



TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero en Automática

Autor

Miguel A Fuentes Puentes

Tutores

Ing. Ksenia Arias Granda

Ing. Rubén Martínez González

Julio, 2023



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática**

TRABAJO DE DIPLOMA

Título

**Propuesta de un sistema de control automático de encendido
para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío
(Horno F-102), basado en un sistema de gestión de quemador
(BMS)**

Autor

Miguel Alfredo Fuentes Puentes

Tutores

Ing.Ksenia Arias Granda

Ing. Rubén Martínez González

Julio, 2023

Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad de Oriente como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución para los fines que estime convenientes, tanto de forma parcial como total, y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Nombre y firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Nombre y firma del autor

Nombre y firma del Tutor

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Carrera

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Departamento

Fecha

Pensamiento

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”.

Albert Einstein

Dedicatoria

Creo que dedicarles este trabajo a mis padres es algo totalmente ínfimo, pero puede ser un comienzo para poder empezar a pagar mi deuda eterna de amor y apoyo incondicional brindado desde mi existencia. Cumplieron todos y cada uno de mis sueños, ahora me toca a mí recompensar cada desvelo, cada lágrima y cada esfuerzo, lo haré con la mayor dedicación del mundo y con todo el amor que me han enseñado a dar estos años, lo merecen.

Agradecimientos

Agradecer es la mejor forma de retribuir el esfuerzo de todas aquellas personas que en los momentos más difíciles extendieron su mano, su tiempo, y que depositaron toda su confianza en mi empeño por alcanzar la meta. Mediante este Trabajo de Diploma agradezco con mucho cariño, amor y sinceridad a:

- Dios por darme la salud, la fe y la sabiduría necesaria para dar cada paso en este camino.
- Mis padres por todo el esfuerzo, la dedicación y el amor, sin los cuales no hubiera sido capaz de sobrevivir a cada tormenta impuesta por la vida.
- Mis amigos: Ángel, Sergio, Carlos, Alejandro y Rafael.
- A mis suegros Equisia Cala y Ernesto Bayard por su cariño y apoyo incondicional en este año tan importante y decisivo en mi carrera como futuro profesional, gracias por no dejarme llorar y devolverme la sonrisa.
- Mis familiares, por creer en mí desde el primer momento e instarme a seguir adelante siempre.
- Todo el claustro de profesores de la FIE, los cuales contribuyeron con mi preparación profesional y humana en especial a la profesora Ksenia Arias Granda (Tutora).
- Mi amiga, MSc. Lidia de las Mercedes Ferrer Téllez.
- Todas las personas que se cruzaron en mi vida y de una manera u otra contribuyeron a que este sueño fuese realidad.

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

API	<i>American Petroleum Institute</i>
BMS	<i>Burner Management System</i>
CCS	<i>Combustion Management Systems</i>
IEC	<i>International Electrothechnical Comission</i>
ISA	<i>Instrument Society of America</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
SIS	<i>Security Instrumented System</i>
SPDT	<i>Single Pole Double Throw</i>

Listado de imágenes

Figura 1. Torre de destilación y sus componentes	5
Figura 2. Triángulo de la combustión	8
Figura 3. Calentador de fuego directo	10
Figura 4. Esquema tecnológico de la torre de destilación al vacío	11
Figura 5. Interfaz gráfica de la torre de destilación al vacío.....	12
Figura 6. Termopar tipo J	13
Figura 7. Termopar tipo K	13
Figura 8. Manómetro empleado en la planta	14
Figura 9. Sensores PT-100	15
Figura 10. Sistemas de válvulas de la planta	16
Figura 11. Filtro regulador de aire de la planta.....	16
Figura 12. Sistemas de gestión de quemadores (BMS)	18
Figura 13. Diagrama visual de un sistema de gestión de quemador (BMS)	19
Figura 14. P&ID simple para un sistema de quemador de combustión a gas ..	21
Figura 15. Sensor de llama ultravioleta típico.....	22
Figura 16. Válvula de cierre de seguridad de gas combustible.....	23
Figura 17. Válvula de cierre de seguridad	24
Figura 18. Regulador de suministro de gas.....	24
Figura 19. Protector del piloto	25
Figura 20. Interruptor de nivel de líquido	25
Figura 21. Termostato neumático.....	26
Figura 22. Conexiones del PLC S7 1200	27
Figura 23. Algoritmo de encendido del sistema BMS	28
Figura 24. P&ID simple para un sistema de quemador de combustión a gas ..	30
Figura 25. Sensor de llama tipo 95UV.....	33
Figura 26. Válvula Solenoide 8210G76	34
Figura 27. Presostato electrónico EPS200	35
Figura 28. Transformador de encendido T11, Brahma	35
Figura 29. Quemador de Gas FP 250/M	36
Figura 30. GRAFCET	39

