

**SIMULADOR BÁSICO PARA LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE
CALDERAS DE TIPO PIROTUBULAR**

**MOISÉS MEJÍA ROJAS
JULIÁN SÁNCHEZ MEJÍA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2010

**SIMULADOR BÁSICO PARA LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE
CALDERAS DE TIPO PIROTUBULAR**

**MOISÉS MEJÍA ROJAS
JULIÁN SÁNCHEZ MEJÍA**

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

**Director
OMAR A. GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2010**

DEDICATORIA

A Dios

*A mis papas, Moisés y Nieves, por tan invaluable esfuerzo y
perseverancia para alcanzar este gran logro.*

*A mis hermanas Ivonne y Mónica, por estar siempre a mi lado con su
cariño y comprensión.*

MOISÉS MEJÍA ROJAS

DEDICATORIA

A Dios

A la memoria de mi padre Alonso, por su apoyo constante y ser un ejemplo de vida

A mi madre Berta, por creer ciegamente en mí en todo momento

A la memoria de mi abuela Lucila, por sus oraciones y cuidados

A mis tíos, especialmente a: Darío, Néstor, Mario y Jaime; por su ayuda permanente a lo largo de la carrera.

A la familia Blanco, por la hospitalidad y cariño brindado.

JULIÁN SÁNCHEZ MEJÍA.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Omar Armando Gelvez Arocha, docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su colaboración, ayuda desinteresada, apoyo constante durante el desarrollo del proyecto y por su entrañable vocación a la enseñanza.

Al Ingeniero Jorge Enrique Meneses, por su oportuna y temprana colaboración en el tema de Implementación de los métodos Grafcet y Gemma en los sistemas de control de una caldera pirotubular.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CALDERAS	3
1.1 DEFINICIÓN.....	3
1.2 ELEMENTOS BÁSICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA.....	4
1.2.1 Fuego.....	4
1.2.2 Agua.....	5
1.2.3 Superficie de intercambio de calor	5
1.3 CLASIFICACIÓN.....	5
1.3.1 Calderas Acuotubulares.....	7
1.3.2 Calderas Piro tubulares.....	10
2. SISTEMAS DE UNA CALDERA DE TIPO PIROTUBULAR	14
2.1 SISTEMA DE AGUA-VAPOR.....	15
2.1.1 Sistema de alimentación de agua.....	15
2.1.2 Sistema de vaporización de agua.....	22
2.2 SISTEMA DE COMBUSTIÓN.....	23
2.2.1 Sistema de ignición.....	24
2.2.2 Sistema principal de combustible.....	28
3. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO EN UNA CALDERA DE TIPO PIROTUBULAR	34
3.1 CONTROL EN EL ENCENDIDO DE UNA CALDERA PIROTUBULAR.....	34
3.2 CONTROL EN LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR.....	44
3.2.1 Controlador de estado sólido (on/off)	45
3.2.2 Controlador continuo por computadora.....	46

4. MODELADO SECUENCIAL DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE UNA CALDERA DE TIPO PIROTUBULAR.	52
4.1 GRAFCET (Gráfico de comando etapa- transición).	53
4.1.1 Etapas	54
4.1.2 Transiciones.....	59
4.1.3 Uniones orientadas.	60
4.1.4. Reglas de evolución.....	60
4.1.5 Estructuras principales.....	63
4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA GRAFCET A LOS SISTEMAS BÁSICOS DE UNA CALDERA PIROTUBULAR.	64
4.2.1 Modelado secuencial para el arranque de una Caldera de tipo Piro­ tubular.	65
4.2.2 Modelado secuencial de la operación en modo continuo para una Caldera de tipo Piro­ tubular.	71
4.2.3 Modelado secuencial para la operación en modo ON –OFF de una Caldera de tipo Piro­ tubular.	75
4.3 GUIA GEMMA PARA MODOS DE MARCHA Y PARADAS EN UNA CALDERA PIROTUBULAR.....	77
4.3.1 Presentación de la guía GEMMA.	78
4.3.2 Implementación la guía GEMMA en el modelado secuencial de los sistemas de encendido y operación de una caldera piro­ tubular.	81
4.3.3 Presentación de Grafcet completo de arranque y operación para una caldera piro­ tubular.	84
5. SIMULADOR BÁSICO PARA LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE CALDERAS DE TIPO PIROTUBULAR.....	86
5.1 HERRAMIENTAS DE DESARROLLO.....	86
5.1.1 Hardware utilizado.	86
5.1.2 Software utilizado.....	86

5.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.....	90
5.2.1 Pantalla de presentación	91
5.2.2 Menú principal.....	91
5.2.3 Módulo de subsistemas de la caldera.	92
5.2.4 Módulo de Simulación de la operación y control.....	97
5.2.5 Soportes teóricos.	109
5.3 EXPERIENCIA INTERACTIVA.	113
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	117
6.1 CONCLUSIONES.....	117
6.2 RECOMENDACIONES.	119
BIBLIOGRAFÍA.....	120
ANEXOS.....	121

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación general de los combustibles	4
Figura 2. Caldera acuotubular	8
Figura 3. Caldera pirotubular	11
Figura 4. Diagrama general de una caldera pirotubular.....	14
Figura 5. Circuito de tratamiento de agua	16
Figura 6. Bomba de alimentación de agua.....	19
Figura 7. Tanque de condensado.....	20
Figura 8. Caminos de alimentación del agua hacia la caldera.....	21
Figura 9. Conjunto de válvulas del sistema de alimentación de agua	21
Figura 10. Componentes del sistema de vaporización de agua	22
Figura 11. Ventilador de tiro inducido.....	25
Figura 12. Componentes del sistema de suministro de aire	26
Figura 13. Barrido de gases dentro de la caldera	27
Figura 14. Sistema de combustible piloto	28
Figura 15. Sistema principal de combustible.....	29
Figura 16. Regulador de gas	30
Figura 17. Interruptor de presión (PAG).....	31
Figura 18. Válvula principal de combustible.....	32
Figura 19. Manómetro de baja presión.....	32
Figura 20. Servo Válvula de control proporcional de gas.	33
Figura 21. Esquema eléctrico Fireye.....	36
Figura 22. Control de nivel tipo McDonnell	39
Figura 23. Despiece de controlador de nivel tipo Mcdonnell	41
Figura 24. Control de presión de vapor	43
Figura 25. Válvula de seguridad.....	44
Figura 26. (A) Característica de un control on-off ideal y modificaciones con (B) zona muerta y (C) histéresis.....	45
Figura 27. Transductores de presión.....	50

Figura 28. Variador de velocidad del motor ventilador.....	51
Figura 29. Representación de las etapas en un diagrama secuencial.	55
Figura 30. Acción asociada a la etapa 1 (nivel 1)	55
Figura 31. Acción asociada a la etapa 1 (nivel 2)	56
Figura 32. Representación gráfica de la acción condicional.....	57
Figura 33. Representación gráfica de la acción retardada	57
Figura 34. Representación gráfica de la acción limitada.	58
Figura 35. Representación gráfica de la acción de pulso	58
Figura 36. Representación gráfica de la acción memorizada.....	59
Figura 37. Representación literal y simbólica de la receptividad	60
Figura 38. Divergencia en O.....	61
Figura 39. Convergencia en O	62
Figura 40. Divergencia en AND.....	62
Figura 41. Convergencia en AND.....	62
Figura 42. Secuencia única	63
Figura 43. Secuencias simultáneas.....	64
Figura 44. Grafcet de primer nivel para el arranque de una caldera de tipo pirotubular	67
Figura 45. Grafcet de segundo nivel para el arranque de una caldera de tipo pirotubular	70
Figura 46. Circuito eléctrico del encendido de la caldera	71
Figura 47. Grafcet de primer nivel para la operación de la caldera en control continuo	73
Figura 48. Grafcet de segundo nivel para la operación de la caldera en control continuo	74
Figura 49. Grafcet de primer nivel para la operación de la caldera en control ON- OFF	76
Figura 50. Grafcet de primer nivel para la operación de la caldera en control ON- OFF	77
Figura 51. Modos de funcionamiento según la guía GEMMA.....	79
Figura 52. GEMMA completo de una caldera pirotubular	82

Figura 53. Graficet completo de funcionamiento de una caldera de tipo pirotubular.....	85
Figura 54. Entorno de Adobe illustrator CS4.....	87
Figura 55. Entorno de Adobe Flash CS4	89
Figura 56. Ambiente de programación de ActionScript.....	90
Figura 57. Pantalla de presentación.....	91
Figura 58. Menú principal	92
Figura 59. Presentación del tratamiento	93
Figura 60. Acceso al Pdf y al cuestionario del módulo de tratamiento de agua	94
Figura 61. Sistema de control de nivel	95
Figura 62. Sistema de combustión	96
Figura 63. Sistema de generación de vapor	97
Figura 64. Secuencia de encendido general.....	98
Figura 65. Tablero de arranque.....	99
Figura 66. Llenado frontal de la caldera.....	100
Figura 67. Graficets de encendido de la caldera para las etapas de llenado de la caldera y encendido del ventilador	101
Figura 68. Barrido de gases	102
Figura 69. Ignición en la caldera	103
Figura 70. Combustión	104
Figura 71. Generación de vapor en la caldera.....	105
Figura 72. Modo de operación ON-OFF.....	106
Figura 73. Modo de operación con control continuo	107
Figura 74. Falla en el control de nivel de la caldera.....	108
Figura 75. Falla en el control de presión	109
Figura 76. Pantalla de inicio del cuestionario para la puesta en marcha y operación de calderas de tipo pirotubular	112
Figura 77. Introducción al uso del simulador.....	113
Figura 78. Manejo del simulador por parte de los estudiantes	114
Figura 79. Test para usuarios.....	115
Figura 80. Calificación promedio del test para usuarios	115
Figura 81. Paso 3 de la instalación	122

Figura 82. Botón ver Pdf.....	123
Figura 83. Botón hacer cuestionario.....	124
Figura 84. Botón ver Grafcet	124
Figura 85. Botones anterior y siguiente.....	124
Figura 86. Botón inicio.....	125
Figura 87. Botón cerrar.....	125
Figura 88. Botón de arranque.....	125
Figura 89. Mano Virtual	126
Figura 90. Elementos guía representados en el entorno del simulador	127

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones del controlador de estado sólido (Fireye).....	35
Tabla 2. Distribución de terminales del Fireye.	38
Tabla 3. Especificaciones técnicas del control de nivel auxiliar.....	42
Tabla 4. Especificaciones técnicas del control de presión de vapor.....	43
Tabla 5. Relación de los elementos del Grafcet de segundo nivel para el arranque de una caldera de tipo pirotubular.	69
Tabla 6. Relación de los elementos del Grafcet de segundo nivel para la operación en control continuo de una caldera de tipo pirotubular.	74
Tabla 7. Relación de los elementos del Grafcet de segundo nivel para la operación en control ON-OFF de una caldera de tipo pirotubular.	77

RESUMEN

TÍTULO:
SIMULADOR BÁSICO PARA LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE CALDERAS DE TIPO PIROTUBULAR ♦.

AUTORES:
Moisés Mejía Rojas
Julián Sánchez Mejía ♦♦

PALABRAS CLAVES:
Calderas Pirotubulares, simulación, operación, subsistemas, Grafcet.

DESCRIPCIÓN:
En la universidad industrial de Santander se viene haciendo una reestructuración de los programas de pregrado con el único propósito de mejorar el nivel de enseñanza, buscando una mejor fundamentación a lo largo de las carreras, que permita ayudar a la construcción por parte de los estudiantes, de espacios de confrontación de sus conocimientos y capacidades, ya que para un buen desempeño profesional por parte del recién egresado, debe haber en este una preparación adecuada, teniendo en cuenta que el ambiente industrial es cada vez más competitivo y con una enorme evolución.

El simulador básico para la puesta en marcha y operación de calderas de tipo Pirotubular pretende ser un medio interactivo para el complemento en la formación del Ingeniero Mecánico en el área de Sistemas Térmicos, permitiendo al estudiante mirar con una óptica más clara la aplicabilidad de la formación académica a la industria de una manera práctica y entretenida.

Esta herramienta fue diseñada a través de los programas Adobe Flash CS4 y Adobe Illustrator CS4, y sus plataformas de ejecución son el Flash Player y el Mozilla. El simulador está dividido en tres módulos de la siguiente manera: subsistemas de la caldera (describe cada uno de los sistemas que hacen parte de la caldera con sus respectivos componentes), simulador de operación y control (ilustra las etapas de encendido de la caldera, los tipos de control usados en el equipo y las fallas más comunes tanto en el encendido como en la operación), soporte teórico (contiene el manual de usuario, los diagramas secuenciales Grafcet, documentos complementarios y cuestionarios de evaluación).

♦ Proyecto de grado

♦♦ Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Omar Armando Gelvez Arocha

SUMMARY

TITLE:

BASIC SIMULATOR FOR STARTING AND OPERATION OF FIRE TUBE BOILERS[♦].

AUTHORS:

Moisés Mejía Rojas

Julián Sánchez Mejía^{♦♦}

KEY WORDS:

Fire tube boilers, simulation, operation, subsystems, Grafcet.

DESCRIPTION:

The Universidad Industrial de Santander has been reforming the undergraduate programs with the purpose of improving the education level, looking for a better foundation in the course of the careers, that would assist the construction on behalf of the students, of confrontational spaces of his knowledge and capacities, because for a good professional performance by the newly graduated, must have adequate preparation in this, given that industrial environment is increasingly competitive and great developments.

The basic simulator for the starting and operation of fire tube boilers intended to be an interactive means for the complement in the formation of the Mechanical Engineer in the area of Thermal Systems, allowing the student to look with a clearer perspective the applicability of training academia to industry in a practical and entertaining.

This tool was designed through the programs Adobe Flash CS4 and Adobe Illustrator CS4, and their platforms of execution are the Flash Player and Mozilla. The simulator is divided into three modules of the following way: Subsystems of the boiler (describe each one of the systems that are part of the boiler with their respective components), operation and control simulator (illustrate the stages of ignition of the boiler, the types of control used in the machine and the most common faults so much in the starting as in the operation), theoretic support (contains user's manual, Grafcet sequential diagrams, complementary documents and questionnaires of evaluation).

[♦] Graduation Project

^{♦♦} Faculty of Physics-Mechanic Engineerings, School of Mechanic Engineering, Director Omar Armando Gelvez Arocha

INTRODUCCIÓN

El constante avance en la transmisión del conocimiento plantea retos muy grandes tanto a los educadores como a los estudiantes, por el aumento de la información y el acceso cada día más fácil a esta. Con el objetivo de contribuir con esta misión educativa que cumple la escuela de Ingeniería Mecánica se hacen necesarios crear medios educativos en donde los estudiantes sin dejar de lado la educación presencial, complementen este método formativo de manera didáctica, creando un sentido de responsabilidad amplio con su capacitación a la vida laboral para lograr mirar con una óptica más clara la aplicabilidad de la formación académica en la industria.

El presente proyecto de grado pretende complementar la labor educativa de la escuela de Ingeniería Mecánica en el área de Sistemas Térmicos, en donde de manera interactiva el estudiante encuentre los pasos a seguir para la puesta en funcionamiento y los modos de operación de una Caldera de tipo Piro-tubular, permitiéndole un breve acercamiento a la industria sin exponerse a los riesgos que trae la manipulación de equipos a presión.

El simulador básico para la puesta en marcha de Calderas de tipo Piro-tubular consta de tres grandes módulos en donde el usuario de forma ordenada deberá seguir las indicaciones que brinda el programa, para la comprensión total de los conceptos tratados por la herramienta.

En el capítulo 1 se da una introducción al tema de Calderas, se relacionan los elementos básicos para su funcionamiento y su clasificación.

En el capítulo 2 se presentan los sistemas que hacen parte de la caldera, como es el caso del sistema de agua-vapor y el sistema de combustión.

En el capítulo 3 se habla de los diferentes tipos de control usados para calderas piro-tubulares, así como los elementos que hacen posible cada modo de operación del equipo.

El capítulo 4 trata la implementación de los métodos Gráficos Grafcet y Gemma para la obtención del automatismo de una Caldera Piro-tubular; mostrando los diagramas obtenidos tanto para el arranque como para los modos de operación del equipo.

En el capítulo 5 se presenta el Simulador propiamente dicho, las herramientas usadas para su desarrollo, una descripción de los contenidos de los módulos y submódulos, así como una experiencia interactiva con un grupo de estudiantes.

El capítulo 6 contiene las conclusiones y recomendaciones del trabajo de grado.

1. CALDERAS

1.1 DEFINICIÓN.

Una caldera es un recipiente metálico fabricado de paredes resistentes, en el cual agua a determinada presión es transformada en vapor, aprovechando la energía química de un combustible que luego de quemarse con aire producirá energía de tipo térmica.

Una caldera está diseñada para obtener el máximo calor posible en el proceso de la combustión; este calor recibido de la caldera esta dado por los tres mecanismos de transferencia de calor: la conducción se da entre las paredes del hogar, la convección es producida por el calentamiento de tubos de humo con los productos de la combustión, y la radiación por el intercambio de calor de la llama con las paredes del hogar.

Las calderas tienen una gran importancia dentro de la industria, ya que generalmente son el punto de partida en la producción de energía en la mayoría de las empresas, donde su uso también está ligado a los sistemas de calefacción.

Para el correcto funcionamiento de la caldera, esta estará formada por diferentes sistemas los cuales se encargarán de garantizar un desempeño lo más óptimo posible, brindando seguridad tanto al personal operario como al equipo.

1.2 ELEMENTOS BÁSICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA.

Los tres elementos básicos para que una caldera pueda operar son: el fuego, agua de alimentación y una superficie de transferencia de calor.

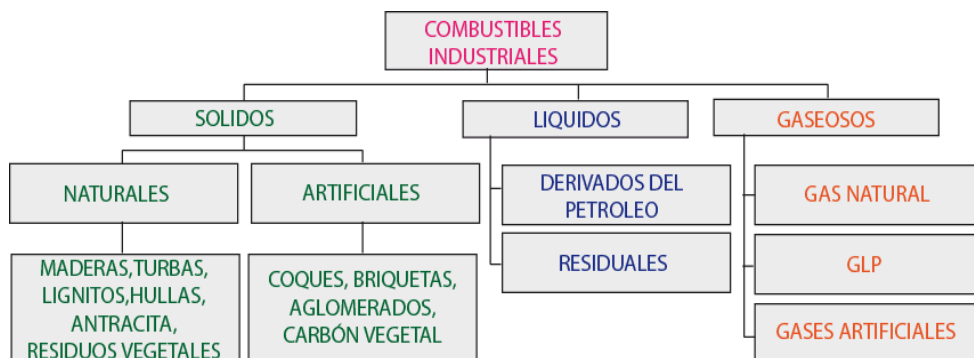
1.2.1 Fuego.

El fuego es el resultado del proceso de combustión, es necesario mantener una llama lo más uniformemente posible, por esta razón la combustión se debe dar de manera óptima y sin daños al medio ambiente.

En el proceso de combustión son necesarios varios elementos: un combustible, un comburente (generalmente es aire) y un agente externo que produzca la ignición por medio de la chispa producida gracias a una bujía. Al darse este proceso tendremos una reacción química del combustible con el aire para producir gases de combustión y por supuesto generar energía en forma de calor, energía que es aprovechada por la caldera para evaporar el agua.

A continuación se muestra una tabla con los diferentes tipos de combustibles; algunos de ellos utilizados para la combustión en calderas.

Figura 1. Clasificación general de los combustibles



Fuente: el autor

1.2.2 Agua

El agua de alimentación para calderas debe llevar tratamiento previo antes de entrar al equipo, para esta finalidad es necesario un circuito de tratamiento de agua, con el fin de realizar tratamientos de ablandamiento, desalinización y en general una purificación del fluido por medio de diferentes procesos de tipo químico, de no llevarse a cabo este tipo de tratamiento, la caldera sufrirá problemas de incrustaciones, sedimentación, desgaste por material en partículas, etc.

1.2.3 Superficie de intercambio de calor

La tubería por la que circulan los gases en las calderas pirotubulares o el agua en las acuotubulares es fundamental para una eficiente transferencia de calor. De la buena combustión y del tratamiento de agua, así como de las características físicas del material de intercambio de calor depende que el flujo de energía de los gases de combustión hacia el agua sea lo más eficiente posible.

1.3 CLASIFICACIÓN.

Las calderas tienen una amplia clasificación de acuerdo con algunas de sus características físicas, su principio de funcionamiento o la aplicación para la cual están diseñadas.

Las formas más comunes de clasificación de las calderas son:

Según la disposición de fluidos:

- Acuotubulares.
- Pirotubulares.

Según configuración geométrica:

- Horizontal.
- Vertical.

Según la clase de combustible:

- Sólido.
- Líquido.
- Gaseoso.

Según el mecanismo de transmisión de calor dominante:

- Convección.
- Radiación.
- radiación y convección.

Según Por el tiro:

- tiro natural.
- hogar presurizado.
- hogar equilibrado.

Según por presión:

- de baja presión.
- de media presión.
- de alta presión.

Aunque se pueden clasificar las calderas con diferentes criterios, podemos decir que existen dos tipos básicos de calderas: acuotubulares y pirotubulares.

1.3.1 Calderas Acuotubulares.

En las calderas acuotubulares, el agua circula por dentro de tubos, pasando los gases calientes alrededor de los tubos. Estos tubos están, generalmente conectados a dos calderines, un calderín superior y otro inferior. En el calderín superior de vapor se produce la separación del vapor existente en el agua en circulación, y en el inferior se depositan los lodos y residuos de la separación de vapor y agua líquida.

Los tubos que unen ambos calderines se distribuyen de forma que una parte de ellos queda en el lado caliente de la caldera y la otra parte en el lado frío, El agua de los tubos del lado caliente es parcialmente evaporada de forma que dicho vapor asciende hacia el calderín superior debido a la menor densidad del vapor con respecto al agua. El agua de la parte fría circula del calderín superior al inferior debido a la mayor densidad del agua en esta zona, de forma que se produce una circulación natural de la masa de agua.

Este tipo calderas suelen operar hasta presiones de 100 bares en el caso de las calderas industriales y de 200 bares en el caso de calderas para centrales térmicas. La capacidad de estas calderas no se acostumbra a medir en BHP, normalmente se expresan en lb/hr de vapor producido o en MBtu/hr, teniendo en cuenta que cada libra de vapor a una presión y temperatura dadas dispone de una cantidad determinada de energía. Este tipo de calderas maneja producciones de 500 Tm/hr y 4000 Tm/hr respectivamente.

Para presiones superiores a las indicadas, a partir de las cuales la circulación desciende rápidamente debido a que las densidades del agua y el vapor son similares, se utilizan calderas acuotubulares de paso único. En estas calderas, la circulación es forzada por un sistema de bombeo que introduce el agua por un extremo y tras ser calentada, sale en forma de vapor por el otro. Su capacidad de trabajo está dada a una presión máxima 350 bares.

Figura 2. Caldera acuotubular



Fuente: Catalogo babcock-wanson

Las ventajas de este tipo de calderas son las siguientes:

- Puede obtenerse una mayor capacidad aumentando el número de tubos, independientemente del diámetro del calderín de vapor.
- El calderín está expuesto al calor radiante de la llama.
- Poseen una gran libertad de incrementar capacidades y presiones.
- Facilitan el montaje y rápida puesta en marcha.

Componentes principales de una caldera de tipo acuotubular.

- **Hogar.**
El hogar es el lugar dentro de la caldera en el cual el combustible se quema con el aire, formando el proceso de combustión, por medio del cual se logrará una liberación de calor. El hogar debe permitir que la combustión se realice de forma adecuada, estos hogares pueden ser básicamente de dos tipos: los refractarios que son construidos con

ladrillos refractarios y los de paredes enfriadas con agua, donde los hogares generalmente tienen paredes de tubos y ladrillos.

- **Sección de transferencia de calor.**

En esta parte de la caldera se dan dos tipos de transferencia de calor: por convección y por radiación. Está formada por tubos enfilados que permiten la circulación del producto de la combustión, en esta parte de la caldera se generará la mayor cantidad de vapor.

- **Economizador.**

El economizador es el encargado de precalentar el agua de alimentación de la caldera, utilizando el calor de los gases que salen por la chimenea, este equipo permite mejorar la eficiencia en la combustión, ya que disminuye el calor requerido para evaporar el agua.

- **Calentador de aire.**

El calentador de aire precalienta el aire a utilizar en la combustión antes de que este entre en contacto con el combustible, esto con el fin de aumentar la eficiencia en el proceso de la combustión y no usar exceso de combustible para el mismo.

Este calentador se hace necesario con el uso de combustibles de alto contenido de humedad. Su principio es aprovechar el calor sensible de los gases que salen por la chimenea, por lo tanto se recupera calor que iría inicialmente a la atmosfera.

- **Sobrecalentador.**

El sobrecalentador es usado para adherir calor adicional a los productos de la combustión, ayudando a generar una ganancia de energía en el vapor que será finalmente usado a la salida de la caldera.

Existen dos tipos de sobrecalentadores: el sobrecalentador de tipo radiante, el cual recibe calor por radiación de forma directa a través de la llama; y el sobrecalentador de tipo convectivo, que obtiene el calor principalmente por el paso de los productos de la combustión a través de los tubos.

1.3.2 Calderas Pirotubulares.

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

Las calderas pirotubulares son calderas de forma cilíndrica, en donde el flujo de los gases de combustión se da por el interior de una serie de tubos que van de placa a placa en el cuerpo de la caldera, estos tubos están bañados por agua lo cual aumenta la transferencia de calor, para la evaporación del agua.

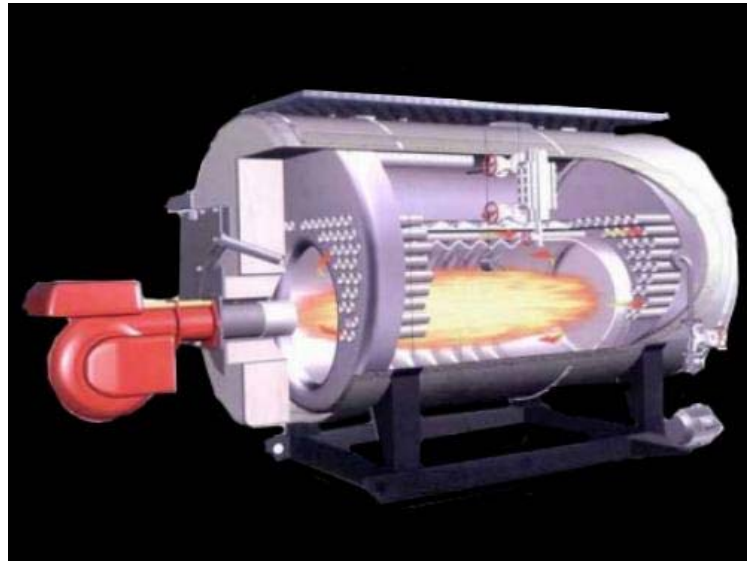
A diferencia de las calderas de tipo acuotubular, la capacidad de las calderas pirotubulares viene dada en unidades de BHP, que no es más que la potencia requerida para evaporar 34.5lb de agua a cien grados centígrados a una presión atmosférica. Su equivalencia en Btu/h es: $1\text{BHP} = 33472\text{Btu/hr}$.

Las calderas de tipo pirotubular manejan presiones de 0 a 300 Psig, las capacidades van de 1BHP a 900 BHP, su máxima producción de vapor de tipo saturado es de 30.000lb/hr. Existen calderas pirotubulares de uno, de dos o de tres pasos, dependiendo de la circulación de los gases por los tubos. Su aplicación se da a nivel de Hospitales, clínicas, hoteles, en general, en industrias donde se requiera vapor como fuente de energía.

Las ventajas de este tipo de caldera son las siguientes:

- Bajo costo, gracias a su sencilla fabricación.
- Se usan para quemar combustibles de tipo gaseoso, líquido y sólido.
- Menores exigencias en cuanto a la pureza del agua de alimentación.
- Mayor flexibilidad de operación.
- No necesitan grandes espacios, por su pequeño tamaño.
- Tienen una buena eficiencia.

Figura 3. Caldera pirotubular



Fuente: Catalogo Calderas Caballano

Componentes principales de una Caldera Pirotubular.

- **Tubo principal.**
El tubo principal es el mismo hogar, en donde se genera la llama producto de la combustión en la caldera, este tubo principal debe tener las condiciones geométricas ideales para permitir una

combustión óptima, el tubo principal está cubierto con un material refractario que permitirá una buena transferencia de calor.

- **Tubos secundarios.**

Los tubos secundarios son los ductos encargados de transportar los gases productos del hogar desde el tubo principal a la chimenea, la cantidad de tubos secundarios depende directamente con la capacidad de generación de vapor que maneja la caldera, los tubos secundarios están en contacto directo con agua, ayudando a la evaporación de agua. Otro factor a tener en cuenta es que los tubos secundarios pueden tener desde uno a tres pasos, de acuerdo al tipo de necesidad que se maneje.

- **Quemador.**

El quemador es el elemento que se encarga de la preparación del combustible con el fin de lograr una combustión lo más eficientemente posible, el quemador debe inyectar el combustible de la manera más idónea para lograr que este se mezcle con el aire correctamente, esta inyección de forma equilibrada se logra gracias a un atomizador.

