al tamaño de la tubería. El material de las partes mojadas de las válvulas debe ser de acero inoxidable, para evitar la corrosión.

La marca Dwyer cuenta válvulas automáticas de tipo bola, con coeficientes de flujo de hasta 1152 gpm. Para válvulas de bola la marca usa el modelo WE01, 02, 03, 04 o 05, de acuerdo al tipo de conexión al proceso. Otra opción es la marca de válvulas Valtek Sulamericana, la cual cuenta con la línea de válvula de globo GLS. En la figura 3.14 se muestran las válvulas escogidas.

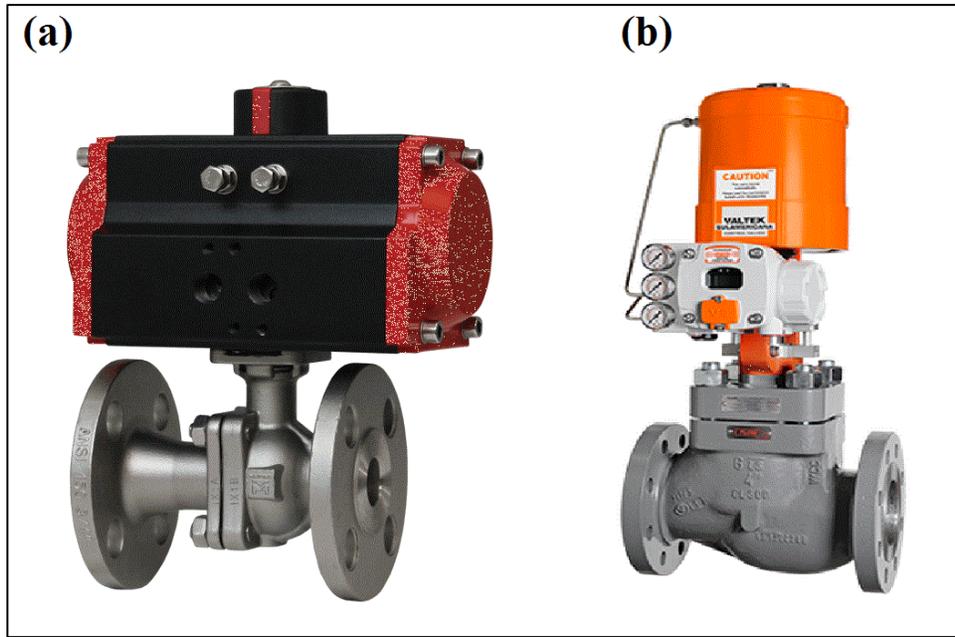


Figura 3. 14. Válvulas de control (a) WE4 de Dwyer (b) GLS de Valtek.

En las tablas 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 se muestra todo el equipo que fue seleccionado, de acuerdo a la aplicación. En la primera columna se detalla la descripción del equipo y en la segunda columna el modelo seleccionado.

Tabla 3. 10. Instrumentación necesaria para el control de combustión.

Descripción	Modelo
Sensor de presión de vapor	<ul style="list-style-type: none"> • 266GDT, de ABB
Analizador de oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> • AZ20, de ABB • AZ121, de ABB • XZR200, de Michell • XZR500, de Michell
Flujo de combustible	<ul style="list-style-type: none"> • FPD500, de ABB • FSV430, de ABB • FSB300, de ABB
Válvula de combustible	<ul style="list-style-type: none"> • WE 01, 02, 03, 04, 05 o 20, de Dwyer • GLS de Valtek
Actuador de dámper de aire forzado	<ul style="list-style-type: none"> • DDD 53, 63, 73 o 83, de Dwyer • ACT-MD 01, 02, 03, 04 o 05, de Dwyer
Variador de frecuencia de aire forzado	<ul style="list-style-type: none"> • Altivar, de Schneider

Tabla 3. 11. Instrumentación necesaria para el control de nivel de agua.

Descripción	Equipo
Sensor de nivel de domo	<ul style="list-style-type: none"> • 266DRH, de ABB
Sensor de presión de domo	<ul style="list-style-type: none"> • 266GDT, de ABB
Flujo de vapor	<ul style="list-style-type: none"> • FPD500, de ABB • FSV430, de ABB
Temperatura de vapor	<ul style="list-style-type: none"> • TSP121 de ABB
Flujo de agua de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • FPD500, de ABB
Temperatura de agua de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • PFH7069, de Herten
Válvula de alimentación de agua	<ul style="list-style-type: none"> • WE 01, 02, 03, 04, 05 o 20, de Dwyer • GLS

Tabla 3. 12. Instrumentación necesaria para el control de presión de horno.

Descripción	Equipo
Sensor de presión de hogar	<ul style="list-style-type: none"> • 266DSH, de ABB • DH3-016, de Dwyer
Variador de frecuencia de aire inducido	<ul style="list-style-type: none"> • Altivar, de Schneider
Actuador de dámper de aire inducido	<ul style="list-style-type: none"> • DDD 53, 63, 73 o 83, de Dwyer • ACT-MD 01, 02, 03, 04 o 05, de Dwyer

Tabla 3. 13. Instrumentación necesaria para el equipo de monitoreo.

Descripción	Equipo
Temperatura de combustible	<ul style="list-style-type: none"> • TSP121 de ABB
Presión de combustible	<ul style="list-style-type: none"> • 266GDT, de ABB
Presión de atomización	<ul style="list-style-type: none"> • 266GDT, de ABB
Temperatura de chimenea	<ul style="list-style-type: none"> • TSP121 de ABB • PFH7069, de Herten
Temperatura de aire	<ul style="list-style-type: none"> • PFH7069, de Herten

3.3 Interfaz implementada

La interfaz implementada es el medio por el cual se configura todo el sistema y el que muestra el estado de la caldera. El objetivo de esta sección es mostrar de manera general como se puede navegar por la interfaz, cuales características del control pueden configurarse y que información es mostrada.

En la ventana principal se ven las condiciones dentro de la caldera y se realiza la operación de los PIDs y estaciones del equipo de control. Los valores de la temperatura del agua, la presión de atomización, la temperatura del aire y la temperatura de vapor, no se agregaron a esta ventana para mantener un diseño simple. Los displays numéricos que tienen borde verde permiten acceder a una ventana emergente de acuerdo a la variable. En el caso del inducido, el forzado, el agua y el combustible, se usan para acceder a las estaciones manual-automático de cada uno de los equipos de control. En la figura 3.15 se muestra la imagen de la ventana principal y en la figura 3.16 las estaciones manual-automático.

La ventana emergente de la estación cuenta con tres valores de control, la entrada, el bias y la salida. La entrada corresponde al valor de control calculado por las lógicas descritas en la sección 3.1, el bias es una desviación aplicada a la entrada cuando el modo es automático y la salida es el valor que indica el porcentaje de control. En la parte superior hay dos botones, el botón de cambio de manual a automático y el botón de salida.

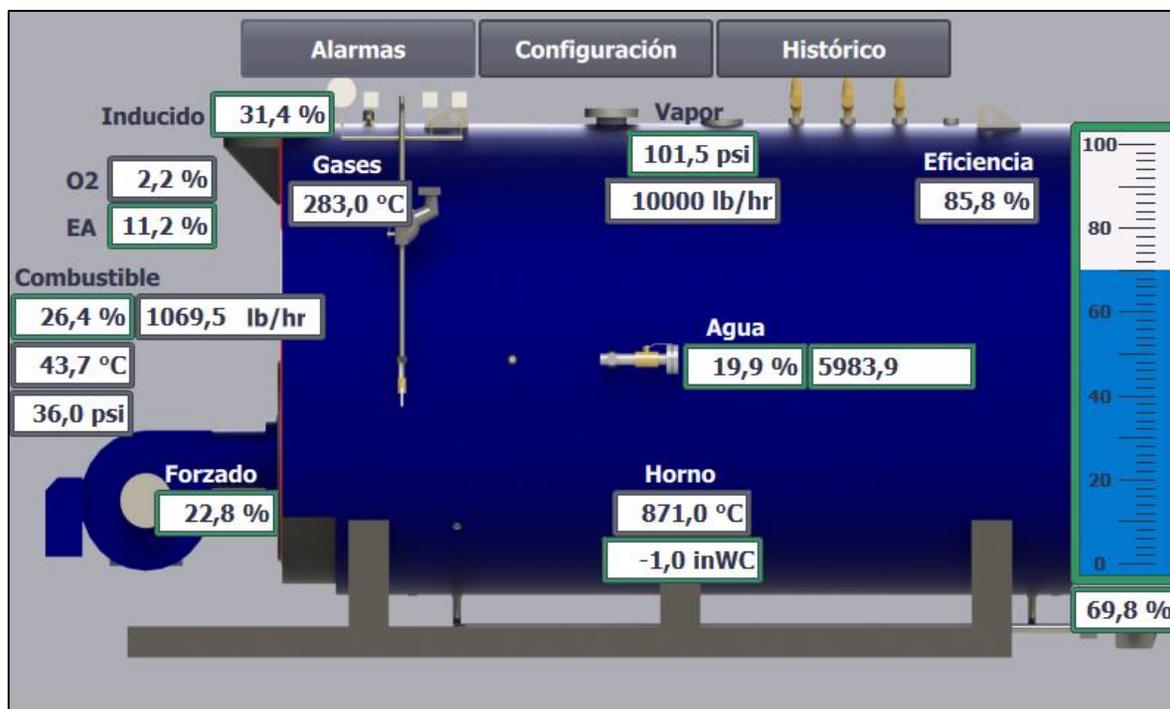


Figura 3. 15. Ventana principal. (Tomado de TIA Portal V13)

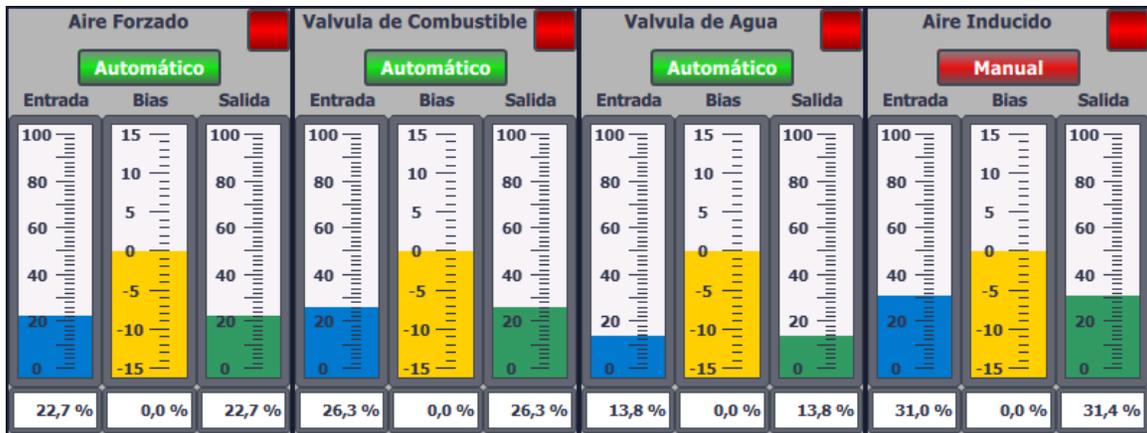


Figura 3. 16. Estaciones de manual-automático. (Tomado de TIA Portal V13)

Los demás displays con borde verde permiten acceder al control de los PIDs. En la figura 3.17 se muestran imágenes de las ventanas de PIDs. Hay tres valores de control, la entrada, la consigna y la salida. La entrada es el valor de la variable medida, la consigna es el valor deseado de la variable medida y la salida es el valor de control calculado por el PID. En la parte superior hay dos botones, el botón que cierra la ventana emergente y el botón de manual a automático. Si el sistema está en manual, permite al usuario ingresar un valor de salida en el display, si está en automático, la salida es calculada por el PID. Las ventanas de exceso de aire y flujo de vapor tienen un botón adicional, el cual permite escoger entre una consigna local o remota.

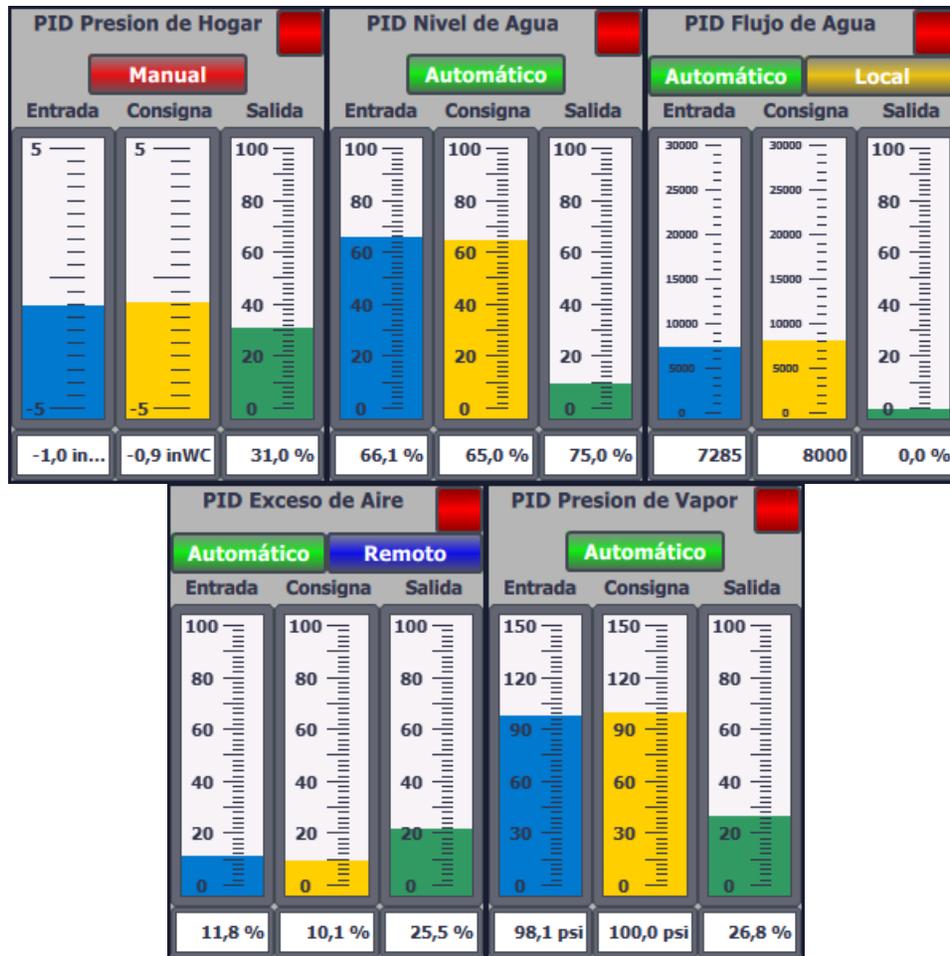


Figura 3. 17. Ventanas emergentes de PIDs. (Tomado de TIA Portal V13)

La ventana principal permite también acceder a la ventana de alarmas, de configuración y de histórico. La ventana de alarmas se usa para verificar el estado de la caldera y cualquier tipo de alarma activa. Contiene una tabla donde se muestran los avisos del estado de la caldera junto con las alarmas activas y las que se han activado anteriormente. En esta tabla se puede ver la fecha en que se activó, el estado y la descripción. En la figura 3.18 se muestra una imagen de la ventana de alarmas. La ventana cuenta con 5 botones, el botón de operación, el cual devuelve al usuario a la ventana principal, el botón de configuración y el de histórico, que abren las ventanas correspondientes.

Los botones de alarmas 1 y 2 se usan para acceder a la configuración de las alarmas, y son accesibles solo por medio de contraseña. En estas ventanas se pueden configurar las alarmas mostradas en la figura 3.19.

Operación				Configuración				Histórico			
Alarmas 1				Alarmas 2							
Hora	Fecha	Estado	Descripción								
19:56:36	13/06/2017	E	Baja temperatura de combustible								
19:56:36	13/06/2017	E	Compresor de aire de atomización arrancado								
19:56:36	13/06/2017	E	Modulacion permitida								

Figura 3. 18. Tabla de alarmas. (Tomado de TIA Portal V13)

Operación	Alarmas	Configuración	Histórico	Operación	Alarmas	Configuración	Histórico		
Presión de vapor	Límite inferior	80,0 psi	Límite superior	130,0 ...	Temperatura de vapor	Límite inferior	1500,0	Límite superior	1500,0
Oxígeno	Límite inferior	3,0%			Presión de hogar	Límite inferior	-1,5	Límite superior	+0,5
Temperatura de combustible	Límite inferior	20,0 °C	Límite superior	50,0 °C	Temperatura de hogar	Límite inferior	631,0	Límite superior	871,0
Presión de combustible	Límite inferior	25,0 psi	Límite superior	40,0 psi	Forzado	Desviación	10,0		
Temperatura de chimenea			Límite superior	900,0 °C	Inducido	Desviación	11,0		
Presión de atomización	Límite inferior	20,0 psi							
Nivel de agua	Límite inferior	50,0%	Límite superior	75,0%					
	Límite inferior bajo	45,0%	Límite superior alto	80,0%					

Figura 3. 19. Ventana de alarmas 1 y 2. (Tomado de TIA Portal V13)

La ventana de configuración permite acceder a los parámetros de control del sistema. Cuenta con once botones de navegación. Los tres botones superiores son los botones básicos de navegación. Los siguientes tres botones llevan a ventanas donde es posible visualizar los valores de todas las entradas y configurar los límites máximo y mínimo de medición. Además, algunas entradas tienen un botón llamado HMI, donde se puede seleccionar entre mostrar o no el valor en la ventana principal. En la figura 3.20 se muestra la ventana del menú de configuración y en la figura 3.21 las 3 ventanas de entradas.

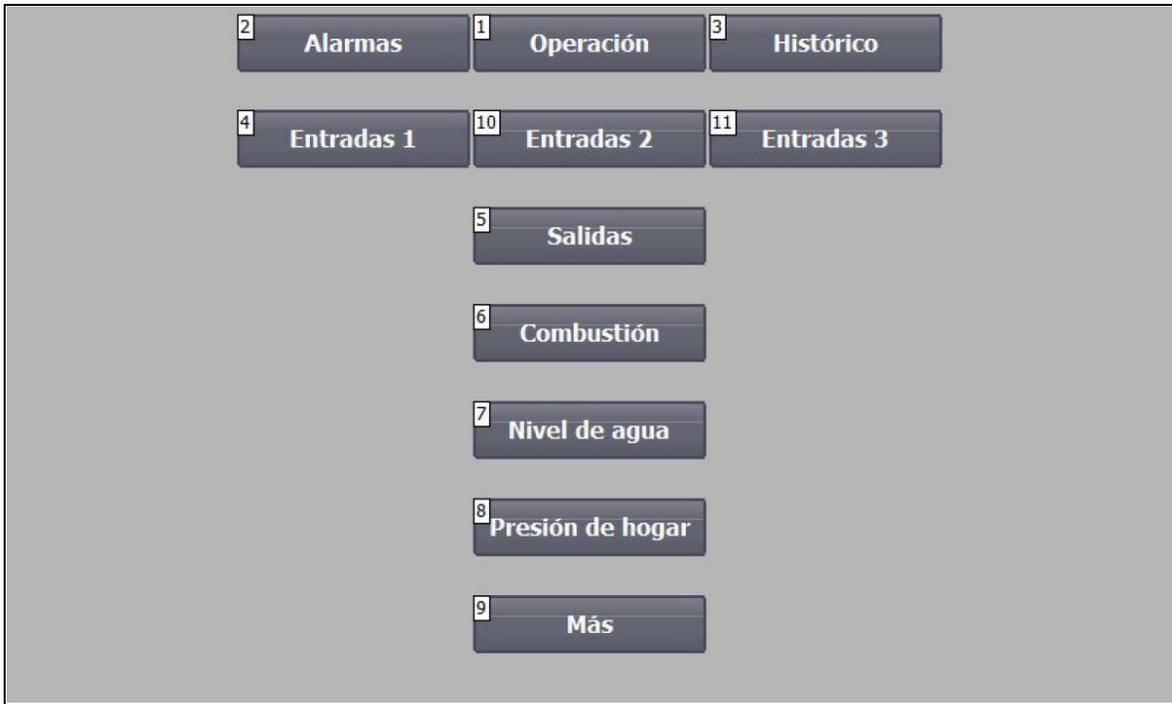


Figura 3. 20. Menú de configuración. (Tomado de TIA Portal V13)

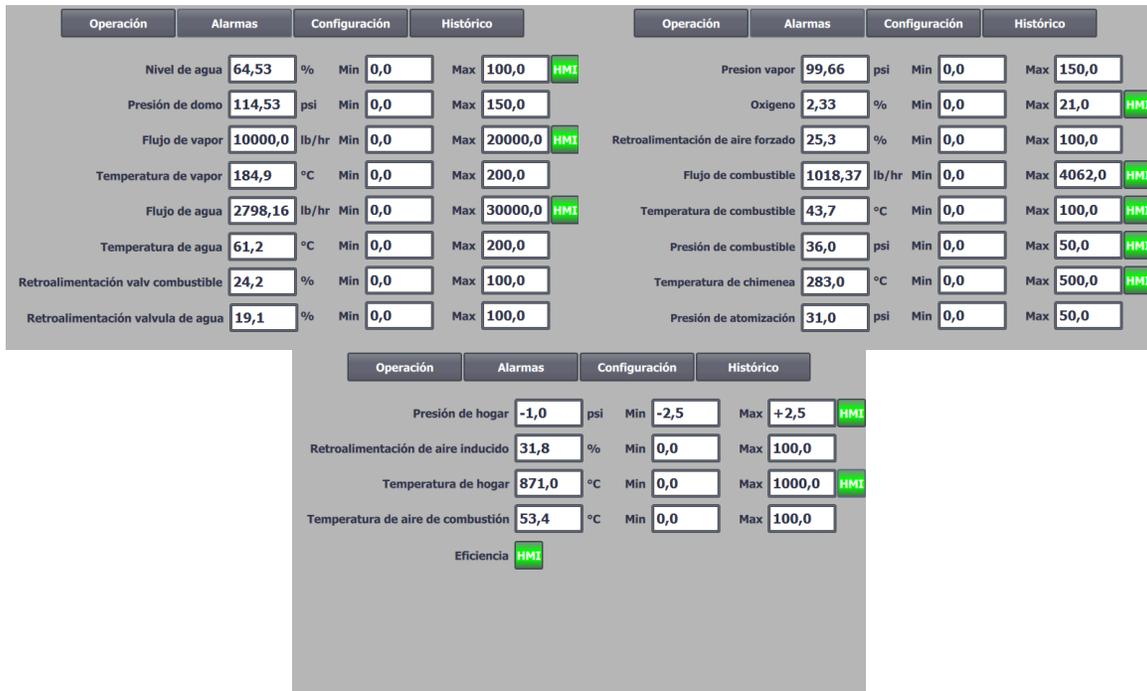


Figura 3. 21. Configuración de entradas. (Tomado de TIA Portal V13)

El botón de salidas, similar al de entradas, permite visualizar el valor de todas las salidas y de los límites mínimo y máximo de control. Estos últimos no son editables. También cuenta con el botón HMI, para el aire forzado, la válvula de agua y el aire inducido. Los displays de las salidas tienen un borde verde, indicando que pueden configurarse por medio de una ventana emergente. Esta configuración se usa cuando el equipo que se va a controlar no funciona de manera lineal con respecto a la señal de control. En la figura 3.22 se muestra la imagen de la ventana de salidas y en la figura 3.23 se muestran las ventanas emergentes de caracterización.