Resumen

La política de Cuba en los últimos años ha potenciado una mejora en la calidad y modernización de los procesos tecnológicos, automatizados de las diferentes industrias, como la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”, en Santiago de Cuba. Teniendo en cuenta ello, en esta investigación se realizó el estudio gnoseológico, histórico y actual de las torres de destilación al vacío, del sistema de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío, así como también del sistema de gestión de quemadores (BMS) para el calentamiento de petróleo en torres de destilación al vacío. Este trabajo tiene como objetivo elaborar una propuesta de sistema de gestión de quemadores (BMS) para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102), en la planta “Combinada 2” de la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”, Santiago de Cuba. Para cumplir con el objetivo planteado, se diseñó y verificó mediante simulación, un sistema BMS para el control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102). Los resultados obtenidos permitieron la obtención de una propuesta de sistema de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (F-102), basado en un sistema BMS.

Palabras clave: BMS, sistema de gestión de quemadores.

Abstract

Cuba's policy in recent years has promoted an improvement in the quality and modernization of technological, automated processes of different industries, such as the "Hermanos Díaz" Oil Refinery in Santiago de Cuba. Taking this into account, in this investigation the gnoseological, historical and current study of the vacuum distillation towers, the automatic ignition control system for heating oil to the vacuum distillation tower, as well as the system was carried out. Burner Management System (BMS) for heating oil in vacuum distillation towers. The objective of this work is to elaborate a proposal for a burner management system (BMS) for heating oil to the vacuum distillation tower (Furnace F-102), in the "Combined 2" plant of the "Hermanos Hermanos" Oil Refinery. Diaz", Santiago de Cuba. In order to meet the stated objective, a BMS system for the automatic control of ignition for heating oil in the vacuum distillation tower (Furnace F-102) was designed and verified through simulation. The results obtained allowed obtaining a proposal for an automatic ignition control system for heating oil in the vacuum distillation tower (F-102), based on a BMS system.

Keywords: BMS, burner management system.

ÍNDICE

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas	I
Listado de imágenes	II
Resumen	III
<i>Abstract</i>	IV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	5
1.1 Torres de destilación al vacío.....	5
1.1.1 Componentes de una torre de destilación	6
1.1.2 Tipos de torres de destilación	6
1.2 Quemadores	7
1.2.1 Principios de combustión	7
1.2.2 Sistemas de encendido para calentamiento de petróleo	9
1.3 Sistema de calentamiento para refinación de petróleo en la planta “Combinada 2”	10
1.3.1 Descripción de la instrumentación de la planta “Combinada 2”	13
1.4 Sistemas de gestión de quemadores (BMS)	16
1.4.1 Componentes de los sistemas de gestión de quemadores	18
1.4.2 Importancia de un BMS	18
1.4.3 Normas y códigos existentes de los BMS	19
1.4.4 Esquema del P&ID con sistema BMS	21
1.4.5 Instrumentación de un sistema de quemador (BMS)	22
Sensor de llama	22
Válvula de cierre de seguridad	22
Regulador de suministro de gas	24
Interruptor de nivel de líquido (apagado por nivel bajo)	25
PLC S7 1200	26

1.4.6 Algoritmo de encendido del sistema BMS	27
Conclusiones parciales	28
CAPÍTULO 2 DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	29
2.1 Requerimientos del sistema BMS	29
2.2 Estructura de control BMS propuesta.....	29
2.3 Instrumentación propuesta.....	31
2.3.1 Sensor de llama tipo 95UV	31
Figura 25. Sensor de llama tipo 95UV	33
2.3.2 Válvula Solenoide 8210G76	33
Figura 26. Válvula Solenoide 8210G76	34
2.3.4 Transformador de encendido T11, Brahma.....	35
2.3.6 PLC Siemens S7 1200.....	36
2.4 Diseño del algoritmo del sistema	38
2.4.1 GRAFCET	38
2.4.2 Algoritmo en GRAFCET	38
2.4.3 Verificación de la propuesta de solución	40
2.5 Valoración económica e impacto medio ambiental.....	41
2.5.1 Valoración económica.....	41
2.5.2 Impacto medio ambiental	41
Conclusiones parciales	42
CONCLUSIONES GENERALES.....	43
RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
ANEXOS.....	48