- **Ventilador.**

El ventilador toma el aire del medio ambiente y lo induce en el quemador de la caldera para su mezcla con el combustible, el aire que llega al quemador debe de tener unas condiciones de presión adecuadas para la una combustión óptima, de lo contrario se tendrá una combustión fallida; razón por la cual la velocidad del ventilador debe manejarse con el fin de lograr esta presión debida.

- **Bomba de alimentación de agua.**

La bomba de alimentación suministra agua previamente tratada a la caldera. Para la puesta en marcha del equipo se debe tener un nivel de agua suficiente para garantizar una operación correcta, por tanto la

bomba debe contar con sensores de nivel que le permitan controlar su funcionamiento.

- **Sistema de alimentación de combustible.**

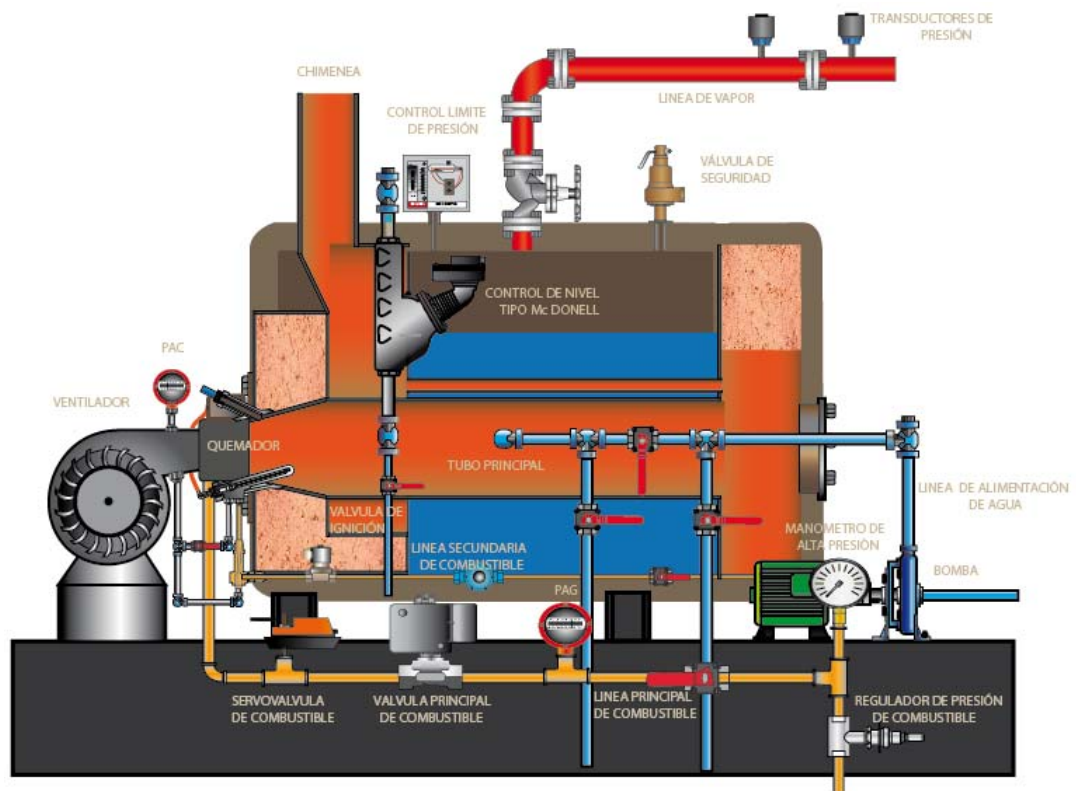
Para la existencia de la combustión es necesario un combustible a ciertas condiciones de presión y temperatura, con el fin de obtener un proceso lo más adecuado posible, este sistema de alimentación de combustible llevará el combustible al quemador para su mezcla con el aire comburente. El sistema contiene controles de presión, válvula y demás para su buen desempeño.

2. SISTEMAS DE UNA CALDERA DE TIPO PIROTUBULAR

Con el fin de comprender de manera precisa el funcionamiento de una caldera, es importante identificar los sistemas que hacen posible su correcta operación.

El siguiente proyecto se ha realizado con base a la caldera de tipo pirotubular que está instalada en el laboratorio de plantas térmicas de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander. El propósito es analizar de forma detallada cada uno de los sistemas de la caldera, estudiando: principios de funcionamiento, mecanismos de control y los parámetros que gobiernan cada sistema. El proceso de producción de vapor se logra por medio de la interacción de los diferentes sistemas y variables que permitan obtener la mejor eficiencia en la caldera.

Figura 4. Diagrama general de una caldera pirotubular



Fuente: el autor.

Desde el punto de vista funcional existen dos sistemas básicos en una caldera:

- Sistema de agua-vapor
- Sistema de combustión

2.1 SISTEMA DE AGUA-VAPOR.

El sistema de agua-vapor tiene como función suministrar agua a la caldera a presiones adecuadas y condiciones químicas aptas, para obtener vapor de la manera más eficiente posible, además mantener un nivel adecuado dentro del recipiente para poder cumplir con este objetivo.

Este sistema a su vez está conformado por dos subsistemas que actúan de forma integrada, estos subsistemas son:

- Sistema de alimentación de agua
- Sistema de vaporización del agua

2.1.1 Sistema de alimentación de agua

El sistema de alimentación de agua es el circuito que se encarga de suministrar agua a la caldera para la producción de vapor, el agua que llega a la caldera debe de tratarse previamente para eliminar sales y otras sustancias disueltas en el agua, que puedan generar problemas en la caldera.

Existen varios procedimientos químicos para el tratamiento de agua en calderas, entre los cuales se encuentran el tratamiento a través de cal de sosa y el basado en permutita, en el caso de la caldera del laboratorio de plantas térmicas, el tratamiento químico del agua se realiza por medio de permutita.

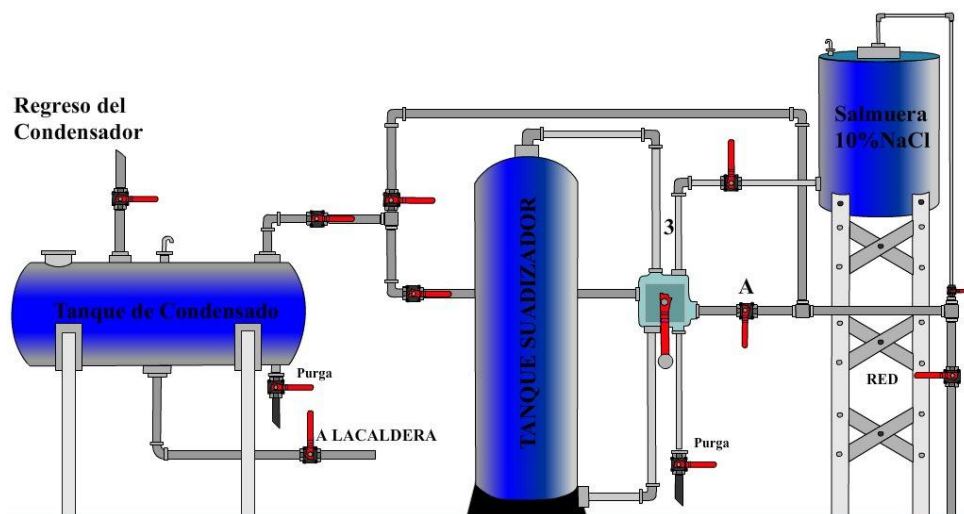
Circuito de tratamiento de agua.

El tratamiento del agua de alimentación de la caldera tiene como finalidad cumplir con los siguientes objetivos:

- Prevención de depósitos de incrustaciones que perjudiquen la transferencia de calor dentro de la caldera, lo cual puede conllevar al sobrecalentamiento del metal del equipo, conllevando a reparaciones costosas y paradas largas del equipo.
- Eliminación de gases corrosivos existentes en el agua de alimentación de la caldera.
- Prevención de agrietamiento intercrystalino o la formación de fisuras en el metal de la caldera.
- Prevención de remanentes de agua y espuma en el fondo de la caldera.

El circuito de tratamiento de agua cuenta con un suavizador a base de permutita de corriente descendente. El agua entra por la parte superior del suavizador de agua y la circulación del fluido es de tipo descendente a través del lecho de permutita.

Figura 5. Circuito de tratamiento de agua



Fuente: el autor

El tratamiento de agua de la caldera tiene dos modos de operación:

- Operación normal
- Operación con regeneración

➤ **Operación normal.**

La operación normal se da de la siguiente manera: El agua entra de la red pública a una válvula tipo multipuerto, para luego pasar al suavizador, en donde el fluido circulará por un lecho de permutita artificial y partículas de cuarzo, al salir del suavizador pasará nuevamente el agua por la válvula multipuerto para luego depositarse en el tanque de condensado. Para realizarse esta operación la válvula A debe estar abierta y la válvula multipuerto en la posición 3. Es importante aclarar que para cualquier modo de operación debe de estar abierta la válvula A.

➤ **Operación con regeneración.**

El uso continuo del suavizador causa una pérdida de propiedades de la permutita, por tal motivo es necesario regenerar estas propiedades, el proceso de regeneración se divide en tres etapas:

- Lavado
- Inyección de salmuera
- Enjuague

➤ **Lavado.**

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

En la etapa de lavado, la válvula A debe de estar cerrada y la válvula multipuerto en la posición 1. Luego de esto se va abriendo poco a poco la válvula A, de manera que se regula el flujo para evitar que la permutita salga por el drenaje; la etapa del lavado dura entre 15 y 20 minutos, el proceso termina cuando el agua salga totalmente clara del suavizador.

➤ **Inyección de salmuera**

La etapa de inyección de salmuera consiste en inyectar salmuera por la parte superior de la unidad mediante un hidroeyector que es incorporado a la válvula multipuerto, lo cual permite la regeneración de la permutita. Esta etapa es posible si se cierra la válvula A y se coloca la válvula multipuerto en la posición 2. Más adelante se abre la válvula A y la válvula C, siendo la válvula C la que controla el nivel del tanque de salmuera, de esta manera el nivel del tanque empieza a descender.

➤ **Enjuague.**

La etapa final de la regeneración es el enjuague con agua para eliminar el exceso de sal y los cloruros de calcio y magnesio que se han formado. Una vez que la salmuera haya sido inyectada en su totalidad, se cierra la válvula de salida del tanque de salmuera (válvula C) y sigue pasando agua por el circuito por un tiempo entre 20 y 30 minutos. La etapa de enjuague termina cuando el agua que salga por el drenaje no tenga sabor salino.

Elementos que conforman el sistema de alimentación de agua.

A continuación se hace referencia a los elementos que conforman el sistema de alimentación de agua en la caldera.

➤ **Bomba de alimentación de agua.**

La bomba de alimentación se encarga de mantener un nivel adecuado de agua dentro de la caldera para garantizar su operación óptima, el encendido y apagado de la bomba están comandados por elementos de control, los cuales la accionarán cuando el nivel este bajo y la desenergizarán en el momento en que el nivel de agua sea elevado. La bomba cuenta con un motor generalmente de tipo trifásico para su operación.

Figura 6. Bomba de alimentación de agua



Fuente: el autor

➤ **Tanque de condensado.**

El tanque de condensado es un recipiente generalmente de tipo cilíndrico, el cual debe garantizar agua a la bomba de alimentación, cada vez que esta lo requiera.

El tanque de condensado está conectado directamente al circuito de tratamiento del agua o en su defecto a la red pública, además debe tener un indicador de nivel para visualizar la altura del agua dentro del tanque, la salida del tanque está conectada a la bomba de alimentación, luego de pasar el fluido por filtros para eliminar impurezas.

Es importante que el tanque tenga dentro de sus elementos una válvula para la purga de este, con el fin de eliminar suciedades e impurezas que se puedan localizar en el fondo del recipiente.

Figura 7. Tanque de condensado



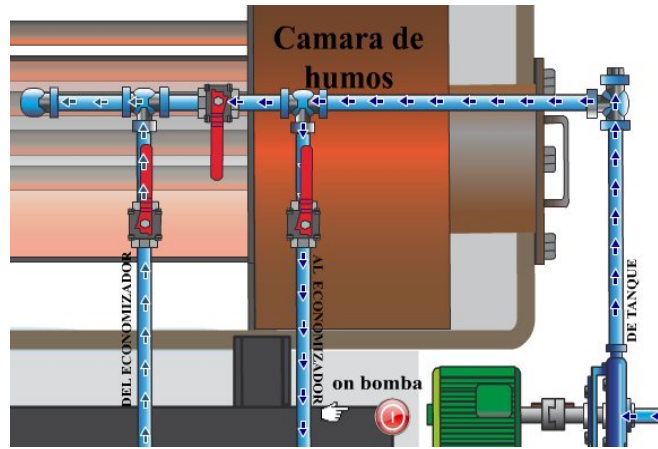
Fuente: el autor

➤ **Economizador.**

Un economizador es un dispositivo mecánico de transferencia de calor que calienta un fluido hasta su punto de ebullición, sin pasar de él. Hacen uso de la entalpía en fluidos que no están lo suficientemente calientes como para ser usados en una caldera, recuperando la potencia que de otra forma se perdería, y mejorando el rendimiento del ciclo de vapor.

El agua proveniente de la bomba de alimentación hacia la caldera, puede tomar dos caminos diferentes, el primero es entrar directamente de la bomba a la caldera, mientras la segunda opción es hacer pasar el agua por un economizador con el fin de aumentar su temperatura, con el fin de aumentar la velocidad de evaporación del agua y obtener una mayor eficiencia dentro del equipo.

Figura 8. Caminos de alimentación del agua hacia la caldera



Fuente: el autor

➤ **Válvulas.**

Las válvulas usadas en el sistema de alimentación de agua son de tipo: globo, compuerta y de cheque globo para aplicaciones de válvulas direccionales. Su utilización se da para permitir o impedir el paso del fluido hacia cierta rama del sistema, estas válvulas cobran gran importancia en el caso de averías de tuberías y uniones, así como en el mantenimiento de la bomba o el tanque de condensado.

Figura 9. Conjunto de válvulas del sistema de alimentación de agua



Fuente: el autor

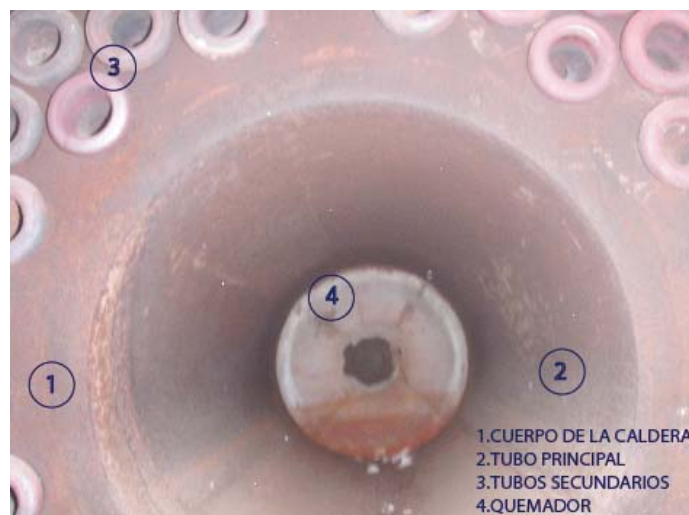
2.1.2 Sistema de vaporización de agua.

El sistema de vaporización de agua en la caldera, requiere para su correcto funcionamiento un recipiente de tipo hermético para soportar altas presiones, de igual manera este recipiente debe tener un recubrimiento de material aislante con el fin de evitar las pérdidas de calor.

Los elementos que componen el sistema de vaporización de agua son:

- El quemador: Es el encargado de mezclar el aire con el combustible de manera que se produzca la combustión.
- Cuerpo de la caldera: Es un recipiente con capacidad de soportar altas presiones y evitar la transferencia de calor, así mismo debe estar fabricado con materiales apropiados para el contacto permanente con el agua.
- Tubo principal: Permite la combustión óptima del combustible y del comburente, además se encarga de almacenar la llama producida en la combustión.
- Tubos secundarios: Transportan los gases de combustión a la chimenea, además transfieren calor al agua para su evaporación.

Figura 10. Componentes del sistema de vaporización de agua



Fuente: el autor

2.2 SISTEMA DE COMBUSTIÓN.

Las calderas son equipos encargados de proporcionar energía en forma de calor, para conseguir esta energía es necesario un proceso llamado combustión.

La combustión es una reacción química de tipo exotérmica en la que se da la oxidación de una sustancia y la reducción de otra, a una temperatura entre los 1000 y 1600 °C.

Los elementos básicos para la combustión son:

- Combustible: Es la sustancia que se oxida, es decir, la que se quema
- Comburente: Es el elemento que se reduce, el comburente más común es el oxígeno.
- Temperatura de ignición: la temperatura de ignición debe ser lo suficientemente elevada para la ignición.

Los factores más importantes a tener en cuenta para un desarrollo óptimo de la combustión y mantener un control adecuado en este proceso son:

- Relación aire / combustible
- Calidad de la mezcla aire / combustible
- Espacio necesario para que se desarrolle una combustión adecuada.
- Análisis de los gases de escape.

Existen diferentes tipos de combustión, por ejemplo: obtenemos una combustión completa cuando se quema todo el combustible con una cantidad mínima de aire, una combustión perfecta se da cuando el combustible es quemado con solo un contenido de aire teórico, mientras que se tendrá el caso de una combustión incompleta cuando no se quema todo el combustible.

La función del sistema de combustión es llevar el gas desde la red pública hasta el quemador y como transportarlo a un sistema secundario para la producción de una llama piloto.

De esta manera el sistema de combustión está conformado por dos subsistemas, así:

- Sistema de ignición.
- Sistema principal de combustible

2.2.1 Sistema de ignición.

Generalmente las igniciones se realizan añadiendo calor a una mezcla a través de una fuente externa, la temperatura a la cual se da este proceso se denomina temperatura de ignición.

La mezcla a la cual se hace referencia esta conformada por aire y combustible, a continuación se explican cada uno de los elementos que hacen posible la formación de la llama piloto dentro de la caldera.

- **Suministro de aire.**

El suministro de aire es uno de los factores fundamentales para el funcionamiento de la caldera, tanto en el encendido de ella, donde cumplirá un papel primordial en el barrido de gases, sino también en la fase de combustión y en la operación en régimen de la caldera.

El propósito es suministrar la cantidad de aire requerida para tener en todo momento la capacidad de producción máxima de la caldera, manteniendo una correcta relación aire combustible.

El elemento usado para este propósito es un ventilador de tiro inducido, que funciona gracias a un motor de velocidad variable, acoplado al ventilador por medio de una correa.

Figura 11. Ventilador de tiro inducido



Fuente: el autor

El sistema de aire utiliza un ventilador para tomar el aire del ambiente y dirigirlo hacia el quemador por un ducto, además cuenta con un interruptor de presión de aire (PAC) normalmente abierto, que actúa como controlador de la presión del aire de combustión, cerrando el circuito de arranque cuando la presión sea de 3 pulgadas de H₂O.

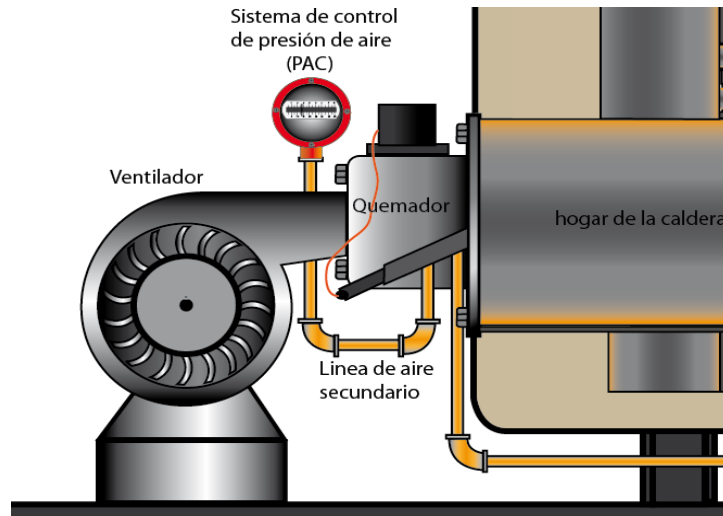
Para el encendido del ventilador, deben de cumplirse ciertas condiciones en el sistema de control de la caldera, estas son: un nivel de agua adecuado dentro de la caldera y una presión de vapor normal.

En el momento en que el ventilador se encienda, se debe tener una presión mayor a 3 pulgadas de H₂O en el flujo de aire, presión medida por el interruptor de presión PAC, para así iniciar con el barrido de gases que se encuentran dentro de la caldera; si no se detecta la presión mínima en el PAC, el circuito de arranque no cerrará y la caldera no continuará su secuencia de encendido.

Para graduar el flujo de aire requerido para la combustión en forma mas precisa, el ventilador cuenta con un variador de velocidad que controla la velocidad en el motor del ventilador.

La combustión en la caldera se realiza por medio de una mezcla entre aire y combustible a través de un quemador, luego de la combustión quedan en el interior de la caldera ciertos gases residuos de esta combustión.

Figura 12. Componentes del sistema de suministro de aire

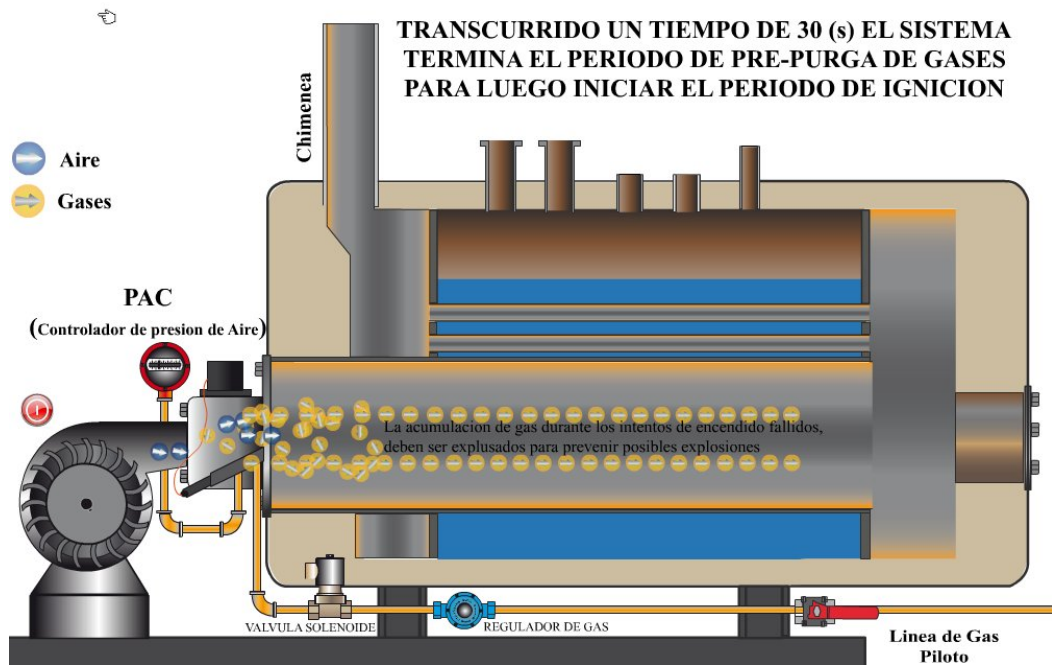


Fuente: el autor

Es necesario por esta razón antes de encender la caldera, evacuar todos estos gases para evitar problemas en la combustión, la extracción de los gases de combustión se realiza por medio del ventilador, el tiempo de extracción de los gases es llamado periodo de prepurga y esta gobernado por medio del controlador de encendido de la caldera.

El periodo de prepurga es manejado por medio de un temporizador, el cual será energizado por el Controlador de encendido de la caldera, luego de haber recibido una señal de presión de aire adecuada, el temporizador actuará por un tiempo de 30 segundos aproximadamente.

Figura 13. Barrido de gases dentro de la caldera



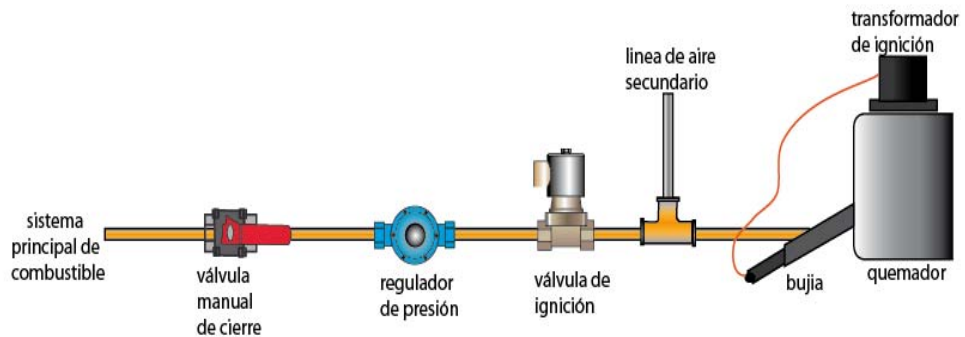
Fuente: el autor.

- **Sistema de combustible piloto.**

Este sistema es el encargado de proporcionar y mantener una llama piloto para lograr el encendido del quemador de la caldera, durante el denominado periodo de ignición. Los componentes de este sistema piloto son los siguientes:

- Regulador de presión
- Válvula de ignición
- Sistema Venturi
- Electrodo de ignición

Figura 14. Sistema de combustible piloto



Fuente: el autor.

En la etapa de ignición se dará apertura a la válvula de ignición, y se energizarán al mismo tiempo el temporizador de ignición y el transformador de ignición. Este transformador de ignición generará un arco eléctrico entre la punta del electrodo y la bujía. El temporizador de ignición se encontrará funcionando por un periodo de 10 segundos.

Durante todo este tiempo se encontrará cerrada la válvula principal de combustible, mientras tanto el aire secundario y un combustible piloto van al sistema Venturi, en donde se mezclarán y gracias al efecto de vacío que proporciona el sistema, esta mezcla llega a través del tubo ignitor y es encendida por el arco eléctrico, además un aire secundario del ventilador ayudará a obtener una calidad en la llama piloto, aire que podrá ser regulado gracias a una válvula de compuerta a la salida del ventilador.

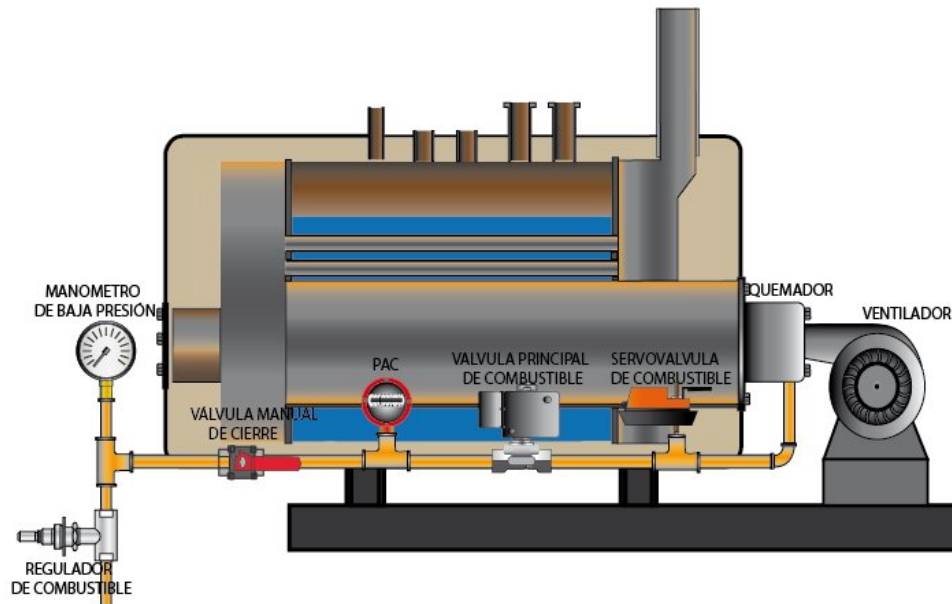
2.2.2 Sistema principal de combustible.

El sistema principal de combustible es el encargado de suministrar el gas necesario a la caldera para el proceso de producción de vapor, el sistema principal de combustible cuenta con los siguientes elementos:

- Regulador de gas.

- Válvula Manual de cierre.
- manómetro de alta y baja presión
- Sensor/Interruptor on/off alta presión de gas, PAG
- Válvula principal de combustible
- Servo válvula de control proporcional de combustible.