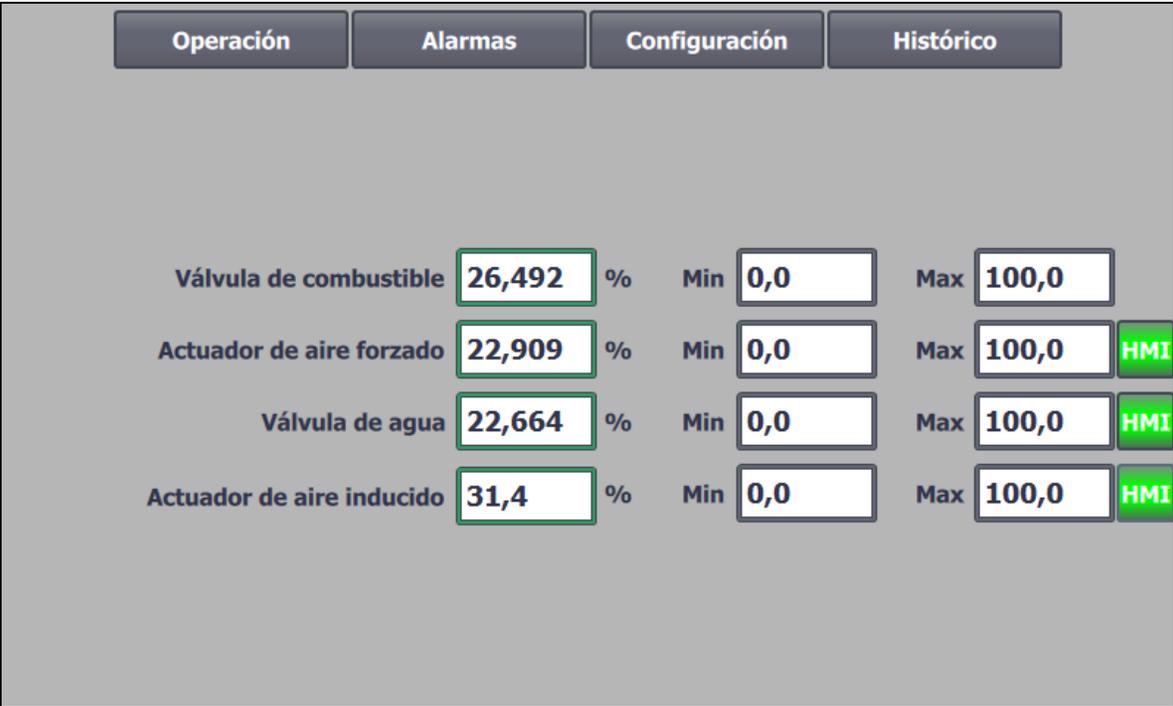


Figura 3. 22. Ventana de salidas. (Tomado de TIA Portal V13)



Figura 3. 23. Ventanas de calibración de las salidas. (Tomado de TIA Portal V13)

La ventana de configuración de la combustión permite seleccionar el tipo de control, el tipo de combustible, las constantes de PID de presión de vapor y de exceso de aire, y el ajuste de oxígeno. El tipo de control puede ser ninguno, de un eje o de dos actuadores. El tipo de combustible puede ser gas o bunker. Las constantes editables son K_p para ajustar la ganancia, T_i para el tiempo integral y T_d para el tiempo derivativo. El exceso de aire es una tabla que relaciona un valor de apertura de la válvula de combustible en relación a una cantidad de exceso de aire. Esta tabla debe determinarse por medio de pruebas durante la puesta en marcha. En la figura 3.24 se muestra una imagen de la ventana de configuración del control de combustible.

Tipo de control		Ajuste de oxigeno	
Dos Actuadores		Valvula	Exceso aire
Tipo de combustible		0,0	5,0
Bunker		10,0	7,0
		20,0	9,0
		30,0	11,0
		40,0	16,0
		50,0	25,0
		60,0	36,0
		70,0	49,0
		80,0	64,0
		90,0	81,0
		100,0	100,0

PID Presion de vapor		PID Exceso de aire	
Kp	0,007	Kp	0,004
Ti	0,9	Ti	1,0
Td	0,0	Td	0,0

Figura 3. 24. Configuración de combustible. (Tomado de TIA Portal V13)

La configuración de nivel de agua cuenta con un selector del tipo de control, la configuración de la compensación por presión de domo, la habilitación de la compensación por flujo de vapor, la configuración del cálculo de flujo de vapor, la habilitación del cálculo de flujo de agua y la configuración de PIDs. Los tipos de control pueden ser ninguno, de un elemento, dos elementos o tres elementos. La compensación por presión de domo debe ser deshabilitada en caso de que no se cuente con el sensor. Los valores min y max son los multiplicadores mínimo y máximo de acuerdo a los que se multiplica el nivel medido. La compensación de flujo de vapor se puede deshabilitar en caso de que se quiera trabajar un control de tres elementos sin flujo de vapor. Se agregó la posibilidad de calcular el flujo másico en caso de que el medidor sea por diferencial de presión, pero esta característica no está implementada debido a que se debe verificar la validez de las ecuaciones de este cálculo. La configuración

de los PIDs es por medio de las constantes K_p , T_i y T_d . En la figura 3.25 se muestra la ventana de configuración del nivel de agua.

Figura 3. 25. Configuración del nivel de agua. (Tomado de TIA Portal V13)

La configuración de la presión de hogar es más simple debido a la lógica implementada. Se puede habilitar o deshabilitar el control y acceder a los parámetros K_p , T_i y T_d del PID. En la figura 3.26 se muestra la ventana de configuración de presión de hogar.

Figura 3. 26. Configuración de la presión de hogar. (Tomado de TIA Portal V13)

El menú de histórico permite acceder a gráficas de tiempo de las diferentes variables. Se puede acceder a la gráfica del proceso de combustión, la del control de nivel de agua, la del control de presión de hogar y la de monitoreo general. En la figura 3.27 se muestra la ventana de menú de históricos y la ventana general de una gráfica.

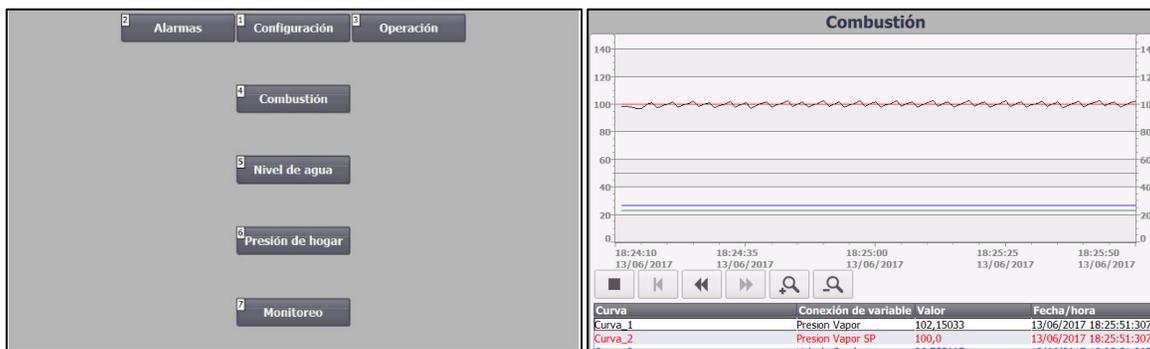


Figura 3. 27. Menú de históricos y ventana de gráfica. (Tomado de TIA Portal V13)

3.4 Programa implementado

El programa fue realizado en TIA Portal V13 usando el lenguaje de programación de escalera. El PLC S7-1200 cuenta con la posibilidad de programar en tres lenguajes diferentes, escalera, texto estructurado y bloques. En la empresa, los lenguajes conocidos son el de bloques y el de escalera, por lo que se descartó el texto estructurado con el objetivo de que el programa pueda ser interpretado por otra persona en la empresa. El lenguaje de escalera fue escogido principalmente porque es fácil e intuitivo de programar, lo cual hace que una tercera persona pueda entender la lógica del programa de mejor manera que en los demás lenguajes. Las imágenes del programa implementado se muestran en la sección de apéndices en las figuras de A.3. a A.3.21. En esta sección se describe brevemente la manera en que está estructurado el programa.

La estructura del programa contiene 19 funciones y 5 bloques de datos. Los bloques de datos contienen las variables de control principales, las variables de los PIDs, los límites de entradas y salidas, los límites de alarmas y variables de configuración de la interfaz. Todos estos datos se manejan en bloques de datos con el objetivo de tener un programa más ordenado, además de que permiten activar la remanencia de las variables. Las 19 funciones implementadas son las siguientes:

1. Programa principal
2. Escalamiento IN
3. Escalamiento OUT
4. Estación MA
5. Interpolación
6. 1. Escalamiento IOs
7. 2. Control de combustión
8. 2. A. Control de válvula combustible
9. 2. B. Control forzado
10. 3. Control de nivel de agua

11. 3. A. Control 1 elemento
12. 3. B. Control 2 elementos
13. 3. C. Control 3 elementos
14. 4. Control Presión de hogar
15. 4.A. Control Inducido
16. 5. IOs digitales
17. 6. Eficiencia
18. Cálculo flujo másico vapor
19. Cálculo flujo másico agua

El programa principal es el que se encarga de llamar a las funciones principales “Escalamiento IOs”, “Control de combustión”, “Control de nivel de agua”, “Control de presión de hogar”, “IOs digitales” y “Eficiencia”. También cuenta con una lógica de control de acuerdo a las entradas alto fuego, bajo fuego y modulación. Cuando la entrada de bajo fuego está activa, todos los controles son colocados a modo manual, y la salida de forzado e inducido es colocada al 0%, esto de acuerdo a la lógica de encendido discutida en la sección 2.2.8. Cuando la entrada de alto fuego está encendida, ocurre lo mismo, pero esta vez la salida de forzado e inducido es colocada a 100%, de acuerdo a la lógica de purga. El sistema de control se puede usar solo si ninguna de estas dos entradas esta activa.

La función de Escalamiento IN se usa para escalar la entrada entera a tipo real. Las entradas analógicas son entradas enteras de 13 bits y son escaladas por el PLC de 4-20 mA a un valor entre 0-27648. Este último rango debe escalarse de nuevo de acuerdo a los límites mínimo y máximo de la variable. Esta función tiene tres entradas, la variable de medición, el límite inferior y el límite superior de medición. La función Escalamiento OUT es similar a la anterior, con la diferencia de que ahora se requiere escalar del valor real al entero de 0-27648. Tiene tres entradas, la variable a convertir, el límite inferior y el límite superior de la variable a convertir.

La función de Estación MA es la estación manual-automático descrita en la sección anterior. Si el modo de la estación es automático, copia la suma de la entrada y el bias a la salida. La suma es limitada en un rango de 0 a 100. La salida es copiada al valor manual para evitar “saltos” al cambiar a modo manual. Cuando el modo es manual, el valor manual es copiado a la salida.

La función de interpolación determina el valor de una función con base a una tabla de puntos. Recibe como entrada una matriz de puntos de acuerdo a la variable a transformar, una matriz de puntos de acuerdo a la variable transformada y la variable a transformar. Esta función lo que hace es calcular una función lineal entre cada rango, de manera que todas las funciones lineales conforman una función más compleja. El comportamiento de la interpolación por rangos lineales se puede ver en la figura 3.28. Inicialmente se iba a utilizar el método de mínimos cuadrados para el cálculo, pero algunas funciones requieren de un polinomio de alto grado, lo cual aumenta el tiempo de ejecución del programa.

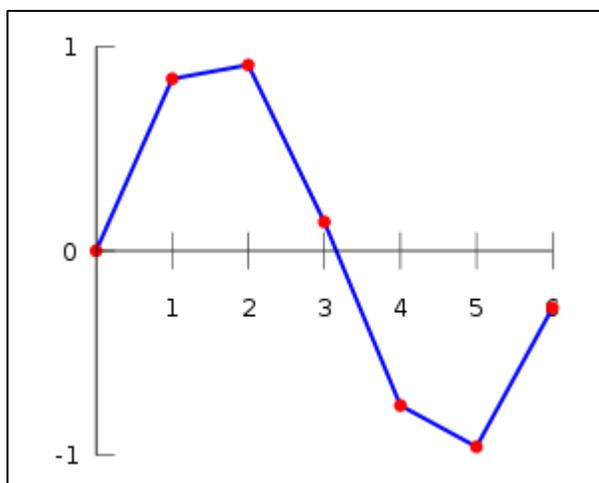


Figura 3. 28. Interpolación por rangos lineales. (Tomado de <https://en.wikipedia.org/wiki/Interpolation>)

El programa de escalamiento de IOs es el que llama a las funciones “Escalamiento IN” y “Escalamiento OUT” para cada variable de entrada y salida. El programa del control de combustión es el que llama a cada lógica de control según el tipo seleccionado. El tipo es seleccionado con base a una variable entera, si es 0 significa que no se seleccionó ningún control, si es 1 se seleccionó un eje y si es 2 el control activo es de dos actuadores. Si el control es 0, solo las estaciones de manual-automático son ejecutadas. Si el control es 1, se llama al PID de presión de vapor y la salida de forzado se iguala a la válvula de combustible multiplicada por el factor establecido. Si el control es 2, la salida de aire forzado es controlada por el PID de exceso de aire. En este bloque se llama a las funciones de estaciones de válvula de combustible y de aire forzado. La salida de estos bloques es interpolada de acuerdo a la caracterización configurada por el usuario.

El siguiente programa es el de control de la válvula de combustible, el cual contiene el PID de presión de vapor. Consiste en varios bloques que copian el valor de la variable de configuración al parámetro del bloque de datos respectivo. El bloque PID cuenta con una entrada de habilitación de modo manual que se activa cuando la variable esta activada, la lógica del programa asume lo contrario. Si el PID está en modo automático, el valor manual sigue a la salida, igual a las estaciones de manual-automático.

El control de forzado se realiza por medio del PID de exceso de aire. Primero se calcula el exceso de aire actual en la caldera. Luego, si el modo es remoto, se realiza el cálculo de la consigna necesaria de exceso de aire. El PID recibe estos dos valores como entrada y consigna.

La siguiente función es la del control de nivel de agua. En ésta, se llaman las funciones de un elemento, dos elementos y tres elementos, dependiendo del tipo seleccionado. El tipo depende de una variable entera, si es 0 no se selecciona ningún control, si es 1 es un elemento, 2 es dos elementos y 3 es para tres elementos. Cada función tiene una parte de la lógica completa, por lo que, para tres elementos, los tres bloques están funcionando. Luego de realizar el cálculo de control, se llama a la estación manual-automático de la válvula de agua.

El control de un elemento se realiza con base a la compensación de presión de domo y al PID de nivel de agua. La compensación lo que hace es escalar la presión de domo a un valor entre los rangos especificados por el usuario. Si está desactivada, se copia un 1 a la constante de compensación. Luego, los bloques de PID calculan el valor automático necesario. Si el tipo de control usado es estrictamente de un elemento, la salida del PID de nivel de agua es copiada a la entrada de la estación de la válvula de agua.

El control a dos elementos agrega la lógica de flujo de vapor a la de un elemento. Contiene el bloque de cálculo de flujo másico de vapor, en caso de que el medidor sea por diferencial de presión. Esta característica no funciona debido a que las ecuaciones para el cálculo deben verificarse, por lo tanto, el control propuesto en este trabajo solo sirve con medidores de flujo másico. El flujo másico es escalado de 0 a 100 según lo haya definido el usuario, y es sumado a la salida del PID de nivel de agua. Esta suma es limitada de 0 a 100 y, si el control es estrictamente de dos elementos, el valor de esta suma es copiado a la entrada de la estación manual-automático de la válvula de agua.

El control a tres elementos agrega el flujo másico de agua. Se puede habilitar el cálculo en caso de que el medidor no sea másico, aunque, al igual que el flujo de vapor, el sistema actualmente solo funciona con medidores directos de flujo másico. Este flujo es la entrada de un PID que permite determinar el valor de apertura de la válvula de agua. Si el modo es remoto, la consigna es la salida del control de dos elementos, la cual es escalada de 0 a 100 al rango de operación del flujo másico de agua. Si el tipo de control es estrictamente de tres elementos, la entrada de la estación de válvula de agua es igual a la salida del PID de flujo de agua.

El control de presión de hogar consiste en una lógica más simple que solo incorpora un PID. El bloque de control de presión llama al bloque de control de inducido, el cual es el que contiene el PID. Luego, la salida de este PID es usada en la entrada de la estación de inducido, la cual es caracterizada según los datos especificados por el usuario.

El programa de IOs digitales contiene la lógica necesaria para las entradas y salidas digitales. Las entradas se copian a un bit de memoria para que puedan ser leídas por la pantalla. Para las salidas, si se cumple una condición de bajo oxígeno, de muy bajo nivel de agua o la desviación de los actuadores es muy alta, se activa la salida de disparo de caldera.

El siguiente programa es el de eficiencia, el cual se encarga de realizar el cálculo en línea. El método escogido para este cálculo fue el método simplificado de pérdidas de calor. Es necesario contar con la temperatura de los gases en la chimenea, la temperatura del aire, el tipo de combustible, el flujo másico de vapor y la capacidad de la caldera. Este método requiere de una gráfica para el cálculo de las pérdidas por radiación, por lo que se determinó una función con base a la gráfica de la figura 2.14. Los datos tomados de esta gráfica se muestran en la tabla 3.14.

Tabla 3. 14. Datos de la gráfica de las pérdidas por radiación en función de la capacidad de la caldera.

% de la capacidad	% de pérdida
8	14
17	8
24	6.2
32	4.8
48	3.1
56	2.6
68	2
76	1.7
88	1.6
100	1.4

Las pérdidas por radiación pueden ser determinadas con base a la siguiente ecuación:

$$R = \frac{81.9061}{C^{0.831569}} \quad (23)$$

Donde R son las pérdidas por radiación y C es la capacidad de la caldera.

La ecuación (23) junto con la ecuación (17) fueron implementadas para el cálculo de la eficiencia. Las funciones de cálculo de flujo másico de vapor y de agua se agregaron para en un futuro realizar la conversión de diferencial de presión a flujo másico.

Capítulo 4

Verificación del sistema

La verificación de este trabajo se realizó por medio de una simulación del proceso de combustión y de la transferencia de calor hacia el agua en la caldera. El control de presión de horno no se tomó en cuenta en esta simulación. Tampoco se consideró el efecto de hinchazón y encogimiento en el nivel de domo. En las secciones de este capítulo se describe la lógica utilizada para la simulación, el método con el que se implementó y los resultados obtenidos.

En la primera sección se detallan los fundamentos teóricos y las ecuaciones usadas para los cálculos de la simulación. La segunda sección describe el programa utilizado y las suposiciones realizadas para la implementación de la simulación. En la sección de resultados se discute el comportamiento del control durante la simulación.

4.1 Modelo de la simulación

El modelo de simulación propuesto se basa en una simplificación del balance de masa y energía dentro de la caldera. La cantidad de energía que entra a la caldera depende solo del combustible y del aire, la cual es transferida hacia el domo de acuerdo a una eficiencia en la combustión y a un porcentaje de pérdidas por los factores descritos en el capítulo 2. Esta

energía es usada para calentar el agua hasta el punto de saturación, a partir del cual toda la energía agregada es usada para evaporar el agua. En el agua, existen pérdidas debido a la transferencia con las partes más frías del domo, por lo que se considera que el sistema no es adiabático. La presión dentro del domo es calculada con base a la cantidad de vapor y al volumen del domo que no contiene agua.

Para calcular el calor generado, se asumió un poder calorífico constante en el combustible. Los poderes caloríficos fueron tomados de la tabla 2.2, la cual es una recopilación hecha por Dukelow [5] de estos valores para diferentes combustibles. La cantidad de calor teórico del combustible puede ser determinado con base a la siguiente ecuación:

$$Q_{teórico} = C_{combustible} * m_{combustible} \quad (24)$$

El flujo de combustible hacia la caldera puede ser determinado usando el flujo máximo de combustible, la apertura de la válvula y la densidad del combustible, asumiendo que el flujo es lineal con respecto a la válvula, de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{combustible} = \frac{\% Válvula}{100} * \dot{m}_{Max Combustible} \quad (25)$$

La cantidad de oxígeno en los gases de combustión depende del flujo de aire forzado y de la eficiencia de la combustión. Asumiendo que en el aire hay 21% de oxígeno, la cantidad de oxígeno puede ser calculada de la siguiente manera:

$$m_{O_2} = m_{aire} * 0.21 \quad (26)$$

Para calcular la cantidad de oxígeno requerido en la combustión se asumen las concentraciones de compuestos mostradas en las tablas 4.1 y 4.2. Estos datos fueron recopilados por Dukelow [5] de acuerdo al lugar del análisis para el gas natural y al número de fueloil.

Tabla 4. 1. Concentraciones de compuestos en gas natural [5].

Compuesto	% de volumen	
	Pennsylvania	Carolina del Sur
CH ₄ (Metano)	83.40	84.00
C ₂ H ₆ (Etano)	15.80	14.80
CO ₂ (Dióxido de carbono)	0	0.70
N ₂ (Nitrógeno)	0.80	0.50

Tabla 4. 2. Concentraciones de compuestos en fueloil

Compuesto	% de peso	
	No. 2	No. 6
C (Carbono)	86.1	86.5
H ₂ (Etano)	12.8	10.3
S (Sulfuro)	1.0	3.2
N ₂ (Nitrógeno)	0.1	0

Con base a estas tablas y a la tabla 2.1, es posible determinar la cantidad de oxígeno requerida a partir de los compuestos presentes usando la siguiente formula:

$$m_{O_2 \text{ requerido}} = \left(\frac{\%CH_4}{16} * 64 + \frac{\%C_2H_6}{60} * 224 \right) * m_{fueloil \text{ No.2}} \quad (27)$$

$$m_{O_2 \text{ requerido}} = \left(\frac{0.834}{16} * 64 + \frac{0.158}{60} * 224 \right) * m_{fueloil \text{ No.2}} \quad (28)$$

$$m_{O_2 \text{ requerido}} = 3.93 * m_{fueloil \text{ No.2}} \quad (29)$$

Usando la ecuación 29 junto con la cantidad de oxígeno presente, se puede calcular la eficiencia de la combustión de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\%Efic. \text{ Combustión} = \frac{m_{O_2}}{m_{O_2 \text{ requerido}}} * 100 \quad (30)$$

Siendo la eficiencia de la combustión máximo un 100%, la cantidad de oxígeno en los gases de combustión se puede calcular de la siguiente manera:

$$m_{O_2 \text{ gases}} = m_{O_2} - m_{O_2 \text{ requerido}} * \frac{\%Efic. \text{ Combustión}}{100} \quad (31)$$

El porcentaje de oxígeno puede ser determinado dividiendo la masa de oxígeno en los gases entre la masa de los gases. Con el objetivo de simplificar el modelo de la simulación, se asume que la masa de los gases de combustión se puede determinar usando la siguiente ecuación:

$$m_{gases} = m_{aire} - m_{O_2 \text{ requerido}} * \frac{\%Efic. \text{ Combustión}}{100} \quad (32)$$

Por lo tanto, el porcentaje de oxígeno se puede calcular de la siguiente manera:

$$\%Oxígeno = \frac{m_{O_2 \text{ gases}}}{m_{gases}} * 100 \quad (33)$$

Las ecuaciones mostradas hasta este punto describen el proceso de combustión de manera general y simplificada. Para completar el modelo, es necesario tomar en cuenta la generación de vapor. Esta generación depende principalmente del calor generado que es transferido hacia el domo, el cual se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q_{generado} = Q_{teórico} * \frac{(\%Efic. Combustión * (1 - \%Perdidas))}{100} \quad (34)$$

Este calor es usado para calentar el agua hasta el punto de saturación y luego para evaporarla. El calor sensible para llegar al punto de saturación y el calor latente se pueden calcular con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{sensible} = m_{agua} * c_{agua} * \Delta T \quad (35)$$

$$Q_{latente} = m_{agua} * L_{agua} \quad (36)$$

Con base a la ecuación 36, la cantidad de vapor producida de acuerdo al calor generado puede ser calculada con la siguiente fórmula:

$$m_{vapor} = \frac{Q_{generado}}{L_{agua}} \quad (37)$$

La ecuación 37 se puede usar siempre y cuando la temperatura del agua este en el punto de saturación.

La cantidad de agua dentro del domo depende del flujo de agua de alimentación y del flujo de vapor generado, y puede ser calculada con base a la siguiente ecuación:

$$m_{agua\ domo} = m_{agua\ domo} + m_{agua\ alimentación} - m_{vapor\ generado} \quad (38)$$

El nivel de agua dentro del domo depende del volumen de agua. La relación entre el nivel de agua y el volumen no es lineal, y para determinarlo debe de calcularse el área del segmento circular que forma el agua en la pared circular del domo, asumiendo que es cilíndrico. El área del segmento debe determinarse por medio de iteraciones, las cuales pueden tomar un tiempo considerable sobre la ejecución del programa, por lo que se decidió modelar el nivel de agua de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\%Nivel = \frac{V_{agua\ domo}}{V_{domo}} * 100 \quad (39)$$

$$V_{agua\ domo} = \frac{m_{agua\ domo}}{\rho_{agua}} \quad (40)$$

Donde la densidad del agua puede ser calculada con la ecuación 22.