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo, han tenido gran importancia a nivel mundial debido a su versatilidad y a la posibilidad de incursionar en diversas aplicaciones industriales en el campo de la Ingeniería. El avance de la tecnología ha provocado que el análisis de los sistemas de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo, se pueda llevar a cabo de una manera distinta a la convencional [1].

Con el pasar de los años el problema común que siguen presentando las empresas industriales es la demanda y exigencia de mejorar los procesos de producción de manera constante, para tales tareas se utilizan sistemas de control automáticos de encendido para el calentamiento de petróleo como hornos de varios tipos a nivel mundial: *botton*, laterales (*side*), finales (*end*), horizontales, verticales y otros [1].

En Cuba, los sistemas de control automático de encendido para calentamiento de petróleo a torres de destilación, desempeñan una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, así como en múltiples sectores de la industria. Ello se evidencia en aplicaciones industriales como la mejora tecnológica en el horno F-203 de Refinería Cienfuegos S.A. para elevar la eficiencia energética [1].

Sin embargo, el estado tecnológico de las instalaciones de la industria petrolera cubana se ha convertido en uno de los obstáculos fundamentales para alcanzar mayores niveles de producción, tanto en cantidad como calidad, que demanda la sociedad cubana. Esta situación se hace aún más crítica en el área de refinación, donde el deterioro de las plantas existentes las convierte en instalaciones, no solo ineficientes, sino también inseguras.

Las autoridades del país y la dirección de la Unión Cuba-Petróleo han decidido revertir esta situación, con la modernización gradual de las Refinerías de Petróleo “Nico López” en La Habana y la “Hermanos Díaz” en Santiago de Cuba. Esta modernización tecnológica está vinculada a la automatización de los procesos tecnológicos que tienen lugar en las plantas de ambas refinerías [2].

En visitas reiteradas a la Refinería “Hermanos Díaz” en Santiago de Cuba, se detectó que entre sus principales problemáticas técnicas se encuentra la planta “Combinada 2”, en específico, en el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102), lo cual incide en:

- Operación de calentamiento de petróleo es realizada por operadores y herramientas manuales.
- Ineficiencia y bajo rendimiento en el sistema de calentamiento del petróleo.
- Poca seguridad industrial. El proceso se realiza de forma manual, un operador con una antorcha prende la llama, lo evidentemente es un proceso peligroso, que atenta contra la seguridad del personal.
- Retardo de tiempo no deseado en el calentamiento del petróleo para el Horno F-102.

Teniendo en cuenta lo anterior, se define como **problema científico** la inexistencia de un sistema de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102) en la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”, no permite un mayor rendimiento productivo, mayor eficiencia energética y seguridad tecnológica en la planta “Combinada 2”.

Por tanto, se delimita como **objeto de investigación** al sistema de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo la torre de destilación al vacío (Horno F-102) de la Refinería “Hermanos Díaz”. Teniendo en cuenta que los sistemas de gestión de quemadores (BMS) son sistemas de control dedicado a la seguridad de la combustión y la asistencia del operador en el arranque y la parada del equipo de fuego directo [3].

A su vez se precisa como **campo de acción** el sistema de gestión de quemadores (BMS) en torres de destilación al vacío. Y se define como **objetivo de la investigación** elaborar una propuesta de sistema de gestión de quemadores (BMS) para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102) en la planta “Combinada 2” de la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”, Santiago de Cuba.

De este modo se plantea como **idea a defender** que, si se dispone de un sistema de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a la torre destilación al vacío basado en un sistema BMS, se podría lograr un mayor rendimiento productivo, mayor eficiencia energética y seguridad tecnológica de la planta (Horno F-102) en la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”.