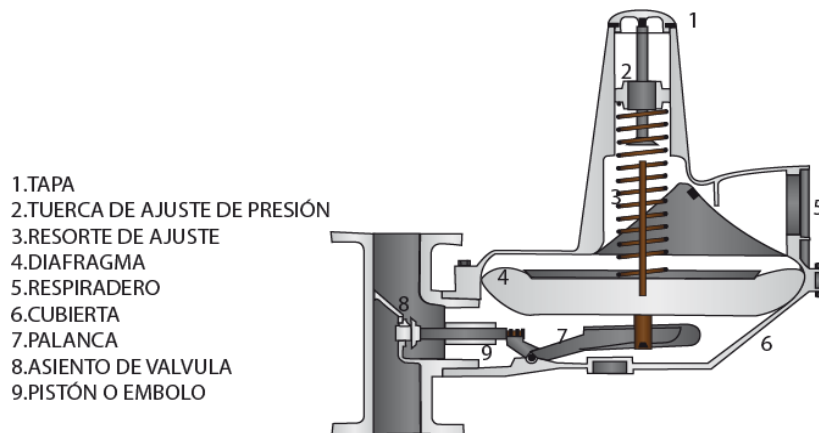
Figura 15. Sistema principal de combustible



Fuente: el autor

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

Figura 16. Regulador de gas



Fuente: el autor.

Interruptor de presión (PAG). Es un interruptor de corriente eléctrica accionado por presión. Su finalidad es regular la presión máxima de combustible que llega al quemador de la caldera.

El interruptor de presión actúa de la misma forma que un interruptor normalmente cerrado, el cual se abrirá al sentir una presión elevada en la línea de combustible (7 pulgadas de mercurio aprox), abriendo a su vez el circuito de combustible de la caldera, desconectando la válvula principal de combustible, logrando así que la caldera se apague.

Figura 17. Interruptor de presión (PAG)

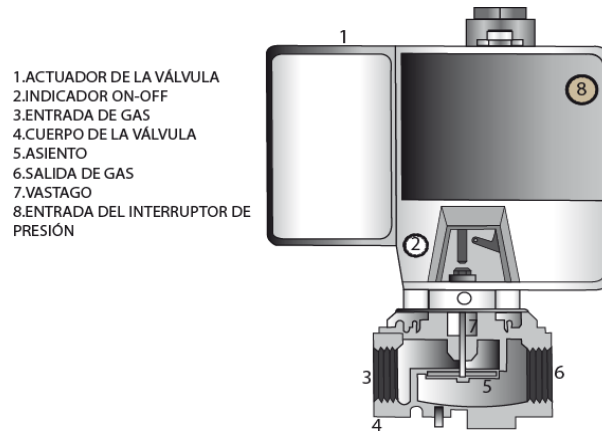


Fuente: el autor.

Válvula principal de combustible. La válvula principal de combustible es la encargada de controlar el paso del combustible hacia el quemador de la caldera. Esta válvula está constituida por un cuerpo y un solenoide, al ser energizado el solenoide de la válvula, se abre la válvula, lo que permite el paso de combustible hacia el quemador.

En el momento en que la válvula sea nuevamente desenergizada esta volverá a su posición por defecto, cortando el paso de combustible al quemador. La válvula principal de combustible es comandada por el controlador de encendido de la caldera.

Figura 18. Válvula principal de combustible



Fuente: el autor

Manómetro de alta y de baja presión. El manómetro de alta presión está ubicado a la entrada de la red de gas, mientras que el de baja presión se encuentra después del regulador de presión, los manómetros más usados en estos sistemas de combustible son los tipo bourdon.

Figura 19. Manómetro de baja presión



Fuente: el autor

Servo válvula de control proporcional de combustible. La servo válvula de combustible permite regular de forma continua y controlada el flujo de combustible hacia el quemador de la caldera, tiene dos modos de operación: manual o por medio de un controlador, este tipo de control continuo permite una combustión mucho más precisa, logrando estabilizar la presión de vapor de la caldera de forma óptima.

Figura 20. Servo Válvula de control proporcional de gas.



Fuente: el autor

3. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO EN UNA CALDERA DE TIPO PIROTUBULAR.

El sistema de control y monitoreo se encarga de gobernar el funcionamiento de todos los sistemas de la caldera, brindando control y seguridad tanto al equipo como a los operarios en la etapa de encendido y en la de operación.

Existen diferentes factores a tener en cuenta en el momento de ejercer control sobre la operación de la caldera, estos factores determinan el estado de las variables de control, los factores a tomar en cuenta son los siguientes:

- Factores a Regular. Son los factores que se deben mantener en un valor preestablecido, estos son: Presión de vapor, relación aire/combustible, nivel de agua y presión de combustible.

- Factor Perturbador. El factor perturbador es la demanda de vapor a la salida de la caldera, esta afecta directamente la presión de vapor del equipo.

- Factores a manipular. Son los factores con los cuales se compensa la influencia del factor perturbador sobre los factores a regular; los principales a tener en cuenta son:
 - Flujo de Agua de Alimentación: debe ser igual al flujo de vapor que sale de la caldera.
 - Flujo de combustible: equilibra la presión de vapor.
 - Flujo de Aire: mantiene una relación aire/combustible adecuada.

3.1 CONTROL EN EL ENCENDIDO DE UNA CALDERA PIROTUBULAR.

El control de encendido de la caldera se realiza por medio de un controlador de estado sólido, el cual se encarga de ejecutar una secuencia lógica para el

arranque del equipo de forma automática, así mismo evita que se den errores de manejo por parte de operarios.

La caldera del laboratorio de plantas térmicas tiene un controlador de encendido marca Fireye, serie M2.

Tabla 1. Especificaciones del controlador de estado sólido (Fireye).

FUENTE	120 V (Mínimo 102V, Máximo 132V)	
ENERGÍA CONSUMIDA	5,4VA	
SERIE	M2	
PESO APROXIMADO	5 LIBRAS	
TEMPERATURA AMBIENTE LIMITE		
CONTROL UVM-TFM	MÁXIMA 125°F	MINIMA - 40°F
SCANER UV2	MÁXIMA 200°F	MINIMA – 40°F
TIEMPO DE RESPUESTA A LA FALLA DE LLAMA		
SCANER UVM2	4 SEGUNDOS	
PRUEBA DE IGNICIÓN	4 SEGUNDOS	

Fuente: Fireye Corporation.

El Fireye es un modulo de tipo compacto, el cual está diseñado para proporcionar un encendido automático y una supervisión continua de la llama de la caldera, cuenta con un detector de llama de tipo ultravioleta para vigilar en todo momento el proceso la combustión. Así mismo el Fireye controlará tiempos de prepurga e ignición en la caldera.

En el caso de una falla en el encendido o luego de suministrar la orden de paro de seguridad, se bloqueará la unidad y se activará una alarma de falla en el circuito. Luego de una falla es necesario dar una orden de rearme para reactivar el Fireye.

A continuación se muestra el esquema eléctrico del Fireye.

Por otra parte si la presión de vapor dentro de la caldera es alta, se debe abrir la válvula de salida de vapor, con el fin de despresurizar la caldera y así poder seguir con el proceso de arranque.

2. Al estar cerrados tanto los contactos relacionados con el nivel de agua y el contacto de presión de vapor; se energiza el ventilador de la caldera, el cual debe garantizar una presión de aire suficiente para iniciar con un barrido de gases dentro del equipo, esta presión de aire será detectada y manipulada por medio de un controlador de presión de aire (PAC), el cual debe garantizar una presión de aire MINÍMA para continuar con la secuencia, de lo contrario se apagará el FIREYE.

3. Con el ventilador encendido y una correcta presión de aire, se energiza el temporizador de barrido de gases, el cual se encontrará encendido por cerca de 30 segundos, periodo conocido como prepurga.

4. Al terminar el tiempo de prepurga, el controlador energizará automáticamente los siguientes elementos: Válvula de ignición, transformador de ignición y el temporizador de ignición.

5. El temporizador de ignición estará energizado aproximadamente durante 10 segundos, tiempo en el cual debe obtenerse una llama piloto a través de una chispa generada por la bujía y gas de la línea piloto; si al término de los 10 segundos no se detecta llama por parte del sensor ultravioleta (UVM), se tendrá una alarma de ausencia de llama.

6. Si la llama piloto es detectada y existe una presión de gas correcta para la combustión, se energizará la válvula principal de combustible. El elemento encargado de verificar una presión de combustible adecuada es un controlador de presión de combustible (PAG), cuyo principio de funcionamiento es igual al controlador de presión de aire (PAC), la diferencia es que el PAG se encarga de limitar la presión del combustible, es decir, cuando exista una presión

MÁXIMA el controlador impedirá el encendido de la válvula principal de combustible; generando una alarma por alta presión de combustible y apagando el FIREYE.

Una vez energizada la válvula principal de combustible y con el ventilador encendido, empieza la etapa de combustión en la caldera.

Tabla 2. Distribución de terminales del Fireye.

TERMINAL	CONEXIÓN
1	FASE
2	NEUTRO
3	VÁLVULA DE IGNICIÓN VI
4	TRANSFORMADOR DE IGNICIÓN
5	VÁLVULA PRINCIPAL DE COMBUSTIBLE
6	ENERGIZAR CONTROL ELECTRÓNICO
7	CONTROLES DE OPERACIÓN CN,PV,RC
8	ENERGIZAR VENTILADOR Y TERMINAL 6
A	LUZ INDICADORA DE BAJO NIVEL
S1 y S2	FOTOCELDA FC

Fuente: Fireye Corporation.

Como se pudo observar en la secuencia de encendido de la caldera, para un correcto funcionamiento, el Fireye debe contar con ciertos controles auxiliares, los cuales interactúan de forma dinámica con él, estos controles son:

- Control principal de nivel de agua
- Control auxiliar de nivel de agua
- Control Límite de Presión de Vapor.

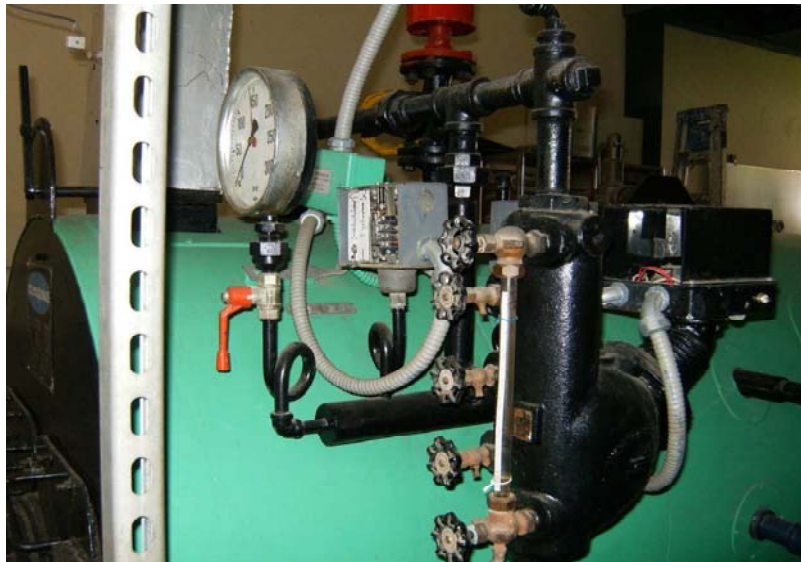
- **Control principal de nivel de agua.**

El control principal de nivel de agua en la caldera, maneja el arranque y parada del motor bomba de agua que se encarga de mantener un nivel de líquido adecuado dentro del equipo.

En el caso de la caldera del laboratorio de plantas térmicas, se usa como elemento para control de nivel, un control de nivel de agua marca McDonell serie 157, el cual consta de un flotador resistente a condiciones altas de tensión; el flotador está comunicado a dos interruptores tipo mercurio, cuyos contactos energizarán o desenergizarán la bomba, igualmente se activará una alarma por bajo nivel en la caldera en caso de existir este problema.

El control de nivel McDonell es usado para calderas de vapor de baja y media presión, como es el caso de calderas de tipo residencial, comercial e industrial, para una presión máxima de trabajo de 150Psi.

Figura 22. Control de nivel tipo McDonnell



Fuente: el autor.

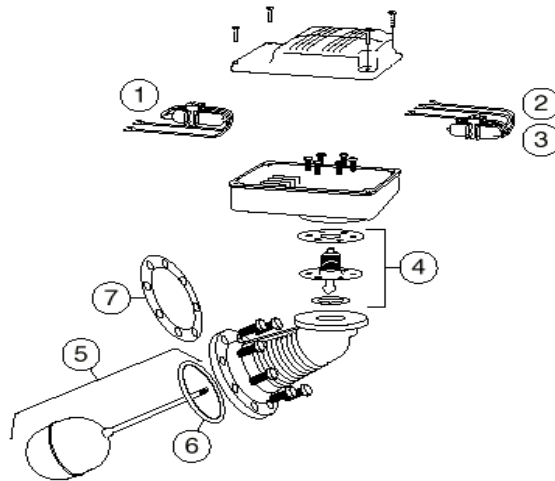
El cuerpo del controlador tiene un tubo de vidrio que permite observar el nivel de agua dentro de la caldera en todo momento a través de una columna de agua; así mismo cuenta con tres válvulas que tienen como función permitir la salida de aire de la caldera, la válvula de la parte superior debe de permanecer abierta durante el encendido de la caldera, hasta que comience a salir vapor por ella.

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

El control tiene una flecha horizontal que indica el nivel mínimo de agua de funcionamiento de la caldera, este nivel es de aproximadamente 1.5 pulgadas por debajo del nivel normal en el equipo, de esta manera la bomba se enciende cuando el nivel de agua baje $\frac{3}{4}$ con respecto al nivel marcado por la flecha horizontal, la bomba estará encendida hasta obtener un nivel adecuado.

En el momento en que exista un bajo nivel en la caldera se activará una alarma por bajo nivel y a su vez se bloqueará el circuito del quemador, esto sucederá hasta que se restablezca el nivel de agua en el equipo.

Figura 23.Despiece de controlador de nivel tipo McDonnell



1. Switch de mercurio de dos alambres
2. Switch de mercurio de tres alambres
3. Reset manual de Switch de mercurio de tres alambres
4. Fuelle de ensamble
5. Flotador y varilla de ensamble
6. Empaque termico
7. Sello térmico

Fuente: El autor.

▪ **Control auxiliar de nivel de agua.**

Se acciona cuando el control de flotador falla, protege la caldera por bajo nivel de agua apagando el quemador, posee un electrodo que al dejar de censar agua inhabilita el circuito de la caldera. De la misma forma impide que inicie la secuencia de arranque de la caldera, cuando no se cuenta con un nivel de agua adecuado.

La caldera del laboratorio de plantas térmicas tiene un control auxiliar de nivel marca Warrick, cuyas especificaciones técnicas se muestran a continuación.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del control de nivel auxiliar

ESPECIFICACIONES DEL CONTROL AUXILIAR DE NIVEL	
FUENTE	110 VOLTIOS CA
ELECTRODO	REFERENCIA #3BIA
RELAY DE CONTROL REFERENCIA	REFERENCIA #161DOA

Fuente: www.boiler-burners.com

Los dos controles de nivel, tanto el principal como el auxiliar, envían señales al controlador de encendido de la caldera para permitir el inicio de la secuencia de arranque, por ende, si alguno de los contactos correspondientes a estos controles está abierto, el Fireye detendrá su operación hasta restablecer la falla en el sistema.

Es importante saber que en caso de detectar el nivel de agua por debajo de la mitad del volumen total, no se debe suministrar agua fría a la caldera porque se corre el riesgo de una implosión por choque térmico brusco.

- **Control límite de presión de vapor.**

El control límite de presión de vapor se encarga de proteger el sistema contra sobrepresiones, apagando la caldera cuando esta alcance una presión de vapor bastante alta (100 a 110 Psi), el rango de presiones que maneja el control de presión de vapor está entre 95 y 110 Psi, es decir, en el momento que el valor de la presión llegue a 110 Psi, el controlador abrirá el contacto de presión de vapor (PV); deteniendo la operación del Fireye de la caldera hasta que la presión baje a un valor de 95 Psi, presión en la que se cerrará el contacto que permite el funcionamiento del Fireye, restableciéndose así la secuencia de encendido de la caldera.

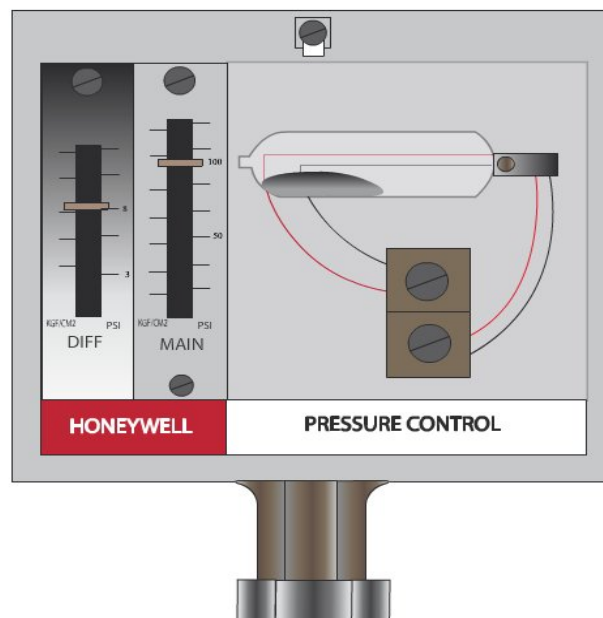
El principio de funcionamiento del control de presión límite de vapor se da por medio de un interruptor con base en una ampolleta de gota de mercurio conectada a un muelle que se activa por presión

Tabla 4. Especificaciones técnicas del control de presión de vapor.

ESPECIFICACIONES DEL CONTROL DE PRESIÓN LIMITE	
MARCA	HONEYWELL
ESCALA PRINCIPAL	10 A 150 Psi
ESCALA DIFERENCIAL	8 A 16 Psi
PRESIÓN PICO	225Psi
TEMPERATURA AMBIENTE MÁXIMA	66°C
TEMPERATURA AMBIENTE MINIMA	-37°C

Fuente: El Autor.

Figura 24. Control de presión de vapor



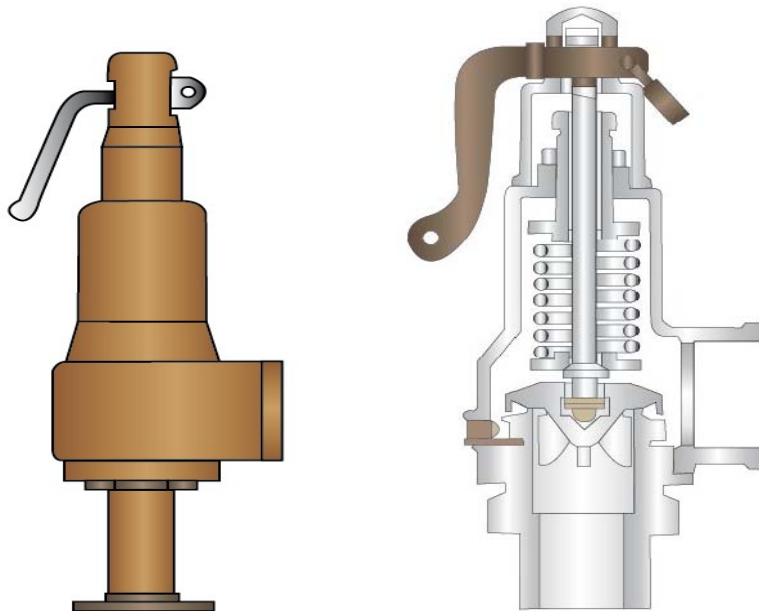
Fuente: el autor

En caso de fallar el control límite de presión, la caldera deberá estar protegida por una válvula de seguridad, la cual deberá abrirse para despresurizar la caldera, la presión de ajuste de la válvula de seguridad debe corresponder a presión máxima admisible para la cual fue diseñada la caldera.

Entre los factores a tener en cuenta a la hora de construir una válvula de seguridad encontramos: el disco y los asientos deben ser de materiales anticorrosivos, cualquier tipo de falla en alguna de las piezas de la válvula no puede interferir en la capacidad de disparo de la misma, puesto que podrían poner seriamente en peligro a toda la instalación y la vida de los operarios.

Es muy importante el uso de tuberías de descarga, si la descarga está situada donde los trabajadores puedan ser alcanzados por el vapor, debido a los perjuicios que podrían causarles por las altas temperaturas del gas.

Figura 25. Válvula de seguridad



Fuente: el autor

3.2 CONTROL EN LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR.

Tomando como base la caldera de tipo pirotubular del laboratorio de plantas térmicas de la escuela de ingeniería Mecánica, existen dos tipos controladores, como son:

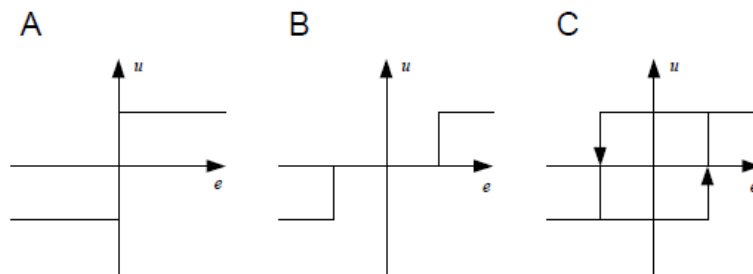
- Controlador de estado sólido (on/off)
- Controlador continuo por computadora

3.2.1 Controlador de estado sólido (on/off)

El control de dos posiciones es también llamado control con regulación todo o nada, en donde el elemento final se mueve rápidamente entre una y otra de las dos posiciones fijas que ofrece el controlador, para un valor único de la variable controlada.

Este tipo de control se emplea usualmente con una banda diferencial o zona neutra, en la que el elemento final de control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. Los ajustes de control se basan en variar el punto de consigna y la gama diferencial.

Figura 26. (A) Característica de un control on-off ideal y modificaciones con (B) zona muerta y (C) histéresis



Fuente: el autor

El tipo de control más usado en las calderas pirotubulares es el controlador de estado sólido, en el caso de la caldera que se tomó como referencia para la realización de este proyecto, el controlador de estado sólido es marca Fireye, el cual como ya vimos anteriormente realiza una secuencia lógica automática para operaciones de arranque y parada, pero también esta secuencia será válida para operación en régimen.

De esta manera el modo de operación on/off esta comandado por el Fireye y sus controles auxiliares, los controles a los que se hace referencia son:

- Control de límite de presión de vapor
- Control de presión de combustible (PAG)
- Control de presión de aire (PAC)
- Control de nivel tipo McDonnell
- Sensor de llama ultravioleta UVM

Así mismo existen diferentes variables que pueden causar bloqueos en la secuencia de operación de la caldera, estas son:

- Alta presión en la línea principal de combustible
- Baja presión de aire para combustión
- Ausencia de llama
- Bajo nivel en la caldera
- Alta presión de vapor

3.2.2 Controlador continuo por computadora.

El control on/off es la forma más simple de ejercer control, además es el tipo de control más usado a nivel industrial, sin embargo este método presenta algunas falencias por el hecho de no actuar en todo momento sobre la variable a controlar.

Tipos de controladores según las acciones básicas de control.

Para corregir los inconvenientes del control tipo on/off, son usados otros tipos de controladores basados en otras acciones básicas de control, estos son:

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

➤ **Proporcional (P).**

El control on/off tiene como característica sobreactuar cuando ocurre un pequeño cambio en el error, lo cual hace que la variable manipulada cambie su rango completamente. Este problema se resuelve usando un control de tipo proporcional, donde el controlador es proporcional al error de control cuando el error es pequeño, mientras que si el error es grande el controlador actuará igual que un control on/off.

➤ **Proporcional Integral (PI).**

El control proporcional integral disminuye y elimina el error en el estado estacionario, error provocado por el control de tipo proporcional. El control integral actúa en el momento que hay una desviación entre la variable y punto de ajuste, el controlador integra la acción en el tiempo y la suma a la acción proporcional. El error es integrado en un intervalo de tiempo determinado, luego es multiplicado por una constante y adicionada al modo proporcional para así formar el control PI, con lo cual se obtiene una respuesta estable y se elimina el error estacionario.

➤ **Proporcional Derivativo (PD).**

El error es la desviación entre la variable y el punto de ajuste, el control derivativo actúa cuando hay un cambio en el valor absoluto del error, manteniendo el valor del error a su valor mínimo posible con la misma velocidad que el error se produce, evitando un incremento del error; en el caso de tener un error constante en el tiempo, no se ejecutará el control derivativo.

El control deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante D y se suma a la señal del control proporcional, para formar el control PD.

➤ **Control Proporcional-integral-derivativo (PID).**

Un control proporcional integral derivativo PID, es un sistema de control de gran uso industrial, el cual utiliza un mecanismo de control por realimentación, el PID corrige el error entre un valor medio y el valor que se quiera obtener.

El sistema de control se basa en tres parámetros: proporcional, integral y derivativo. El valor proporcional determina la reacción del error, el integral genera una acción correctiva de acuerdo a la integral del error, permitiendo que el error se pueda reducir a un valor mínimo; mientras el derivativo proporciona la acción del tiempo en que se produce el error. El control PID maneja infinitas posiciones y aprovecha las ventajas de los tres parámetros por los cuales se rige.

Sistema de control continuo de la caldera del laboratorio de plantas térmicas.

El control continuo permite un control mucho más estricto ya que este opera con señales presentes en todo momento, los actuadores para este tipo de control son generalmente de tipo electromecánicos y neumáticos; la función de control está dada la mayoría de veces por circuitos de tipo electrónico cableado.

En el caso de la caldera del laboratorio de plantas térmicas la toma de datos y el control continuo se realiza por medio de una computadora, la cual registra las diferentes variables de funcionamiento del equipo, como son:

- La Presión de la caldera
- El flujo másico de vapor que sale de la caldera

El control continuo del laboratorio de plantas térmicas usa un hardware con un sistema de módulos de la marca Field Point y un software de la firma Delfhi,

versión 6.5; encargados simultáneamente de recibir señales de tipo análogo de la caldera y llevarlas al computador para ser evaluadas y corregidas.

El control de presión de la caldera ha sido adecuado al mecanismo de control continuo basado por computadora, de manera que tomando una señal de tipo análogo (presión en la caldera), esta se envía al hardware y de allí se procede a actuar de forma simultánea sobre la servo válvula de combustible y el variador de velocidad del motor del ventilador, con el fin de obtener una presión fija dentro del equipo. Para lo cual se debe dar una presión de ajuste de trabajo para la caldera, es decir, el valor que se desea para la presión de trabajo en todo momento, de esta manera se regula la apertura de la válvula proporcional de combustible y la velocidad del motor del ventilador.

Para realizar control sobre la presión de la caldera, se cuentan con ciertos elementos de medición y de control, estos son:

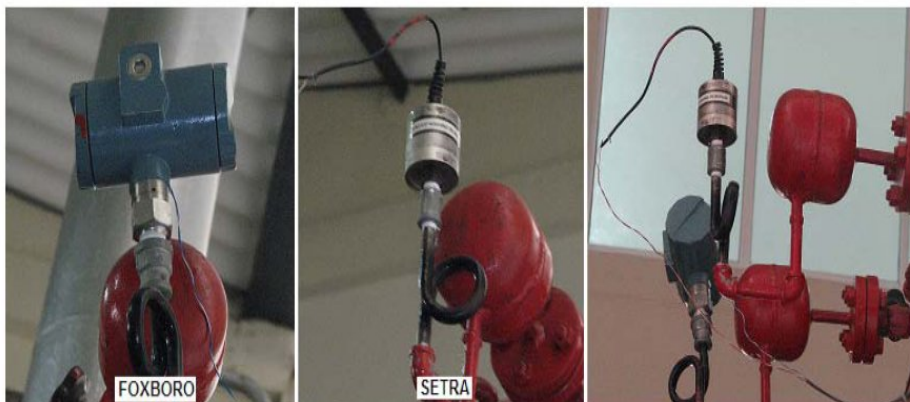
- Transductores de presión
- Servo válvula proporcional de combustible
- Variador de velocidad del motor ventilador

- **Transductores de presión.**

Los transductores de presión, se encargan de sensar la presión del vapor de salida de la caldera y transmitir al Fieldpoint una señal análoga proporcional al valor de la presión; los transductores están instalados antes y después de una platina de orificio. Este orificio y la caída de presión a través de él, permiten calcular el flujo másico de salida del vapor de la caldera.

El laboratorio de plantas térmica cuenta con dos transductores de presión, el primero de ellos marca Foxford y el segundo marca Setra, ambos son alimentados con corriente continua y proporcionan salidas de corriente al Fieldpoint del orden de miliamperios de acuerdo al valor de la presión.

Figura 27. Transductores de presión



Fuente: Valdivieso Martínez Rosemberg, Guíos Hernández Darwin Fabián.¹

- **Servo válvula proporcional de combustible**

La servo válvula proporcional de combustible permite un control preciso del flujo de combustible hacia el quemador, ya que este tipo de válvulas proporcionan infinitas posiciones. El funcionamiento de la servo válvula puede darse de forma manual o por medio del Fieldpoint, con un voltaje de trabajo que varía entre 2 y 20 voltios de corriente continua y un voltaje de alimentación de 24 voltios, por último tiene una señal de realimentación que va al Fieldpoint con el fin de indicar la posición en la cual se encuentra la válvula.

Por medio de la servo válvula se controla una válvula de globo, logrando un mayor o menor flujo de combustible hacia la caldera. La servo válvula del laboratorio de plantas térmicas es de marca Delta con referencia SM24-SR.