La presión dentro del domo puede ser determinada a partir de la ecuación para gases ideales de la siguiente manera:

$$P = \frac{m_{vapor}}{V_{vapor}M} RT_{vapor} \quad (41)$$

Donde P es la presión, m es la masa total de vapor, V_{vapor} es el volumen que ocupa el vapor en el domo, M es la masa molar del vapor, R es la constante universal de los gases y T_{vapor} es la temperatura a la que se encuentra el vapor. Para esta simulación, se asume que el vapor se encuentra a la temperatura de saturación, por lo tanto, puede aproximarse con la relación de Clausius-Clapeyron de la siguiente manera:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{L_{agua}}{R_{evaporación}} * \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (42)$$

$$T_2 = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{R_{vapor}}{L_{evaporación}} * \ln \frac{P_2}{P_1} \right)^{-1} \quad (43)$$

Donde T_1 , L_{agua} y P_1 son la temperatura, calor latente y presión en un punto específico de saturación. El punto seleccionado para esta simulación fue a condiciones atmosféricas, con valores de $P_1=101385$ Pa, $T_1=373.15$ K y $L_{evaporación}=40660$ J/(mol.K). R_{vapor} es igual a 8.314 J/mol, de acuerdo a la constante universal de gases.

La cantidad de vapor dentro del domo depende de la cantidad de vapor generado por calor y la cantidad de vapor que demanda la planta, y puede ser calculada de la siguiente manera:

$$m_{vapor\ domo} = m_{vapor\ domo} + m_{vapor\ generado} - m_{vapor\ demanda} \quad (44)$$

4.2 Programa de simulación

En general, el estado del domo de una caldera depende de la presión y de la temperatura en el agua y el vapor. Usando las tablas de propiedades termodinámicas mostradas en la sección de apéndices es posible determinar el calor latente de evaporación y la densidad de un fluido. También se pueden determinar estas propiedades usando programas de computadora con algoritmos como los propuestos por IAPWS (International Association of the Properties of Water and Steam) [17]. La desventaja de estos programas es que pueden tomar un tiempo de ejecución considerable en relación a la ejecución del programa, por lo que el calor latente de evaporación y la densidad del vapor se asumieron constantes.

Para el modelo implementado primero se asumen algunas condiciones iniciales. La temperatura del agua de alimentación se asume a 60 °C, la densidad del vapor se asume a 3.419 kg/m³ (densidad a 100 psi) y el nivel inicial es de 65%. Las características del domo son 4.572 m de longitud y 0.9144 m de diámetro usado. La Presión inicial dentro del domo es igual a la presión atmosférica, asumida de 101325 Pa. Las características de operación de esta caldera son 100 psi de vapor y una capacidad máxima de 20 000 lb/hr.

La implementación se hizo en un bloque cíclico que corre a 50 ms dentro del mismo PLC del sistema de control. El tiempo de ejecución del programa debe ser constante para poder calcular la cantidad de masa presente en la caldera por cada ejecución. Para calcular la cantidad de combustible por ciclo se asumió una alimentación máxima de combustible de 500 gph (1.89271 m³/hr). Si se usa fueloil No. 2, el cual tiene una densidad de 971.8 kg/m³ [17], el flujo másico máximo es de 1839.34 kg/hr (4055.05 lb/hr). Para cada ciclo, esto es un flujo de 0.02554633 kg/50 ms. Por lo tanto, la cantidad de combustible dentro de la caldera puede ser determinada sustituyendo este valor en la ecuación 25:

$$m_{combustible} = \% Válvula * 0.0002554633 \quad (45)$$

Para determinar el valor de control de aire forzado se debe calcular el oxígeno requerido. De acuerdo a la ecuación 29, el oxígeno requerido para la cantidad máxima de combustible es de 0.0850693 kg. Considerando que el aire tiene 21% de oxígeno, la cantidad de aire requerido es de 0.4050918 kg. Si se asume que el ventilador es capaz de generar un 20% más sobre este requerimiento, la cantidad máxima de aire es 0.4861102 kg. De acuerdo a estos datos, la cantidad de aire presente en la caldera puede ser calculada de la siguiente manera:

$$m_{aire} = \% Forzado * 0.004861102 \quad (46)$$

Usando las ecuaciones 29, 30, 31, 32 y 33, es posible calcular la cantidad de oxígeno presente, la cantidad de oxígeno requerido, la eficiencia de la combustión y la cantidad de oxígeno en los gases de combustión. La mezcla de aire y combustible no siempre es 100% perfecta, por lo que se limitó la eficiencia a un valor máximo de 95%.

El calor generado puede ser calculado con base a la ecuación 34. No todo este calor es transferido hacia el agua, existen pérdidas como las descritas en la sección 2.2.6 que afectan la cantidad final de calor que es transferida. Todas estas pérdidas fueron asumidas constantes y con un valor de 8%. Para las pérdidas por calor sensible del aire, se asumió un máximo de 6% proporcional al flujo de aire forzado. La eficiencia de una caldera ronda entre 80% y 85%, por lo que la suma de estas pérdidas debe estar entre un 10% y un 15%.

Dentro de las principales pérdidas de calor, las más importantes son las usadas para aumentar la temperatura de las masas, es decir, las pérdidas por calor sensible. Las pérdidas por calor latente pueden ser altas dependiendo de la humedad del aire y de la cantidad de hidrógenos que tiene el combustible. Por lo tanto, el 8% asumido constante en realidad no lo es, y varía según la composición del aire y combustible, y de la calidad de la combustión.

También existen pérdidas por el escape de calor en el agua de purga, pero se asumió que la purga realizada no es constante, sino que se realiza periódicamente y en un tiempo corto en comparación con la operación de la caldera. Por lo tanto, no se asumió esta pérdida en el modelo.

Para determinar que parte del calor generado se convierte en calor sensible o en calor latente, en cada ciclo de ejecución se compara el calor sensible necesario para llegar al punto de saturación con el calor en el agua. Si el calor sensible es mayor que el calor del agua, el calor

producido es sumado al calor del agua hasta que alcance el calor sensible. Una vez alcanzado este valor, el calor generado es usado para producir vapor. La transferencia de calor a través de las superficies de calentamiento se asumió perfecta e instantánea, aunque esta debe tener un retardo dependiendo de las características del material. Para el cálculo del calor sensible, la masa que es calentada es aquella que se encuentra más cerca de la superficie de calentamiento. En esta simulación se asumió que esta masa es un 20% de la masa total en el domo. Para el agua, la capacidad calorífica es de 4.1813 kJ/(kg.K) y el calor latente es de 1945.24 kJ/kg o 40660 J/mol (a 100 psi).

La implementación de esta simulación se hizo en lenguaje estructurado, ya que este lenguaje permite visualizar más líneas de código en un menor espacio que en todos los demás. El programa implementado para la simulación puede verse en los apéndices de la figura A.22.

4.3 Resultados de la simulación

Los resultados fueron obtenidos usando el SCADA Ignition de Inductive Automation, el cual tiene una versión de prueba que solamente debe reiniciarse cada dos horas para seguir usándose. Para iniciar la simulación, se realizó una secuencia de arranque manual de la caldera. El domo debe estar lleno al valor especificado por el fabricante, en este caso 65%. La válvula de combustible y el actuador de aire forzado deben abrirse a un valor determinado para generar presión. En este punto, el control de nivel de agua debe ponerse en automático y la consigna debe ser igual al valor de nivel dentro de la caldera.

Cuando la presión ha alcanzado el 50% del valor de operación, en este caso 50 psi, se genera una demanda de flujo de vapor que no sea demasiado grande para que la presión disminuya. Para la simulación, se usó una demanda inicial de 5000 lb/hr. Una vez que la presión alcanza el 75% del valor deseado, el control de combustión puede ponerse en automático.

Este procedimiento es el que se realiza normalmente en todo tipo de calderas, donde se maneja manualmente el equipo para llevarlo a una zona de estabilidad. Una vez en esta zona, se activa el control automático para que siga regulando el proceso.

Los resultados obtenidos son los que se muestran en las figuras 4.1 a la 4.12. Estas gráficas fueron obtenidas realizando las pruebas de los tres controles de nivel para cada uno de los controles de combustión. El tiempo total de la gráfica es de 30 minutos, durante los primeros 10 minutos se genera una demanda constante de 5000 lb/hr, luego se genera una demanda variable sinusoidal entre 12 000 y 15 000 lb/hr, con un período de 10 minutos. Por último, se cambia la demanda a un valor constante de 10 000 lb/hr.

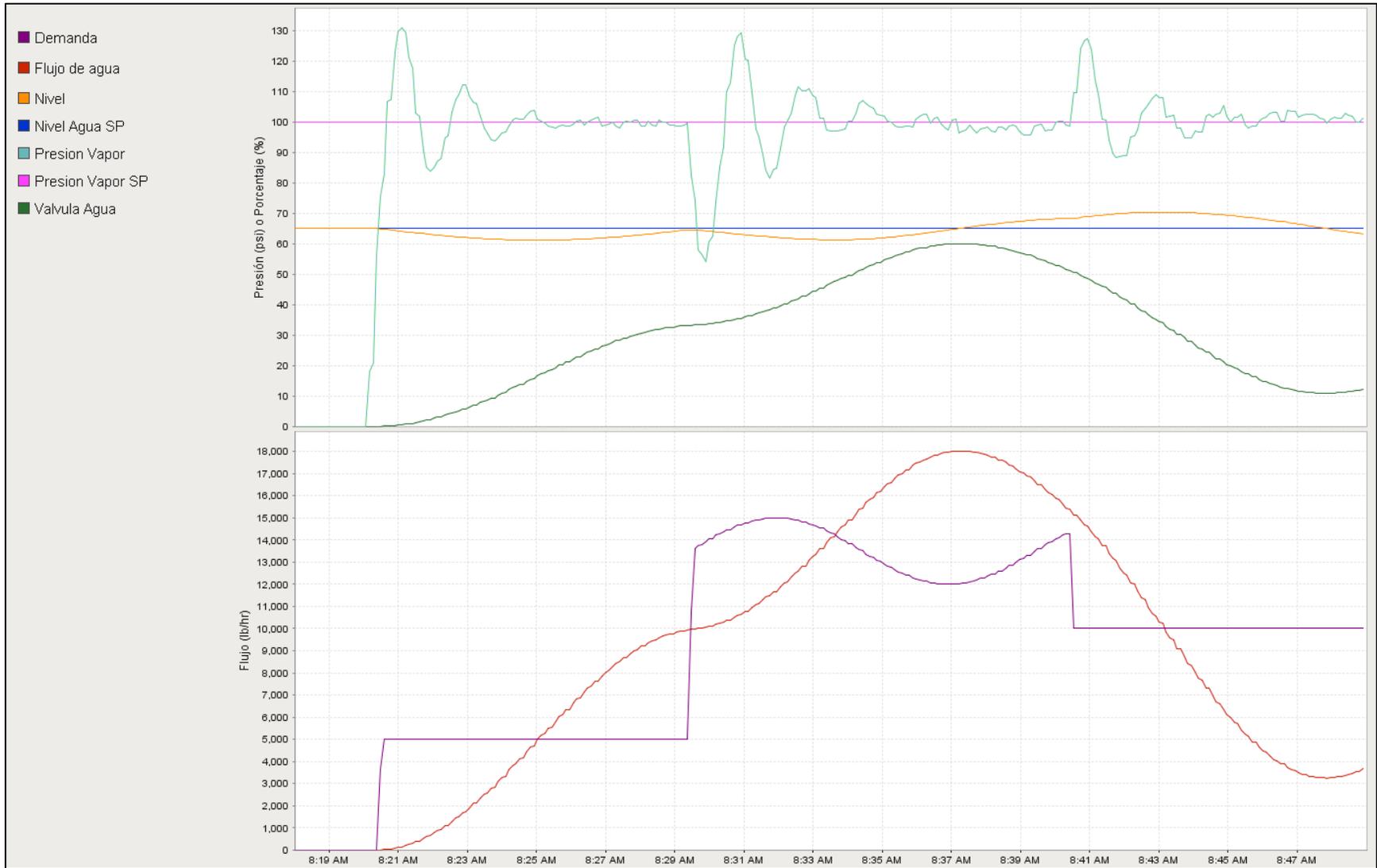


Figura 4. 1. Simulación del control de nivel por un elemento usando el control de combustión de un eje. (Tomado de Ignition SCADA)



Figura 4. 2. Simulación del control de nivel por un elemento usando el control de combustión de dos actuadores. (Tomado de Ignition SCADA)

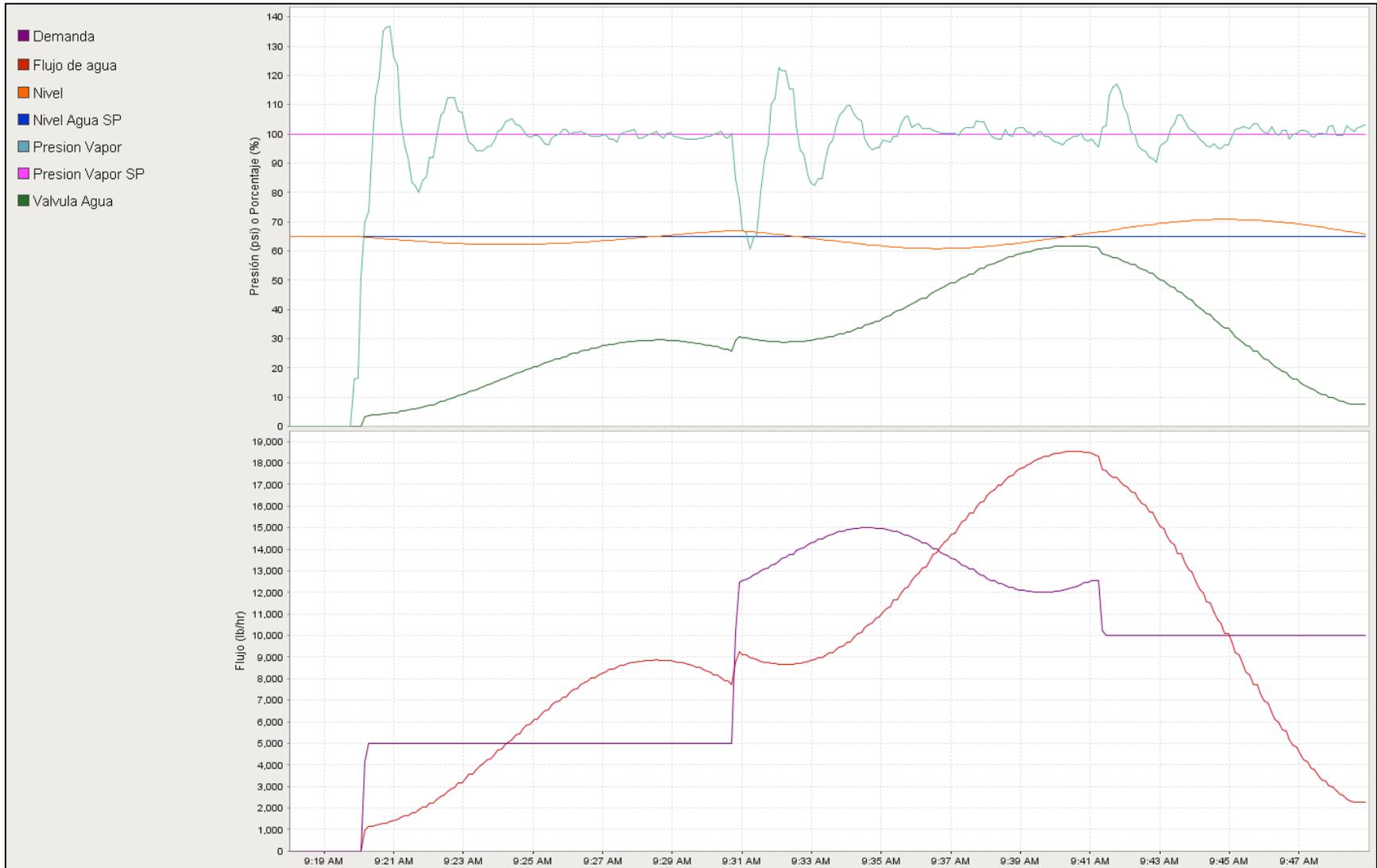


Figura 4. 3. Simulación del control de nivel por dos elementos usando el control de combustión de un eje. (Tomado de Ignition SCADA)

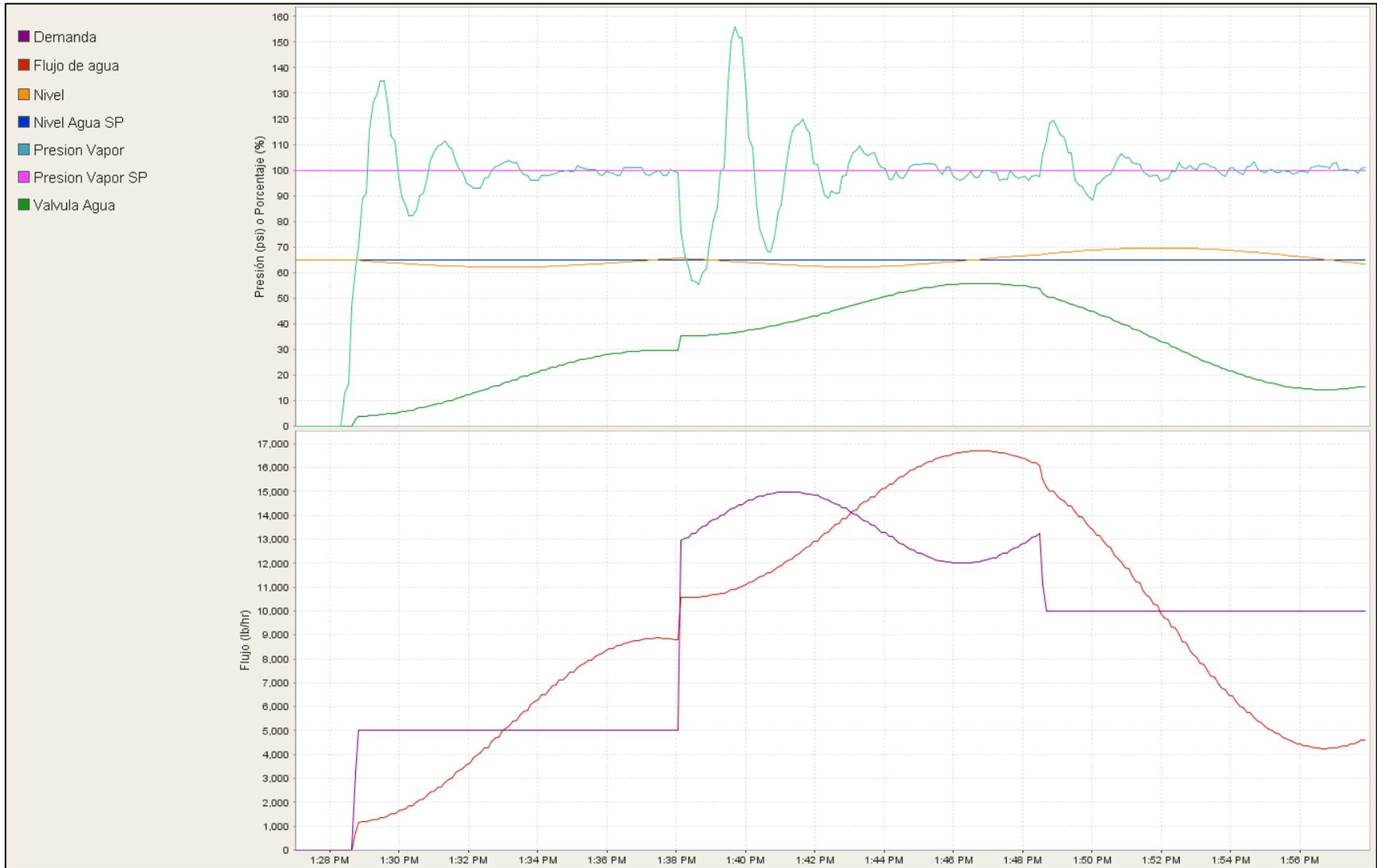


Figura 4. 4. Simulación del control de nivel por dos elementos usando el control de combustión de dos actuadores. (Tomado de Ignition SCADA)



Figura 4. 5. Simulación del control de nivel por tres elementos usando el control de combustión de un eje. (Tomado de Ignition SCADA)

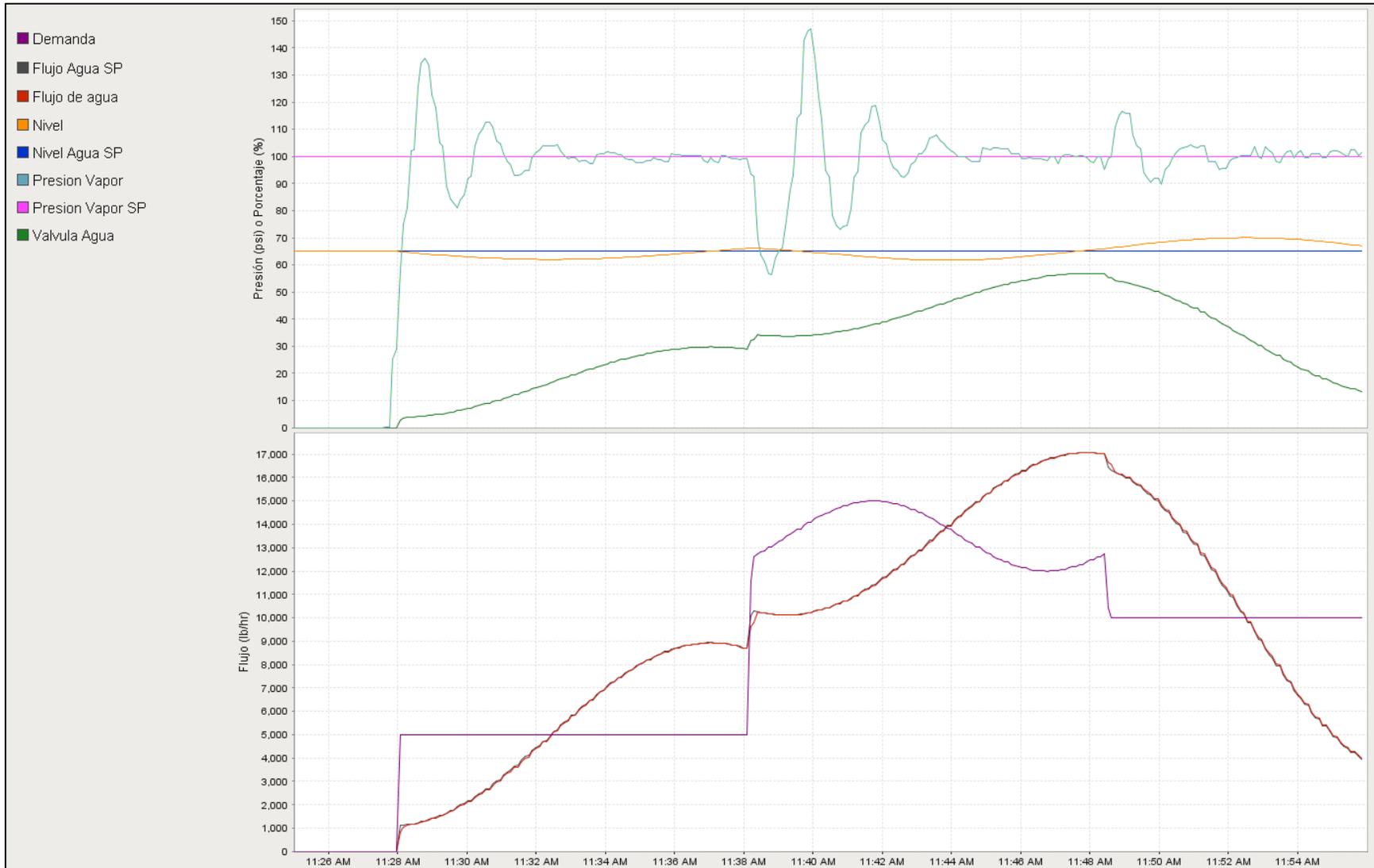


Figura 4. 6. Simulación del control de nivel por tres elementos usando el control de combustión de dos actuadores. (Tomado de Ignition SCADA)