Para el desarrollo de este estudio se utilizaron diversos **métodos y técnicas de investigación** como el histórico-lógico, inducción deducción y análisis-síntesis para la elaboración y redacción del informe final teniendo en cuenta de partir de lo general a lo particular. También se realizó la revisión bibliográfica de materiales en inglés y español en distintas bases de datos y revistas especializadas, así como la revisión de la documentación especializada que poseen en la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”. Además, se utilizó la técnica de la simulación para recrear a través de un modelo computacional la factibilidad del sistema de gestión de quemadores (BMS) para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102) en la planta “Combinada 2” de la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”, Santiago de Cuba.

De este modo, se plantean las **tareas de investigación** siguientes:

1. Estudiar desde el punto de vista gnoseológico, histórico y actual de las torres de destilación al vacío.
2. Caracterizar el sistema de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío del (Horno F-102).
3. Caracterizar el sistema de gestión de quemadores (BMS) para el calentamiento de petróleo en torres de destilación al vacío.
4. Diseñar y verificar mediante simulación, de un sistema BMS para el control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102).

El **alcance de la investigación** está dado por la simulación de un sistema de control automático, basado en un BMS dedicado a la seguridad de la combustión para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío

del (Horno F-102) de la planta “Combinada 2” de la Refinería “Hermanos Díaz” de Santiago de Cuba.

Como resultado de la investigación se diseñó un sistema BMS para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102), que cuenta con un botón de paro, que en caso de que ocurra una acción de apagado de seguridad, permite detener el flujo de combustible al quemador.

Este trabajo está estructurado en dos capítulos. El capítulo1 expone el marco teórico dedicados al estudio gnoseológico histórico y actual de los sistemas de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a torres de destilación al vacío (Horno F-102), basado en un sistema (BMS) en la “Refinería de Petróleo Hermanos Díaz”, y a la descripción de la instrumentación de la planta local, así como su flujo tecnológico y el estudio de un sistema de gestión de quemador BMS. El capítulo 2 se basa en una propuesta de diseño de un sistema de control automático de encendido para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102), basada en un sistema BMS.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En este capítulo se exponen conceptos acerca de las torres de destilación al vacío, sus tipos, características, composición, así como las características de calentadores a fuego directo de crudo de residuo, y el calentador a fuego directo, como sistemas de encendido para el calentamiento de petróleo a torres de destilación al vacío.

1.1 Torres de destilación al vacío

Las torres de destilación al vacío son cuerpos metálicos de diferentes formas geométricas que están destinados a destilar a presiones más bajas el petróleo combustible y extraer de estas fracciones más ligeras contenidas en el petróleo combustible después de la destilación atmosférica (Figura 1). La destilación al vacío del petróleo combustible se aplica el principio de vaporización instantánea. El vacío se crea con el eyector de tres etapas. En el tope de la torre se utiliza un reflejo frío y en la parte lateral dos reflejos de intervalos [4].

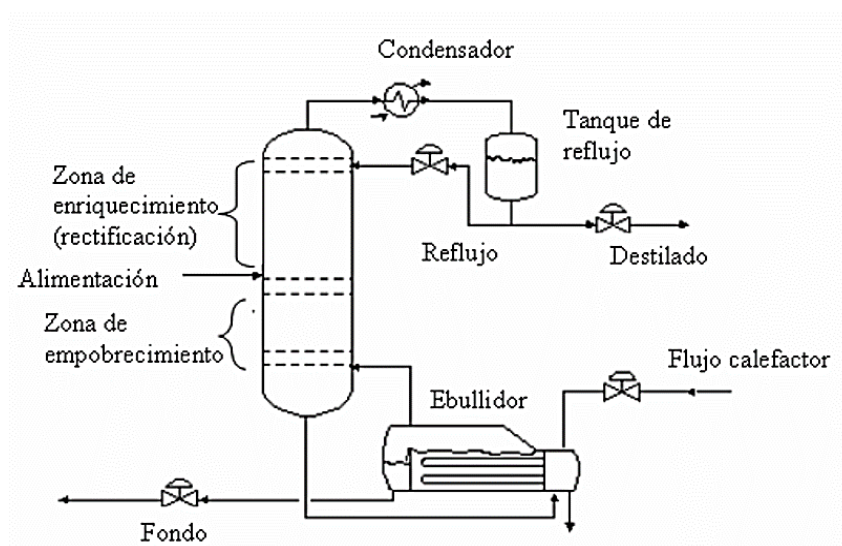


Figura 1. Torre de destilación y sus componentes.