- **Variador de velocidad del motor ventilador**

El variador de velocidad del motor ventilador controlar la cantidad de aire requerida para la combustión de una manera precisa, el principio de

¹ Tesis de grado, Implementación de instrumentación para el monitoreo y control de los bancos y/o sistemas de los laboratorios de transferencia de calor aplicada, refrigeración y la planta térmica

funcionamiento se da por medio de una entrada de tipo análoga que varía entre 0 y 10 voltios de corriente continua, voltaje que es controlado por medio del Fielpoint, quien recibe una señal de la servo válvula del combustible y envía instantáneamente una señal de control sobre el motor ventilador, con el fin de mantener una relación aire/combustible constante.

El variador usado en la caldera del laboratorio es marca Altivar 16 y su ubicación está dentro del tablero de control de la caldera.

Figura 28. Variador de velocidad del motor ventilador.



Fuente: el autor.

4. MODELADO SECUENCIAL DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE UNA CALDERA DE TIPO PIROTUBULAR.

Los procesos de tipo industrial no siempre se desarrollan en un modo automático, estos pueden tener un modo de operación semiautomático o manual, así mismo pueden surgir inconvenientes que obliguen a una parada inmediata de una máquina o proceso.

Es por esta razón que en la automatización de una máquina es necesario prever cada uno de los estados posibles, como son:

- Funcionamiento Automático
- Funcionamiento Semiautomático
- Funcionamiento Manual
- Paradas de emergencia
- Puesta en marcha

El automatismo debe detectar todo tipo de fallas en la máquina y ejecutar acciones de tipo correctivo conjuntamente con el personal operativo para la solución de estas anomalías, igualmente generar alarmas que permitan al operario estar atento ante la presentación de inconvenientes en el funcionamiento del equipo.

La complejidad de los automatismos industriales ha ido creciendo abismalmente con el tiempo, resultando cada vez más difícil definir de manera clara y concisa las especificaciones funcionales propias del autómatas. Más si a esto se suma la cantidad de variables de entrada y salida usadas en un proceso.

Existen diferentes formas de describir la secuencia de operación de un proceso basado en un autómatas programable, las cuales podrían ser clasificadas de la siguiente manera:

- Descripción lineal: esta descripción resulta bastante larga, incomoda, imprecisa y muchas veces incompleta.
- Descripción lógica: También conocida como logigrama, su uso es limitado debido a que no es apropiado para la realización mediante programación.
- Descripción por organigrama: Resulta precaria para el caso de autómatas secuenciales y no muestra los funcionamientos de tipo simultáneo, la ventaja es que puede ser desarrollado por medio de un programa.

En la actualidad se han desarrollado representaciones de tipo gráfico para automatismos, estas representaciones son de tipo funcional e independiente del tipo de tecnología que emplean, ya sea cableada (módulos neumáticos, relés electromecánicos, módulos de tipo electrónico) o programada (PLC, computadora o microprocesador). Este tipo de representaciones se basa en los conceptos de etapa y transiciones entre las etapas, permitiendo así simplificar los automatismos de tipo secuencial.

4.1 GRAFCET (Gráfico de comando etapa- transición).

A raíz de los adelantos en modelamientos de representaciones gráficas de los autómatas, la AFCET (Asociación francesa para la cibernética económica y técnica) y la ADEPA (Agencia nacional para el desarrollo de la producción automatizada), desarrollaron trabajos sobre el tema desde la década de los setenta, obteniendo como resultado un diagrama funcional llamado **GRAFCET** (Gráfico de mando etapa-transición).

Este diagrama busca describir los automatismos con base a las informaciones que estos reciben, manejando un orden estricto dentro de la secuencia, para evitar algún tipo de falla o bloqueo del sistema. Sin embargo el diagrama puede

ser corregido en cualquiera de sus etapas sin necesidad de volver a instancias iniciales del programa.

Los componentes básicos de un Grafcet son los siguientes:

- Etapas: Son los estados a los que están asociados los conjuntos de acciones del automatismo.
- Transiciones: Son las condiciones para pasar de una etapa a la siguiente, a las transiciones van orientadas las receptividades.
- Uniones orientadas: Se encargan de unir las etapas a las transiciones y las transiciones a las etapas.

4.1.1 Etapas

La etapa es el estado del sistema en el que no hay variación de las salidas al variar las entradas, de acuerdo al comportamiento del autómata, las etapas tienen dos estados:

- Activa
- Inactiva

Las etapas son representadas por un cuadrado con un número en la parte superior de este, la entrada y la salida de cada etapa se encuentran en la parte superior e inferior de cada símbolo de la etapa; este conjunto de la salida, la entrada y el cuadrado, constituyen el símbolo completo de la etapa. Si es necesario mostrar la situación del Grafcet en un momento determinado se marca un punto en la parte superior de las etapas que se encuentren activas. Así mismo si se trata de una etapa inicial se debe representar con un cuadrado doble.

Figura 29. Representación de las etapas en un diagrama secuencial.



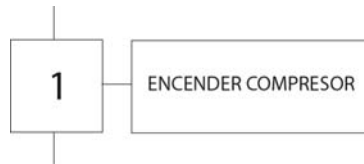
Fuente: el autor.

➤ **Acciones asociadas a una etapa.**

Las acciones correspondientes a cada etapa van en el interior de uno o de varios rectángulos unidos a la etapa a la cual están asociadas, estas acciones pueden ser descritas literal o simbólicamente; de la misma manera sucede con las receptividades asociadas a cada transición. Estos dos niveles de representación son los siguientes:

- Nivel 1: En este nivel no se tienen en cuenta los elementos de tipo tecnológico que hacen parte del automatismo, por lo cual se remite solo a la parte funcional del sistema.

Figura 30. Acción asociada a la etapa 1 (nivel 1)



Fuente: el autor.

- Nivel 2: Se especifican los aspectos de tipo tecnológico del sistema de control, realizando una descripción de tipo simbólica. En el caso de escribir las acciones en forma simbólica, deberá existir una tabla donde se dé la relación de cada símbolo y la acción a ejecutar. Por ejemplo: EC= Encendido del compresor.

Figura 31. Acción asociada a la etapa 1 (nivel 2)



Fuente: el autor.

➤ **Tipos de acciones.**

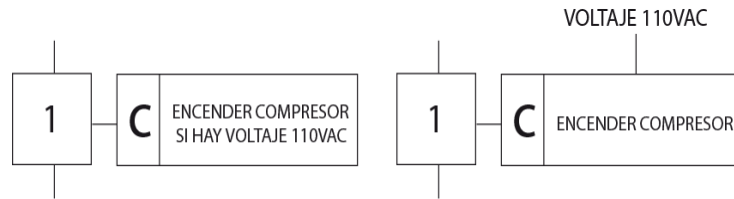
Existen diferentes formas de clasificar las acciones relacionadas a una etapa, de acuerdo a:

- La procedencia: internas o externas.
- Su etiqueta: Virtuales o reales
- Su requisito: condicionales o incondicionales.

Las acciones de tipo condicional se ejecutan si se cumple una función lógica adicional, este tipo de acciones a su vez se dividen de la siguiente manera:

- Acción condicional.
La acción condicional se realiza si se cumple una condición para el desarrollo de esta, por ejemplo: se tiene un sistema controlado electrónicamente, para la regulación de un proceso. Si esta activa la etapa de espera 1 y hay un voltaje de alimentación de 110VAC, entonces el compresor se pondrá en marcha. Se puede representar esta condición ya sea dentro o fuera del recuadro, a su vez el cuadro de la acción está acompañado de un cuadrado que contiene la letra C, con el fin de indicar la condicionalidad.

Figura 32. Representación gráfica de la acción condicional



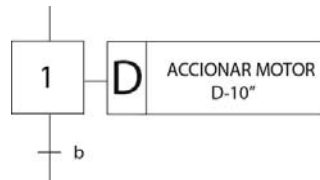
Fuente: el autor.

- Acción retardada (Delayed).

La acción de tipo retardada funciona como un temporizador de la acción luego de haberse activado la etapa, por ejemplo: se tiene un motor que se pondrá en marcha 10 segundos luego de haberse activado la etapa 1; si la transición b se activa antes de esos 10 segundos, el motor no se pondrá en marcha.

La acción de tipo retardada es simbolizada por medio de un cuadro antes de la acción, por medio de la letra D.

Figura 33. Representación gráfica de la acción retardada

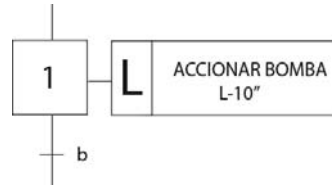


Fuente: el autor.

- Acción limitada (Limit).

La acción de tipo limitada es representada por un recuadro con la letra L, consiste en activar la acción durante un tiempo determinado, sin importar si la condición para pasar a la siguiente etapa se cumple o no. Por ejemplo: una bomba es puesta en funcionamiento durante 10 segundos después de haberse activado la etapa 1, pasado este tiempo, aunque no se active la transición b, la bomba dejará de funcionar.

Figura 34. Representación gráfica de la acción limitada.

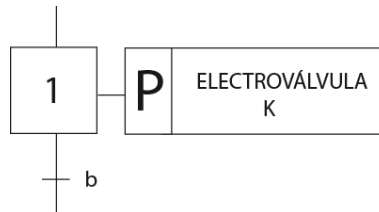


Fuente: el autor

- Acción de pulso.

La acción es activada por medio del pulso de un elemento externo a la secuencia del proceso. Por ejemplo: Al activarse la etapa 1 se encenderá la electroválvula por medio de un pulsador K. Esta acción retardada está representada por un recuadro con la letra P.

Figura 35. Representación gráfica de la acción de pulso

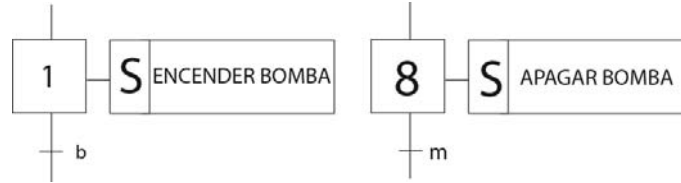


Fuente: el autor.

- Acción memorizada.

La acción de tipo memorizada, se activa una etapa dada y seguirá activa (set) hasta que se dé la orden de desactivación de esta acción (reset); la acción memorizada es representada gráficamente por medio de un recuadro con la letra S. Por ejemplo: Cuando se active la etapa 1, una bomba se pondrá en marcha de forma estable (set), y al salir de la etapa, continuará funcionando hasta que se haga un reset a la acción. Al activarse la etapa 8, la bomba se detendrá, ya que en esa etapa, la acción hace un reset al funcionamiento de la bomba.

Figura 36. Representación gráfica de la acción memorizada



Fuente: el autor.

4.1.2Transiciones.

Las transiciones representan las condiciones que el sistema debe cumplir para pasar de una etapa a la siguiente. Esta validación de la condición es llamada flanqueo de la transición, lo cual implica un cambio en las etapas activas del Grafset, ya que al ser flanqueada una transición, pasa a estar inactiva la etapa inmediatamente anterior y activa la siguiente etapa.

Las transiciones son representadas por medio de pequeños segmentos horizontales que cortan la línea de unión entre dos etapas. A cada transición se le relaciona con una proposición de tipo booleana llamada receptividad, la cual puede ser cierta o falsa.

La receptividad es la condición para flanquear una transición, esta es función de las informaciones internas o externas del automatismo, y esta es representada ya sea en forma literal o simbólicamente, generalmente a la derecha del símbolo de transición. En el caso de ser representada simbólicamente, se recomienda añadir una tabla donde se relacione cada símbolo con su correspondiente significado.

Figura 37. Representación literal y simbólica de la receptividad



Fuente: el autor.

4.1.3 Uniones orientadas.

Las uniones orientadas se encargan de unir las etapas con las transiciones y viceversa, se encargan de señalar el camino de las evoluciones del Grafcet. Estas uniones son representadas por medio de líneas horizontales o verticales, en caso de ser necesario se usan las líneas oblicuas. Por norma, las evoluciones del Grafcet se deben dar de arriba hacia abajo, en caso de ser en otro sentido se deben usar flechas para orientar el camino de evolución.

4.1.4. Reglas de evolución.

Existen una serie de normas para el desarrollo del Grafcet de un proceso, estos parámetros han sido diseñados con el fin de obtener un diagrama claro y de fácil comprensión para cualquier tipo de persona.

➤ Situación inicial.

La situación inicial del Grafcet señala el comportamiento inicial del proceso, este corresponde a las etapas que se encuentran activas al comienzo del funcionamiento; en el caso de ser un Grafcet cíclico, la situación inicial corresponde al estado de reposo. Si se trata de un proceso no cíclico, la situación inicial va a depender del estado del proceso en el momento de la puesta en marcha y de la parte de mando del automatismo.

➤ **Franqueo de una transición.**

La evolución de una situación del Grafcet se realiza por medio del franqueo de una transición, este franqueo se produce si la transición se encuentra validada y la receptividad asociada a esta transición es cierta, de esta forma la transición queda obligatoriamente franqueada.

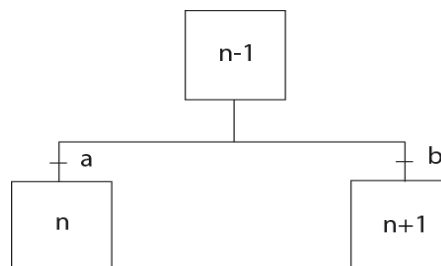
➤ **Evolución de las Etapas activas.**

El franqueo de una transición trae como consecuencia la activación de las etapas inmediatamente posteriores y la desactivación de las inmediatamente anteriores.

➤ **Reglas de estructuras de uso frecuente.**

- **Divergencia en O.** Estando activa la etapa $n-1$ se pasa a la etapa n o a la $n+1$ según este activa a o b .

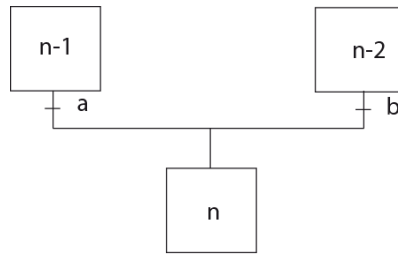
Figura 38. Divergencia en O



Fuente: el autor.

- **Convergencia en O.** Para pasar a la etapa n debe estar activa la etapa $n-1$ y cumplirse la receptividad a o estar activa la etapa $n-2$ y cumplirse la receptividad b .

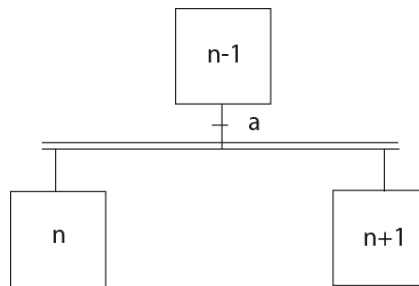
Figura 39. Convergencia en O



Fuente: el autor.

- **Divergencia en AND.** Estando activa la etapa $n-1$ al verificarse la receptividad a se pasa simultáneamente a las etapas n y $n+1$

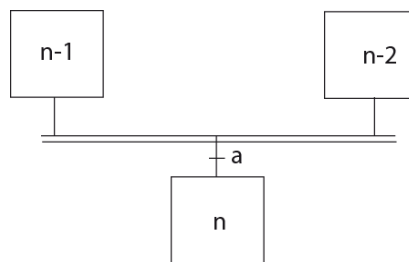
Figura 40. Divergencia en AND



Fuente: el autor.

- **Convergencia en AND.** Si las etapas $n-1$ y $n-2$ están activas simultáneamente y se cumple la condición a se pasa a la etapa n .

Figura 41. Convergencia en AND



Fuente: el autor

➤ **Evoluciones Simultáneas.**

Varias transiciones que son franqueables simultáneamente llegan a ser simultáneamente franqueadas. Esto permite descomponer el Grafcet en varios diagramas, en donde se deben especificar claramente sus conexiones.

➤ **Activación y desactivación simultanea.**

Si existe el caso en que una etapa debe estar activada y desactivada al mismo tiempo, esta etapa quedará finalmente activa.

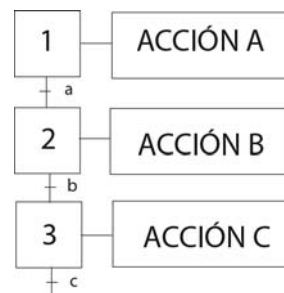
4.1.5 Estructuras principales.

Las estructuras principales pueden ser empleadas individualmente o combinadas entre ellas, estas se describen a continuación:

➤ **Secuencia Única**

Una secuencia única se compone de una serie de etapas que son activadas una a continuación de la otra, de manera lineal; de modo que a cada etapa se le ve acompañada solamente de una transición y cada transición validará solo una etapa.

Figura 42. Secuencia única

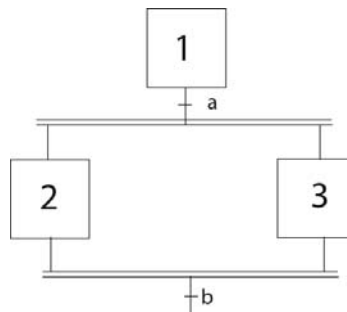


Fuente: el autor

➤ **Secuencias simultáneas.**

Es también llamada paralelismo estructural, en este caso el franqueo de una transición conduce a la activación de varias secuencias al mismo tiempo, luego de la activación de estas etapas, cada una de las secuencias seguirá actuando de forma independiente. Para asegurar la desactivación de estas secuencias simultáneas se usan etapas de espera comunes para cada una de las secuencias.

Figura 43. Secuencias simultáneas



Fuente: el autor.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA GRAFCET A LOS SISTEMAS BÁSICOS DE UNA CALDERA PIROTUBULAR.

Para el desarrollo del Simulador Básico para la Puesta en Marcha y Operación de Calderas de tipo Piro tubular, era necesario analizar de forma detallada cada uno de los sistemas que conforman la caldera, y los diferentes mecanismos de control que gobiernan el funcionamiento de los componentes del equipo, tanto en la secuencia de encendido como en la operación de la caldera.

Con base en esta necesidad se inició una búsqueda de un método que permitiese comprender de forma detallada los lineamientos para la puesta en marcha y la operación de la caldera; así como las fallas o errores que suceden

en el sistema y las respectivas acciones correctivas para reiniciar su funcionamiento.

Es así, como se decidió implementar la metodología Grafcet, para la identificación de las diferentes etapas del proceso de la caldera, y el estudio de las diferentes variables que permiten el correcto funcionamiento del sistema. Se escogió el Grafcet por ser un diagrama que permite describir los diferentes comportamientos de la caldera de forma clara, además es un método que no depende de la tecnología de control que maneja el equipo.

4.2.1 Modelado secuencial para el arranque de una Caldera de tipo Pirotubular.

El encendido de una Caldera Pirotubular maneja una secuencia de arranque conformada por un conjunto de etapas, las cuales deben contar con una serie de condiciones para poder hacer exitoso el encendido del equipo.

Con base en la caldera del laboratorio de plantas térmicas, se realizó un análisis de los mecanismos de control encargados del arranque de una caldera pirotubular, y se encontró que el control de encendido es manejado por un controlador de estado sólido de la marca Fireye, cuyo funcionamiento y circuito de control se han descrito en el capítulo anterior.

Luego de estudiar el esquema eléctrico del Fireye y de identificar las señales de entrada y salida de este controlador a través de las variables y sistemas auxiliares por los cuales se rige su funcionamiento; se procedió a construir un Grafcet de primer nivel para el encendido de la caldera.

➤ **Grafcet de primer nivel para el arranque de una caldera de tipo piro-tubular.**

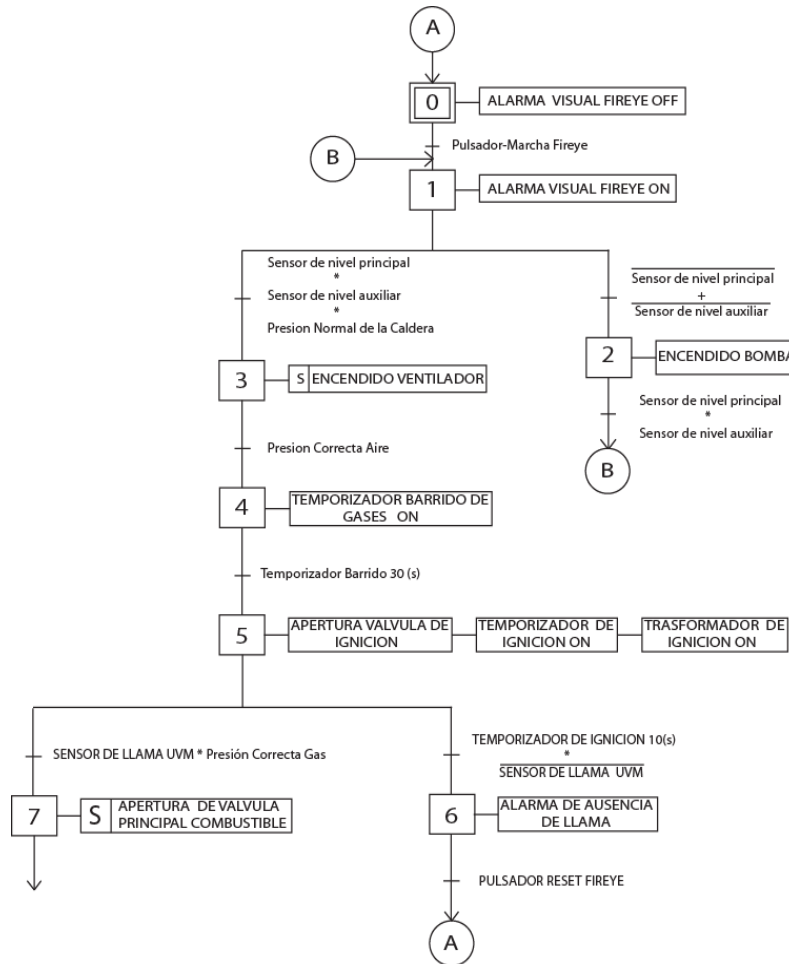
El Grafcet de primer nivel contiene todos los pasos para el encendido de la caldera, además, las condiciones para que esta secuencia se desarrolle satisfactoriamente. La característica principal de este diagrama es que no contiene especificaciones de tipo tecnológico, es decir, el Grafcet de primer nivel es totalmente funcional, por lo tanto no contiene detalles de los elementos de control que gobiernan el automatismo de la caldera.

El Grafcet de primer nivel del arranque de la caldera, muestra el comportamiento de la secuencia de encendido del equipo, desarrollado por medio del controlador Fireye, el resumen la secuencia es la siguiente:

- Inicialmente el controlador se encuentra desenergizado, por lo cual existe una alarma visual de color rojo, que indica que el Fireye está apagado, esta es la etapa inicial del automatismo, por lo cual se representa con un doble recuadrado y el número 0.
- A través de un pulsador de marcha normalmente abierto se da la orden de encendido al Fireye, con lo cual se inicia el proceso de arranque del equipo, está es la receptividad que debe existir para pasar de la etapa inicial a la etapa 1, cuya acción asociada es la generación de una alarma visual de encendido del Fireye.
- Luego de esta segunda etapa se presenta una divergencia en O, tomando el diagrama dos caminos diferentes:
 - El primero de estos caminos se valida si existen dos contactos cerrados referentes al nivel de la caldera, es decir, si existe un nivel adecuado en el equipo; la otra condición para cumplir con la receptividad está relacionada con una presión normal dentro de la caldera, de cumplirse estas tres condiciones se activará la etapa

número 3, cuya acción queda memorizada, por lo tanto el ventilador estará encendido hasta que en otra nueva etapa se de reset a esta memoria.

Figura 44. Grafcet de primer nivel para el arranque de una caldera de tipo piro tubular



Fuente: el autor.

- En caso de no existir un nivel adecuado en la caldera se validará el segundo camino en donde se activa la etapa 4, cuya acción asociada es el encendido de la bomba, esta etapa estará activa hasta que haya un nivel adecuado. Con lo cual el diagrama vuelve a la divergencia en que se encontraba al inicio.

- Al cumplir con las condiciones de la transición existente entre la etapa número 1 y la número 3, se activa la etapa 3, y con ello el encendido del ventilador. Luego de esto se encuentra la condición de presión correcta de aire, si cumple esta condición, la transición es franqueada con lo cual se activa la etapa 4, correspondiente al encendido de un temporizador controlador del tiempo de barrido de gases.

- La receptividad necesaria para pasar de la etapa 4 a la 5, es el haber transcurrido un tiempo de 30 segundos por medio del temporizador de barrido de gases, con lo cual se activará la etapa 5, dando apertura a la válvula de ignición y energizando tanto el transformador de ignición como el temporizador de ignición.

- Luego de esta etapa 5, se encuentra otra divergencia en O, con lo cual es posible tomar dos diferentes evoluciones para el diagrama:
 - Un primer camino pasa de la etapa 5 a la 7, en el caso de que la transición dada por la presencia de llama en la caldera y una presión correcta de aire se cumpla, si existe esta receptividad, se pasará a la etapa 7, en donde se abre la válvula principal de combustible.
 - La segunda evolución se genera, si luego de los diez segundos que dura energizado el temporizador de ignición, no se detecta presencia de llama, se llega así a la etapa 6, cuya acción es la activación de una alarma por ausencia de llama. Para volver a realizar la secuencia de encendido se tiene como transición una señal proveniente de un pulsador para reinicio del Fireye, con lo cual se vuelve a la etapa inicial del proceso (etapa 0).

- En caso de activarse la etapa 7, y con ello su acción: apertura de la válvula principal de combustible. Con esta etapa se da por finalizado el Grafcet de primer orden correspondiente al arranque de la caldera.

- **Grafcet de segundo nivel para el arranque de una caldera de tipo piro-tubular.**

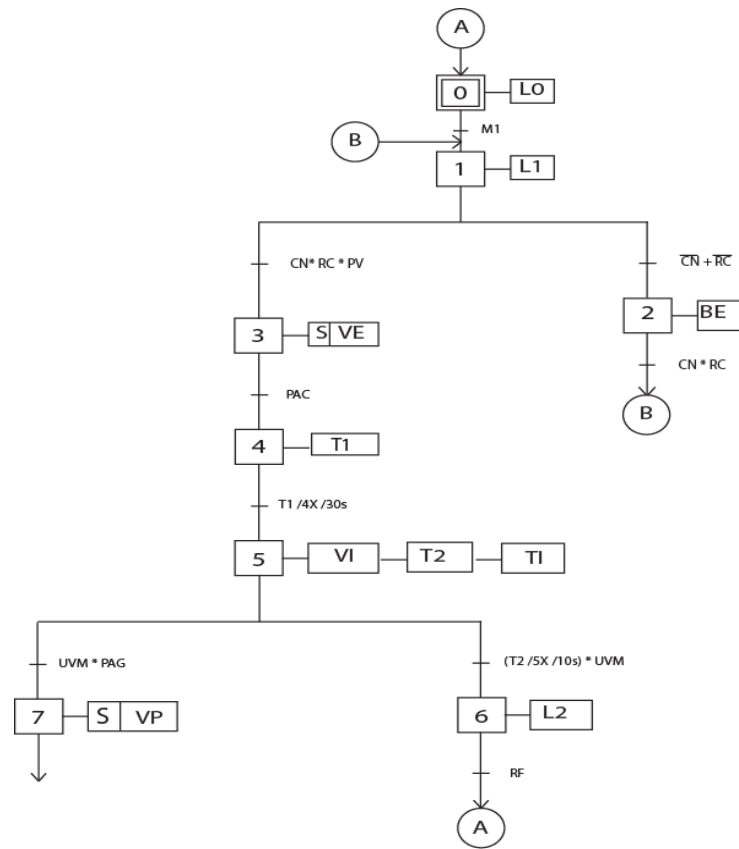
En el Grafcet de segundo nivel para el arranque de la caldera, se especifican algunos aspectos de tipo tecnológico del control de los elementos que participan en el encendido de la caldera, para tener claridad de cada uno de estos símbolos se agrega una tabla donde se relacionan cada uno con su respectivo significado.

Tabla 5. Relación de los elementos del Grafcet de segundo nivel para el arranque de una caldera de tipo piro-tubular.

SIMBOLO	ELEMENTO
L0	ALARMA VISUAL FIREYE OFF
L1	ALARMA VISUAL FIREYE ON
CN	CONTROL DE NIVEL PRINCIPAL
RC	CONTROL DE NIVEL AUXILIAR
PV	PRESIÓN NORMAL EN LA CALDERA
VE	VENTILADOR ENCENDIDO
T1	TEMPORIZADOR DE BARRIDO DE GASES
VI	APERTURA DE VÁLVULA DE IGNICIÓN
TI	TRANSFORMADOR DE IGNICIÓN
T2	TEMPORIZADOR DE IGNICIÓN
UVM	SENSOR DE LLAMA UVM
VP	VÁLVULA PRINCIPAL DE COMBUSTIBLE
RF	RESET FIREYE
L2	ALARMA VISUAL AUSENCIA DE LLAMA
PAC	CONTROL DE PRESIÓN DE AIRE
PAG	CONTROL DE PRESIÓN DE GAS

Fuente: el autor.