Figura 4. 7. Simulación del control de combustión de un eje usando el control de nivel de un elemento. (Tomado de Ignition SCADA)

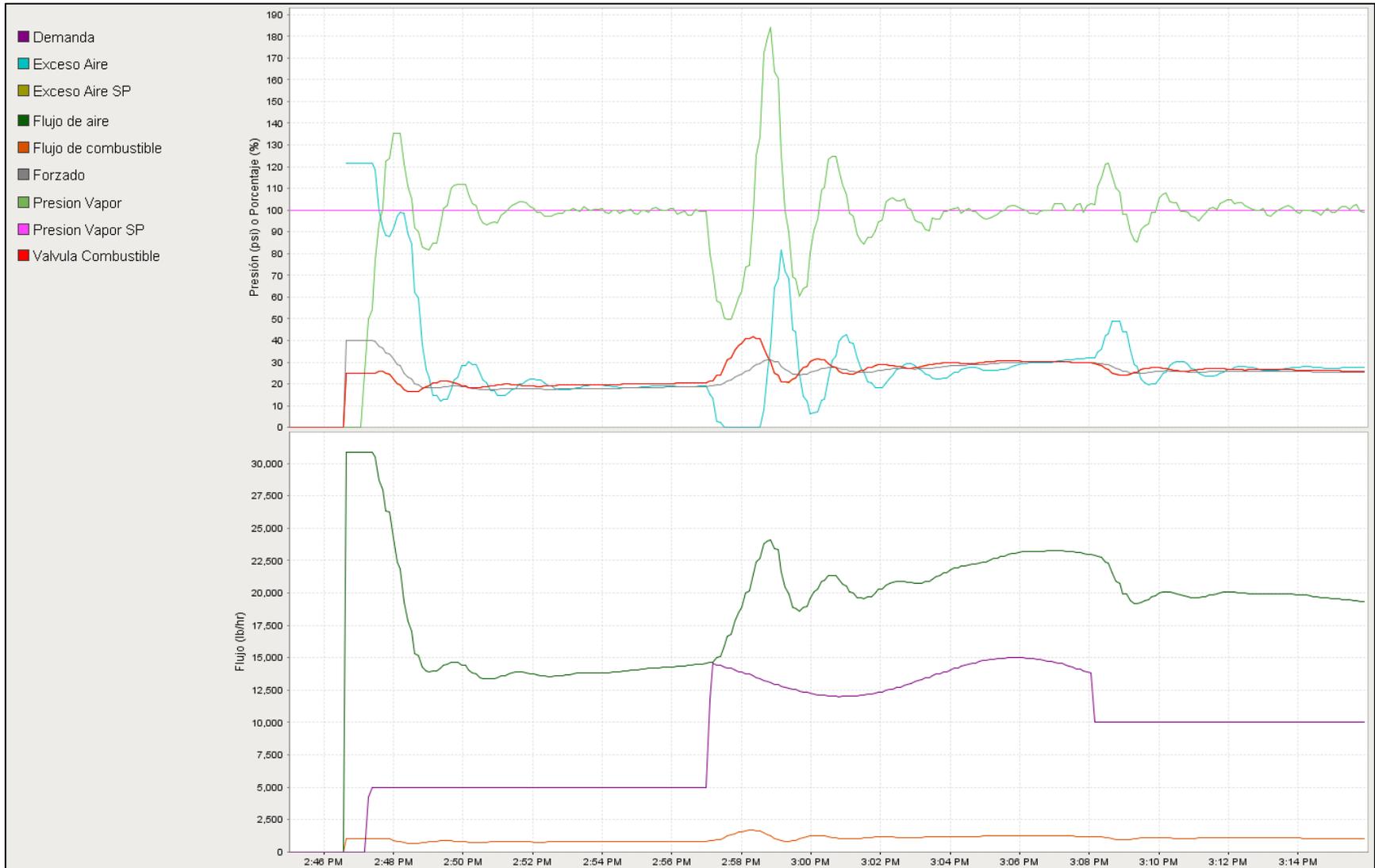


Figura 4. 8. Simulación del control de combustión de dos actuadores usando el control de nivel de un elemento. (Tomado de Ignition SCADA)

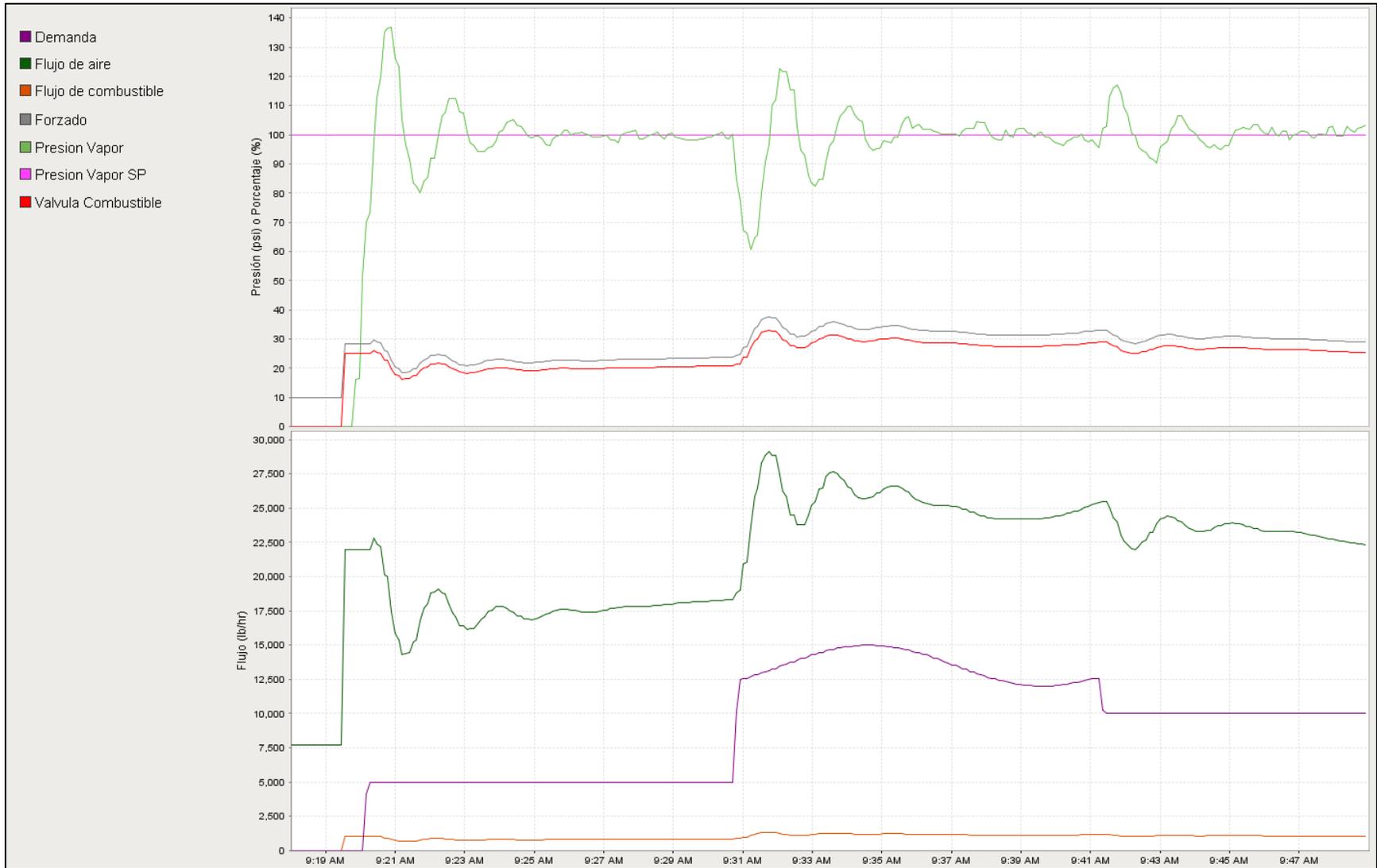


Figura 4. 9. Simulación del control de combustión de un eje usando el control de nivel de dos elementos. (Tomado de Ignition SCADA)



Figura 4. 10. Simulación del control de combustión de dos actuadores usando el control de nivel de dos elementos. (Tomado de Ignition SCADA)



Figura 4. 11. Simulación del control de combustión de un eje usando el control de nivel de tres elementos. (Tomado de Ignition SCADA)



Figura 4. 12. Simulación del control de combustión de dos actuadores usando el control de nivel de tres elementos. (Tomado de Ignition SCADA)

En la simulación se muestra que para el control de nivel de agua la estabilidad aumenta entre más elementos se agregan. La diferencia entre cada uno de los controles es muy poca, de un 2% aproximadamente, debido principalmente a que la simulación se comporta relativamente estable a este nivel de agua. Además, el hecho de que el sistema inicie en el valor de la consigna ayuda a que el sistema no se desestabilice. El uso de un control de combustión diferente no afectó en gran medida al control de nivel, ya que la producción de vapor para ambos es muy similar.

En las gráficas del control de combustión se puede ver que el tiempo de estabilización es igual independientemente del tipo de control de nivel de agua. Esto se debe a las pocas perturbaciones en el nivel que se mostraron en la simulación. El control logra estabilizar el sistema independientemente del tipo de demanda. Para la demanda inicial de 5000 lb/hr, se genera un sobreimpulso inicial alto, de alrededor de 135 psi. Esto puede ser un problema dependiendo de las condiciones de operación de una caldera. Es posible obtener un sobreimpulso más bajo haciendo que el control sea más lento llevando manualmente la presión de vapor lo más cerca posible a la consigna.

Este tipo de control no actúa muy bien cuando el cambio en la demanda es muy grande. Por ejemplo, cuando se cambió la demanda de 5000 a 12 500 lb/hr la presión llegó a 60 psi, lo cual representa una caída de hasta el 40% del valor de trabajo. Realizar cambios pequeños y graduales puede tener un mejor comportamiento que un cambio muy grande de manera repentina. El error en estado estacionario es menor a un 5%, lo cual es un buen comportamiento para este tipo de procesos.

El comportamiento del control con dos actuadores tuvo un sobreimpulso mayor que el control por un eje. Esto se debe principalmente a que al inicio se colocó el actuador de forzado a 40% y el de presión de vapor a 25%, con el objetivo de demostrar el funcionamiento del control. El control utilizado no está bien sintonizado, ya que durante el periodo donde la demanda es variable hubo un momento donde el exceso de aire fue cero, lo que indica que hubo pérdidas por una combustión incompleta. Durante este tiempo, el sobreimpulso del control fue de hasta 180 psi.

Los valores de los parámetros de ganancia, tiempo integral y tiempo derivativo de los PIDs se sintonizaron a prueba y error previamente a estas pruebas. Para este tipo de control no es necesario usar la componente derivativa, sin embargo, se implementó en caso de requerir un ajuste más fino. Los parámetros determinados para cada PID se pueden ver en la tabla 4.3.

Tabla 4. 3. Parámetros de sintonización determinado para la simulación.

PID	Ganancia	Tiempo integral
Presión de vapor	0.007	0.9
Exceso de aire	0.004	1
Nivel de agua	0.01	0.4
Flujo de agua	0.001	1

A partir de las gráficas se puede ver que el tiempo de estabilización para la presión de vapor y para el nivel de agua es menor a 10 minutos. Para la presión de vapor, el tiempo de estabilización es de aproximadamente 8 minutos. Para el nivel de agua, las variaciones producidas por el flujo de vapor usado son muy pocas, por lo que el control no se desestabiliza a más de un 10%. Esto se debe principalmente a que las dimensiones del domo simulado son grandes comparadas con el flujo de vapor de la demanda usado. La operación de la caldera simulada funciona de esta forma, ya que un aumento muy grande en la demanda de vapor genera una caída de presión alta que puede desestabilizar el control. Durante las pruebas se determinó que una diferencia mayor a 6 000 lb/hr produce una caída de presión muy alta para la operación de una caldera.

Otros factores que influyen en la poca variación del nivel de domo son la consideración de una densidad de vapor y calor latente constantes. El calor latente disminuye conforme se aumenta la temperatura, mientras que la densidad aumenta, por lo que la cantidad de flujo generado podría ser mayor a la calculada. Aun así, se espera que este error no sea mayor a un 10%, debido a que el calor latente y densidad usados fueron los del vapor en saturación a 100 psi.

De acuerdo a los diferentes tipos de control de nivel, se puede ver que el control a 3 elementos se comporta de una mejor manera que los otros dos cuando la demanda de vapor es variable. En los otros casos, donde la demanda de vapor es discreta, todos los controles se comportan de manera similar.

Capítulo 5

Análisis económico

En este capítulo se aborda el tema del análisis económico del proyecto. La primera sección de este capítulo es acerca del análisis realizado para la selección del controlador e interfaz, los cuales son los componentes más caros del sistema de control. El segundo capítulo trata acerca de la inversión que debió realizar la empresa para el desarrollo del proyecto. La inversión de la empresa abarca el equipo utilizado para las pruebas y la remuneración durante el periodo de desarrollo.

La última sección aborda el tema de la inversión que debe realizar una empresa dueña de una caldera para implementar este sistema. En esta sección se presenta el precio final del sistema de control, el precio de cada instrumento y el precio de la mano de obra por puesta en marcha.

5.1 Selección del controlador e interfaz

Uno de los criterios para escoger estos equipos fue el costo económico en relación a sus características. El controlador y la interfaz representan más del %50 del costo total del sistema de control, por lo que una buena selección es necesaria para disminuir el precio final. Como se mostró en la sección 3.2, se escogieron tres marcas para la selección del equipo de acuerdo a su bajo precio y disponibilidad en para la empresa. En la tabla 5.1 se muestran los precios de cada uno de los equipos considerados.

Tabla 5. 1. Costo de los sistemas de control propuestos.

Marca	Descripción	Cantidad	Precio unidad	Precio
Unitronics	Panel HMI UniStream de 7"	1	\$864.00	\$864.00
	CPU para panel UniStream	1	\$316.00	\$316.00
	Unidad de 8 entradas analógicas no aisladas, UIA-0800N	3	\$184.00	\$552.00
	Unidad de 6 salidas analógicas, UIA-0006	1	\$390.20	\$390.20
	Unidad de 8 entradas digitales y 8 salidas digitales de relé, a 24 V, UID-0808R	1	\$136.00	\$136.00
	Unidad de 16 entradas digitales a 24 V, UID-1600	1	\$114.00	\$114.00
	Total	-	-	\$2372.00
Schneider	Panel Magelis de 7" HMIDT351	1	\$528.68	\$528.68
	Systema operativo de Magelis HMIG3U	1	\$981.23	\$981.23
	Schneider PLC M221 con 24 entradas digitales y 16 salidas digitales, de 100 a 240 V	1	\$455.70	\$455.70
	Unidad de 8 entradas analógicas no aisladas, TM3A18	3	\$120.75	\$362.25
	Unidad de 4 salidas analógicas, TM3AQ4	1	\$126.00	\$126.00
	Total	-	-	\$2453.86
Siemens	Panel Simatic KTP700 Basic	1	\$647.90	\$647.90
	CPU Simatic S7-1200, 1214C AC/DC/RLY, con 14 entradas digitales y 10 salidas digitales a relé, de 24 V, 2 entradas analógicas y 2 salidas analógicas	1	\$327.36	\$327.36
	Unidad de 4 entradas digitales a 24 V, SB1221	1	\$55.80	\$55.80
	Unidad de 8 entradas analógicas no aisladas, SM1231	3	\$316.82	\$950.46
	Unidad de 4 salidas analógicas a 24 V, SM 1232	1	\$327.36	\$327.36
	Total	-	-	\$2308.88

Inicialmente para el equipo Siemens se consideró la interfaz TP700 Comfort, la que cuenta con más variables para registro de datos, capacidad de ventanas emergentes y deslizables, y mayor memoria, a un precio de esta pantalla es de \$983.32. Con este precio, el equipo de Siemens tenía un costo de \$2644.3, lo cual lo colocaba como el más caro de los tres.

Inicialmente se consideró que las características de las tres marcas eran suficientes para implementar el sistema de control, por lo que el equipo Unitronics fue seleccionado por ser el de menor costo. Como se mencionó en la sección 3.2, luego de desarrollar una parte del programa se determinó que este equipo no poseía las características necesarias para la implementación del programa, por lo que se debió considerar otra opción. Se escogió Siemens por su facilidad de programación y porque se sabía que el equipo era capaz de manejar este tipo de controles.

Una vez seleccionado el equipo Siemens, se exploró más a fondo las características de la pantalla KTP700 y se determinó que era posible implementar el programa, por lo que se cambió la interfaz. Este cambio redujo el precio del equipo Siemens y lo colocó como el más barato de los tres. Además de ser el más barato, el PLC 1200 es el más potente.

5.2 Inversión de la empresa

La inversión por parte de la empresa fue muy poca, debido a que el proyecto fue realizado principalmente como diseño y no como implementación. La compra de equipos como el PLC, los módulos, la interfaz HMI, los equipos del gabinete y gabinete no fue realizada, sino que se usó el equipo existente en la bodega. El equipo usado para la programación fue la computadora marca Siemens modelo Simatic PG, la cual cuenta con una licencia del software TIA Portal V13 y WinCC profesional.

El costo de inversión de la empresa fue de \$400 mensuales por la remuneración para el desarrollo. El proyecto fue desarrollado en un plazo de 4 meses, por lo que la remuneración total fue de \$1600. Para una empresa que no cuenta con ninguno de los equipos ni softwares utilizados, el costo de desarrollo de este proyecto es de \$7377.24, de acuerdo a los costos presentados en la tabla 5.2.

Tabla 5. 2. Inversión por parte de la empresa.

Descripción del costo	Precio
PLC 1212C AC/DC/RLY	\$216.38
Licencia de TIA Portal V13 Versión profesional	\$3128.52
Licencia de WinCC Versión profesional	\$2422.34
Cable de red tipo UTP	\$10.00
Remuneración por desarrollo	\$1600.00
	\$7377.24

5.3 Inversión por la implementación

El diseño del sistema de control comprende un gabinete pre armado y pre configurado junto con toda la instrumentación necesaria. El costo total del panel de control incluye el costo de todo el equipo usado, el armado y la puesta en marcha. El armado de un panel de control se hace por subcontrato y tiene un costo de \$175 para un panel de este tamaño. El costo de la puesta en marcha incluye dos días de un ingeniero, los cuales le cuestan a la empresa \$6 por hora, para un ingeniero con salario mínimo. A este valor se le debe sumar un costo administrativo, gastos por transporte al lugar y alimentación, los cuales suman \$15 por hora. En total, el costo del sistema de control por parte de la empresa es de \$3535.87. En la tabla 5.3 se muestran todos los costos tomados en cuenta para el armado y puesta en marcha del sistema.

Tabla 5. 3. Costos de armado del sistema.

Descripción	Código	Cantidad	Precio unidad	Precio
Panel Simatic KTP700 Basic	6AV2123-2GB03-0AX0	1	\$647.90	\$647.90
CPU 1214C AC/DC/RLY, con 14 entradas digitales y 10 salidas digitales a relé de 24 V, 2 entradas analógicas y 2 salidas analógicas	6ES7214-1BG40-0XB0	1	\$327.36	\$327.36
Unidad de 4 entradas digitales a 24 V, SB1221	6ES7221-3BD30-0XB0	1	\$55.80	\$55.80
Unidad de 8 entradas analógicas no aisladas, SM1231	6ES7231-4HF32-0XB0	3	\$316.82	\$950.46
Unidad de 4 salidas analógicas a 24 V, SM 1232	6ES7232-4HD32-0XB0	1	\$327.36	\$327.36
Fuente de alimentación Phoenix Contact TRIO 24VDC/5ª	TRIO-PS-2G/1AC/24DC/5-2903148	1	\$163.00	\$163.00
Gabinete Huffman de 700x500x250 mm	M700x500x250G	1	\$140.00	\$140.00
Borne Allen-Bradley 2.5 mm	1492J3	34	\$0.67	\$22.78
Relé y conector hembra de tornillo Schneider, 24VDC	RSL1PVBU	1	\$12.35	\$12.35
Relé y conector hembra de tornillo Schneider, 110 VAC/VDC	RSL1PVFU	18	\$12.35	\$222.30
Supresor de transientes BKS, línea y neutro	BKS-A-2 Polos	1	\$105.29	\$131.61
Interruptor termo magnético Schneider de 6 A	A9F74106	1	\$14.65	\$14.65
Botón de emergencia Schneider	XB4 BS542	1	\$36.00	\$36.00
Canaleta EFAPEL 40x40 mm/2 m	13020	4	\$5.45	\$21.80
Riel DIN acero galvanizado amarillo 2 m	TS-35/7.5-2.0m	1	\$4.60	\$4.60
Anillo numerado KSS #0 para cable Φ3-4.2 mm	EC1-0YM	500	\$0.015	\$7.50
Cable flexible 1.5x1 mm ² 500V Negro	H05Z1-KNG	20	\$0.27	\$5.40
Costo de armado del gabinete		1	\$175	\$175
Costo de puesta en marcha		2	\$135	\$270
				\$3535.87

El precio de uno de estos controles puede estar en el rango de \$4500 a \$5000, para lo cual el retorno de la inversión hecha por la empresa sería a la venta de dos de estos equipos. El precio todavía debe determinarse, con base a las pruebas en una caldera y al ahorro generado en el combustible.

La selección de toda la instrumentación no se realizó con base a un análisis económico, debido a que las marcas que representa la empresa para el área de instrumentación no son muy variadas. Los equipos en los que si se hizo una selección por precio fueron el analizador de oxígeno, los actuadores de dâmpen, las válvulas de control y los sensores de temperatura.

Los costos de la instrumentación varían dependiendo de las características del instrumento escogido. Se estimó el precio de cada instrumento asumiendo que es el más caro de las opciones propuestas. Para los equipos del control de combustión, el costo es de \$25 500, siendo el más caro de los tres controles. En general, el equipo necesario para la

implementación es un equipo caro, siendo el más barato el sensor de presión de vapor a \$2000. Los analizadores de oxígeno propuestos fueron de las marcas ABB y Michell, siendo el de ABB más robusto, pero más caro. La ventaja del analizador de Michell es que tiene un costo de \$1750, el cual es considerablemente más barato que el de ABB.

Las válvulas de control disponibles son la válvula de globo Valtek o la válvula de bola Dwyer. El equipo de Valtek es más robusto y más caro, con un precio de \$3500, mientras que las de Dwyer se usan para aplicaciones en calderas pequeñas o medianas y tienen un costo de hasta \$1300. El actuador de dámper puede ser ACT-MD o DDD, ambos de Dwyer. La selección de estos depende del torque requerido para, siendo el equipo ACT-MD más capaz que el DDD. Los sensores de temperatura considerados pueden ser del tipo RTD o termocupla. En general, la termocupla puede ser usada para todas las mediciones, con el objetivo de reducir costos, pero la RTD es superior en cuanto a precisión. En la tabla 5.4 se muestran los precios aproximados de cada uno de estos instrumentos.

Tabla 5. 4. Precios de la instrumentación para el control de combustión.

Descripción	Modelo	Precio
Sensor de presión de vapor	266GDT de ABB	\$2000
Analizador de oxígeno en gases de combustión	AZ20 de ABB	\$7000
Flujo de combustible	FCB430 de ABB	\$9000
Válvula de combustible	GLS de Valtek	\$3500
Actuador de dámper de aire forzado	ACT-MD05 de Dwyer	\$1300
Variador de frecuencia de aire forzado	Altivar de Schneider	\$5000
		\$27800.00

Para el control de nivel, el costo total es de \$15 400. Los instrumentos más caros son el sensor de presión de domo y el medidor de flujo de vapor. En la tabla 5.5 se muestran los precios de estos equipos.

Tabla 5. 5. Precios de la instrumentación para el control de nivel de domo.