Las torres de destilación contienen en su interior platos, copas, relleno o empaques en los cuales tiene lugar el contacto líquido vapor en equilibrio. En la zona de agotamiento o de despojamiento *stripping*, situada en la parte inferior de la columna, se inyecta vapor de agua, para disminuir la presión parcial de los hidrocarburos, favoreciendo la vaporización de los compuestos más volátiles y ayudarlos a que asciendan a la zona de la columna que tenga a

presión y temperatura adecuada para que se produzca el equilibrio líquido-vapor y se produzca la extracción del producto definido [4] (ver Anexos 1, 2 y 3).

1.1.1 Componentes de una torre de destilación

En general, las torres de destilación constan de varios componentes, cada uno es usado ya sea para transferir energía calorífica o transferir materia como:

- Almacén vertical donde tiene lugar la separación de los componentes del líquido y aloja los dispositivos internos y junto con el condensador y el rehervidor, constituyen la columna de destilación.
- Componentes internos de la columna tales como platos y/o empaquetaduras que se usan para promover la separación de componentes.
- Ebullición que provee la vaporización necesaria para el proceso de destilación.
- Condensador que se usa para enfriar y condensar el vapor saliente de la parte superior de la columna.
- Tanque de reflujo que maneja el vapor condensado que viene de la parte superior de la columna de manera que el líquido (reflujo) pueda ser recirculado a la columna.

1.1.2 Tipos de torres de destilación

Existen diversos tipos de torres de destilación, diseñadas para llevar a cabo tipos de separaciones específicas y cada diseño diferente en términos de complejidad. Una manera de clasificar las torres de destilación es hacerlo de acuerdo a la forma en que son operadas, por ejemplo: columnas *Batch* (por lotes) y continuas [5].

- **Torres *Batch*:** En la operación *Batch* la alimentación a la columna se introduce por lotes. La columna se carga con una porción de la mezcla a separar y se lleva a cabo el proceso de destilación. Cuando esta termina, se carga un nuevo lote a procesar.

- **Torres continuas:** A diferencia de las anteriores, las columnas continuas procesan una corriente de alimentación ininterrumpida. No existen interrupciones a menos que existan problemas con las columnas o las unidades de proceso contiguas. Son capaces de manejar altas producciones y son el tipo más común. Dentro de ellas se encuentran:
 - Columna binaria: la alimentación contiene solamente dos componentes.
 - Columna multicomponente: la alimentación contiene más de dos componentes.

Teniendo en cuenta lo anterior, es preciso aclarar que para el cumplimiento de su función, es necesario que las torres de destilación al vacío tengan sistema de control de encendido para el calentamiento del petróleo. El cual puede ser manual o automático. Sin embargo, a nivel internacional el sistema que se emplea principalmente es el sistema automático, pues es el que permite menos riesgos ambientales, laborales e industriales. Además, admite una mejor eficiencia en el proceso de calentamiento del crudo.

Este calentamiento se lleva a cabo a través de intercambiadores de calor, el crudo circula por el lado de los tubos y gradualmente gana en temperatura. El petróleo llega al límite de batería a una temperatura menor a 30 °C y es bombeado hasta llegar al primer intercambiador de calor. En esta primera parte del precalentamiento llega hasta una temperatura de 130 °C [6].

Por otra parte, el precalentamiento se efectúa mediante el aprovechamiento de las corrientes de productos de la torre atmosférica, los reflujos de la misma y las corrientes de residuo de vacío, y recirculación de gasóleo pesado y ligero de vacío, así como de la torre de vacío [6].

1.2 Quemadores

1.2.1 Principios de combustión

La combustión es una reacción química exotérmica de un combustible con el oxígeno que tiene como consecuencia la generación de una llama. La llama es una masa gaseosa que emite luz y calor [7].

A través del proceso de combustión se generan otros productos químicos como dióxido de carbono (CO_2), también conocido como gas de efecto invernadero para el cual se ha establecido normatividad sobre los límites permitidos de emisión hacia la atmosfera. La reacción de combustión se presenta en tres fases [7]:

- Fase de pre-reacción: El combustible se descompone generando radicales inestables y muy activos.
- Fase de oxidación: Se combinan los radicales con el oxígeno de forma exotérmica produciendo la propagación de la llama.
- Fase de terminación: Formación de compuestos estables o gases de combustión.