Figura 45. Grafcet de segundo nivel para el arranque de una caldera de tipo pirotubular



Fuente: el autor

- **Circuito eléctrico correspondiente al sistema de control para el arranque de una caldera de tipo pirotubular.**

Luego de la obtención de los diagramas de secuencia para el encendido de la caldera y de analizar el esquema eléctrico del controlador Fireye, se construyó un circuito eléctrico que permite visualizar todo el proceso de arranque de la caldera, esto también con el fin de hacerlo visible en cada una de las etapas del simulador.

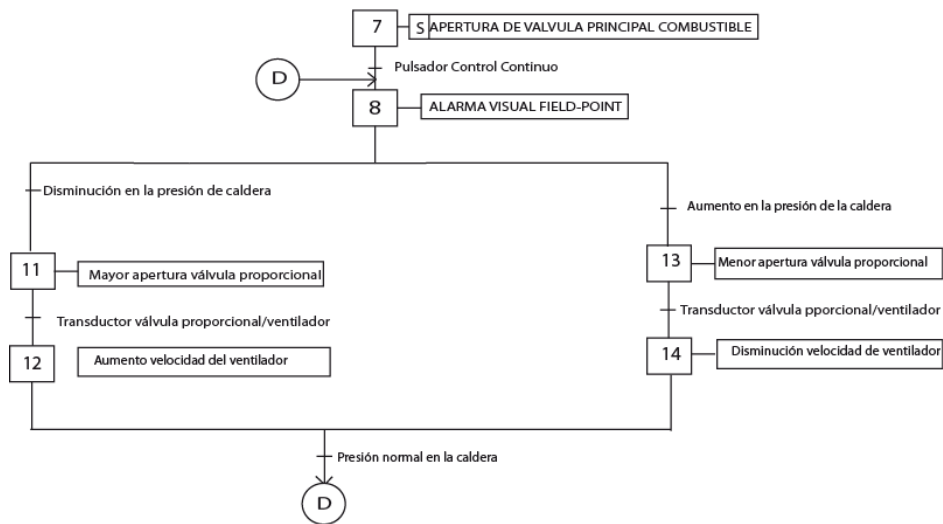
➤ **Grafcet de primer nivel para el control continuo de calderas de tipo piro-tubular.**

Este Grafcet de primer nivel explica de manera funcional el comportamiento del control de modo continuo de la caldera, la secuencia de este diagrama es la siguiente:

- El Grafcet de operación comienza en el estado donde termina la secuencia de arranque de la caldera (Etapa 7), la receptividad que debe estar presente para pasar a la etapa 8 es la selección de control en modo continuo por medio de un interruptor; de esta manera se franquea esta transición y se pasa a la etapa 8, en donde se activará una señal de tipo visual, indicando el encendido del controlador de modo continuo (FieldPoint).
- Luego de encontrarse activa la etapa 8, el sistema tiene una divergencia en O, con lo cual puede evolucionar de dos diferentes maneras:
 - La primera de ellas se valida si ocurre una disminución en la presión de la caldera, con lo cual se activa la etapa 11, cuya acción asociada es una mayor apertura en la válvula proporcional del combustible, luego de esta etapa se pasa a la etapa 12, donde se da un aumento a la velocidad del ventilador, esto gracias a la acción de un transductor que relaciona la apertura de la válvula proporcional con el aumento de velocidad del ventilador; ya que como sabemos la relación aire-combustible debe permanecer constante en todo el proceso
 - El segundo camino se da, si existe un aumento en la presión de la caldera, con lo cual se activa la etapa 13, donde en este caso se da menor apertura a la válvula proporcional de combustible y de la misma manera, se activará la etapa 14, donde se disminuye la velocidad del ventilador.

- Luego de las etapas 12 y 14, el diagrama tiene una convergencia en O, en donde llegan las dos formas de evolución, la transición común es la existencia de una presión de ajuste en la caldera, con lo cual se retornará a la etapa 8, donde ante cualquier cambio de la presión del sistema, se tomará uno de los caminos de evolución. Este tipo de diagrama muestra una secuencia de tipo cíclica.

Figura 47. Grafcet de primer nivel para la operación de la caldera en control continuo



Fuente: el autor

➤ **Grafcet de segundo nivel para el control continuo de calderas de tipo pirotubular.**

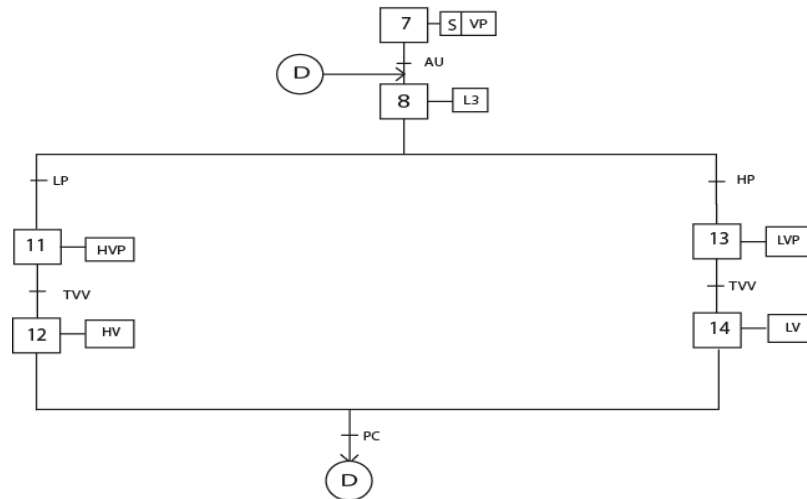
El Grafcet de segundo nivel muestra datos de tipo tecnológico del control continuo de la caldera, por lo cual maneja cierta simbología es relacionada en la siguiente tabla

Tabla 6. Relación de los elementos del Grafcet de segundo nivel para la operación en control continuo de una caldera de tipo pirotubular.

SIMBOLO	ELEMENTO
VP	VALVULA PRINCIPAL DE COMBUSTIBLE
L3	INDICADOR VISUAL MODO CONTINUO ON
LP	DISMINUCIÓN EN LA PRESIÓN DE LA CALDERA
HP	AUMENTO EN LA PRESIÓN DE LA CALDERA
LV	DISMINUCIÓN EN VELOCIDAD DEL VENTILADOR
HV	AUMENTO EN VELOCIDAD DEL VENTILADOR
HVP	MAYOR APERTURA VÁLVULA PROPORCIONAL
LVP	MENOR APERTURA VÁLVULA PROPORCIONAL
TVV	TRANSDUCTOR VÁLVULA - VENTILADOR
PC	PRESIÓN DE AJUSTE EN LA CALDERA
AU	SELECTOR MODO CONTROL CONTINUO

Fuente: el autor

Figura 48. Grafcet de segundo nivel para la operación de la caldera en control continuo



Fuente: el autor.

4.2.3 Modelado secuencial para la operación en modo ON –OFF de una Caldera de tipo Piro tubular.

El tipo de control más común en calderas, esta dado por el control ON-OFF, en donde el mecanismo de control ejecuta una acción sobre el equipo solo ante una situación crítica, diferente al control de tipo continuo donde el controlador ejerce mando en todo momento sobre la variable a controlar.

El control de presión que ejerce el Fireye sobre la caldera, esta comandado por el controlador de presión limite del equipo, en donde al subir la presión a un valor limite (100 Psi aprox), el control de presión abre el circuito de control del Fireye, apagando inmediatamente la caldera. Simultáneamente el control de nivel sigue siendo controlado por medio del McDonell, el cual enciende la bomba al detectar un nivel bajo, y la apaga al existir un nivel alto de agua en la caldera.

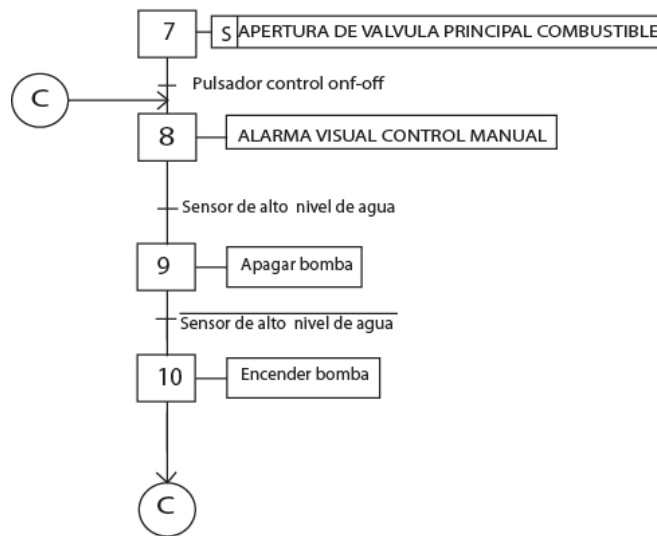
➤ Graficet de primer nivel para el control ON-OFF de una caldera de tipo piro tubular.

Este Graficet de primer orden muestra el comportamiento funcional del control ON-OFF de la caldera, cuya secuencia es la siguiente:

- La secuencia comienza justo en la etapa 7, etapa donde termina el periodo de encendido del equipo. La receptividad para pasar a la etapa 8, es la selección del control ON – OFF por medio de un interruptor, de esta manera se activa la etapa 8, en donde se genera una alarma visual del encendido del control ON –OFF (manual).
- Al recibir el controlador una señal de nivel alto en la caldera, se activa la etapa 9, en donde se apaga la bomba, este estado queda activado hasta el momento en que el nivel de la caldera baje, y ya no exista un nivel alto, de esta manera se activa la etapa 10, donde se vuelve a encender la bomba.

- Luego de la etapa 10, se retorna a la etapa 8 del diagrama, logrando un control de tipo cíclico y repetitivo.

Figura 49. Grafcet de primer nivel para la operación de la caldera en control ON- OFF



Fuente: el autor.

- **Grafcet de segundo nivel para el control ON-OFF de una caldera de tipo pirotubular.**

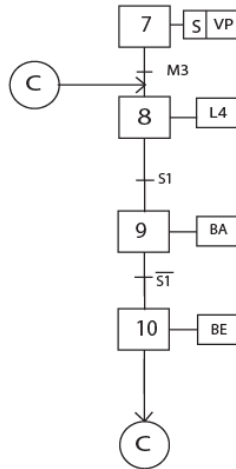
El Grafcet de segundo nivel del control ON – OFF, muestra de manera simbólica cada uno de las acciones y transiciones de este modo de control semiautomático.

Tabla 7. Relación de los elementos del Grafcet de segundo nivel para la operación en control ON-OFF de una caldera de tipo pirotubular.

SIMBOLO	ELEMENTO
VP	VALVULA PRINCIPAL DE COMBUSTIBLE
L4	INDICADOR VISUAL MODO SEMIAUTOMATICO ON
M3	PULSADOR MARCHA MODO SEMIAUTOMATICO
S1	SENSOR ALTO NIVEL DE AGUA
BA	BOMBA APAGADA
BE	BOMBA ENCENDIDA

Fuente: el autor.

Figura 50. Grafcet de primer nivel para la operación de la caldera en control ON- OFF



Fuente: el autor.

4.3 GUIA GEMMA PARA MODOS DE MARCHA Y PARADAS EN UNA CALDERA PIROTUBULAR.

En cualquier sistema de tipo productivo, existen diferentes fallas o anomalías que pueden parar al proceso, como es el caso de averías, falta de material o de materias primas, mantenimiento de componentes, entre otros. Los automatismos deben prever todo tipo de problemas, y estar preparado para

detectar defectos y averías y colaborar en la puesta a punto, además de ejecutar otro tipo de tareas diferentes al tipo de operación normal.

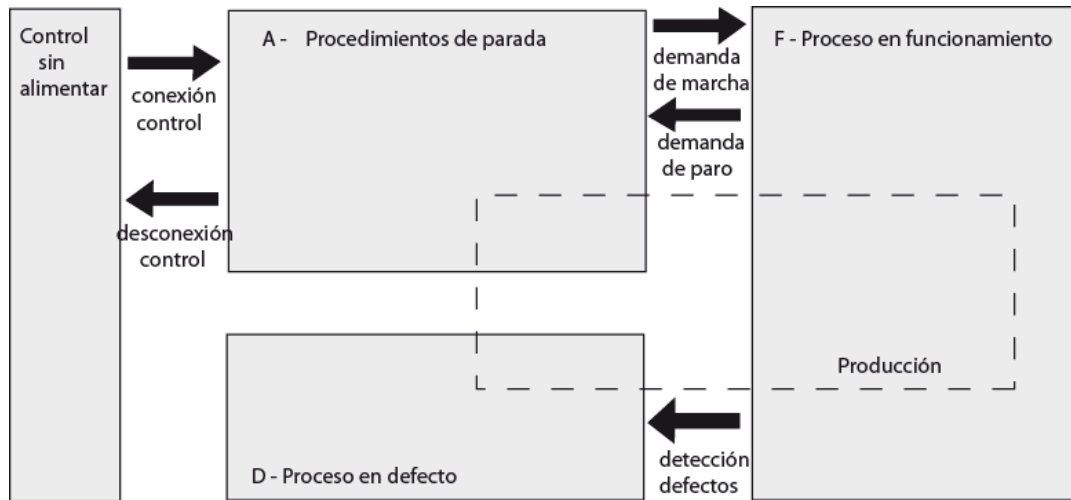
Con el fin de definir todos los estados que puede presentar un equipo, la ADEPA (Agencia nacional francesa para el desarrollo de la productividad aplicada a la industria) ha preparado la guía GEMMA (Guía de estudio de los modos de marchas y paradas), método que complementa al Grafcet, permitiendo una descripción progresiva del automatismo.

4.3.1 Presentación de la guía GEMMA.

GEMMA es una guía de tipo gráfico que muestra los diferentes modos de marcha de un sistema de producción, así como las formas y condiciones para pasar de un estado a otro. Este gráfico ilustra cinco situaciones, las cuatro primeras por medio de rectángulos grises y el quinto con un rectángulo de color blanco, estas situaciones son:

- Control sin alimentación
- Funcionamiento
- Parada
- Defecto
- Sistema en producción

Figura 51. Modos de funcionamiento según la guía GEMMA



Fuente: el autor.

➤ **Grupo F. Procedimientos de funcionamiento.**

- F1. Producción normal. Estado de producción normal de la máquina, es el estado de mayor importancia, ya que representa la función para la cual fue diseñado el sistema.
- F2. Marcha de preparación. Es el conjunto de acciones que se deben desarrollar para que la máquina entre a producir.
- F3. Marcha de cierre. Este procedimiento hace relación a la limpieza o preparación de las máquinas antes de entrar al modo de paro.
- F4. Marchas de verificación sin orden. Es el denominado control manual, en donde el operario puede hacer ciertos movimientos en la máquina sin seguir el orden preestablecido en la secuencia de operación.
- F5. Marchas de verificación con orden. Se realiza el ciclo completo de la máquina, pero controlado por el operador. Se conoce como modo semiautomático.
- F6. Marchas de test. Es el modo típico para realizar pruebas o mantenimiento en la máquina

➤ **Grupo A. Procedimientos de paradas y puesta en marcha**

- A1- Paradas en el estado inicial. Es el estado de reposo de la máquina.
- A2- Parada solicitada al final del ciclo. Estado en que la máquina va a producir solo hasta terminar su ciclo
- A3- Parada solicitada en un estado determinado. Estado en que la máquina se detiene sin necesidad de terminar su ciclo.
- A4- Parada obtenida. Estado de la máquina diferente al estado inicial.
- A5- Preparación para la puesta en marcha luego de un defecto. En este estado se realizan todas las acciones de limpieza, verificación, ajustes para el reinicio del proceso.
- A6- Puesta del sistema en el estado inicial. Estado en el cual se retorna automática o manualmente al estado inicial.
- A7- Puesta del sistema en un estado determinado. Se retoma el sistema en un estado diferente al inicial.

➤ **Grupo D. Procedimientos de defecto.**

- D1- Parada de emergencia. Estado obtenido luego de una parada de emergencia en la máquina.
- D2- Diagnostico y/o tratamiento de fallos. Estado en el cual se analizan las causas de fallas con la ayuda del operador.
- D3- Producción a pesar de los defectos. Es un estado en el cual continua la producción a pesar de existir fallas dentro del sistema.

Estos son todos los estados posibles procedimientos de funcionamiento que ofrece la guía GEMMA, se debe analizar cada sistema en particular, con el fin de reconocer cuales son los estados que están presentes en el proceso.

4.3.2 Implementación la guía GEMMA en el modelado secuencial de los sistemas de encendido y operación de una caldera pirotubular.

Con el fin de implementar la guía GEMMA a los sistemas de control de la caldera, es necesario identificar los estados del GEMMA que son necesarios para el control de la caldera y realizar una descripción de cada uno de ellos, a continuación se describen cada uno de los estados pertenecientes a los diferentes procedimientos de la caldera analizada.

➤ Grupo F. Procedimientos de funcionamiento.

- F1- Funcionamiento de la caldera en control continuo: es el tipo de operación de la caldera comandado por el control de tipo continuo.
- F2- Secuencia de encendido de la caldera: etapa de preparación a la operación de la caldera, ya sea en modo continuo o ON –OFF.
- F5- Funcionamiento de la caldera en modo ON–OFF: funcionamiento controlado por el Fireye, donde se da un control de tipo semiautomático.

➤ Grupo A. Procedimientos de paradas y puesta en marcha.

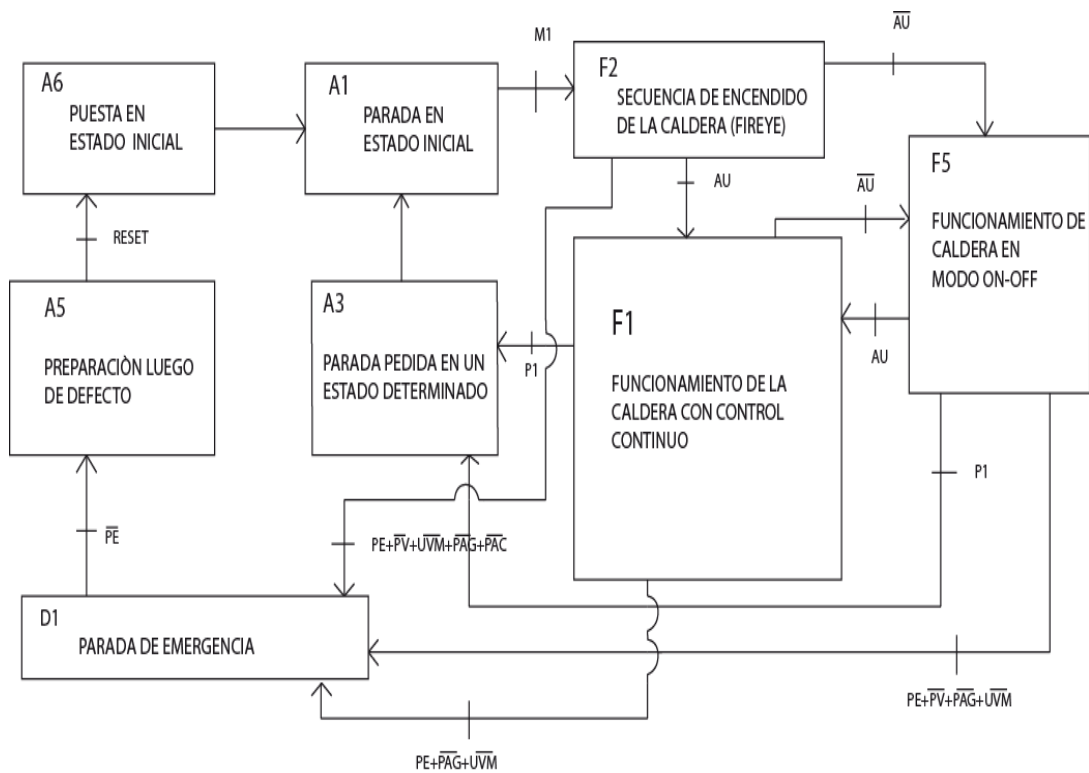
- A1- Parada en estado inicial: es el estado en donde la caldera se encuentra apagada, a la espera de la orden de arranque.
- A3- Parada pedida en un estado determinado: al tratarse de un sistema que no es cíclico, el proceso de producción de vapor puede ser detenido en cualquier instante de tiempo.
- A5- Preparación luego de defecto: luego de una parada de emergencia de la caldera y de solucionar el problema, se elimina la orden de parado de emergencia.
- A6- Puesta en estado inicial: Luego de anular un defecto que ocurrió en el proceso, se procede a reiniciar la caldera

➤ **Grupo D. Procedimientos de defecto.**

- D1- Parada de emergencia: La opción de parada de emergencia debe estar presente en todo tipo de equipo industrial, por lo cual es preciso tener un pulsador de fácil acceso que hace las veces de parada de emergencia, ante cualquier situación crítica.

Es necesario ahora definir sobre el GEMMA los caminos de evolución entre los diferentes estados y trazar las condiciones de evolución existentes para pasar de un procedimiento a otro. A continuación se ilustran los diferentes caminos de evolución del GEMMA y sus respectivas condiciones, con lo cual se obtiene el diagrama GEMMA para el funcionamiento de una caldera de tipo pirotubular.

Figura 52. GEMMA completo de una caldera pirotubular



Fuente: el autor.

Como se puede apreciar en el diagrama, existen una serie de condiciones para pasar de un modo de funcionamiento a otro. A continuación se hace referencia a cada uno de los macro estados y sus caminos de evolución a uno u otro estado.

A1- Parada en estado inicial: por medio de una señal de un pulsador M1, se pasa de este estado a iniciar la secuencia de encendido de la caldera (F2).

A3- Parada en un estado determinado: la caldera puede estar operando ya sea en modo continuo o en modo ON –OFF, en cualquier momento se puede detener su producción por medio de un pulsador P1.

A5- Preparación luego de defecto: a través de la anulación de la parada de emergencia se llega a este estado.

A6- Puesta en estado inicial: luego de la orden de reinicio se llega a este estado inicial del equipo, de donde automáticamente se pasa a la parada en estado inicial.

D1- Parada de emergencia: Se puede llegar a este estado por tres caminos diferentes:

- El primero de ellos es a través de F2, en donde ante cualquiera de los siguientes problemas se llega a una parada de emergencia: alta presión de vapor, falta de llama, alta presión de gas, baja presión de aire o por medio de un pulsador de emergencia.
- Si el equipo se encuentra en el modo de funcionamiento con control continuo, las condiciones de parada de emergencia son: ausencia de llama, alta presión de gas o pulsador de parada de emergencia.
- En caso de estar en el modo de funcionamiento ON –OFF, se llega al estado D1.por cualquiera de las siguientes causas: presión alta de vapor, presión alta de gas, falta de llama y paro de emergencia.

F1- Funcionamiento de la caldera con control continuo: Se llega a este modo luego de la secuencia de encendido, seleccionando el modo automático (AU).

F2- Secuencia de encendido de la caldera: se llega a este modo gracias a un pulsador M1, el cual enciende la caldera, luego de terminar la secuencia, se debe escoger uno de los dos modos de operación, ya sea control continuo (F1), o control ON –OFF (F5); la condición para uno u otro modo es la selección del modo automático (AU) o no.

F3- Funcionamiento de la caldera en modo ON – OFF: Luego del arranque de la caldera, y no encender el modo automático (continuo) se sigue controlando la caldera por medio del Fireye.

4.3.3 Presentación de Grafcet completo de arranque y operación para una caldera pirotubular.

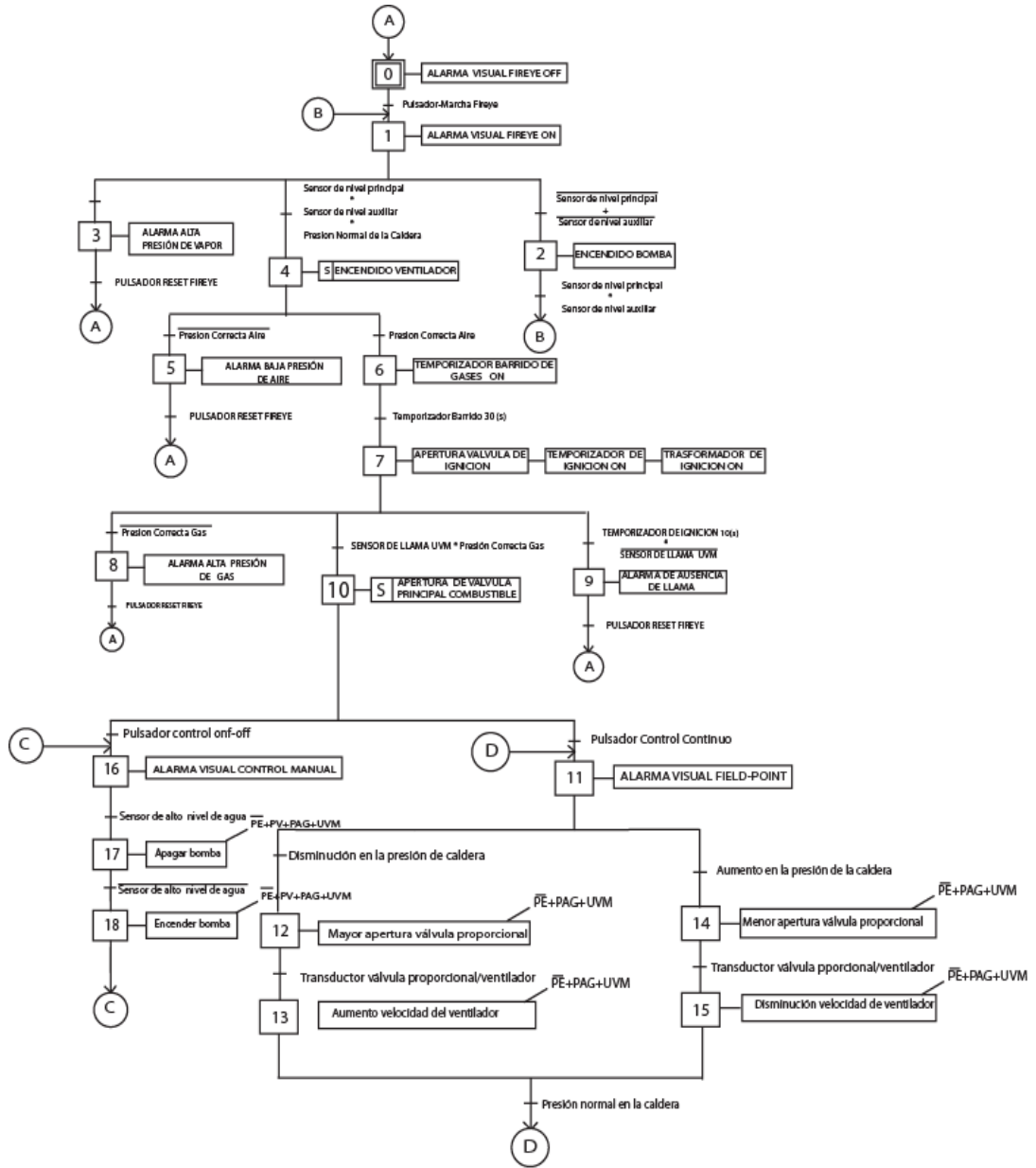
Luego de definir sobre el diagrama GEMMA los caminos y demarcar las condiciones de evolución entre los diferentes estados, se deben estructurar los Grafkets enriquecidos luego del análisis del GEMMA, estos Grafket contienen los posibles defectos del sistema y una unión completa del Grafket de encendido de la caldera con los de operación.

➤ Grafcet completo para una caldera pirotubular con modo de operación continuo y con modo de operación ON – OFF

Este Grafket es la unión de los Grafket de primer orden de encendido del equipo con los de operación en modo continuo y modo ON – OFF, el diagrama tiene un enriquecimiento dado por las condiciones de paro de emergencia de la caldera, obtenidos gracias al diagrama GEMMA.

A continuación se presenta el Grafket completo de funcionamiento de la caldera, con lo cual se termina el modelado secuencial de los sistemas de control del equipo.

Figura 53. Grafcet completo de funcionamiento de una caldera de tipo pirotubular.



Fuente: el autor.

5. SIMULADOR BÁSICO PARA LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE CALDERAS DE TIPO PIROTUBULAR.

5.1 HERRAMIENTAS DE DESARROLLO.

Para la realización del simulador, se usaron diferentes herramientas de tipo computacional que permitiesen construir un programa lo más completo posible, a continuación se hace una relación del hardware y software utilizado para la obtención del simulador.

5.1.1 Hardware utilizado.

Para la utilización del Simulador básico para la puesta en marcha y operación de Calderas de tipo Piro-tubular es necesario el uso de las siguientes herramientas computacionales:

- Procesador Intel Pentium III de 2.8 GHz
- Memoria RAM de 528 Mb
- 100 Mb disponibles de disco duro
- Tarjeta de video 256 Mb
- Monitor de 14"
- Unidad de CD ROM

5.1.2 Software utilizado.

Para la obtención del simulador fueron usados software de la familia Adobe Systems Incorporated, con el fin de lograr una compatibilidad en todo el proceso de construcción de la herramienta.