Descripción	Equipo	Precio
Sensor de nivel de domo	266DRH de ABB	\$2000
Sensor de presión de domo	266GDT de ABB	\$2000
Flujo de vapor	FSV430 de ABB	\$4000
Temperatura de vapor	TSP121 de ABB	\$700
Flujo de agua de alimentación	FPD500 de ABB	\$3000
Temperatura de agua de alimentación	PFH7069 de Herten	\$200
Válvula de alimentación de agua	GLS de Valtek	\$3500
		\$15400.00

El control de presión de hogar es considerablemente más barato que los demás, debido a que necesita menos equipo. El precio de este sistema tiene un costo de \$8 500. En la tabla 5.6 se muestra el precio de cada uno de los equipos necesarios.

Tabla 5. 6. Precios de la instrumentación para el control de presión de hogar.

Descripción	Equipo	Precio
Sensor de presión de hogar	266DSH de ABB	\$1500
Variador de frecuencia de aire inducido	Altivar de Schneider	\$5000
Actuador de dámper de aire inducido	ACT-MD05 de Dwyer	\$1300
		\$8500.00

Para el monitoreo de la caldera, se necesita hacer una inversión de \$5700. Estos instrumentos son más baratos debido a que son solo medidores de temperatura y de presión. En la tabla 5.7 se muestra el costo de los equipos de solo monitoreo.

Tabla 5. 7. Precios de la instrumentación de solo monitoreo.

Descripción	Equipo	Precio
Temperatura de combustible	TSP121 de ABB	\$700
Presión de combustible	266GDT de ABB	\$2000
Presión de atomización	266GDT de ABB	\$2000
Temperatura de chimenea	TSP121 de ABB	\$700
Temperatura de aire	PFH7069 de Herten	\$300
		\$5700.00

De acuerdo a los precios mostrados en este capítulo, la implementación de un sistema de control para una caldera puede costar desde \$25 000, para un control solo de combustión sin ajuste de oxígeno, hasta \$60 000 aproximadamente. Actualmente, la mayoría de calderas ya cuentan con muchos de los equipos de medición y de control, por lo que el precio de la implementación puede ser menor. Considerando un precio entre \$4500 a \$5000 para el sistema desarrollado, la implementación de estos equipos es económicamente viable.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño de un sistema de control de combustión, nivel de agua y presión de hogar para una caldera. Se logró determinar las principales variables que afectan la eficiencia de una caldera junto con las principales lógicas de control usadas comúnmente. El programa implementado logró estabilizar la caldera dentro de la simulación realizada, lo que confirma su funcionalidad para una futura implementación. No se cumplió con el objetivo de realizar un plan de mantenimiento para el equipo ni se cumplió con el aspecto de probar la generalidad del sistema de control para calderas con diferentes características.

Según la simulación realizada, el sistema puede realizar el control ante diferentes cambios en la caldera. El tiempo de estabilización ante un cambio brusco de la demanda puede ser de hasta 10 minutos, mientras que la variabilidad del nivel es menor a un 10%, lo cual es aceptable para una caldera. El ahorro en el consumo de combustible no puede ser determinado por medio de una simulación, ya que debe medirse en un periodo largo.

El sistema diseñado cuenta con varias ventajas sobre otros sistemas, como la posibilidad de controlar la combustión, el nivel de agua y la presión de hogar usando un mismo controlador. También, es un equipo relativamente barato comparándolo con las características que cuenta. Éste puede ser vendido a un precio de \$4500 a \$5000, lo cual generaría un retorno de la inversión con la venta de dos equipos.

El sistema cuenta con algunas dificultades que deben ser tomadas en cuenta para una futura implementación. La determinación de los parámetros de control de los PIDs es totalmente

empírica, lo cual puede tomar mucho tiempo dependiendo de las características de la caldera. La determinación de la relación entre el combustible y el oxígeno también es determinada de manera empírica, aumentando el tiempo de implementación.

Una de las desventajas más importantes del sistema diseñado es que no permite la conexión de medidores de flujo másico por diferencial de presión, lo cual aumenta el precio de la implementación total. Además, no cuenta con la lógica de control por límites cruzados, limitando su uso a calderas pequeñas o medianas (menores a 300 psi).

Entre las mejoras que deben ser agregadas al sistema, una es la configuración de las unidades de medida alternas. Algunas unidades generalmente usadas y diferentes a las implementadas en este sistema son el bar o mmHg (milímetros de mercurio) para la presión, la tonelada por hora para el flujo másico, o el cambio a flujo volumétrico para el combustible. Otra mejora importante es la estimación de una función con base a una tabla de puntos dados. Usar un método que sea continuo y no con rangos lineales permitiría una mejor precisión para controlar los actuadores o para medir la cantidad de oxígeno requerido.

La simulación puede ser mejorada tomando en cuenta que la densidad y el calor latente varían dependiendo de la presión. Como se mencionó anteriormente, esto puede ser realizado utilizando el método propuesto por la IAPWS, el cual tiene una alta precisión. El modelo de transferencia de calor hacia el agua también debe cambiarse si se quiere tener una mejor precisión en el comportamiento del nivel del agua.

La determinación de diferentes características de calderas en la simulación permitiría validar que es posible implementar el control en diferentes calderas. Cambiar valores como el tamaño del domo, la capacidad de la caldera, la presión de operación, el tipo de combustible y las pérdidas de calor son características que cambian en gran medida el comportamiento de la simulación.

El controlador seleccionado es un equipo con muchas capacidades, gracias a las cuales fue posible realizar el sistema propuesto. A pesar de que no se pudo implementar en una caldera, se probó que su funcionalidad es válida y que cumple con los requisitos necesarios para operar una caldera de manera automática.

Bibliografía

- [1] Acedo, J. (2003). *Control Avanzado de Procesos*. España: Días de Santos.
- [2] Cleaver Brook. (2013, Julio). Hawk 4000: Boiler control operational manual. Estados Unidos.
- [3] Cleaver Brooks. (2010, Mayo). Packaged water systems level control Model LCS150e.1. Estados Unidos.
- [4] Cleaver Brooks. (2013, Setiembre). *Especificaciones de calderas acuotubulares*. Tomado de Cleaver Brooks: <http://www.cleaverbrooks.com/products-and-solutions/boilers/industrial-watertube/index.aspx>
- [5] Cleaver Brooks. (2013, Setiembre). *Especificaciones de calderas piro tubulares*. Tomado de Cleaver Brooks: <http://www.cleaverbrooks.com/products-and-solutions/boilers/firetube/index.aspx>
- [6] Cleaver Brooks. (2014, Abril). Hawk 4000 Boiler Control Operation Manual. Estados Unidos.
- [7] Babcock & Wilcox. (1992). *Steam its generation and use*. Barberton: The Babcock & Wilcox Company.
- [8] Dukelow, S. G. (1991). *The Control Of Boilers*. Research Triangle Park: International Society of Automation.
- [9] Gillman, J. (2010). *Boiler Control Systems Engineering*. Research Triangle Park: International Society of Automation.
- [10] MicroMod. (2014, Octubre). BurnerPak BMS: Burner Management Systems. Rochester, Nueva York, Estados Unidos.
- [11] MicroMod. (2014, Setiembre). DrumPak: Boiler drum level controller. Rochester, Nueva York, Estados Unidos.
- [12] MicroMod. (2014, Setiembre). TrimPak: Linkage control with O2 trim option for jackshaft boilers. Rochester, Nueva York, Estados Unidos.
- [13] MicroMod. (2016, Marzo). MeterPak: Linkage control with O2 trim. Rochester, Nueva York, Estados Unidos.
- [14] National Fire Protection Association. (2004). *NFPA 85 Boiler and Combustion Systems Hazards Code*.
- [15] SIEMENS. (2012, Abril). *S7-1200 Programmable controller System Manual*. Tomado de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf
- [16] Belimo. (2014). *How to select an Actuator for Damper Retrofit*. Tomado de: <https://www.google.com/search?q=d%C3%A1mp+actuator+selection&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b>
- [17] Environmental Technology Centre (2001). *Oil Properties: Fuel Oil No. 2*. Tomado de: http://www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/Oilproperties/pdf/WEB_Fuel_Oil_No._2.pdf

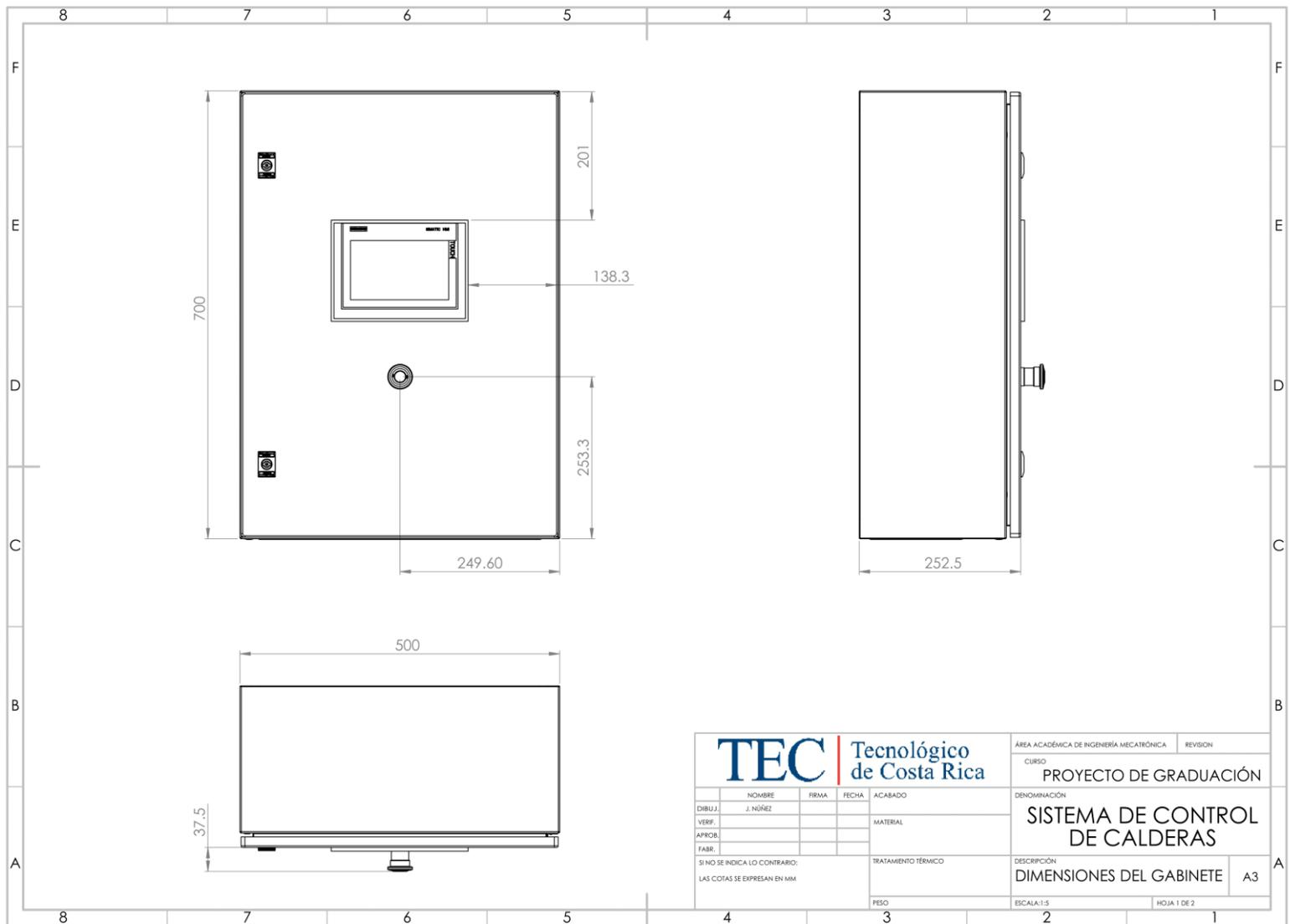


Figura A. 1. Plano de dimensiones del gabinete. (Realizado en SolidWorks 2015)

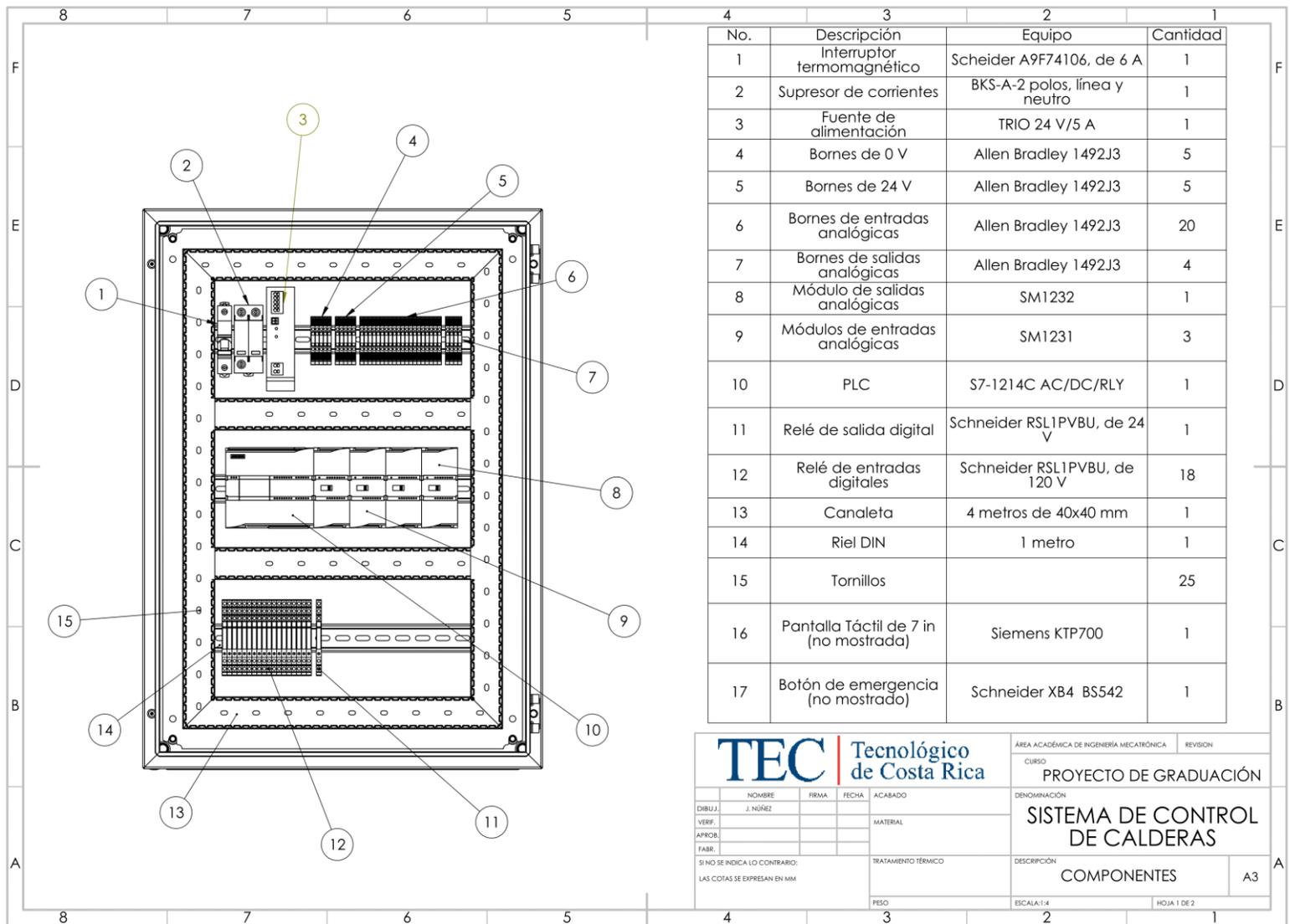


Figura A. 2. Plano de componente del panel de control. (Realizado en SolidWorks 2015)

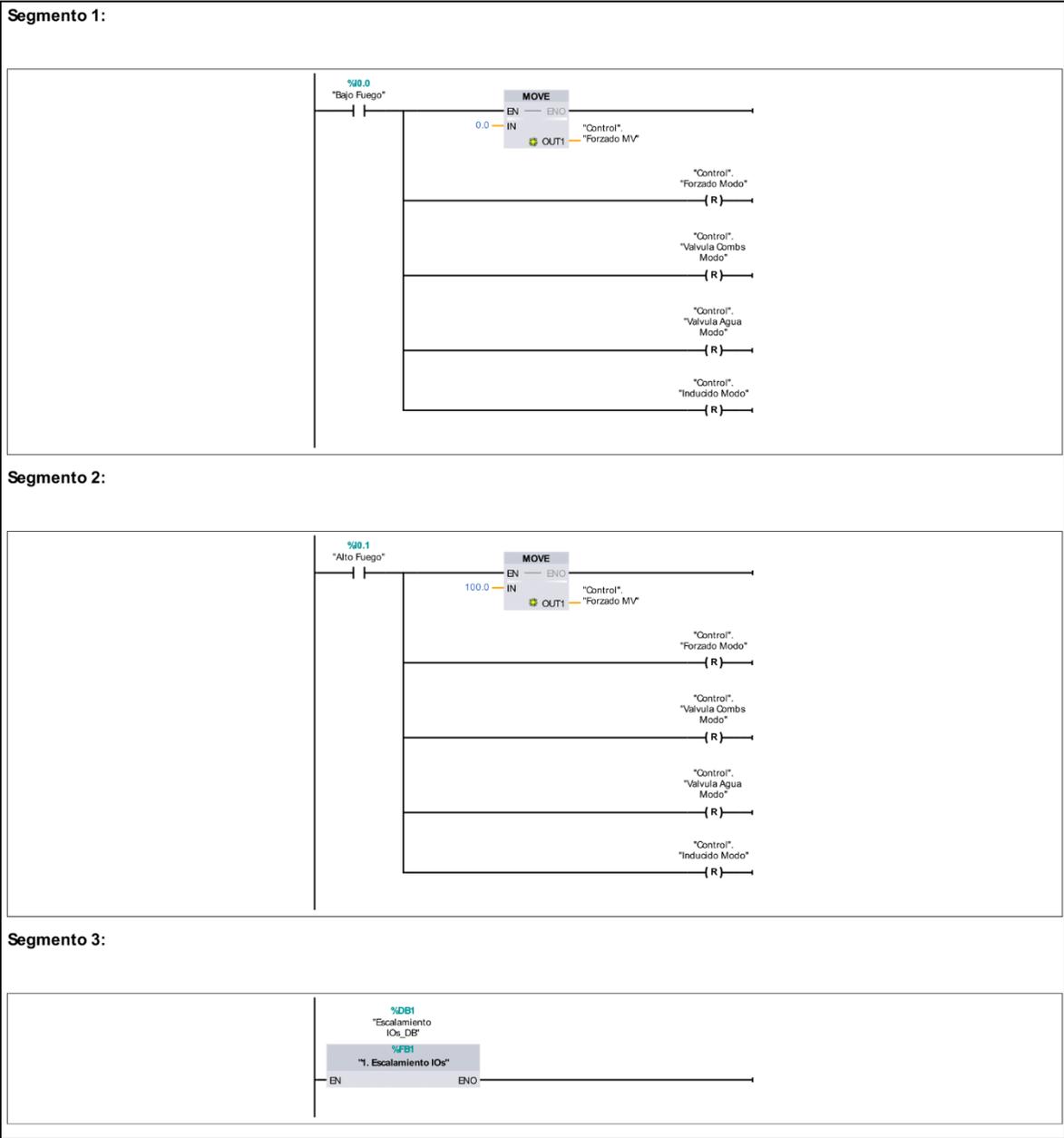


Figura A. 3. Programa principal. (Tomado de TIA Portal V13)

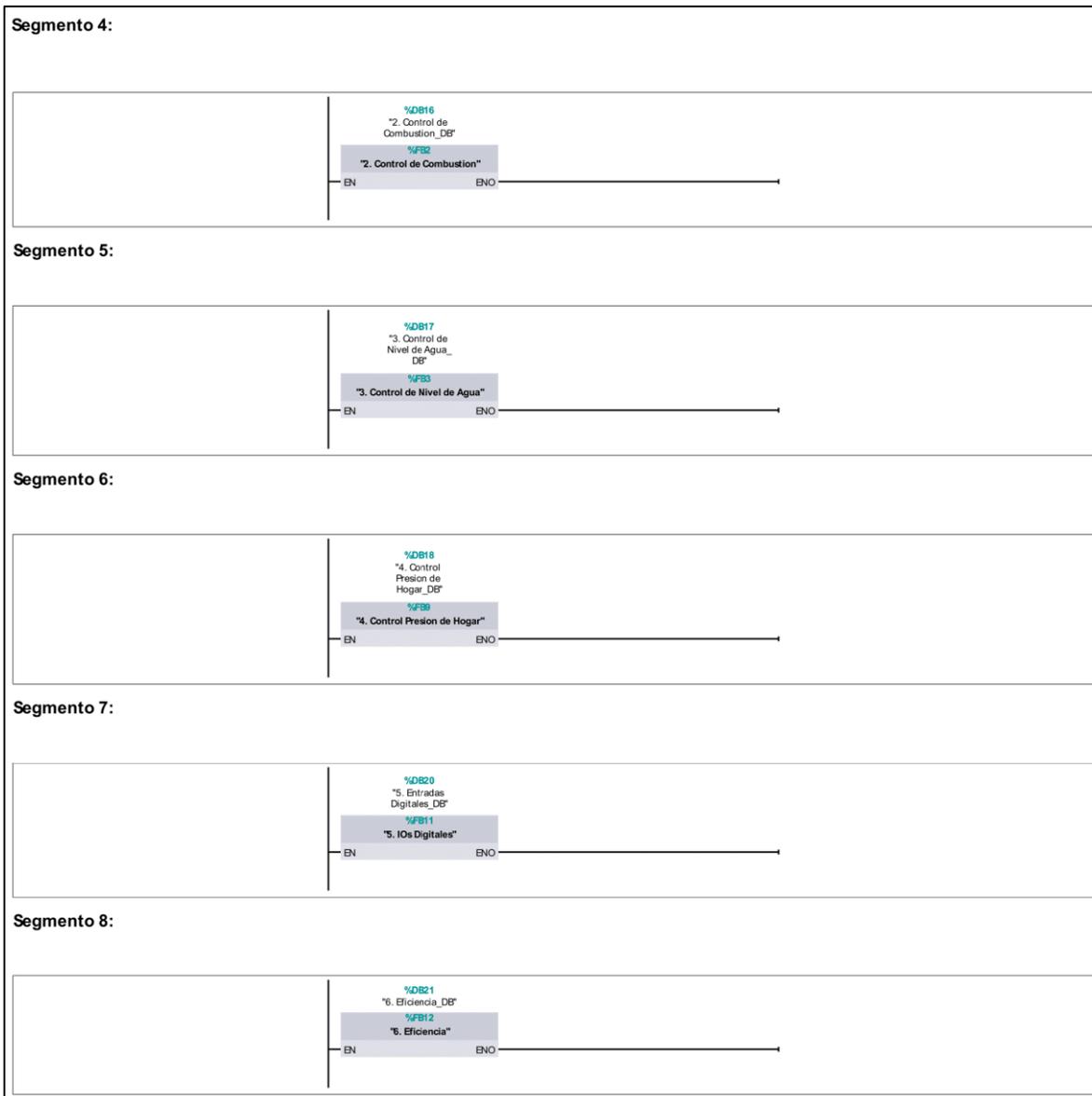


Figura A. 3. Programa principal (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

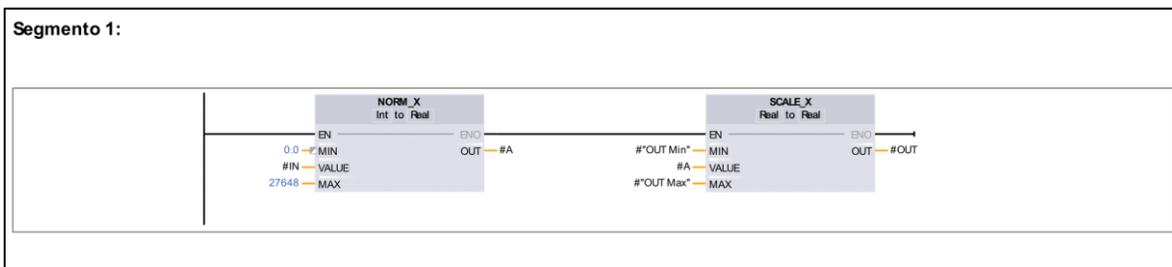


Figura A. 4. Programa de escalamiento de entradas. (Tomado de TIA Portal V13)