La combustión se produce cuando el combustible y el comburente (oxígeno) se encuentran en un espacio y tiempo determinado y con proporciones adecuadas. Adicionalmente, es necesario contar con una fuente de energía (fuente de ignición) que inicie la combustión. La relación de estos tres actores presenta el triángulo de combustión (Figura 2) o triángulo de fuego [7].



Figura 2. Triángulo de la combustión.

Para que inicie la combustión, por lo general, se requiere que el combustible esté en estado gaseoso. Para combustibles líquidos y sólidos, éstos primero deben calentarse hasta la temperatura de gasificación para producir los vapores requeridos y continuar aumentando la temperatura hasta alcanzar la ignición donde los gases inflamables combustiónan espontáneamente. En el caso del gas natural y aire, la mezcla se auto encenderá cuando alcance una temperatura de $650\text{ }^{\circ}\text{C} - 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

Teniendo en cuenta la combustión requerida y la cantidad de oxígeno incluida en la mezcla, se pueden dar los siguientes tipos de combustión [7]:

- **Completa:** Se oxida todo el combustible y en los gases producidos solo se encuentra N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 . Para esta combustión se requiere una cantidad de aire igual o superior a la estrictamente necesaria según la reacción.
- **Incompleta:** No se oxida el combustible en su totalidad, en consecuencia, aparecen elementos inquemados (compuestos parcialmente oxidados) en los gases de combustión (CO , H_2 , C , H_2S , y C_nH_m) que se consideran altamente contaminantes. Esta combustión requiere una cantidad de aire inferior a la necesaria según la reacción.

Teniendo en cuenta la reacción de combustión, se recomienda evitar las mezclas de aire–combustible ya que son susceptibles a los cambios en los parámetros de operación (variación en el suministro de aire) los cuales aumentan la emisión de monóxido de carbono (CO). En caso contrario, un aumento en el suministro de aire para evitar los inquemados, puede disminuir el rendimiento ya que se requiere incrementar la temperatura en un volumen mayor de aire [7].

1.2.2 Sistemas de encendido para calentamiento de petróleo

El sistema de calentamiento de petróleo a torres de destilación al vacío tiene diversos tipos como:

- **Calentadores a fuego directo de crudo de residuo:** Este calentador varía en su forma, ya que es de caja en ambas zonas, tanto en radiación como en convección, y solo se puede quemar gas, no combustible como es el caso de otro quemador [8]. El crudo reducido que sale de la torre atmosférica es la alimentación de este calentador a fuego directo. Entra por medio de 4 líneas que son las entradas a cada serpentín. Como medida de seguridad se tiene un serpentín que corta el suministro de gas cuando detecta un nivel bajo de flujo y una alta temperatura. La temperatura de alimentación a la torre de vacío es de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9].
- **Calentador a fuego directo:** Los calentadores de fuego directo tienen como objetivo subir la temperatura del crudo para alimentarlo a la torre

de destilación atmosférica y de vacío. Los calentadores se dividen en zonas por donde pasan los tubos a los serpentines con el producto donde se lleva a cabo el intercambio de calor, la parte baja donde se encuentran los quemadores es la zona de radiación, y la parte superior donde ascienden los gases calientes es la zona de convección. En la Figura 3 se puede observar las diferentes zonas con las que cuenta un calentador a fuego directo [9].

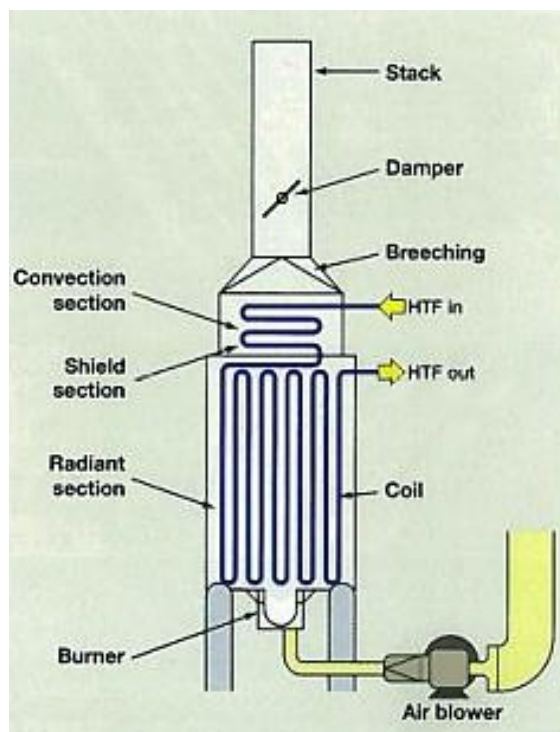


Figura 3. Calentador de fuego directo.