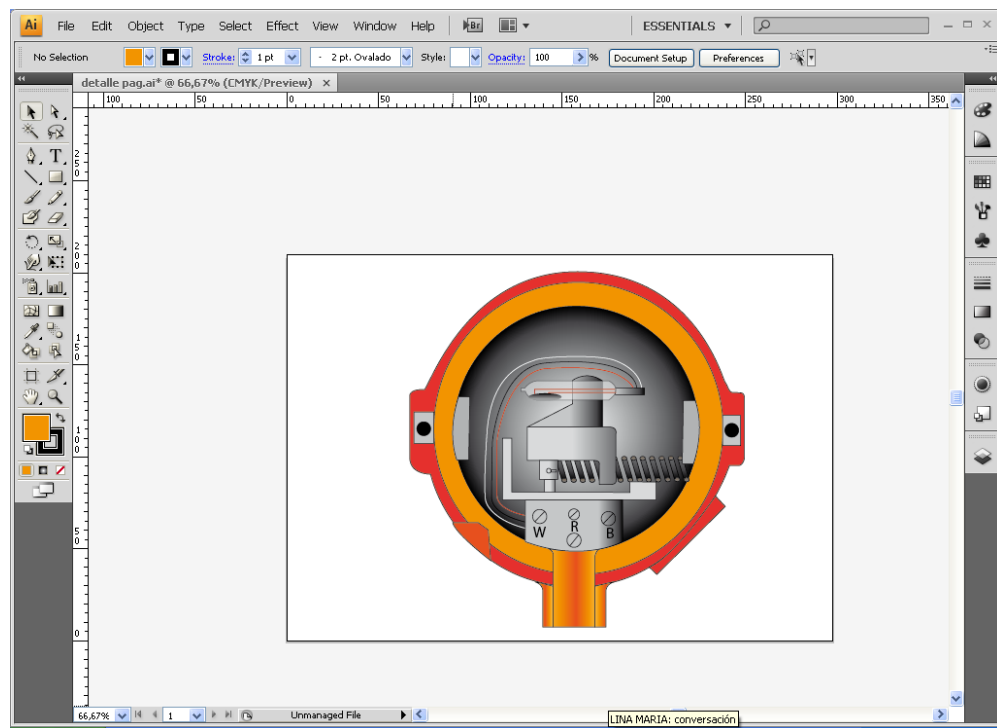
➤ **Adobe Illustrator CS4:**

Adobe Illustrator es un entorno gráfico de tipo vectorial, el cual trabaja sobre una pantalla denominada mesa de trabajo, su uso está aplicado a la creación de dibujos y pinturas para el diseño gráfico. Este programa incluye una serie de transparencias, degradados y un conjunto de opciones que permiten tener un modo eficaz de diseño.

La elección de la versión CS4, se dio con base a las nuevas opciones de texturas y realismo gráfico que maneja este modelo, además de la afinidad que tiene esta serie con el Flash CS4.

Como primer paso para la realización de cada una de las películas que hacen parte del simulador, era necesario primero dibujar los elementos que se iban a animar, desde un objeto en particular, hasta el sistema completo del equipo.

Figura 54. Entorno de Adobe Illustrator CS4



Fuente: el autor.

➤ **Adobe Flash CS4.**

Adobe Flash (anteriormente conocido como Macromedia Flash) es un programa cuyo ambiente es similar a un estudio de animación que trabaja sobre fotogramas, con el fin de brindar contenidos de tipo interactivo, independientemente de la plataforma de trabajo de cada computadora.

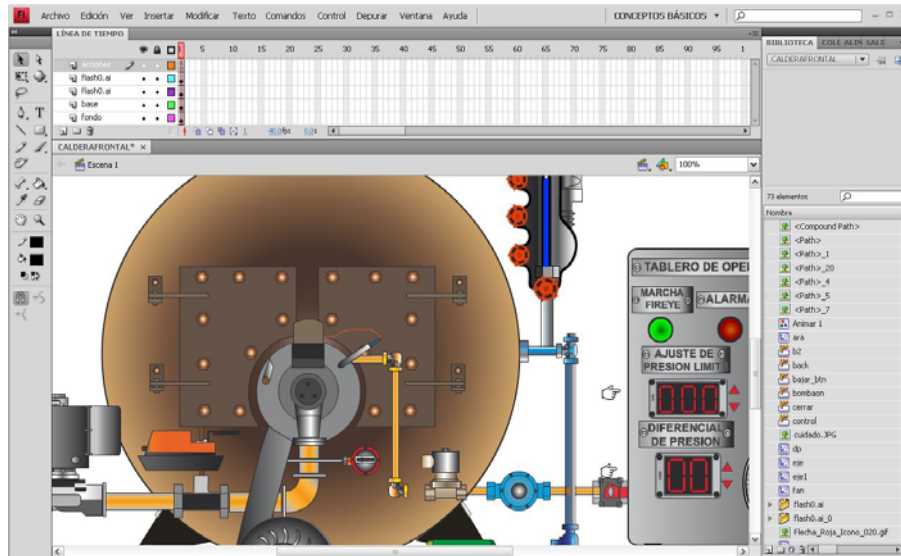
Flash es el programa entorno, mientras Flash Player es utilizado para ejecutar los archivos generados en Flash. Los archivos Flash Player tienen la extensión SWF, por lo que pueden aparecer en una página web para ser vistos por cualquier tipo de navegador; su mayor utilización es en las páginas web, donde hacen parte de las animaciones de estos sitios.

Uno de los objetivos del proyecto era desarrollar un simulador con alto grado de riqueza gráfica, que permitiese observar de la forma más clara posible, cada uno de los procesos que se llevan a cabo en la caldera, según este requerimiento y luego de analizar cada una de las alternativas informáticas para el desarrollo del simulador, se optó por usar Adobe Flash CS4.

El Adobe Flash CS4 maneja un rico entorno gráfico, con lo cual se podrá observar de forma animada la secuencia de encendido y los modos de operación de la caldera; además, permite visualizar una simulación de cada uno de los sistemas y componentes básicos que conforman el equipo.

El Adobe Flash CS4 es la última versión de este producto, por lo cual cuenta con un ambiente de trabajo que permite crear películas mucho más avanzadas, a esto se suma su compatibilidad con Adobe Illustrator CS4. Otra gran ventaja es que contiene un lenguaje de programación (ActionScript) que permite crear y manipular variables de trabajo, lo que permite manejar animaciones de alta complejidad.

Figura 55. Entorno de Adobe Flash CS4



Fuente: el autor.

- ActionScript

El ActionScript es el lenguaje de programación propio del Adobe Flash, permite ampliar las aplicaciones del Flash y crear películas con mayor contenido interactivo, teniendo la posibilidad de generar variables y condiciones que conlleven a animaciones más completas y con mayor control del usuario.

Las versiones superiores a Flash CS3, utilizan la versión 3.0 de ActionScript, aunque en el caso de este proyecto se usó la versión 2.0, por tratarse de una versión con mayor facilidad de manejo y contar con un mayor paquete de tutoriales en la Web.

El proceso para simular cada uno de los detalles operativos de la caldera por medio de Flash fue el siguiente:

- Dibujar en Adobe Illustrator el elemento o sistema a animar, con base a la distribución de la caldera del laboratorio de plantas térmicas.
- Dividir el dibujo por capas, con el fin de facilitar su manipulación en Flash.

- Realizar la programación de objetos a través de Flash, por medio de su lenguaje de programación: ActionScript 2.0

Figura 56. Ambiente de programación de ActionScript

```

1  getUrl("FSCommand:fullscreen", true);
2
3  _root.texto1_txt._visible=false;
4  _root.nivel1_mc._visible=false;
5  _root.eje1_mc._visible=false;
6  _root.m3_mc._visible=false;
7  _root.val_mc._visible=false;
8  _root.reset_txt._visible=false;
9  _root.llave_mc.stop();
10 _root.alarma_mc._visible=false;
11 _root.eje_mc.stop();
12 _root.m2_mc._visible=false;
13 _root.open_mc._visible=false;
14 _root.close_mc._visible=false;
15 var M1:Number=60;
16
17 onEnterFrame=function()
18 {
19     if (manome==1&&M1<alta)
20     {
21         M1 = M1 + 0.2;
22     }
23     if (manome==2&&M1>baja)
24     {

```

acciones: 1
Línea 98 de 98, Col 3

Fuente: el autor.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.

El Simulador básico para la puesta en marcha y operación de Calderas de tipo Piro-tubular, consta de 3 módulos que contienen: todo el proceso de encendido de la caldera, los modos de la operación que puede manejar el equipo, un conjunto de fallas que pueden ocurrir en el sistema y un módulo complementario; los cuales hacen de este simulador una herramienta valiosa en el área de máquinas térmicas, para todo el estudiantado de Ingeniería Mecánica.

Es necesario para la correcta ejecución de cualquiera de los módulos, seguir las indicaciones que están planteadas por el diseñador, para este fin se implemento el uso de una **MANO VIRTUAL**, la cual se encarga de llevar al usuario por una secuencia de visualización de cada proceso.

5.2.1 Pantalla de presentación

La pantalla de presentación es la introducción al simulador, en esta se encuentra una animación en donde se dará acceso a un menú principal dando clic a el botón ENTRAR AL SIMULADOR.

Figura 57. Pantalla de presentación



Fuente: el autor

5.2.2 Menú principal

El menú principal permite hacer uso de los módulos y submódulos que contiene el simulador, así mismo da una breve introducción al tema que contiene cada módulo. Al dar clic sobre el vínculo correspondiente a un módulo, se despliega la introducción a este y la opción de ejecutarlo. Igualmente el usuario tiene la posibilidad de volver al menú principal en cualquiera de las partes en que se encuentre navegando del simulador.

Figura 58. Menú principal



Fuente: el autor

5.2.3 Módulo de subsistemas de la caldera.

Con el fin de lograr una comprensión completa de los contenidos del simulador, se elaboró un módulo que sirviera de introducción a los sistemas de operación y control de la caldera. Este módulo muestra los diferentes subsistemas que conforman el funcionamiento integral de la caldera, desde la alimentación de agua hasta el objeto general del equipo, el cual es la generación de vapor.

El módulo de subsistemas de la caldera consta de cuatro submódulos: Tratamiento de agua, Sistema de control de nivel, Sistema de combustión y Sistema de generación de vapor.

➤ **Tratamiento de agua.**

El tratamiento de agua, presenta todo el proceso previo que sufre el agua de alimentación de la caldera, antes de entrar al equipo.

- Presentación del tratamiento: Pantalla de inicio del tratamiento de agua, a través del cual el usuario podrá tener acceso a los tres modos de operación del circuito de tratamiento de agua:
 - Operación normal
 - Operación con regeneración
 - Agua sin tratamiento

Figura 59. Presentación del tratamiento



SIMULADOR BASICO PARA CALDERAS DE TIPO PIROTUBULAR



TRATAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS PIROTUBULARES



OPERACION NORMAL

OPERACION CON REGENERACION

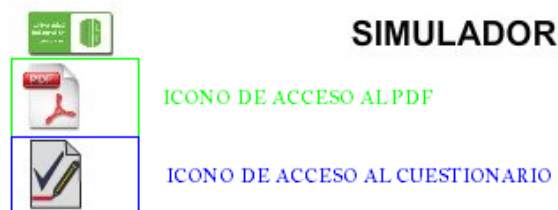
AGUA SIN TRATAMIENTO

Fuente: el autor

- Operación normal: Esta opción se muestra el proceso de suavizado del agua, a través de una secuencia de apertura de válvulas del circuito de tratamiento.

- Operación con regeneración: el proceso de regeneración consta de tres partes: lavado, inyección de salmuera y enjuague. El simulador lleva al usuario por cada una de estas etapas, siguiendo una secuencia orientada por el diseñador.
- Agua sin tratamiento: en este modo el usuario podrá visualizar la forma como pasa el agua de red hacia el tanque de condensado, sin pasar antes por el suavizador.
- PDF: cada uno de los módulos del simulador contiene un documento en formato Pdf, con el fin de brindar una ampliación de los conceptos tratados en cada una de las películas, el usuario puede tener acceso al Pdf en cualquiera de las películas del módulo, con solo dar **clik** sobre el icono que aparece en ellas.
- Cuestionario: Para verificar que el usuario comprendió el módulo ejecutado, se diseño una evaluación para cada módulo del simulador, el cuestionario consta de seis preguntas de selección múltiple; es importante ir al cuestionario luego de haber acabado el módulo correspondiente y de haber hecho una lectura del Pdf. El usuario tendrá acceso al cuestionario por medio de un icono incluido en la parte superior izquierda de las películas.

Figura 60. Acceso al Pdf y al cuestionario del módulo de tratamiento de agua

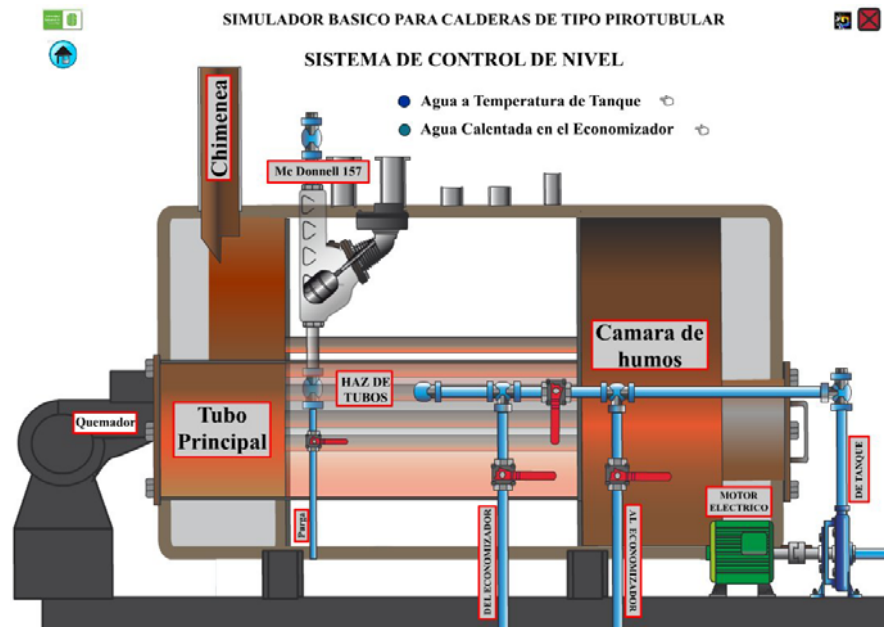


Fuente: el autor

➤ **Sistema de control de nivel.**

Este submódulo ilustra los componentes del sistema de control de nivel de la caldera, el elemento encargado de realizar el control de nivel es un controlador de nivel tipo Mc Donnell , el cual se encarga de encender o apagar la bomba de acuerdo al nivel del agua dentro del equipo.

Figura 61. Sistema de control de nivel



Fuente: el autor.

➤ **Sistema de combustión.**

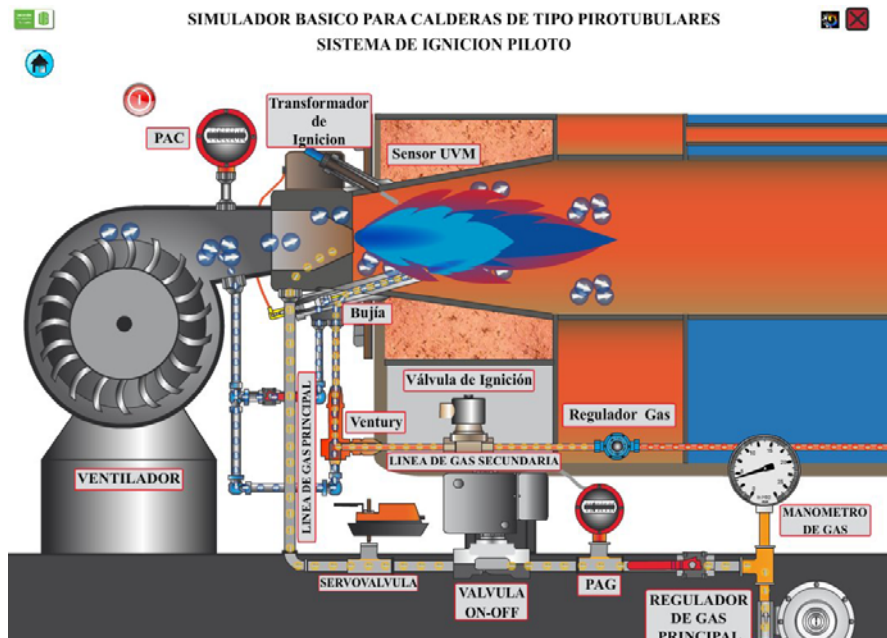
El sistema de combustión es el encargado de la formación de la llama en la caldera para de este modo garantizar una transferencia de calor dentro del equipo; con el propósito de generar vapor, este sistema está conformado por dos circuitos básicos:

- Sistema de combustible piloto: es el encargado de la formación de la llama piloto.

- Sistema principal de combustible: su función es suministrar gas a una presión determinada para la generación de la llama en el hogar de la caldera.

Este submódulo muestra la ubicación en la caldera de cada uno de los componentes que hacen parte de estos dos sistemas.

Figura 62. Sistema de combustión

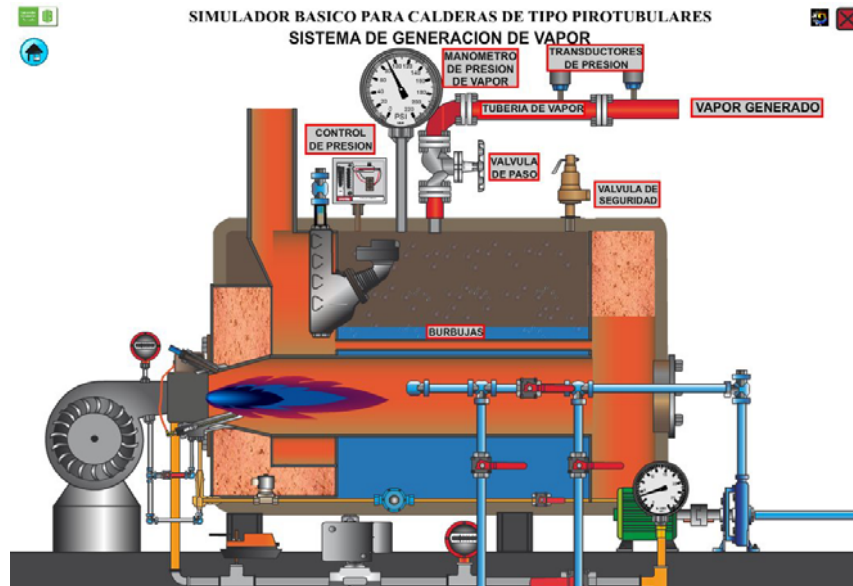


Fuente: el autor.

➤ **Sistema de generación de vapor.**

La generación de vapor ocurre gracias a la transferencia de calor del tubo principal y los tubos secundarios de la caldera hacia el agua contenida por el equipo, luego de un tiempo la presión en la caldera empieza a subir y se estabiliza en un valor predeterminado; la caldera cuenta con un controlador de presión de vapor que limita la presión máxima del sistema. Estos detalles son mostrados en este submódulo para brindar una idea global del tema.

Figura 63. Sistema de generación de vapor



Fuente: el autor.

5.2.4 Módulo de Simulación de la operación y control

Luego de haber hecho una introducción a los subsistemas que conforman el equipo, este módulo contiene una simulación gráfica de toda la secuencia de encendido y operación de la caldera, con todos sus elementos de control detalladamente ilustrados. Este módulo está dividido en cuatro submódulos.

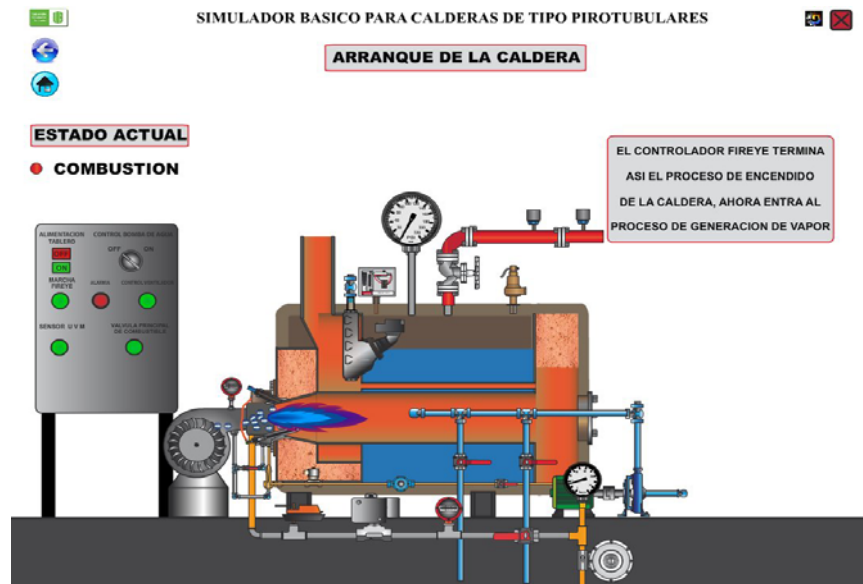
➤ **Arranque general.**

Este elemento del módulo ilustra de manera global el proceso de arranque de la caldera desde el punto de vista físico y a partir de un panel de control típico de la caldera.

- Película general: Muestra de manera global la secuencia de arranque de la caldera, la cual es controlada por el Fireye. El usuario podrá observar al mismo tiempo el comportamiento de los sistemas y sus componentes durante el arranque de la caldera, un tablero de control

que indicará la forma como se van accionando cada uno de los elementos de arranque, la evolución del circuito eléctrico perteneciente a la secuencia de encendido y una serie de informaciones que van explicando las diferentes etapas del arranque del equipo.

Figura 64. Secuencia de encendido general



Fuente: el autor.

- Tablero de arranque: El simulador contiene un tablero, con el fin de familiarizar al usuario con el tablero de mando de la caldera, y de esta manera haga las veces del controlador de arranque del equipo (FIREYE).

El objeto de este tablero es visualizar la secuencia de arranque desde el tablero de control, encienda en primera medida el controlador, luego la bomba, y se deje guiar por el simulador para culminar satisfactoriamente el periodo de encendido del equipo.

Figura 65. Tablero de arranque



Fuente: el autor.

➤ Encendido detallado.

Este submódulo ilustra las etapas de arranque de la caldera, así como los componentes que hacen parte de este proceso de encendido. A continuación se hace un detalle de sus contenidos.

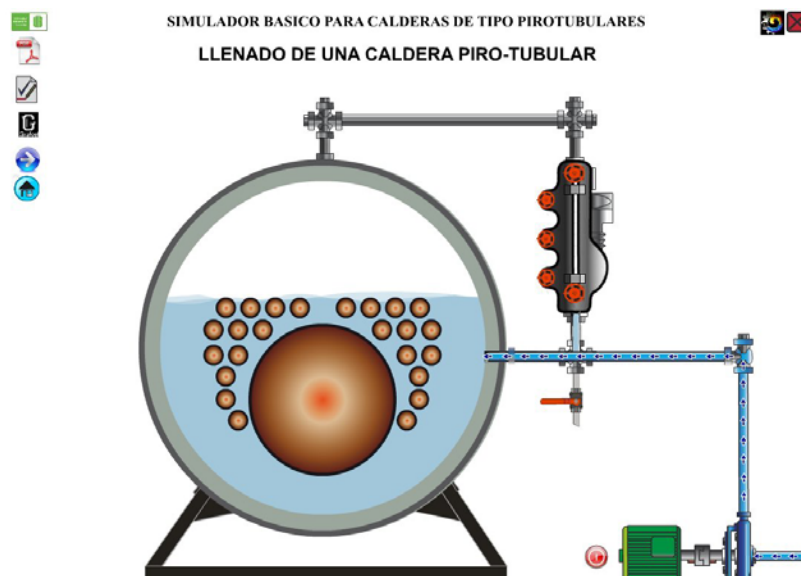
- **Llenado de la caldera.**

Las películas de llenado de la caldera, muestran todo el proceso de ingreso del agua al equipo por medio de la bomba de alimentación, los componentes de este submódulo son los siguientes:

- Llenado frontal de la caldera: Esta película permite observar la distribución del tubo principal y los tubos secundarios en la caldera, así como el llenado del equipo.

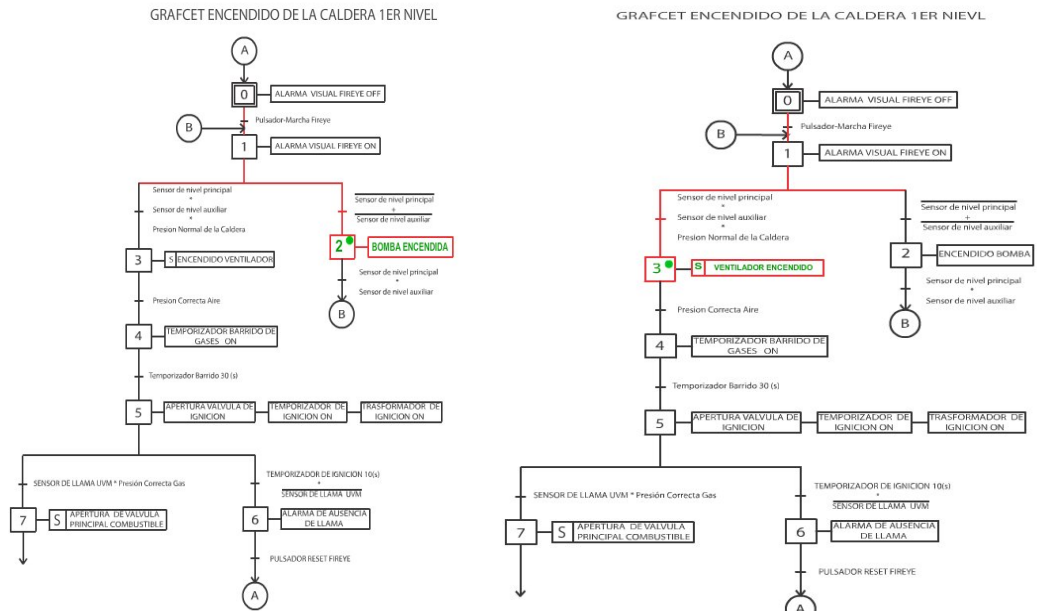
- Llenado lateral de la caldera: Por medio de este llenado lateral se observa la acción del control de nivel Mc Donnell en el momento de alcanzar un nivel alto en el equipo, además de visualizar los caminos posibles de alimentación de agua a la caldera.
- Detalle Mc Donnell: permite conocer el principio de funcionamiento del control de nivel, así como el efecto de este elemento sobre el circuito eléctrico de encendido.
- PDF: el Pdf se encarga de ampliar los conceptos tratados sobre el control de nivel tipo Mc Donnell.
- Grafcet de llenado de la caldera: Se ha implementado el Grafcet en cada una de las etapas de encendido de la caldera, de manera que, el usuario pueda visualizar el estado en el que se encuentra el proceso. Este diagrama muestra la etapa de llenado de la caldera.
- Grafcet de caldera llena: Este Grafcet ilustra la etapa siguiente al llenado de la caldera, en la cual se energizará el ventilador.
- Cuestionario: Contiene preguntas de selección múltiple para verificar la comprensión del contenido tratado en las películas.

Figura 66. Llenado frontal de la caldera



Fuente: el autor

Figura 67. Graficets de encendido de la caldera para las etapas de llenado de la caldera y encendido del ventilador



Fuente: el autor.

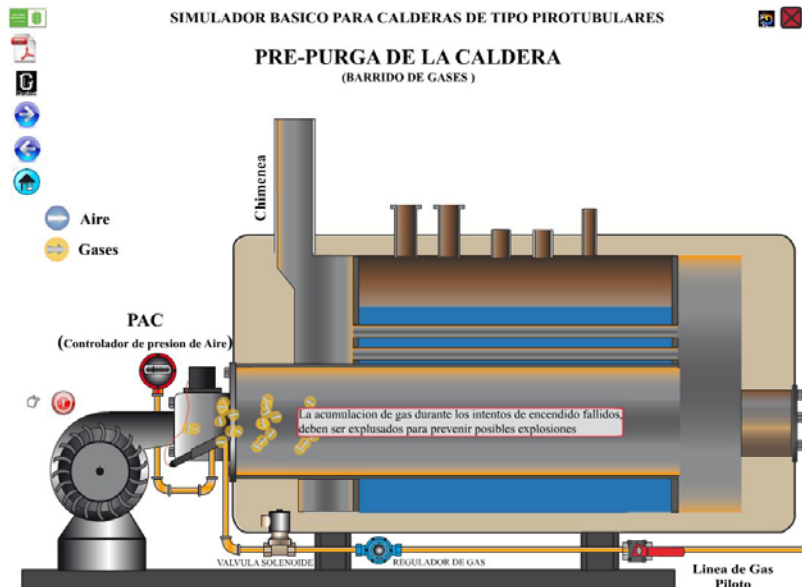
- **Barrido de gases.**

El barrido de gases es la segunda etapa del proceso de arranque de la caldera, este elemento del módulo está constituido por los siguientes componentes:

- Barrido de gases: esta película muestra el periodo de prepurga que sucede en la caldera, luego de encender el ventilador.
- Detalle PAC: pretende mostrar el principio de operación del controlador de presión de aire (PAC), igualmente la forma como este actúa sobre el circuito de control del Fireye.
- Temporizador de barrido de gases: ilustra un temporizador de tipo digital y la relación de este elemento con el circuito del controlador.
- PDF: documento que pretende ampliar la información alrededor del periodo de prepurga de gases en la caldera.