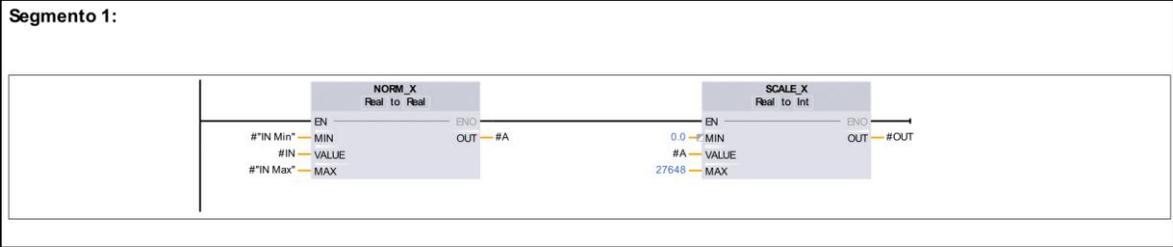


Figura A. 5. Programa de escalamiento de salidas. (Tomado de TIA Portal V13)

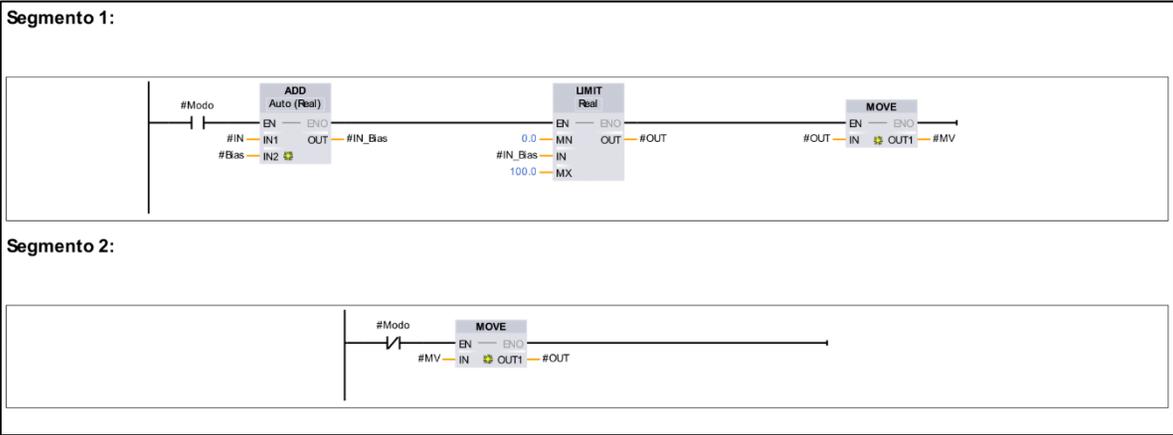


Figura A. 6. Programa de estación manual-automático. (Tomado de TIA Portal V13)

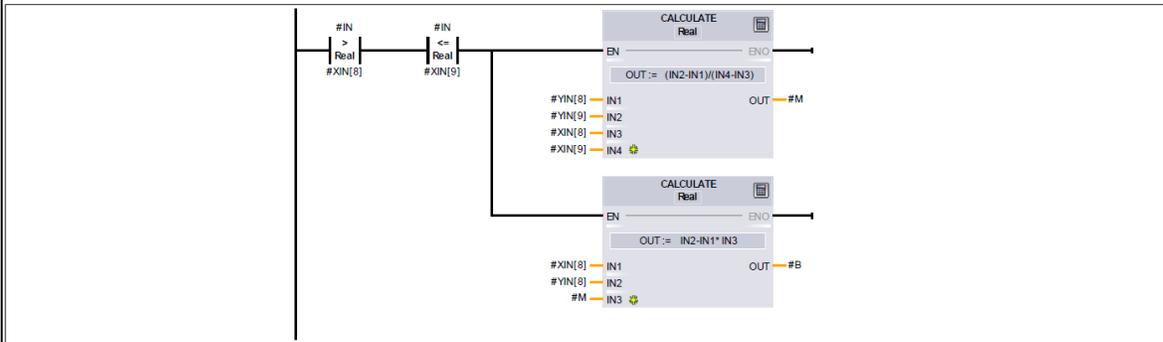


Figura A. 7. Programa de interpolación. (Tomado de TIA Portal V13)

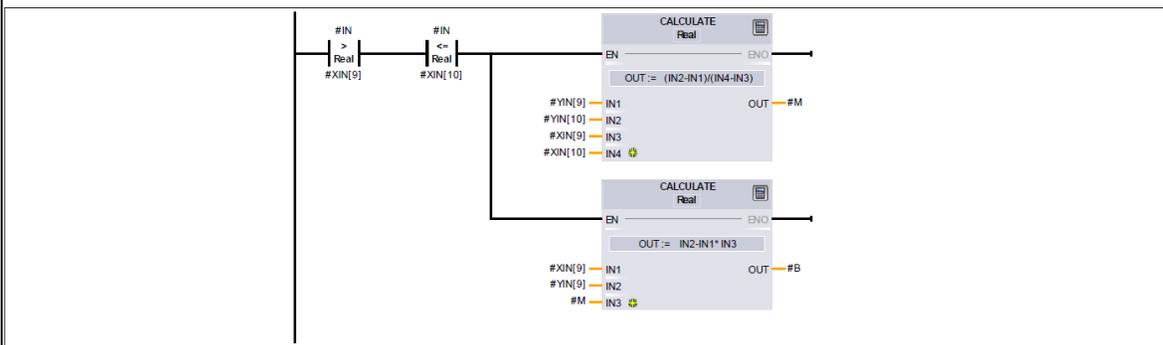


Figura A. 7. Programa de interpolación (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 9:



Segmento 10:



Segmento 11:

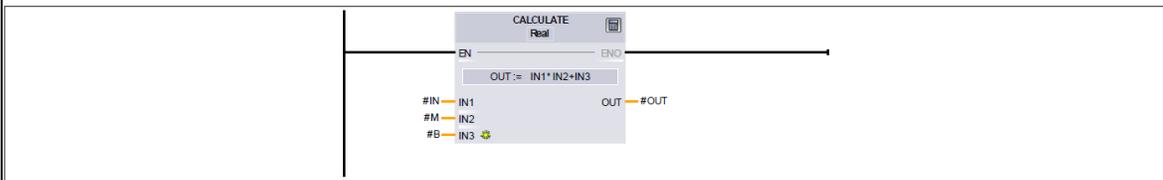
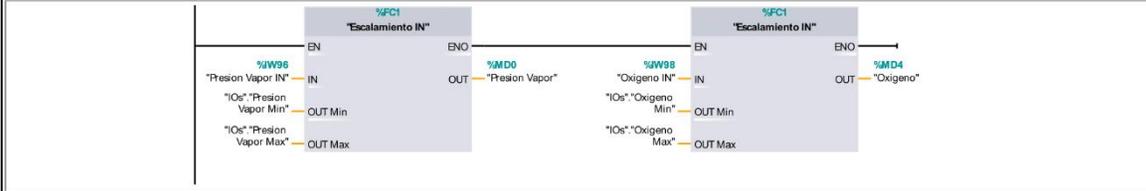
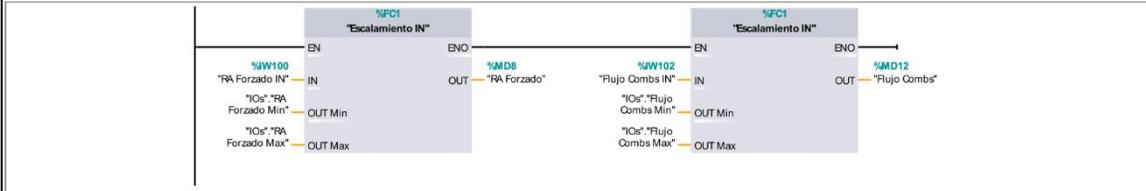


Figura A. 7. Programa de interpolación (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

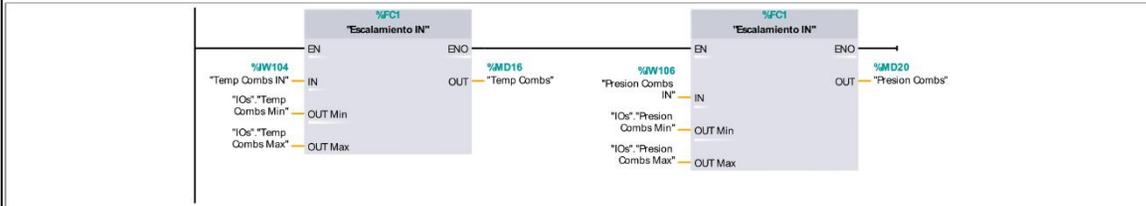
Segmento 1:



Segmento 2:



Segmento 3:



Segmento 4:

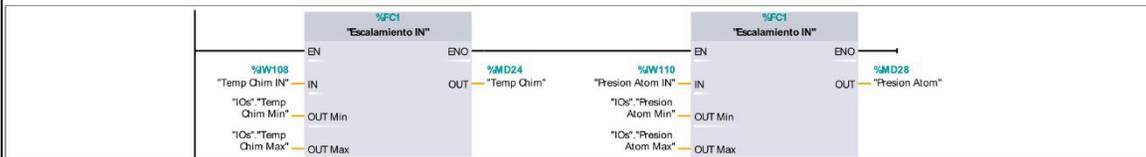
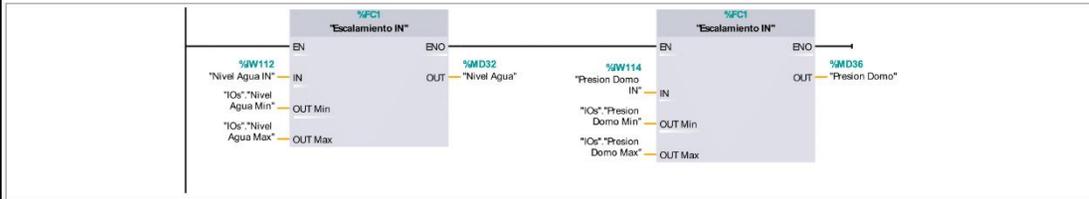
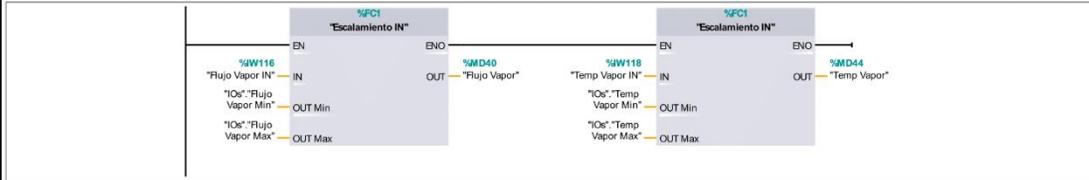


Figura A. 8. Programa de escalamiento de entradas y salidas. (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 5:



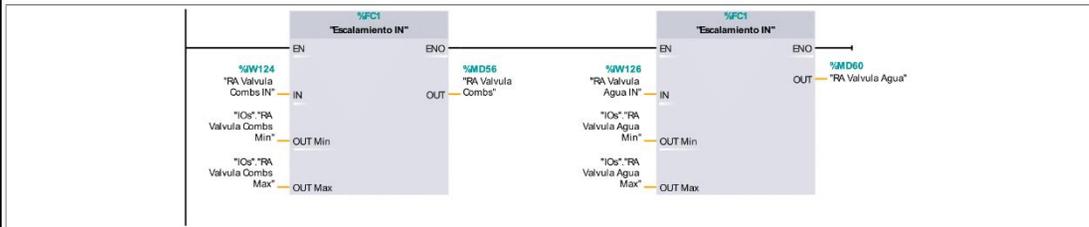
Segmento 6:



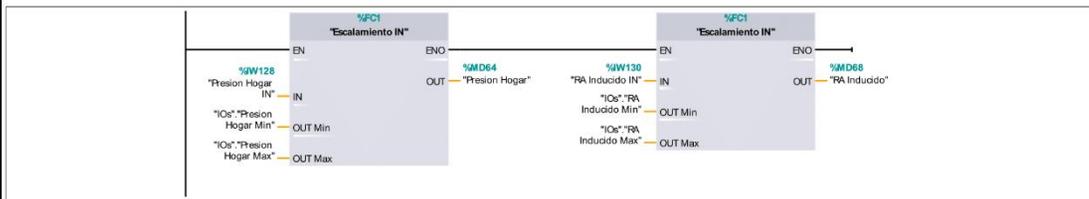
Segmento 7:



Segmento 8:



Segmento 9:



Segmento 10:



Figura A. 8. Programa de Escalamiento IOs (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 11:



Segmento 12:

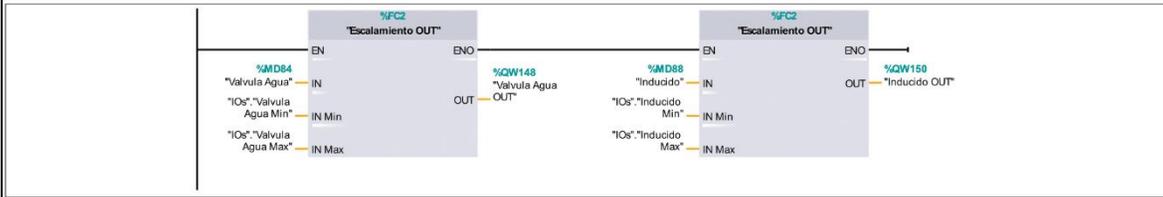
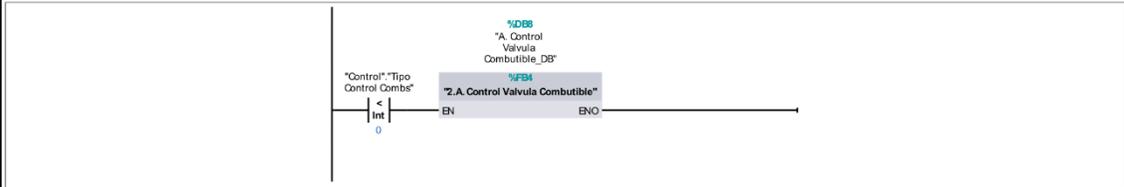
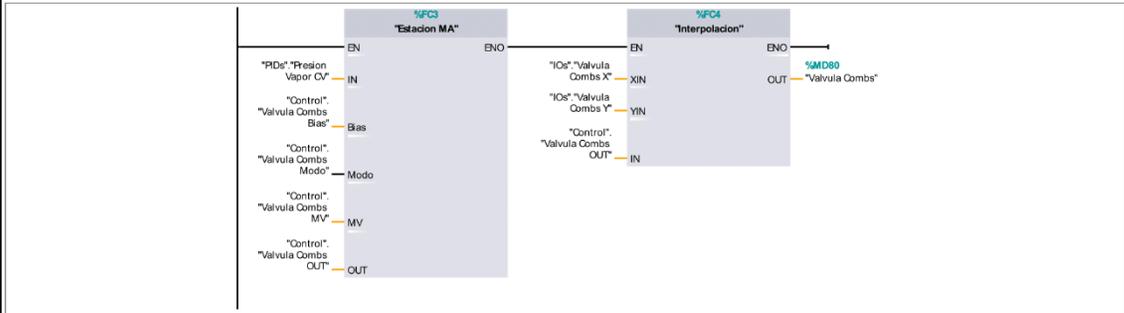


Figura A. 8. Programa de escalamiento de entradas y salidas (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

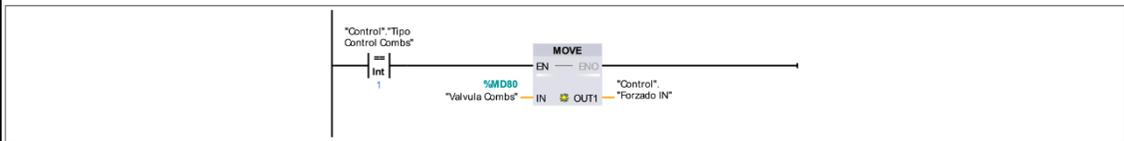
Segmento 1:



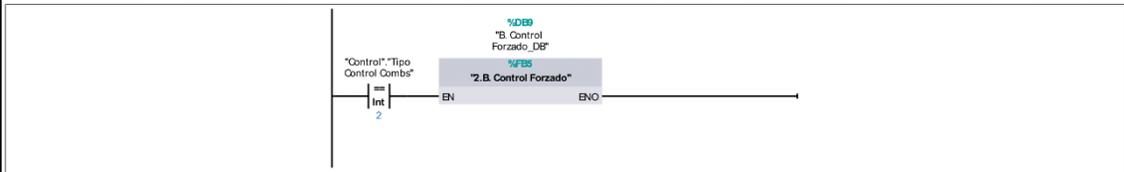
Segmento 2:



Segmento 3:



Segmento 4:



Segmento 5:

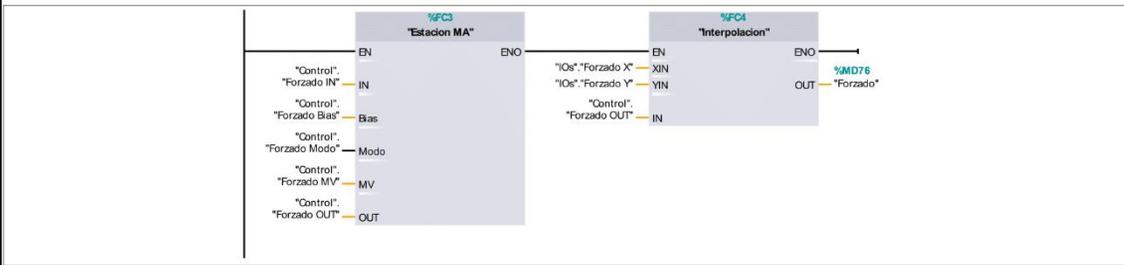


Figura A. 9. Programa de control de combustión. (Tomado de TIA Portal V13)

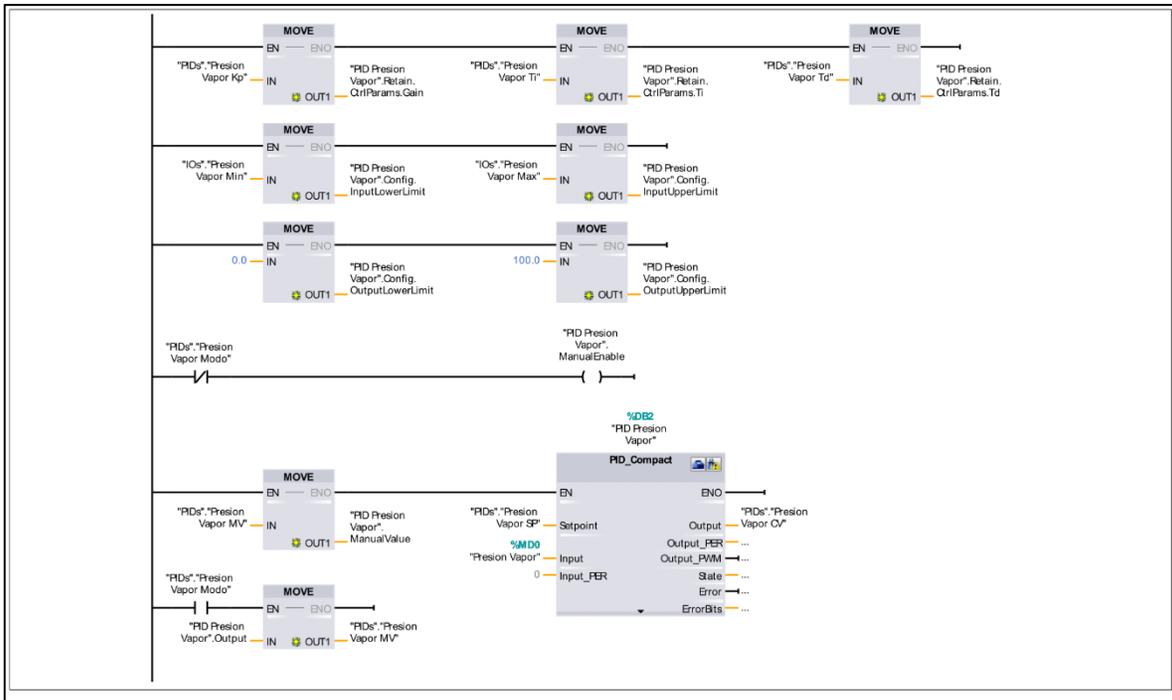


Figura A. 10. Programa de control de la válvula de combustible. (Tomado de TIA Portal V13)

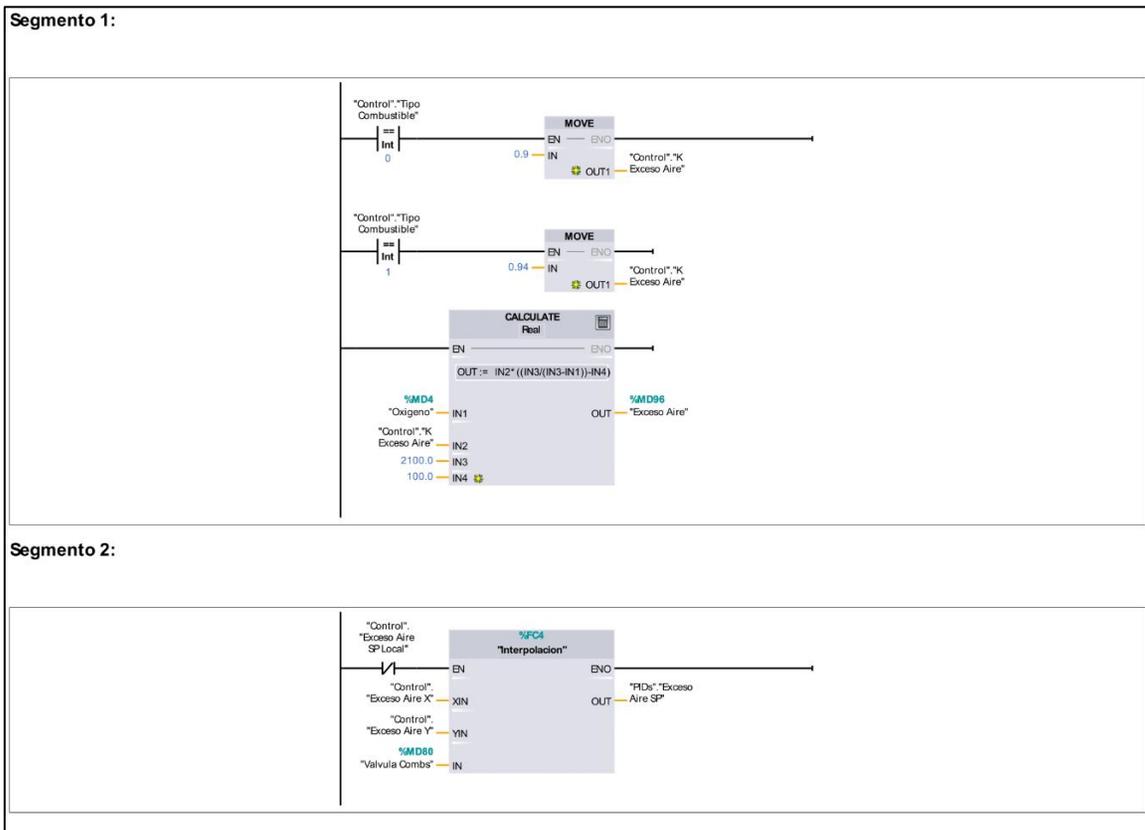
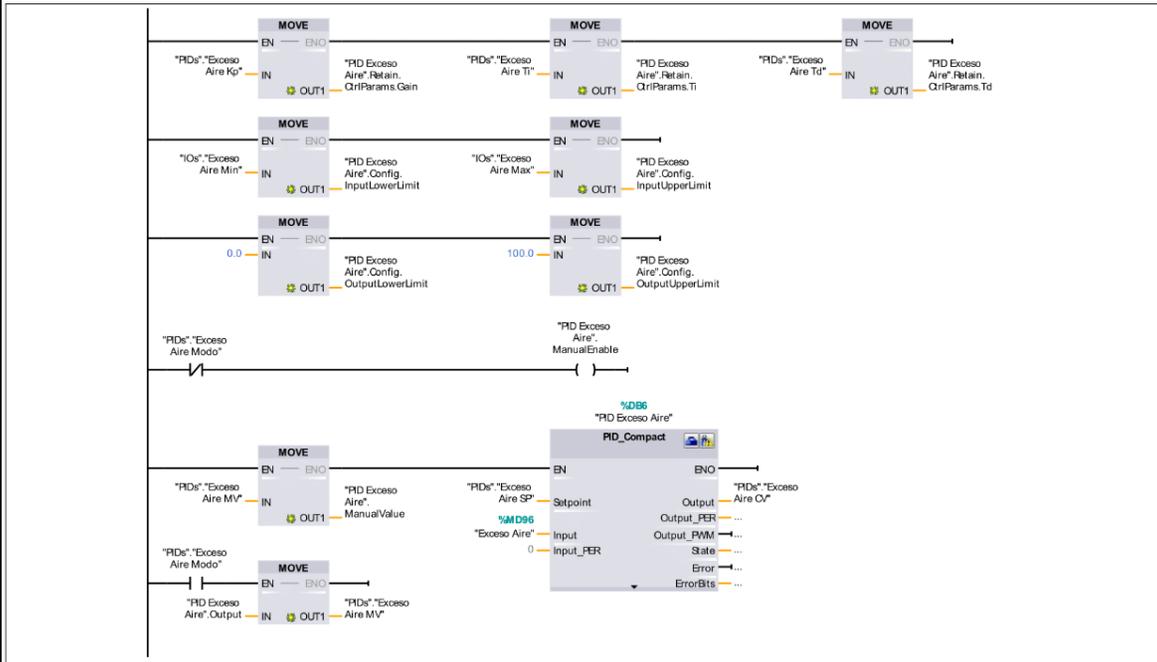