- Grafcet: Este diagrama sitúa al usuario en el estado de purga de la caldera.

Figura 68. Barrido de gases



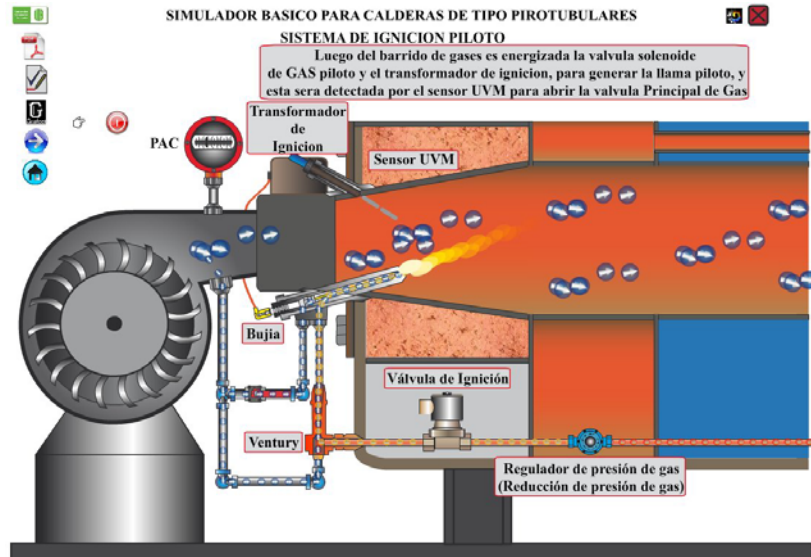
Fuente: el autor.

- **Periodo de ignición**

El periodo de ignición está compuesto por una serie de películas e información complementaria, de la siguiente manera:

- Ignición: se ilustra el camino de la línea piloto de combustible y de todos los componentes de la caldera que hacen posible la formación de la llama piloto, así como el elemento sensor de llama.
- PDF: documento que amplía el concepto de periodo de ignición.
- Grafcet: ilustra el estado del periodo de ignición dentro de la secuencia de arranque.
- Cuestionario: preguntas de selección múltiple alrededor del tema de barrido de gases e ignición.

Figura 69. Ignición en la caldera



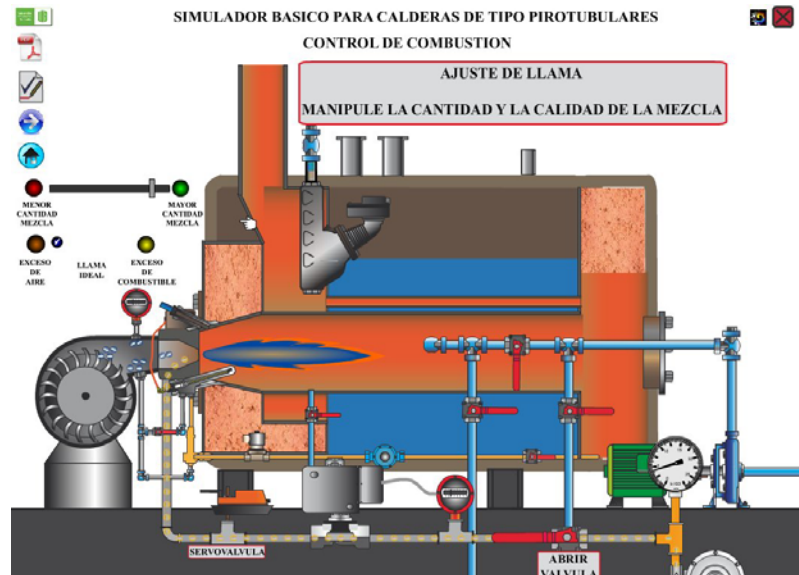
Fuente: el autor.

- **Combustión.**

El conjunto de películas de combustión expone los elementos principales de la línea de combustible, y una manipulación de la llama de la caldera, los componentes de este paquete son:

- Combustión en la caldera: película que permite al usuario manipular la llama en la caldera, así mismo dirigirse a una serie de detalles de del sistema de combustión.
- Detalle reguladora de presión: ilustra el principio de funcionamiento de este elemento.
- Detalle PAG: descripción de la operación del controlador de presión de combustible.
- Detalle Válvula principal de combustible: principio de funcionamiento de la válvula on-off de gas.
- PDF: documento acerca de la combustión en la caldera.
- Grafcet: Ubicación en la etapa final del encendido del equipo.
- Cuestionario: preguntas del tema de combustión.

Figura 70. Combustión



Fuente: el autor.

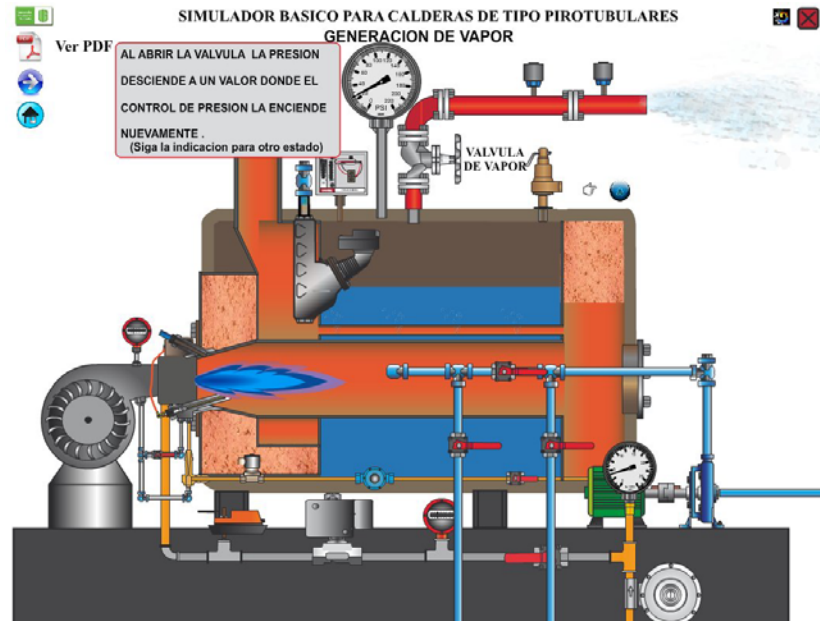
- **Generación de vapor.**

La generación de vapor es la función para la cual es diseñada una caldera, es por esta razón que se ha dedicado un módulo especial a este fenómeno físico. En el módulo de generación de vapor el usuario podrá observar diferentes modos de funcionamiento del equipo de acuerdo a la demanda de vapor que requiera el sistema, visualizando el efecto que tiene esta demanda de vapor sobre la presión de la caldera. Igualmente en este módulo se representa la acción del controlador de presión límite, el cual al detectar una presión elevada dentro del equipo, apagará la caldera, hasta que la presión caiga a un valor aceptable, retomando así nuevamente su operación.

Los tres modos representados para la generación de vapor son:

- Generación de vapor estable
- Alta demanda de vapor
- Válvula de vapor cerrada

Figura 71. Generación de vapor en la caldera



Fuente: el autor.

➤ **Tipos de control.**

El módulo correspondiente a los tipos de control de la caldera, ilustra tanto el mecanismo usado por el controlador ON-OFF como el del controlador de tipo continuo, mostrando los diferentes componentes que hacen parte del control del equipo.

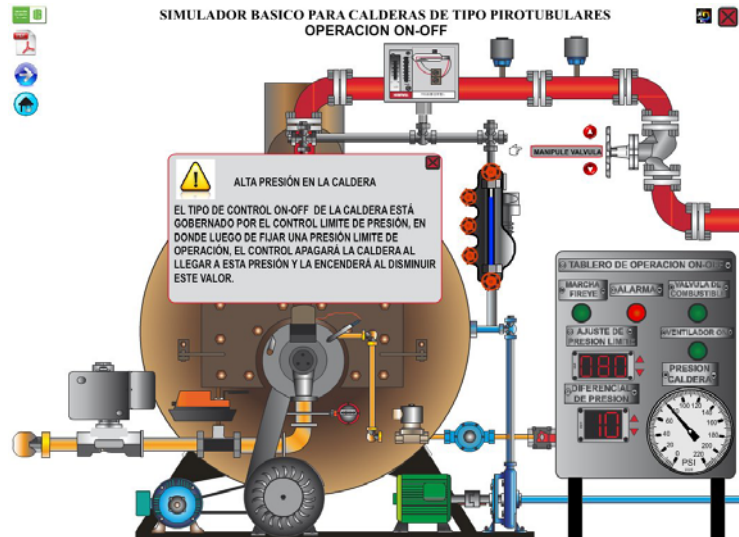
- **Tipo de control ON-OFF.**

Esta película muestra el mecanismo de operación ON-OFF de la caldera, permitiendo al usuario fijar una presión máxima de trabajo y un valor de diferencial de presión que marcará el valor de presión donde reiniciará operaciones la caldera.

El modo de operación ON-OFF tiene un detalle del mecanismo en el cual está basado el controlador de presión de vapor para realizar su función. Igualmente

se presenta el circuito de control de estado sólido del equipo y la acción del controlador sobre el sistema, en caso de una sobrepresión.

Figura 72. Modo de operación ON-OFF



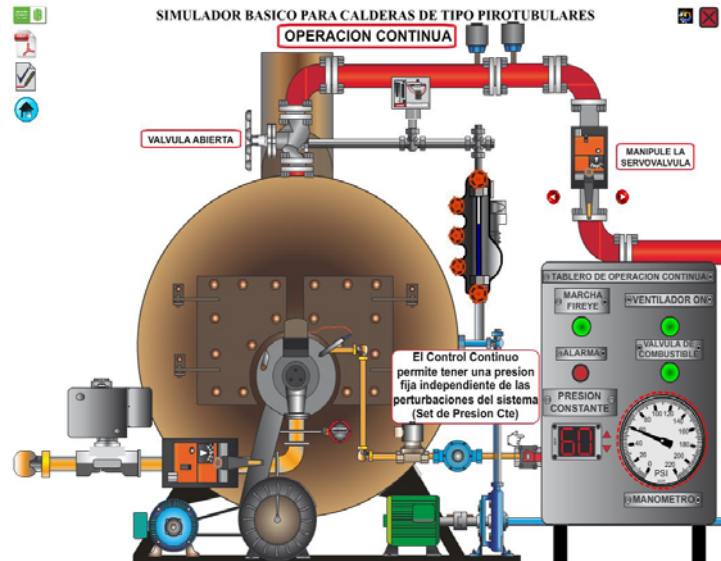
Fuente: el autor.

- **Tipo de control continuo.**

El otro modo de operación de la caldera es por medio de un control continuo, en el cual el usuario debe fijar una presión de trabajo para el equipo, esta presión permanecerá constante sin importar una variación en la demanda de vapor del sistema, esto gracias a la acción del controlador sobre los elementos de control. Los elementos de control continuo son: la servo válvula de combustible y el variador de velocidad del ventilador.

El modo de operación continuo, muestra la acción del controlador sobre la apertura de la servo válvula de combustible y la velocidad del ventilador, con base a la demanda de vapor del sistema, permitiendo mantener una relación aire- combustible óptima y una presión constante.

Figura 73. Modo de operación con control continuo



Fuente: el autor

➤ **Fallas en la caldera.**

La opción de fallas pretende mostrar al usuario los problemas o perturbaciones más comunes que se puedan presentar tanto en el arranque como en la operación en régimen de la caldera, igualmente estudiar las posibles causas de estas fallas y una solución a cada uno de los inconvenientes presentados.

- **Fallas en el arranque de la caldera.**

Para la presentación de cada una de las fallas en el encendido del equipo se utilizó el tablero de control de encendido, en donde se verán representados los diferentes problemas; de la misma manera se permite al usuario ver el detalle físico de cada una de las fallas, las causas de estas y dar una solución, para el reinicio de la secuencia de encendido del equipo.

Las fallas que muestra el simulador para la secuencia de encendido son:

- **Falla en la bomba**

- Falla en el control de nivel
- Falla en el ventilador
- Falla en el control de presión de aire
- Falla en la válvula de ignición
- Falla en el transformador de ignición

- **Fallas en la operación de la caldera.**

En la operación de la caldera suceden diferentes fallas que impiden el funcionamiento normal del equipo, en esta opción el simulador presenta las fallas más comunes en la operación de una caldera pirotubular, igualmente las posibles causas para la presentación de estos problemas.

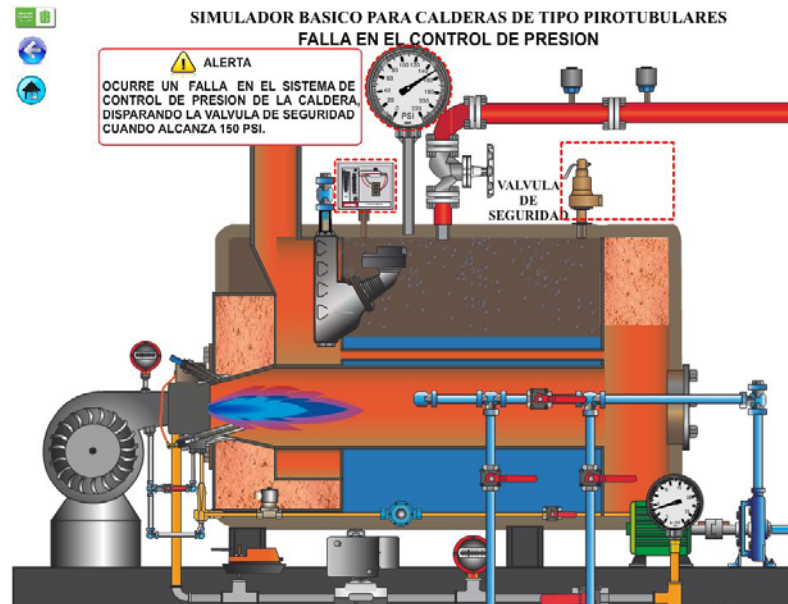
- Falla en los controles de nivel
- Falla en el sensor de llama UVM
- Falla en el control de presión.

Figura 74. Falla en el control de nivel de la caldera



Fuente: el autor.

Figura 75. Falla en el control de presión



Fuente: el autor.

5.2.5 Soportes teóricos.

Este módulo entrega una información complementaria a los módulos anteriores, es de gran ayuda en la comprensión de los contenidos del simulador. Los soportes van desde un manual de usuario para sacar el mayor provecho al simulador hasta evaluaciones que certifiquen el entendimiento de los temas propuestos.

➤ **Manual del usuario.**

El manual de usuario es el módulo que muestra paso a paso la forma correcta de ejecutar el simulador, de manera que la persona comprenda claramente todos los conceptos tratados en cada uno de los módulos de arranque y operación de la caldera. Es importante que el usuario consulte previamente el manual antes ingresar a cualquiera de los módulos, con el fin de hacer provechoso el uso del software.

➤ **Información de subsistemas**

Uno de los objetivos trazados al iniciar el desarrollo del simulador, es la elaboración de un documento que permita al usuario conocer los principios básicos tanto del arranque como de la operación de calderas de tipo pirotubular.

Con el fin de aprovechar el entorno que brinda el simulador, se decidió que dicho manual estuviese dividido en archivos de tipo Pdf, de manera que el usuario a medida que navegue por cada uno de los módulos, pueda tener acceso a la información correspondiente a cada tema en específico. Igualmente el presente módulo agrupa todos los Pdfs correspondientes al encendido del equipo y a los modos de operación posibles.

Los Pdfs brindan una información concreta sobre cada uno de los sistemas que hacen parte del funcionamiento de la caldera, así como de los elementos de control que garantizan una operación normal en el equipo.

Los Pdfs que hacen parte del manual de arranque y operación de la caldera son los siguientes:

- Sistema de alimentación de agua de la caldera
- Control de nivel ON-OFF tipo Mc Donell para calderas pirotubulares
- Sistema de ignición
- Sistema de combustión
- Sistema de arranque de la caldera
- Controlador de estado sólido (ON-OFF)
- Control continuo por computadora

➤ **Modelo Grafcet.**

Este módulo contiene el Grafcet de encendido de la caldera en cada una de sus etapas, desde el llenado del equipo hasta la obtención de la combustión. De la misma manera el usuario podrá tener acceso a cada uno de estos diagramas en el módulo de secuencia de arranque, en donde el Grafcet ilustra la etapa de encendido en la que se encuentra la caldera.

Para la representación de la etapa activa dentro del diagrama de secuencia de arranque, se colocó un círculo de color verde en dicha etapa, según la recomendación de la norma IEC 848².

➤ **Evaluaciones.**

Con el fin de garantizar una completa comprensión de la temática tratada en el simulador, se han diseñado una serie de cuestionarios sobre los diferentes módulos que hacen parte del simulador básico sobre la puesta en marcha y operación de calderas de tipo pirotubular. El usuario puede tener acceso a cada una de las evaluaciones desde los módulos de arranque y operación de la caldera, o por medio de este módulo en donde se pondrán a disposición cada una de las pruebas.

El formato de los cuestionarios consta de seis preguntas, en la modalidad de selección múltiple, donde el usuario podrá optar por tres posibles respuestas; luego de terminar de contestar las preguntas planteadas, se otorgará al usuario una valoración cualitativa, en donde este verificará el grado de comprensión del módulo que acaba de ejecutar. Es importante que el usuario tome la evaluación luego de haber ejecutado el módulo respectivo y de haber leído el Pdf respectivo al tema, de lo contrario es posible que los resultados de la prueba no sean positivos.

² International Electrotechnical Commission

Los cuestionarios que hacen parte del simulador son los siguientes:

- Tratamiento de agua
- Llenado de la caldera
- Barrido de gases e ignición
- Combustión
- Modo de operación ON-OFF
- Modo de operación continuo

Figura 76. Pantalla de inicio del cuestionario para la puesta en marcha y operación de calderas de tipo pirotubular



Fuente: el autor.

5.3 EXPERIENCIA INTERACTIVA.

El simulador básico para la puesta en marcha y operación de calderas de tipo pirotubular busca ser un complemento en la formación del estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, en el área de Sistemas Térmicos.

La acogida que pueda tener el simulador por parte del estudiantado es de vital importancia, ya que estos serán los principales beneficiados con dicha herramienta. Es por esta razón que se decidió buscar un espacio de interactividad del simulador con un grupo de estudiantes, para que estos ejecutaran y finalmente evaluaran diferentes aspectos del programa. Se programó una hora en el CENTIC el día 22 de enero con los estudiantes del curso de Sistemas Térmicos, grupo que está a cargo del Director de proyecto, el Ingeniero Omar Armando Gelvez Arocha.

Figura 77. Introducción al uso del simulador



Fuente: el autor

Figura 78. Manejo del simulador por parte de los estudiantes



Fuente: el autor.

Inicialmente se brindó una introducción del simulador a los estudiantes, para luego permitir que estos lo manipulasen libremente siguiendo las indicaciones que sugiere la herramienta. Finalmente se pidió a los estudiantes respondieran un test para usuarios que fue diseñado para conocer su concepto acerca del proyecto.

El test para usuarios consta de 5 preguntas concretas, las cuales resumen los aspectos fundamentales del simulador, como son:

- La facilidad en el acceso y la manipulación de los diferentes módulos del simulador
- El grado de interactividad entre el usuario y el simulador
- La riqueza gráfica de la herramienta
- Entendimiento y claridad en los temas tratados por el simulador.
- La semejanza del simulador con un modelo real de caldera pirotubular

Figura 79. Test para usuarios.



TEST PARA USUARIOS

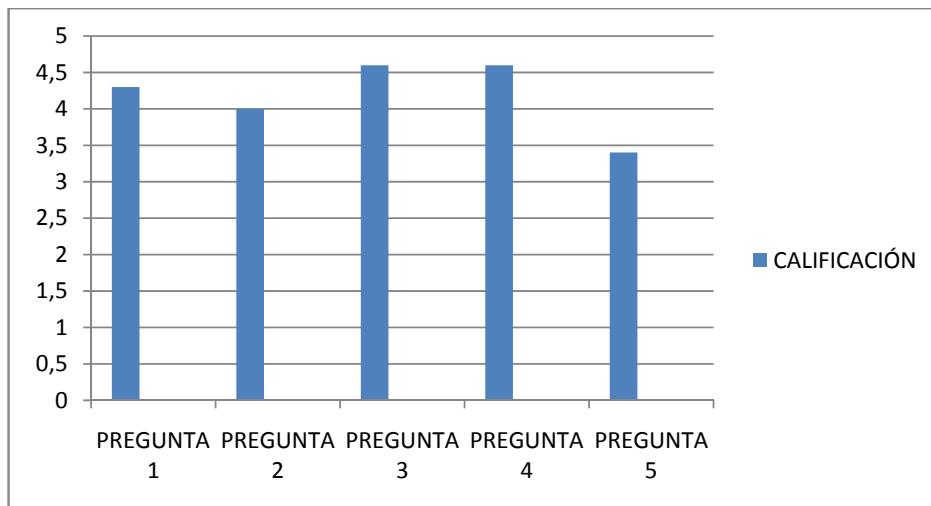
Califique los siguientes aspectos de 1 a 5. Tenga en cuenta que: (1) Peor calificación (5) Mejor calificación.

<p>1. FACILIDAD EN EL ACCESO Y MANIPULACIÓN DE LOS MÓDULOS DEL SIMULADOR</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/></p>	<p>2. NIVEL DE INTERACTIVIDAD ENTRE EL USUARIO Y EL SIMULADOR</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/></p>
<p>3. RIQUEZA GRÁFICA DEL SIMULADOR</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/></p>	<p>4. ENTORNO BASADO EN MÓDELO REAL DE CALDERA</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/></p>
<p>5. CLARIDAD EN LA INFORMACIÓN SUMINISTRADA</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/></p>	

Fuente: el autor

Las preguntas están calificadas en un rango de 1 a 5, donde 1 es la peor calificación y cinco es la mejor calificación. El número de estudiantes participantes en la encuesta fue de 15 y los resultados se muestran en la siguiente gráfica.

Figura 80. Calificación promedio del test para usuarios



El gráfico ilustra el promedio de calificación para cada uno de los aspectos a evaluar por los estudiantes, por lo cual podemos observar lo siguiente:

- Existe una interfaz sencilla para el ingreso a la herramienta. El menú principal da acceso fácilmente a cualquiera de los temas; en donde la manipulación de los módulos no tiene ningún tipo de problema.
- El nivel de interactividad del usuario con la herramienta es muy bueno, ya que este debe ir siguiendo las indicaciones del simulador para ir ejecutando cada uno de los módulos, haciendo en muchas ocasiones las veces de operario de la caldera.
- El simulador cuenta con una alta riqueza gráfica, el cual era uno de los propósitos trazados inicialmente para el desarrollo de la herramienta, donde el usuario navegase en un ambiente agradable y didáctico.
- El simulador corresponde al modelo de la caldera del laboratorio de sistemas térmicos de la escuela de Ingeniería Mecánica, se realiza un detalle de cada uno de los sistemas que conforman la caldera.
- La información suministrada por el simulador es clara hasta cierto punto. Teniendo en cuenta que el tiempo de uso del simulador por parte del grupo de estudiantes fue menor a una hora, tiempo que no permite navegar por todas las opciones que suministra la herramienta, como es el caso del módulo de soporte técnico, en donde se muestra información teórica de cada uno de los subsistemas de la caldera.

En términos generales, la experiencia con el grupo de estudiantes fue muy positiva, ya que surgieron una serie de sugerencias por parte de ellos para el mejoramiento de la herramienta, las cuales se tuvieron en cuenta para enriquecer el conjunto del simulador.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES

- Se desarrollo un Simulador grafico para facilitar el entrenamiento en la puesta en marcha y operación de Calderas de tipo Piro tubular, a través de una herramienta de alto nivel interactivo.
- Se realizó una adecuada simulación de los estados de la caldera, como son:
 - Cada una de las etapas que conforman la secuencia de arranque del equipo.
 - Los modos de operación en modo On-Off y Continuo, con sus respectivos elementos de control. Manejando las variables de funcionamiento de la caldera tanto en el encendido como en los tipos de operación.
 - Fallas y perturbaciones comunes, sus posibles causas y solución.
- El desarrollo de este proyecto permitió complementar la formación académica en áreas como:
 - El conocimiento en los programas Adobe Flash CS4 con su lenguaje de programación ActionScrip y en Adode Ilustrador CS4, con los cuales se obtuvo un diseño grafico y la programación de cada uno de los sistemas de la caldera.
 - El análisis de manera detallada de las secuencias de control en procesos industriales, por medio del método grafico de modelado y descripción de sistemas de automatismos secuenciales (Grafcet) y de la Guía de estudio de los modos de marchas y

paradas (Gemma); los cuales fueron fundamentales en la estructuración del simulador.

- La Implementación de una metodología para la validación del proyecto a través de un grupo objetivo de estudiantes del curso de sistemas térmicos. Experiencia que fue de gran importancia debido a que luego a la interactividad con la herramienta, surgieron sugerencias del estudiantado que permitieron realizar cambios favorables en el simulador.
- Se elaboró un modulo de Soporte Teórico, en donde el usuario podrá encontrar:
 - Documentos en formato PDF, complementarios a los contenidos tratados a lo largo del simulador.
 - Un Manual de usuario para la correcta manipulación del simulador
 - Evaluaciones correspondientes a cada tema.
- El desarrollo de este tipo de proyectos permite un acercamiento indirecto del estudiantado con la industria, gracias a la formación práctica que es recibida por medio de estas herramientas educativas, permitiendo complementar procesos convencionales y la labor docente.
- La elaboración de este proyecto permitió tener una experiencia en el manejo de equipos industriales ya que se estudió una gran información recopilada acerca de Calderas Piro-tubulares, en especial de la Caldera del Laboratorio de Sistemas Térmicos. Información que fue fundamental para el desarrollo de la herramienta.

6.2 RECOMENDACIONES.

- Al no existir un antecedente en cuanto a la realización de simuladores de tipo gráfico para equipos industriales, se dejan sentadas bases para futuros proyectos de grado basados en la herramienta Adobe Flash.
- Este proyecto de grado ilustra los fenómenos físicos que suceden en toda la operación de una caldera pirotubular; se recomienda para futuros trabajos, hacer una simulación en conjunto con el modelamiento matemático del sistema a simular.
- Se recomienda al usuario estudiar previamente el manual de usuario y los Pdf's correspondientes a cada tema del simulador, antes de ejecutar cualquiera de los módulos de la herramienta.
- Se sugiere ejecutar la evaluación correspondiente a cada tema del simulador, luego de haber ejecutado la película del tema y leído el respectivo Pdf. Esto con el fin de verificar la comprensión de los contenidos de la herramienta.

BIBLIOGRAFÍA

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

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

KOHAN, Anthony L. Manual de Calderas. México Mc Graw-Hill, 1992. 980 p.

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

CASILLAS Manuel, Manual de Calderas Industriales, España, Universidad de Burgos, 1991, 306p.

BOTIA, Javier y PARRA, Manuel. Tesis "Simulación y cuantificación del ahorro energético de una caldera pirotubular bajo control on-off y continuo". 2005.

VIDEO Tutoriales, Adobe Flash CS4 en línea, Disponible en: www.videotutoriales.es.

ANEXOS

Anexo 1. MANUAL DEL USUARIO PARA LA EJECUCIÓN DEL SIMULADOR BÁSICO PARA LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE CALDERAS DE TIPO PIROTUBULAR.