Figura A. 11. Programa de control del actuador de forzado. (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 3:



Segmento 4:

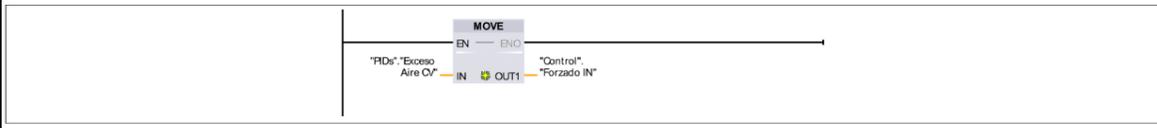
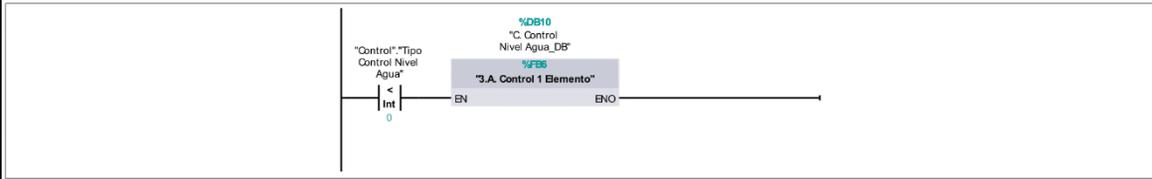
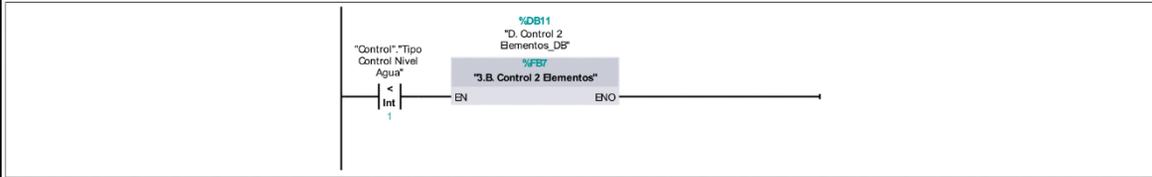


Figura A. 10. Programa de control del actuador de forzado (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

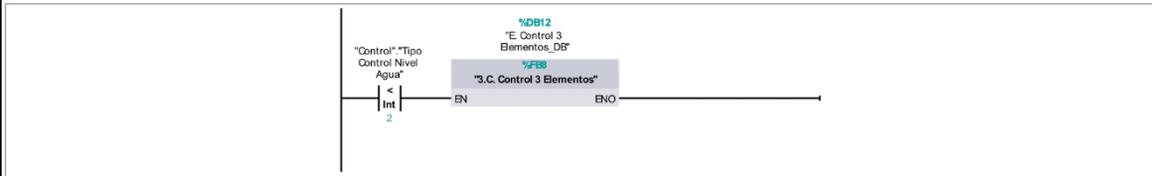
Segmento 1:



Segmento 2:



Segmento 3:



Segmento 4:

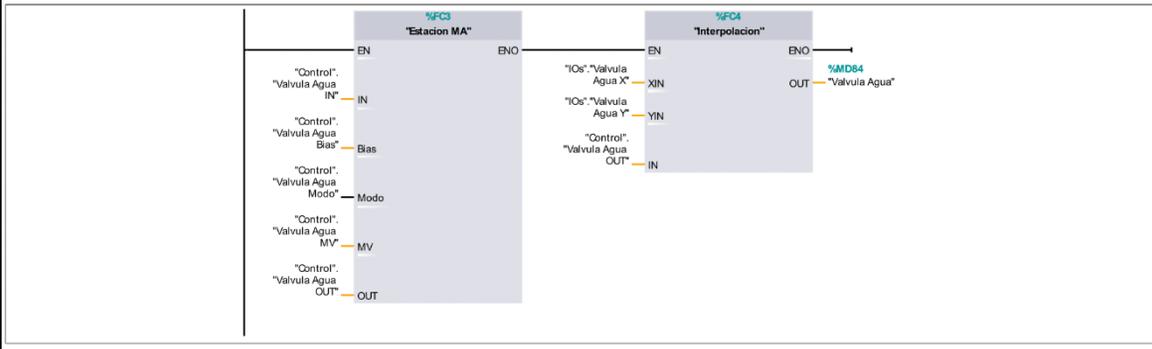


Figura A. 12. Programa de control de nivel de agua (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 1:

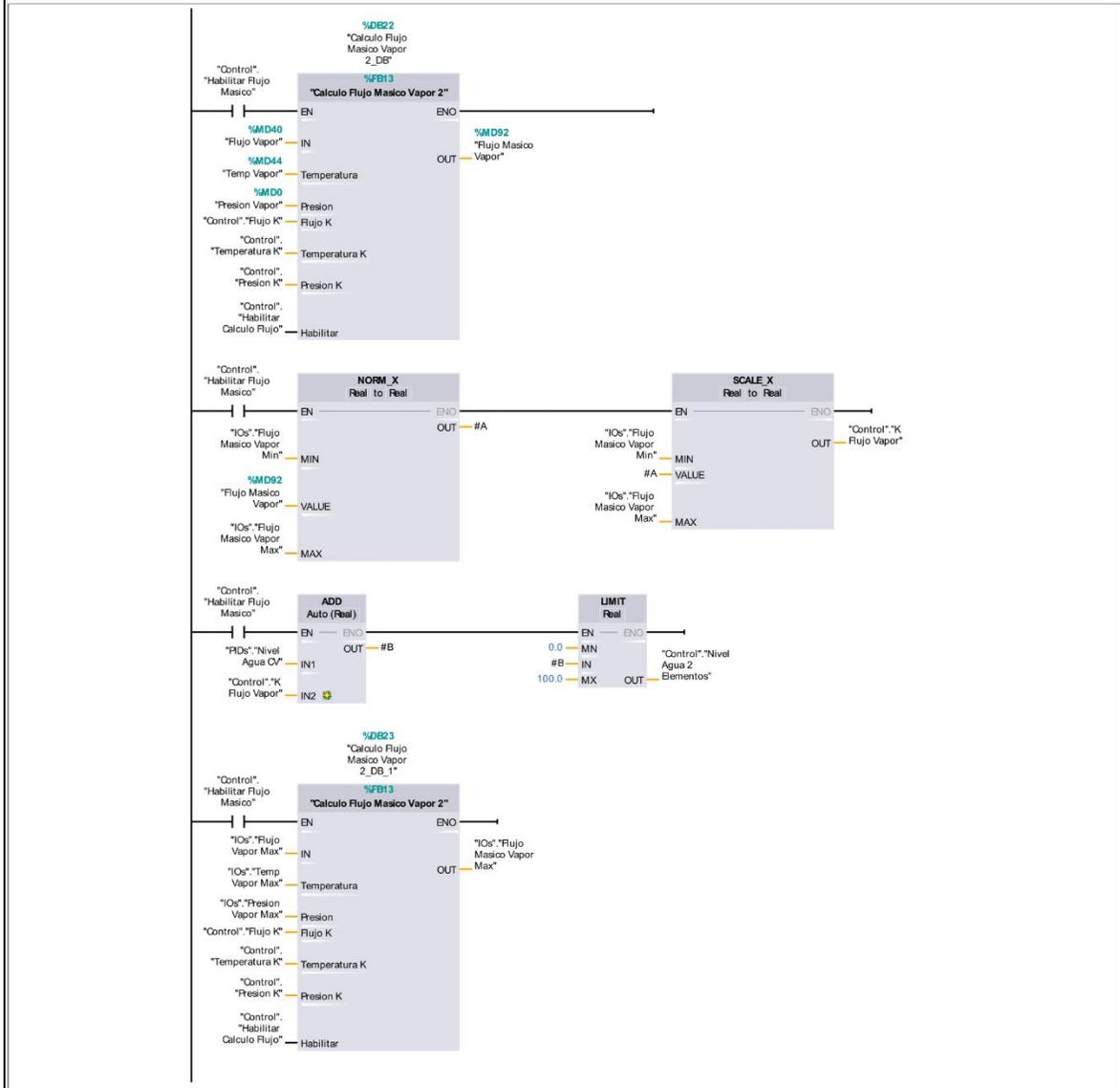


Figura A. 14. Programa de control de dos elementos. (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 2:



Segmento 3:

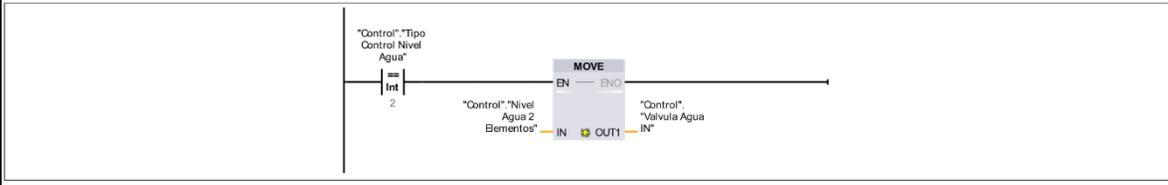


Figura A. 14. Programa de control de dos elementos (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 1:



Segmento 2:

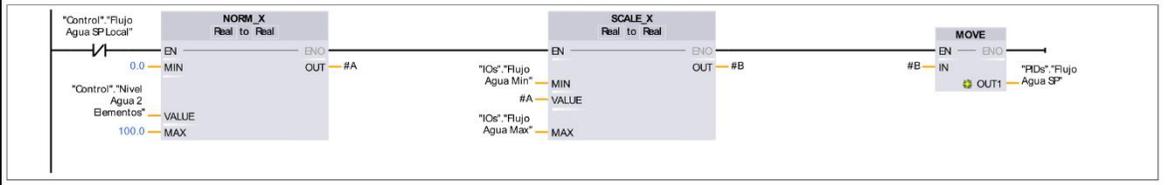
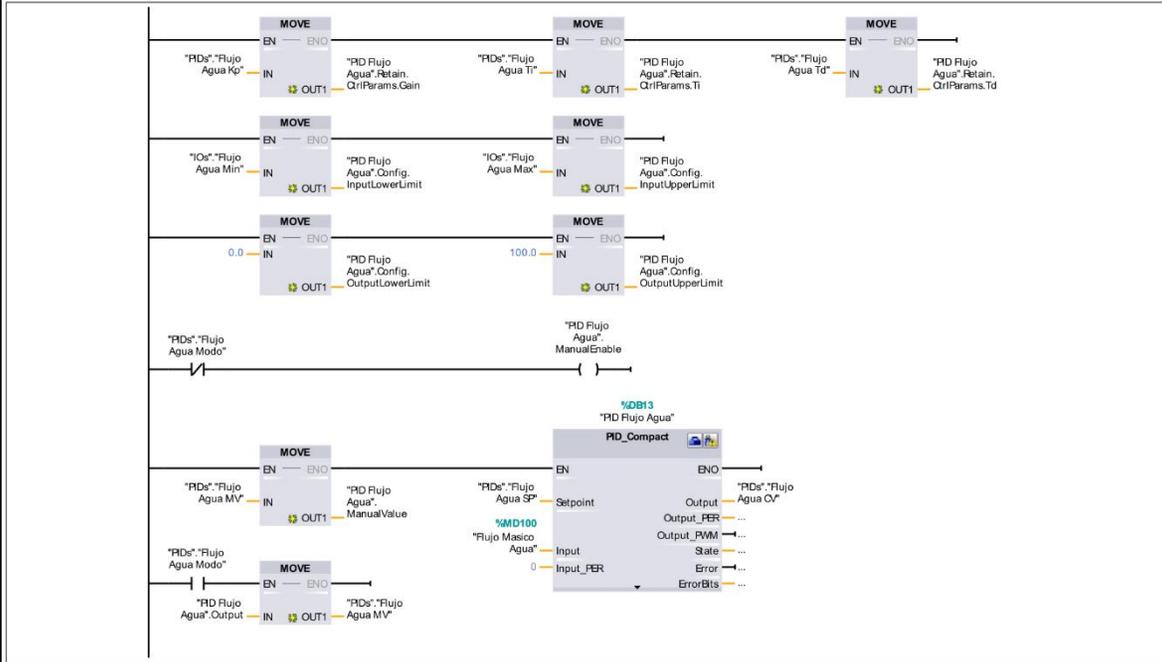


Figura A. 15. Programa de control de tres elementos. (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 3:



Segmento 4:

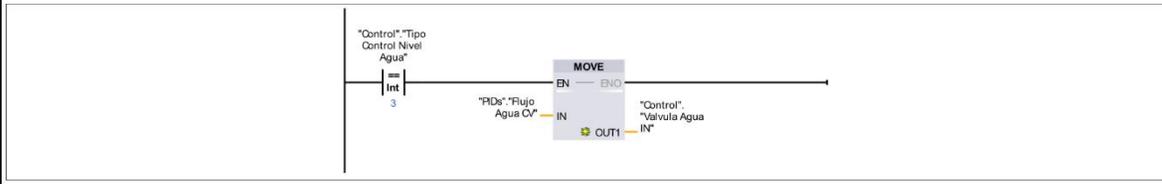
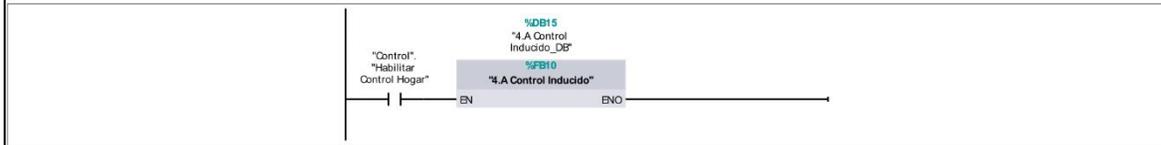


Figura A. 15. Programa de control de tres elementos (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 1:



Segmento 2:

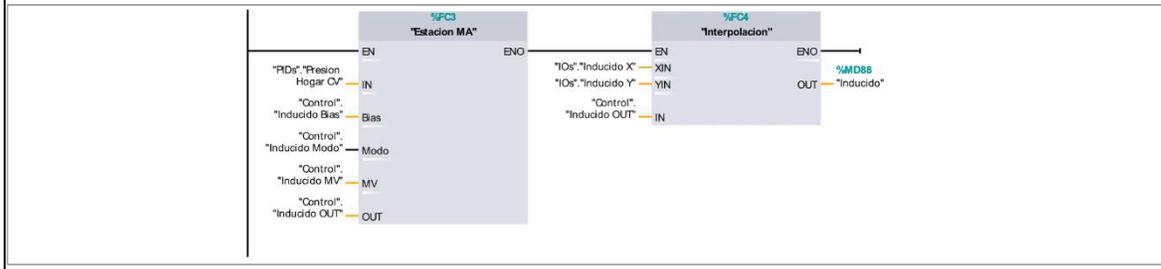


Figura A. 16. Programa de control de presión de horno. (Tomado de TIA Portal V13)

Segmento 1:

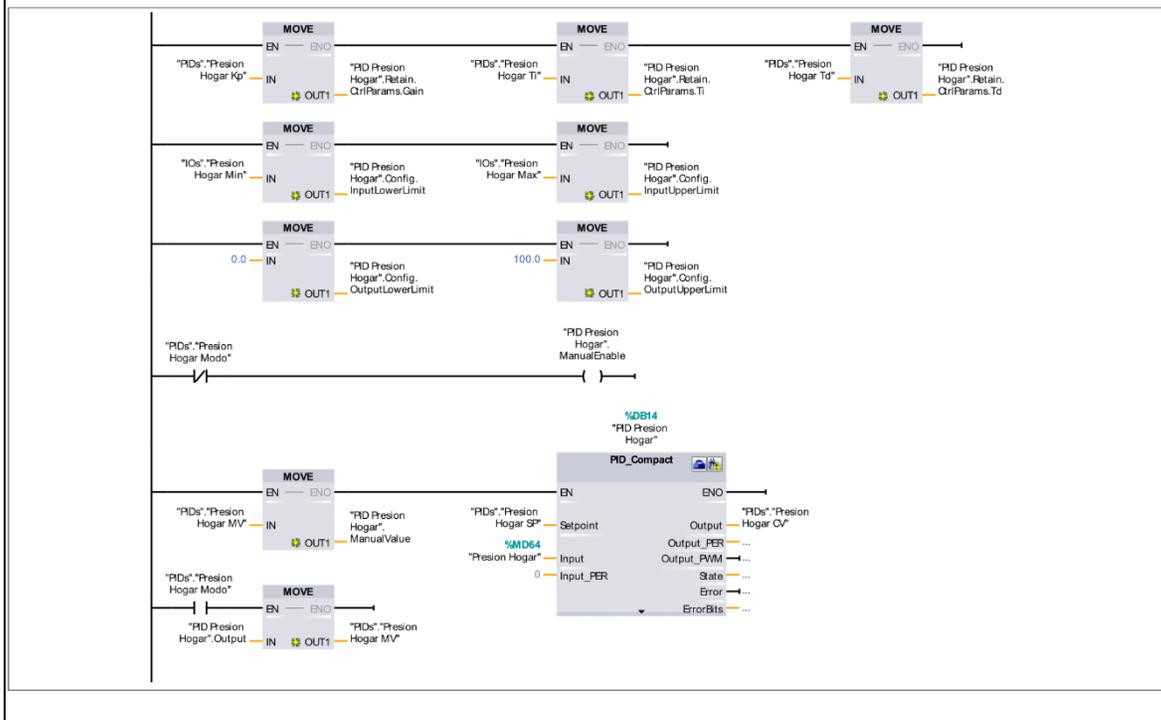


Figura A. 17. Programa de control del actuador de inducido. (Tomado de TIA Portal V13)

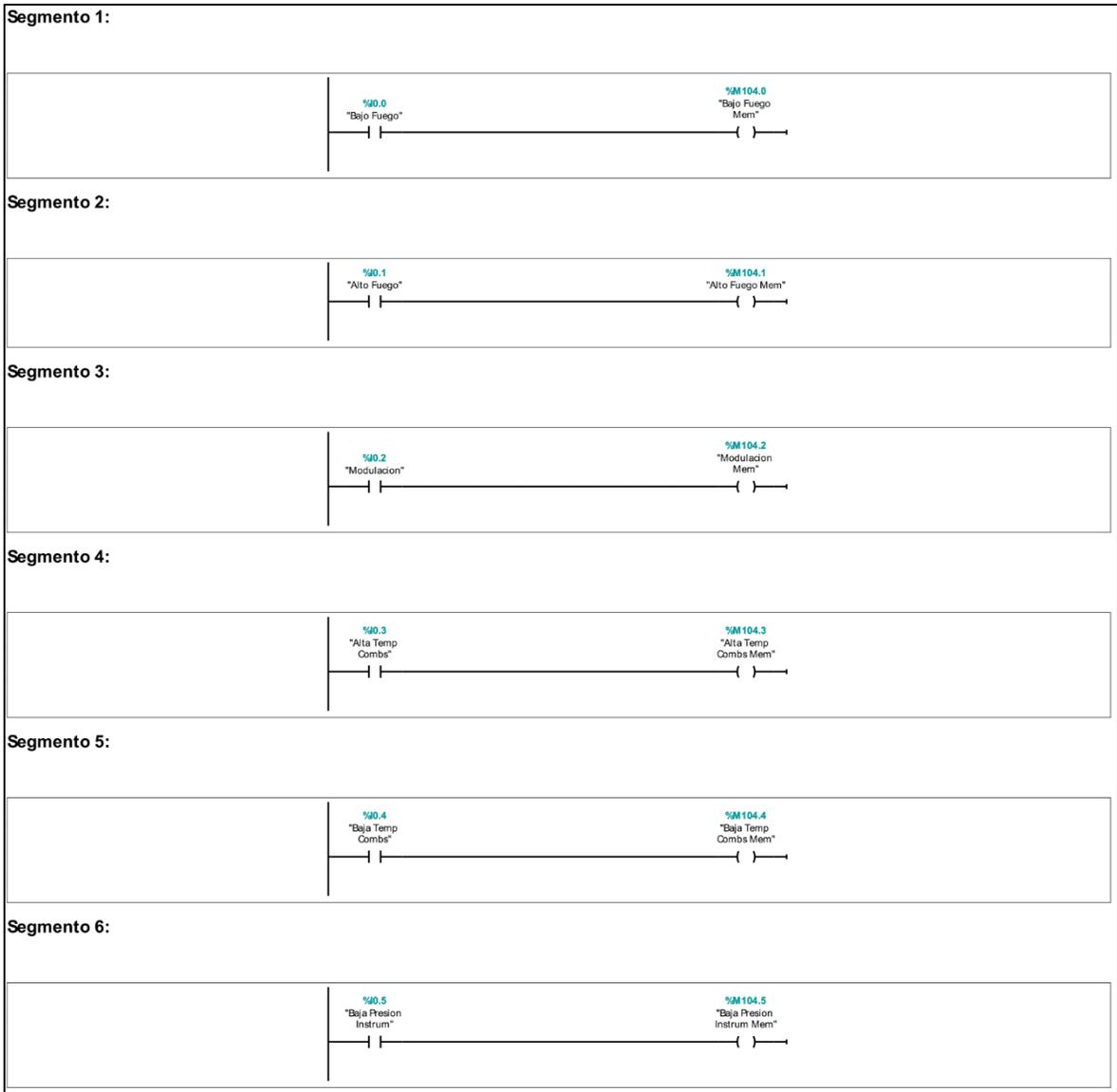


Figura A. 18. Programa general de entradas digitales. (Tomado de TIA Portal V13)

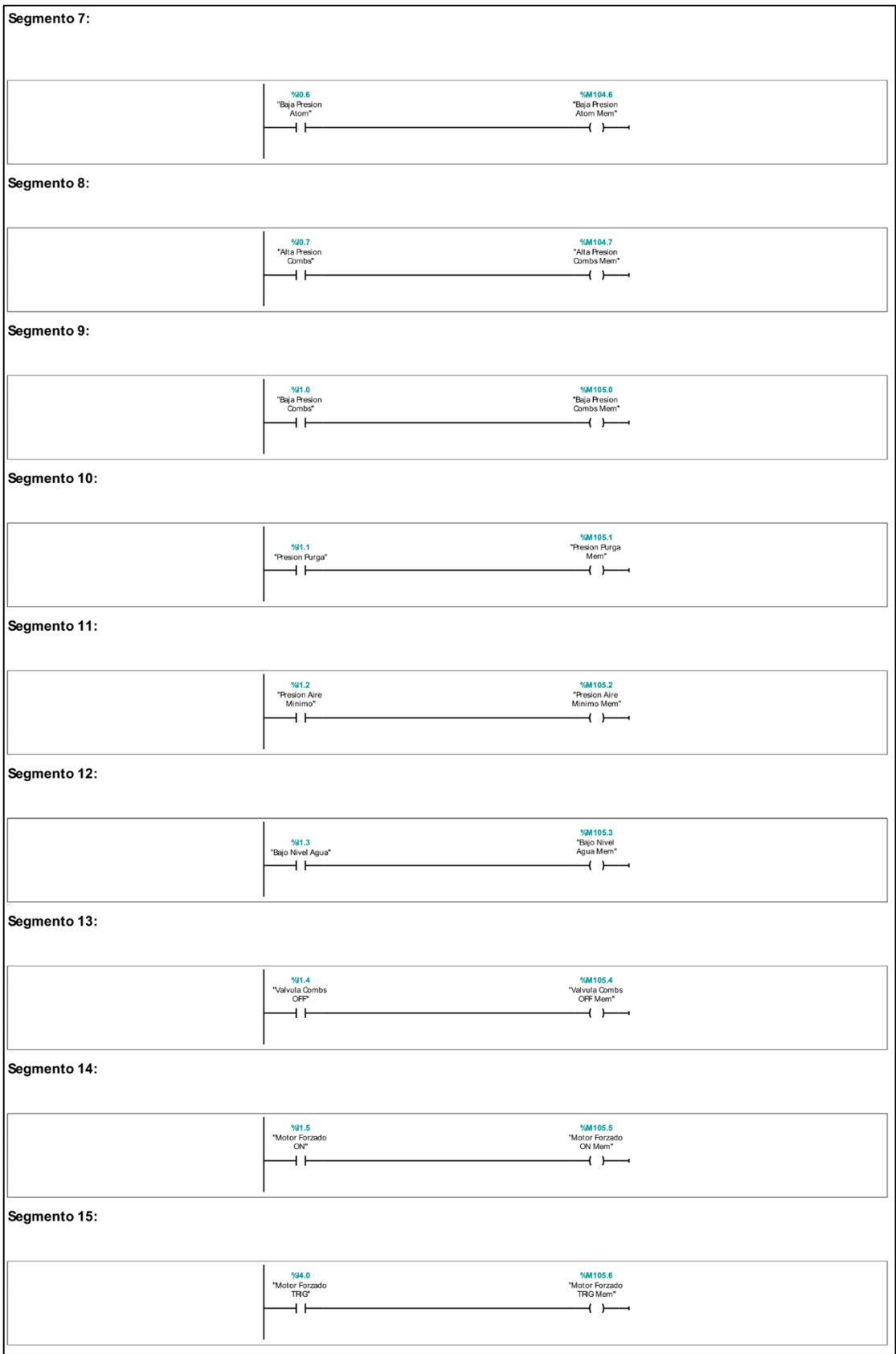


Figura A.18. Programa general de entradas digitales (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

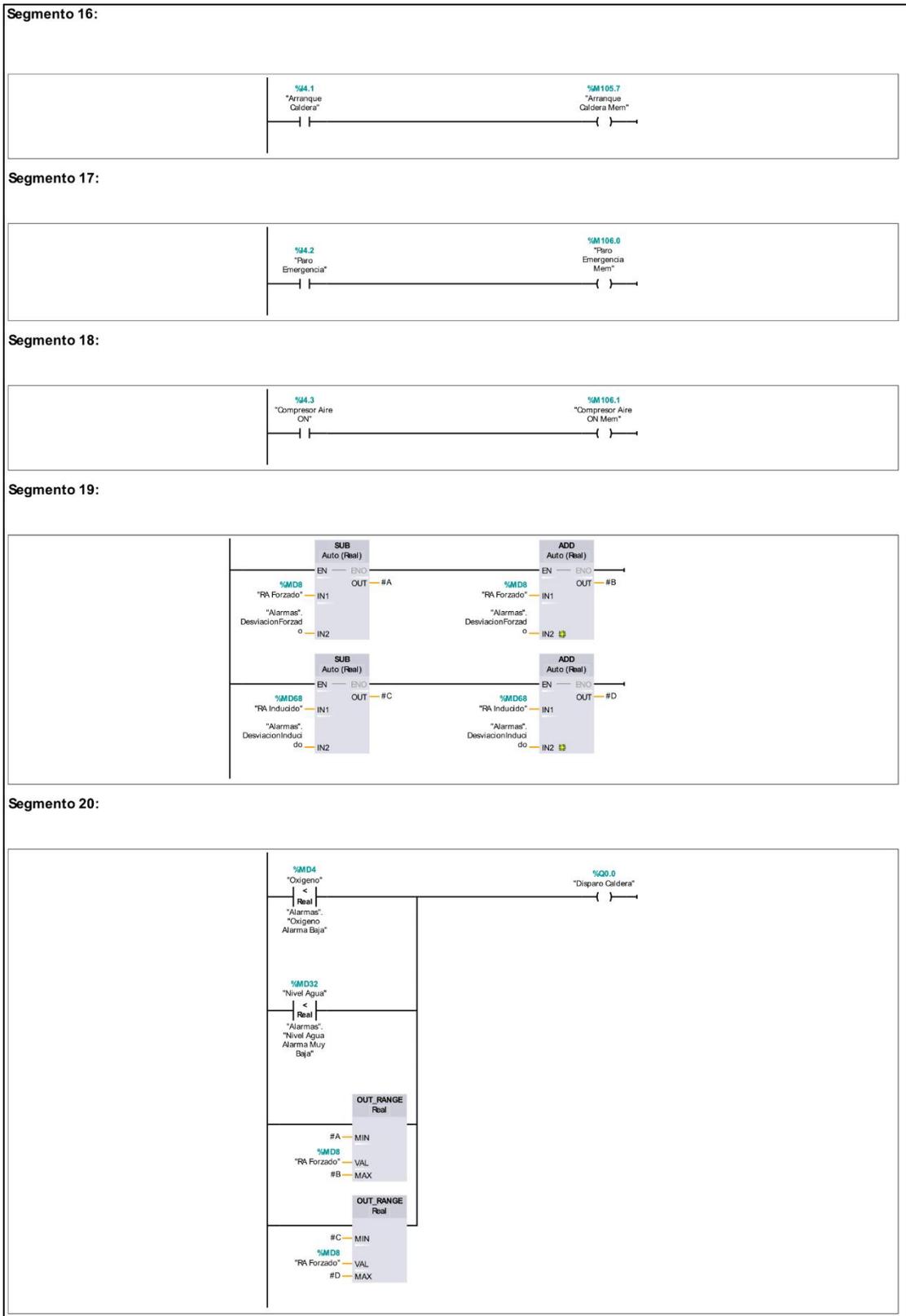
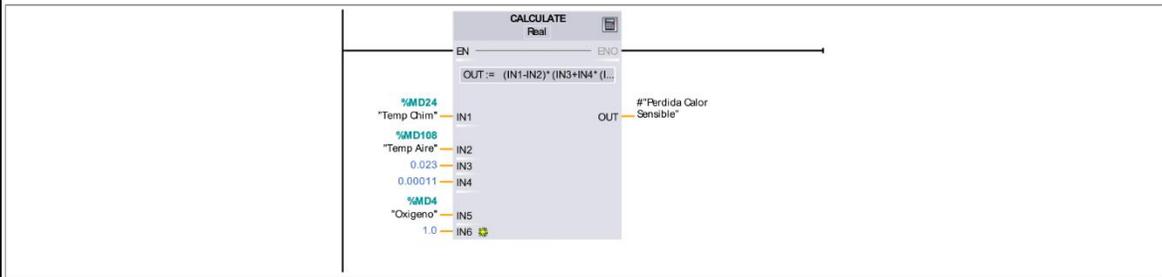
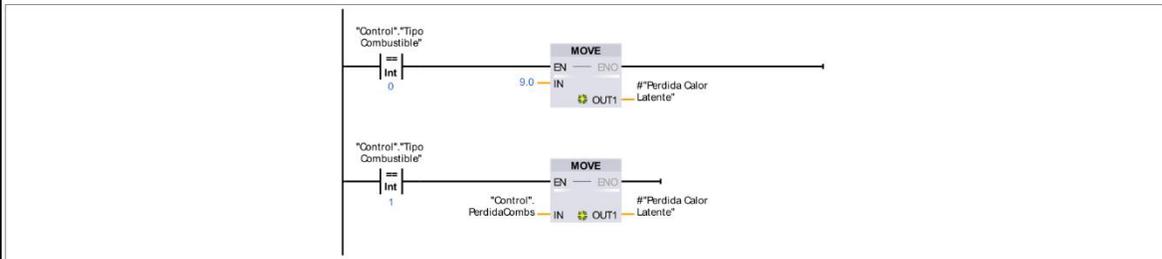


Figura A.18. Programa general de entradas digitales (Continuación). (Tomado de TIA Portal V13)

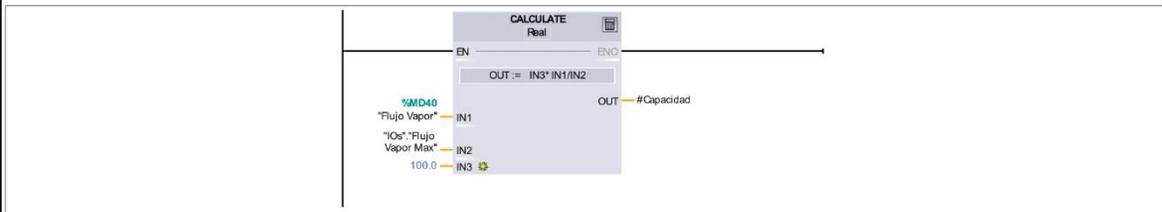
Segmento 1:



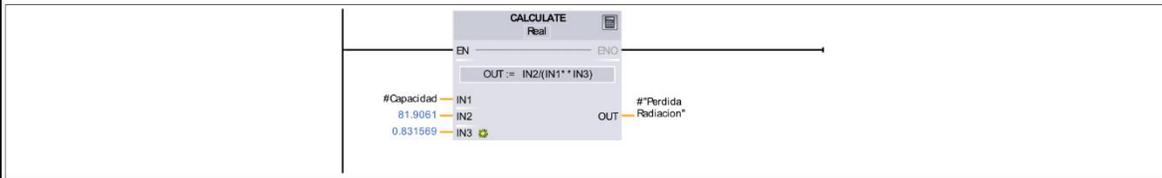
Segmento 2:



Segmento 3:



Segmento 4:



Segmento 5:

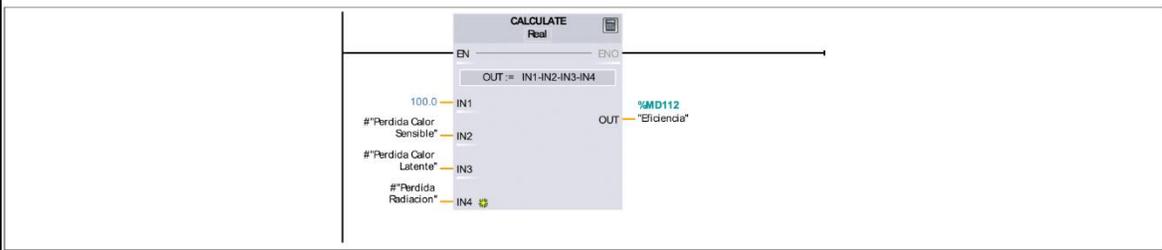


Figura A. 19. Programa de cálculo de la eficiencia. (Tomado de TIA Portal V13)

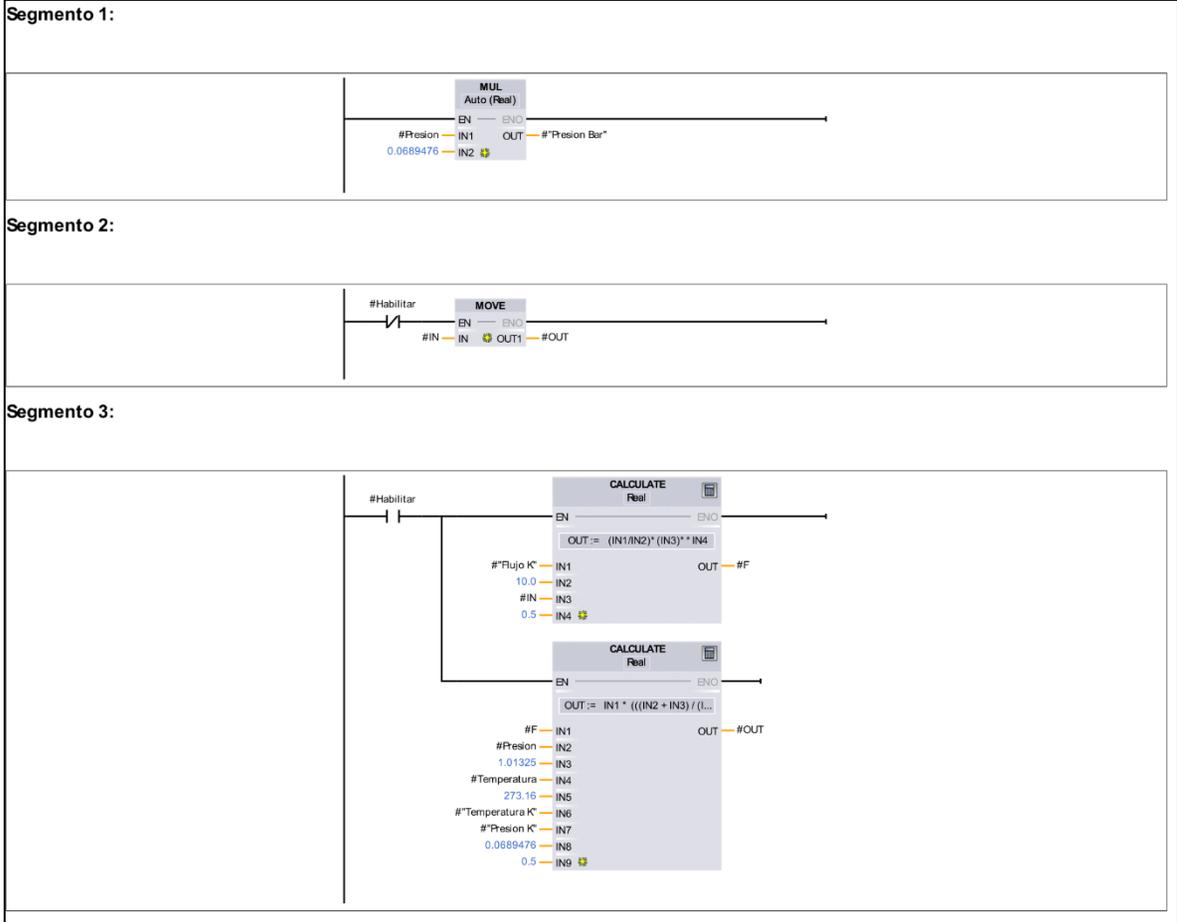


Figura A. 20. Programa de cálculo del flujo másico de vapor a partir de un diferencial de presión. (Tomado de TIA Portal V13)

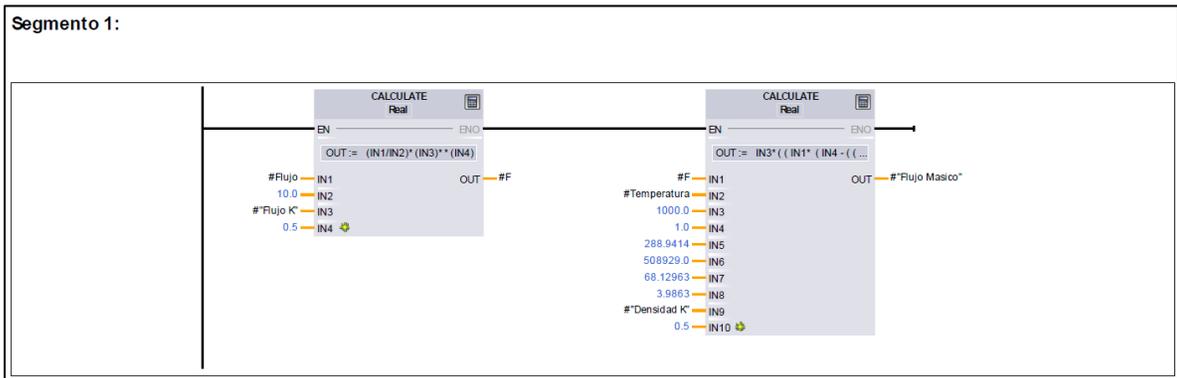


Figura A. 21. Programa de cálculo del flujo másico de agua a partir de un diferencial de presión. (Tomado de TIA Portal V13)

```

0001 IF NOT "Inicio" THEN//Condiciones iniciales
0002   "Simular" := TRUE;
0003   "T_agua_alimentacion" := 60;
0004   "rho_agua" := 958.05;
0005   "rho_vapor" := 3.419;
0006   "Nivel" := 65;
0007   "L_domo" := 4.572;
0008   "D_domo" := 0.9144;
0009   "V_domo" := "L_domo" * 3.14159265 * ("D_domo" / 2) ** 2;
0010   "m_agua_actual" := "rho_agua" * "V_domo" * "Nivel" / 100;
0011   "P_actual" := 101325;
0012   "Inicio" := TRUE;
0013   "P_Domo" := 0;
0014   "Q_agua" := 0.0;
0015   "m_vapor" := 0;
0016 END_IF;
0017 "m_vapor_salida" := "Demanda" / (2.20462 * 20 * 60 * 60);//Cálculo de la masa de vapor de salida, en kg, con
base a una demanda en lb/hr
0018 "C_Combustible" := 53893.42;//Calor específico del combustible, 53893.42 kJ/kg para fueloil No. 2
0019 "FMax_Combustible" := 0.02554633;//Flujo máximo de combustible en kg/50 ms
0020 "m_Combustible" := "FMax_Combustible" * "Valvula Combs" / 100;//Cálculo de la masa en kg de combustible dentro
de la caldera
0021 "Q_Teorico" := "C_Combustible" * "m_Combustible";//Calor teórico en kJ generado por la combustión completa del
combustible
0022 "FMax_aire" := 0.4861102;//Flujo máximo de aire en kg/50 ms
0023 "m_aire" := "FMax_aire" * "Forzado" / 100;//Cálculo de la masa de aire en kg dentro de la caldera
0024 "m_O2" := "m_aire" * 0.21;//Cálculo de la masa de oxígeno en kg dentro de la caldera
0025 "m_O2requerido" := 3.33 * "m_Combustible";//Cálculo de la masa de oxígeno en kg requerido para la combustión
completa
0026 "Eficiencia_Combustion" := "m_O2" / "m_O2requerido";//Cálculo de la eficiencia de la combustión
0027 IF "Eficiencia_Combustion" > 0.95 THEN//Condición que limita la eficiencia a 95%
0028   "Eficiencia_Combustion" := 0.95;
0029 END_IF;
0030 "m_O2gases" := "m_O2" - "m_O2requerido" * "Eficiencia_Combustion";//Cálculo de la masa en kg de oxígeno en los
gases
0031 IF ("m_O2gases" < 0) THEN// Condición que limita la cantidad de oxígeno en los gases de combustión a cero
0032   "m_O2gases" := 0;
0033 END_IF;
0034 "Perdidas" := 0.08 + 0.06 * "Forzado" / 100;//Pérdidas constantes de 6% más pérdidas de 4% por aire inyectado
0035 "Q_generado" := "Q_Teorico" * ("Eficiencia_Combustion" * (1 - "Perdidas"));//Cálculo del calor generado en kJ
0036 "P_atm" := 101325;//Presión atmosférica
0037 "T_sat_atm" := 100 + 273.15;//Temperatura de saturación en K a presión atmosférica
0038 "L_atm_mol" := 40660;//Calor latente a presión atmosférica en J/mol
0039 "R_gases" := 8.314;//Constante universal de gases en J/mol K
0040 "P_actual" := "P_Domo" + 101325;//Presión absoluta en Pa dentro del domo
0041 "T_sat" := ((1 / ("T_sat_atm")) - ("R_gases" / "L_atm_mol") * LN("P_actual" / "P_atm")) ** -1) - 273.15;//
Temperatura de saturación en °C según la presión del domo
0042 "m_agua_alim" := 0.18899682 * "Valvula Agua" / 100;//Cantidad de agua de alimentación en kg
0043 "m_agua_actual" := "m_agua_actual" - "m_vapor_generado" + "m_agua_alim";//Cálculo de la masa de agua dentro
del domo
0044 "C_sensible_agua" := 4.1813;//Calor específico del agua en kJ/kg K
0045 "Q_sensible" := 0.2 * "m_agua_actual" * "C_sensible_agua" * ("T_sat" - "T_agua_alimentacion");//Cálculo del
calor sensible en kJ necesario para calentar el agua a temperatura de saturación
0046 "L_vap_kg" := 1945.24;//Calor latente de evaporación en kJ/kg
0047 "Q_agua" := 0.999 * "Q_agua";//Cálculo del calor actual en el agua debido a pérdidas de un 0.1% cada 50 ms
0048 IF "Q_agua">="Q_sensible" THEN//Condición que determina si el calor debe ser sensible o latente
0049   "m_vapor_generado" := "Q_generado" / "L_vap_kg";//Cantidad de vapor generado en kg
0050 ELSE
0051   "Q_agua" := "Q_agua" + "Q_generado";//El calor se agrega al calor actual del agua
0052   "m_vapor_generado" := 0;//Como el calor es agregado como calor sensible, el vapor generado es cero
0053 END_IF;
0054 "m_vapor" := "m_vapor" + "m_vapor_generado" - "m_vapor_salida";//Cálculo de la masa total de vapor dentro del
domo
0055 IF "m_vapor" < 0 THEN//La cantidad de vapor dentro del domo no puede ser menor a cero
0056   "m_vapor" := 0;
0057 END_IF;
0058 "V_agua" := "m_agua_actual" / "rho_agua";//Cálculo del volumen de agua en m3
0059 "Nivel" := 100 * "V_agua" / "V_domo";//Cálculo del nivel de agua en %
0060 "P_Domo" := ("m_vapor" * 8.314 * ("T_sat" + 273.15)) / (("V_domo" - "V_agua") * 0.01802);//Cálculo de la pre-
sión dentro del domo en Pa
0061 "P_Cabezal" := "P_Domo" - 103421;//Cálculo de la presión en el cabezal, con pérdidas de 206843 (30 psi)
0062 IF "P_Cabezal" < 0 THEN//La presión en el cabezal no puede ser menor a cero
0063   "P_Cabezal" := 0;
0064 END_IF;
0065 "F_lbhr_combs" := "m_Combustible" * 2.20462 * 20 * 60 * 60;//Conversión del flujo de combustible a lb/hr
0066 "F_lbhr_aire" := "m_aire" * 2.20462 * 20 * 60 * 60;//Conversión del flujo de aire a lb/hr
0067 IF "m_vapor_generado" <> 0 THEN//Conversión del flujo de vapor a lb/hr
0068   "F_lbhr_vapor" := "m_vapor_generado" * 2.20462 * 20 * 60 * 60;
0069 END_IF;
0070 IF "P_Cabezal" = 0 THEN
0071   "F_lbhr_vapor" := 0;
0072 END_IF;
0073 "Flujo Combs" := "F_lbhr_combs";//Se copia el flujo calculado a la variable de control
0074 "Flujo Vapor" := "Demanda";
0075 "Flujo Masico Vapor" := "Demanda";//Se copia el flujo calculado a la variable de control
0076 "Presion Vapor" := "P_Cabezal" / 6894.76;//Se copia la presión calculada a la variable de control
0077 "m_gases" := "m_aire" - "m_O2" + "m_O2gases";//Cálculo de la masa de los gases
0078 "Oxigeno" := ("m_O2gases" / "m_gases") * 100;//Cálculo del porcentaje de oxígeno
0079 "Nivel Agua" := "Nivel";
0080 "Presion Domo" := "P_Domo" / 6894.76;
0081 "Flujo Agua" := "m_agua_alim" * 2.20462 * 20 * 60 * 60;

```

Figura A. 22. Programa de la simulación. (Tomado de TIA Portal V13)