Para la utilización del simulador se debe contar como mínimo con un equipo con los siguientes requerimientos:

- Procesador Intel Pentium III de 2.8 GHz
- Memoria RAM de 528 Mb
- 100 Mb disponibles de disco duro
- Tarjeta de video 256 Mb
- Monitor de 14"
- Unidad de CD ROM
- Para una mejor resolución de imagen se recomienda configurar la pantalla a:
 - Resolución de 1024 x 768 pixeles
 - Paleta de colores: color de alta intensidad (24 bits)

En cuanto a software, se requiere:

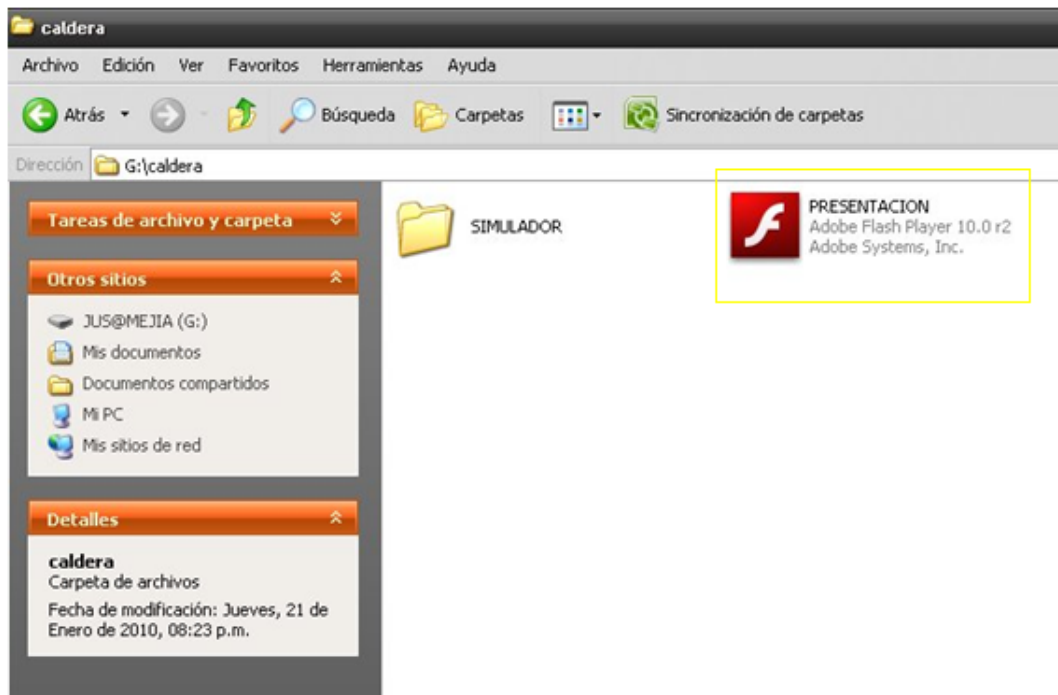
- Sistema operativo Windows XP o superior
- Mozilla Firefox 2.0 (preferiblemente) o Internet Explorer 5.5 o superior

1. INSTALACIÓN.

La ejecución del simulador se puede realizar directamente desde el CD, sin necesidad de instalarlo previamente en el computador, aunque por cuestiones de rendimiento se recomienda correr el software directamente desde el equipo, para este fin se debe guardar una copia del simulador en el computador, de la siguiente manera:

- **Paso 1:** Insertar el CD que contiene el software dentro de la unidad de CD-ROM del equipo.
- **Paso 2:** Abrir el contenido del CD y copiar la carpeta CALDERA en el escritorio o en el sitio del PC donde desee almacenarla.
- **Paso 3:** Una vez copiada la carpeta, abrirla y hacer Doble clic en el vínculo PRESENTACIÓN.
- **Paso 4:** Luego de observar la presentación del simulador, ubicarse en el botón ENTRAR AL SIMULADOR y dar clic sobre este para tener acceso al menú principal, el cual nos permitirá ingresar a los diferentes módulos de la herramienta.
- **Paso 5:** A través del menú principal navegar por los diferentes módulos del simulador.

Figura 81. Paso 3 de la instalación



Fuente: el autor.

2. PROCEDIMIENTO PARA MANEJAR EL SIMULADOR.

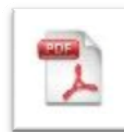
Al encontrarnos en el menú principal del simulador, podemos tener acceso a los diferentes módulos, dando clic a la franja correspondiente a cada módulo se despliegan los submódulos que este contiene, además cada módulo contiene un mensaje de introducción al tema que le corresponde.

2.1 Descripción de botones del simulador.

Los botones usados en cada uno de los entornos permiten al usuario tener un control óptimo de las diferentes posibilidades que ofrece el simulador, logrando un recorrido completo sobre cada uno de los ítems tratados dentro de la herramienta, los botones son característicos de cada uno de los módulos y se ubican en el extremo superior izquierdo de la pantalla, los botones a los cuales hacemos referencia son:

- Botón ver Pdf: este botón se encarga de generar un hipervínculo con el Pdf correspondiente al módulo en estudio, con el fin de afianzar los conocimientos sobre el tema.

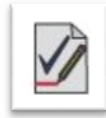
Figura 82. Botón ver Pdf



Fuente: el autor

- Botón hacer cuestionario: a través de este botón se tiene acceso a la evaluación propia de cada uno de los módulos del simulador.

Figura 83. Botón hacer cuestionario



Fuente: el autor.

- Botón ver Grafcet: este botón nos remite ir al gráfico secuencial de la caldera, con el fin de observar el estado del proceso en el cual nos encontramos.

Figura 84. Botón ver Grafcet



Fuente: el autor.

- Botones de anterior y siguiente: Estos botones permiten conectar tanto con la anterior o siguiente película del módulo que se esté ejecutando, los botones están personalizados de acuerdo al detalle al cual se va a acceder.

Figura 85. Botones anterior y siguiente



Fuente: el autor.

- Botón inicio: el botón inicio vuelve al usuario hacia el menú principal del simulador, este botón se encuentra en cada una de las películas que hacen parte de todos los módulos del simulador,

con el fin de que el usuario pueda volver al menú raíz en el momento que considere necesario hacerlo.

Figura 86. Botón inicio



Fuente: el autor

- Botón cerrar: el botón cerrar permite salir del simulador en el momento en que el usuario lo considere necesario. Este botón se encuentra en todas las etapas de la herramienta.

Figura 87. Botón cerrar



Fuente: el autor.

- Botón de arranque: en la mayoría de los módulos existe un botón para dar comienzo a las respectivas películas, este botón de arranque se encarga de energizar elementos o de dar comienzo a la visualización de un estado de la caldera.

Figura 88. Botón de arranque



Fuente: el autor.

2.2 Uso de elementos guía.

Con el fin de realizar un uso adecuado del simulador, se han diseñado elementos guía los cuales se encargarán de ayudar al usuario a ejecutar cada uno de los módulos del programa.

El icono clave para buscar un recorrido ordenado por el simulador es la MANO VIRTUAL, esta mano está desarrollada con el fin de que no se pierda ningún tipo de los detalles de cada una de las películas del simulador.

Figura 89. Mano Virtual

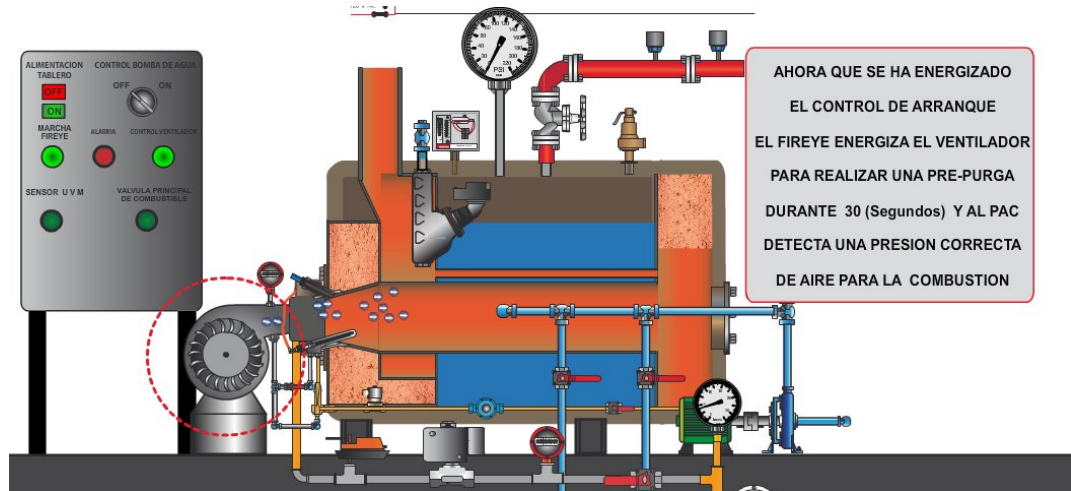


Fuente: el autor

Además de la MANO VIRTUAL se ha hecho uso de recuadros de mensajes en cada una de las películas, esto con el fin de orientar el recorrido por los diferentes temas y explicar hacer una breve explicación del módulo que se está ejecutando.

Por último es importante destacar que en los módulos con alto contenido visual, se usan diagramas de control, los cuales buscan fijar la atención del usuario sobre un componente o proceso en particular.

Figura 90. Elementos guía representados en el entorno del simulador



Fuente: el autor.

3. EJECUCIÓN DE LOS MÓDULOS DEL SIMULADOR.

El diseño de los diferentes módulos del simulador está dado para que cada módulo sea ejecutado de una forma determinada, es decir, el usuario debe manipular cada película en un orden específico para visualizar correctamente el fenómeno presentado. Para este fin se han elaborado los diferentes elementos guía que contiene el simulador, elementos mencionados anteriormente.

A continuación se presenta la forma correcta para ejecutar cada uno de los módulos del simulador.

3.1 Subsistemas de la caldera

Este módulo de carácter introductorio pretende ilustrar al usuario sobre cada uno de los subsistemas que conforman la caldera, así mismo los componentes que hacen posible un funcionamiento correcto del equipo.

3.1.1 Tratamiento de agua.

El primero de los submódulos que contiene el módulo de subsistemas de la caldera, es el submódulo relacionado con el tratamiento de agua de alimentación de la caldera, este módulo consta de tres partes, los pasos para su uso correcto se muestra a seguir.

- Presentación del módulo de tratamiento de agua. En la presentación del tratamiento de agua el usuario tiene tres opciones posibles: operación normal, operación con regeneración y agua sin tratamiento. Para acceder a cualquiera de estas opciones solo basta con hacer un clic sobre la opción a la que se quiera ingresar.

- Operación normal: La secuencia a seguir para el empleo de este submódulo es la siguiente de acuerdo a las indicaciones de la mano virtual:
 - Dar clic sobre el texto AGUA BLANDA.
 - Dar clic sobre RED, con el fin de abrir la llave de paso principal
 - Abrir la válvula “A” la dando clic sobre su letra correspondiente, para dar paso a la válvula multipuerto.
 - Finalmente colocar la válvula multipuerto en la posición 3, dando clic sobre este número.
 - Es posible tener acceso al cuestionario o al Pdf del tema con solo hacer clic sobre el icono correspondiente.
 - Para volver al menú principal dar clic en el botón ubicado en la parte inferior izquierda

- Operación con regeneración: Los pasos para la ejecución de la operación con regeneración son:
 - Iniciar la operación con regeneración dando clic sobre el vínculo indicado por la mano virtual.

- Al dar clic sobre operación con regeneración, se despliegan las tres etapas del proceso de regeneración, se recomienda ver en orden las tres etapas del proceso, por lo cual empezaremos con el lavado.
 - Lavado: para el lavado se debe colocar en primera medida la válvula multipuerto en la posición 1, dando clic sobre el número 1; para continuar con el siguiente paso se debe dar clic sobre el botón siguiente ubicado en la parte inferior derecha.
 - Inyección de salmuera: dando clic al texto inyección de salmuera se entra a esta etapa, luego de esto se debe abrir la válvula C por medio de la cual se abre la llave de paso a la salida del tanque de salmuera, además se debe colocar la válvula multiposiciones en la posición 2. Por último se da clic en el botón siguiente.
 - Enjuague: se inicia esta etapa final de la regeneración dando clic sobre el icono de enjuague, luego de esto se debe colocar la válvula multipuerto en la posición 3. Finalmente se tiene la opción de repetir todo el proceso dando clic en el botón OTRA VEZ o de volver al menú del tratamiento por medio de VOLVER.

- Agua sin tratamiento: El tercer submódulo del tratamiento de agua es la opción del no tratamiento de agua, los pasos para su ejecución son los siguientes:
 - Dar clic en el icono AGUA SIN TRATAR
 - Dar clic en RED con el fin de abrir la llave de paso principal
 - Abrir la llave de paso hacia el tanque de condensado haciendo clic en la letra “F” correspondiente a la válvula.
 - Para terminar se debe dar clic en VOLVER para volver al menú principal del tratamiento de agua.

3.1.2 Sistema de control de nivel.

Dar clic en el respectivo icono para observar una vista lateral del llenado de la caldera, de esta manera se ve claramente la acción del control del nivel sobre la bomba y los componentes de este sistema de control para una caldera pirotubular.

Se debe de seleccionar el camino de alimentación del agua que llega a la caldera, ya sea a través del economizador o directamente del tanque de condensado a una temperatura ambiente. Con esto se energizará la bomba.

3.1.3 Sistema de combustión.

Al seleccionar este submódulo el usuario observará todos los componentes que hacen parte tanto del sistema de combustible piloto como del sistema principal de combustible, con solo dar clic sobre el botón de arranque se logra la obtención de la llama producto de una combustión entre el gas de la línea primaria y el aire proveniente del ventilador.

3.1.4 Sistema de generación de vapor.

Este submódulo de generación de vapor muestra los elementos que forman este sistema básico de la caldera, dando clic en el botón de arranque de la película se observa la formación de burbujas en la caldera, resultado de la transferencia de calor en el equipo; de la misma forma se simula el aumento en la presión dentro de la caldera y la obtención de vapor luego de una determinada presión.

3.2 Simulador de operación y control.

La simulación del arranque y operación de la caldera es el propósito general de este proyecto, por esta razón se muestran cada una de las etapas en la puesta

en marcha del equipo y los modos de operación que este puede presentar con sus fallas más características.

3.2.1 Arranque general de la caldera.

➤ **Simulación general:** Al seleccionar esta opción se deben cumplir con los siguientes pasos para su correcta ejecución:

- Dar clic sobre el botón de arranque, con el fin de energizar tanto el tablero de control como la bomba de agua, con esto la secuencia de encendido de la caldera se ejecutará automáticamente, mostrando las diferentes etapas de esta secuencia. Es importante dejarse guiar por los volúmenes de control que va mostrando el simulador, ya que estos buscan centrar la atención del usuario sobre un elemento en particular.

Esta película contiene un diagrama eléctrico de encendido de la caldera, de manera que simultáneamente se pueden observar la secuencia de encendido de la caldera y la lógica que maneja el circuito de arranque del equipo.

Para tener una idea completa y real del proceso de arranque de una caldera pirotubular se incluyó en esta película un tablero de arranque del equipo en el que el usuario puede reconocer los botones e indicadores básicos del panel de control del equipo.

- Una vez que se obtenga la llama producto de la combustión, el usuario debe dar clic al botón de arranque para iniciar la generación de vapor dentro del equipo. Para la correcta visualización del fenómeno se debe seguir el siguiente orden:
- Luego de dar clic en el botón de arranque para iniciar la generación de vapor **se debe esperar** a que la caldera alcance una presión de trabajo estable de aproximadamente de 90Psi.

- Dar clic en el botón cerrar la válvula, el cual es mostrado por la mano virtual, de esta manera se cierra la válvula de vapor y la presión se eleva hasta un valor de 100 Psi, valor en el cual se apagará la caldera; se recomienda esperar a que la presión alcance el valor máximo posible antes de seguir con el siguiente paso.
 - Dar clic en el botón de generación de vapor estable, el cual es indicado por la mano virtual; la presión cae hasta un valor estable de 80 Psi.
 - Dar clic en el botón alta demanda de vapor, la presión caerá considerablemente hasta un valor de 70 Psi aproximadamente.
 - Es posible observar los tres posibles modos de generación de vapor cuantas veces desee el usuario. Con esto se da por terminada la película general de arranque de la caldera.
- **Tablero de control de arranque:** el tablero de arranque tiene como función familiarizar al usuario con un panel de control típico de una caldera, siguiendo una orden predeterminado para el arranque correcto del equipo, dicho orden es el siguiente:
- Partiendo del menú principal dar clic en el vínculo correspondiente al submódulo de tablero de operación.
 - Prefijar inicialmente antes de encender el tablero los siguientes parámetros:
 - Seleccionar el tipo de control de la bomba, ya sea manual o automático. Si se seleccionó el control manual se recomienda mover el potenciómetro de la bomba de agua, por medio de los botones situados a la izquierda de este, hasta que el elemento alcance una velocidad óptima.
 - Ajustar los valores de máxima presión del sistema y presión de trabajo para el equipo, teniendo en cuenta que la presión de trabajo **nunca** debe ser superior a la máxima.

- Graduar la relación aire combustible moviendo el potenciómetro del ventilador un valor de velocidad superior al indicado por la velocidad mínima para el arranque. Se puede observar como al variar la velocidad del ventilador inmediatamente cambia la apertura de la servo válvula de combustible, manteniendo una relación aire combustible constante.
- Alimentar el tablero de operación dando clic en el botón ON
- De ahí en adelante el controlador ejecuta automáticamente el resto de secuencia de encendido, gracias a la acción de los temporizadores de barrido de gases e ignición.
- Dar clic en el icono de inicio para salir del módulo.

3.2.2 Detalles de funcionamiento.

Esta opción muestra cada una de las etapas de funcionamiento de la caldera, desde su puesta en marcha inicial, así como una explicación detallada de los elementos que hacen posible este proceso.

- **Llenado:** El llenado es el segundo submódulo del arranque de la caldera, para un correcto uso de este se deben seguir los siguientes pasos:
 - Dar clic en la opción llenado del módulo de arranque de la caldera
 - Al entrar al entorno de llenado, dar clic sobre el botón de arranque; de esta manera se encenderá la bomba y se llenará la caldera de agua.
 - Luego de mostrar de manera global el llenado de la caldera, la mano virtual indica la opción de ver el detalle de esta operación, se debe dar clic en el controlador de nivel Mc Donnell para ir a la siguiente película.
 - Se entra a la película de llenado frontal de la caldera, en donde se podrá observar la distribución del tubo principal y tubos secundarios

dentro del equipo, se debe dar clic en el botón de arranque para energizar la bomba.

- Dar clic en el icono siguiente para observar una vista lateral del llenado de la caldera, de esta manera se ve claramente la acción del control del nivel sobre la bomba.
 - Se debe de seleccionar el camino de alimentación del agua que llega a la caldera, ya sea a través del economizador o directamente del tanque de condensado a una temperatura ambiente. Con esto se energizará la bomba
 - El llenado de la caldera está controlado por el controlador de nivel tipo McDonnell, al terminar el llenado se da la opción de ver el detalle físico del controlador de nivel haciendo clic sobre este elemento; igualmente dando clic en el icono siguiente se llega a este detalle. Cualquiera de las dos formas es valida.
- La película de control de nivel con base en una ampolla de mercurio, muestra el principio físico de este elemento de control y es asociado al circuito eléctrico de arranque del equipo; de esta forma el usuario tiene dos opciones, subir o bajar el nivel y observar el efecto de estos dos fenómenos sobre el diagrama eléctrico.
- El usuario tiene la opción de seguir a la siguiente etapa del arranque de la caldera, dando clic en el icono siguiente o volver al menú principal del simulador con un clic en el icono inicio.

➤ **Barrido de gases:** Para ejecutar el submódulo de barrido de gases se deben seguir estos pasos:

- Dar clic sobre el botón de arranque para ver el estado en forma general.
- Para observar el detalle de esta operación se debe dar clic sobre el controlador de presión de aire (PAC) o si se quiere pasar al próximo estado se da clic en el botón siguiente.

- Una vez se entra al detalle del barrido de gases se debe dar clic al botón de arranque de la película para encender el ventilador y dar inicio al periodo de prepurga dentro de la caldera.
 - A continuación se debe dar clic sobre el botón siguiente con el fin de observar el elemento de control de la presión de aire (PAC).
 - Dar clic sobre el botón de arranque de esta película para observar el mecanismo usado por el PAC, y el efecto de este elemento sobre el circuito de arranque del equipo.
 - Para observar el detalle del temporizador de la prepurga, se debe dar clic en el icono siguiente y luego de entrar a esta película dar clic sobre el botón de arranque de esta, por medio del cual se dará la orden de arranque del temporizador. Sucesivamente se puede observar el efecto del temporizador de ignición en el diagrama de arranque del equipo.
 - Por medio del botón azul ubicado en la parte inferior del botón de arranque se puede volver a visualizar el efecto del temporizador de barrido de gases.
 - Por medio de un clic en el botón siguiente se pasa a la siguiente etapa del arranque de la caldera: la ignición.
- **Fuego piloto:** En la etapa denominada fuego piloto se obtiene la chispa que más adelante permitirá la generación de la llama producto de la combustión. Para la ejecución de este submódulo seguimos estos parámetros:
- Al estar en el entorno de la película de fuego piloto, se da clic en el botón de arranque para ver el estado en forma general.
 - Como en todas las películas anteriores se sigue la indicación de la mano virtual, la cual en este caso indica dar clic sobre los elementos del sistema piloto para ver con más detalle esta etapa.

- El simulador ahora se encuentra en la película que muestra un detalle del sistema de ignición de la caldera, se da inicio a esta película con el botón de arranque.
 - Luego de observar el detalle de la ignición, el usuario puede pasar al siguiente estado con el botón siguiente o volver al menú principal por medio del botón inicio.
- **Combustión:** El submódulo de combustión muestra el sistema principal de combustible y permite que el usuario manipule la calidad de la llama producto de la combustión, para su correcto uso se recomienda seguir las indicaciones de la mano virtual, así:
- Verificar la presión de la línea de combustible por medio del manómetro de baja presión, esto se logra dando clic sobre dicho elemento.
 - Energizar la válvula principal de combustible por medio del botón de arranque que se encuentra en la parte inferior de esta.
 - La mano virtual indica dos opciones distintas, la primera es la manipulación de la llama y la segunda es ver los detalles de los componentes del sistema de gas primario. Es aconsejable manipular en primera medida la llama y luego mirar los detalles.
 - Para la manipulación de la llama se cuenta con una regleta con dos botones, uno situado en la parte izquierda y otro en la parte derecha, ambos botones funcionan con solo ubicarse encima de ellos; de esta forma el usuario puede manipular una mayor o menor cantidad de mezcla y ver su efecto sobre la llama.
 - La película carga una llama ideal por defecto, el usuario tiene la opción de visualizar una llama con exceso de aire o una con exceso de combustible, por medio de los botones que se encuentran en la parte inferior de la regleta de manipulación de la llama.

- Una vez manipulada la llama, se recomienda observar los detalles de los elementos del circuito de combustible, para esto basta con hacer clic sobre los elementos a detallar, sin embargo se recomienda hacerlo de esta manera:
 - Siguiendo la indicación de la mano virtual, dar clic sobre el regulador de gas principal, ingresando así a la película del regulador de gas principal
 - Por medio del botón de máxima presión, el usuario puede observar el principio de funcionamiento del regulador ante una sobre presión en la línea de combustible.
 - A través de un botón azul situado debajo del de máxima presión, se puede volver a observar la película.
- Por medio del botón siguiente se entra a ver el detalle del controlador de presión de combustible, así:
 - Dar clic en el botón de arranque para observar el principio de funcionamiento del PAG, al mismo tiempo que la acción de este elemento sobre el diagrama eléctrico del equipo.
- Dando clic en el botón siguiente se ingresa a la película que muestra el principio de funcionamiento de la válvula principal de combustible, para ver el detalle de este componente se debe:
 - Dar clic en el botón de arranque que contiene la película
 - Si se desea volver a ver la película se da clic en el botón azul, de nombre OTRA VEZ.
- Luego de ver los detalles, el usuario tiene la opción de volver a el submódulo de combustión dando clic sucesivamente en el botón anterior o la otra posibilidad es volver al menú principal por medio del botón inicio.
- Al encontrarse en la película principal de combustión, dar clic sobre el botón siguiente para entrar a una película de transición que lleva a la generación de vapor en la caldera.

➤ **Generación de vapor:** Para acceder a esta opción el usuario debe dar clic al botón de arranque para iniciar la generación de vapor dentro del equipo. Para la correcta visualización del fenómeno se debe seguir el siguiente orden:

- Luego de dar clic en el botón de arranque para iniciar la generación de vapor se debe esperar a que la caldera alcance una presión de trabajo estable de aproximadamente de 90Psi.
- Dar clic en el botón cerrar la válvula, el cual es mostrado por la mano virtual, de esta manera se cierra la válvula de vapor y la presión se eleva hasta un valor de 100 Psi, valor en el cual se apagará la caldera; se recomienda esperar a que la presión alcance el valor máximo posible antes de seguir con el siguiente paso.
- Dar clic en el botón de generación de vapor estable, el cual es indicado por la mano virtual; la presión cae hasta un valor estable de 80 Psi.
- Dar clic en el botón alta demanda de vapor, la presión caerá considerablemente hasta un valor de 70 Psi aproximadamente.
- Es posible observar los tres posibles modos de generación de vapor cuantas veces desee el usuario.

3.2.3 Tipos de control de operación.

A través de este submódulo se pueden observar las características y diferencias de cada uno de los modos de control usados en la operación de una caldera pirotubular.

➤ **Control ON-OFF:** Para ingresar a la simulación de este tipo de control solo basta con un clic en el botón ENTRAR correspondiente a esta opción. Seguido a esto se debe tener en cuenta la siguiente secuencia:

- Seleccionar un valor limite de presión para la caldera

- Escoger un diferencial de presión para el re encendido del equipo
- Manipular la válvula de salida de vapor de la caldera, en primera medida cerrándola, para observar la acción del controlador de presión sobre el equipo ante una sobrepresión.
- Abrir la válvula de salida de vapor para el re arranque de la caldera respecto al valor del diferencial de presión escogido inicialmente.
- Es posible cambiar los valores de referencia de presiones y observar el efecto en el sistema cuantas veces se desee.
- Para observar el detalle del controlador de presión de la caldera el usuario tiene dos posibilidades: dar clic en el botón siguiente o sobre el controlador de presión.
- Por medio del botón alta presión se simula un aumento de presión en el equipo, tal que el controlador apaga la caldera inmediatamente.
- Es posible volver a observar el principio de funcionamiento del controlador por medio del botón OTRA VEZ.

➤ **Control continuo:** La simulación de control continuo se ejecuta haciendo clic en el botón ENTRAR de esta opción, para su correcto uso se debe:

- Esperar que la presión se estabilice en un valor de presión y salga el anuncio de ajusta de presión
- Seleccionar el valor de presión de trabajo que se desee para la caldera
- Subir o bajar la demanda de vapor gracias a la apertura de la válvula proporcional situada a la salida de la caldera y observar el efecto de esta válvula sobre los elementos de control continuo: el ventilador y la servo válvula de combustible; donde de acuerdo a la demanda de vapor se tendrá una mayor o menor velocidad en el ventilador y una mayor o menor apertura de la servo válvula de combustible.

3.2.4 Fallas comunes.

Existen diferentes condiciones para que una puesta en marcha exitosa en una caldera, si alguno de estos requisitos no llegue a darse, el arranque de la caldera será fallido. De la misma manera, en la operación existen diferentes variables que pueden llegar a causar una parada de emergencia en el equipo.

➤ **Fallas en el arranque:** Esta posibilidad ilustra diferentes fallas en el encendido de la caldera, para observar todos los detalles, la secuencia es:

- Entrar a la opción fallas en el arranque del submódulo fallas comunes
- Realizar la secuencia de encendido según lo indique la MANO VIRTUAL.
- Saldrá un aviso de falla en un elemento, el usuario tiene dos opciones, una primera por medio del botón siguiente la cual lo llevará a la siguiente falla o la segunda opción es dar clic en el letrero VER DETALLE FISICO Y SOLUCIÓN.
- En el detalle físico se dan las posibles causas de esta falla y se da la opción de reparar el daño dando clic al elemento marcado por la flecha roja
- Luego de dar solución al problema, por medio del botón siguiente se pasa a otra de las fallas y así sucesivamente.

➤ **Fallas en la operación:** Con respecto al análisis de paradas de emergencia de la guía Gemma para una caldera pirotubular, se han escogido tres fallas comunes en la operación del equipo. Para su visualización se propone seguir este orden:

- Luego de ingresar a esta opción se da inicio a la falla de los controles de nivel, donde se visualizan causas y daños causados por este tipo de problema.

- Por medio del botón siguiente se accede a la siguiente falla, correspondiente al control de llama.
- Dar clic en el botón de arranque de esta película para visualizar el problema y las posibles causas de este.
- Dar clic en el botón siguiente para entrar a la falla del control de nivel, en donde se puede observar una sobrepresión la cual es finalmente aliviada por la válvula de seguridad.

3.3 Soporte teórico

El soporte teórico está conformado por una serie de ayudas que permiten al usuario una total comprensión de los contenidos del simulador, este módulo contiene desde los diagramas secuenciales Grafcet hasta un manual de usuario para hacer el mejor uso de esta herramienta computacional.

3.3.1 Manual de usuario.

El acceso al manual de usuario se logra por medio de un clic en el botón ENTRAR correspondiente a esta opción, en este archivo de tipo Pdf se encuentran todos los pasos para la ejecución ordenada del simulador.

3.3.2. Información de subsistemas.

Este submódulo permite al estudiante afianzar sus conocimientos acerca de los principios básicos sobre la puesta en marcha y operación de calderas de tipo pirotubular. Esta información está dividida en varios archivos de tipo Pdf con el fin lograr un acceso desde cada una de las temáticas expuestas en el simulador, de la misma manera a través de este submódulo se pueden observar cada uno de los Pdf's con solo dar clic sobre el tema de interés.

3.3.3. Método Grafcet.

El método gráfico Grafcet permite comprender de manera más clara todo el proceso de encendido de la caldera, sus etapas y transiciones entre ellas; es posible ingresar al Grafcet propio de cada etapa de encendido por medio de las películas de detalles de funcionamiento, y a su vez se pueden observar todas las etapas del diagrama por medio de este submódulo correspondiente al soporte teórico.

3.3.4 Evaluaciones.

Todas las evaluaciones referentes a los temas tratados en el simulador están compiladas en este submódulo, de modo que el usuario puede elegir cualquiera de estas y desarrollarla las veces que considere necesario.