1.3 Sistema de calentamiento para refinación de petróleo en la planta “Combinada 2”

La Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”, está ubicada en la carretera de Mar Verde, Km7 ½ en Santiago de Cuba. La unidad Combinada 2 está destinada para procesar el crudo Romas Kino (Figura 4), el cual tiene un contenido de azufre no mayor del 2% en peso. El proceso se realiza mediante los procedimientos físicos-mecánicos de la desalación, deshidratación, destilación, rectificación e intercambio de calor.

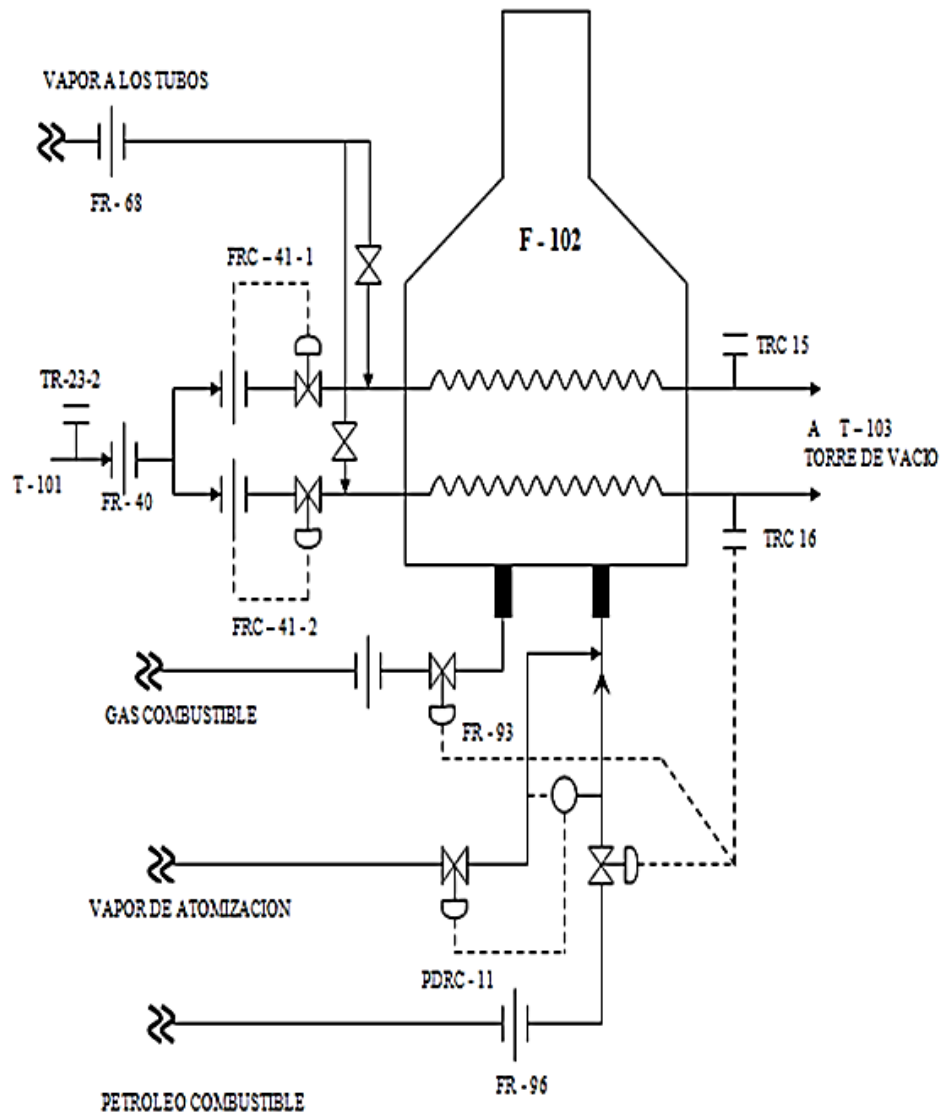


Figura 4. Esquema tecnológico de la torre de destilación al vacío.

Una vez calentado el crudo a la torre, se cumple que la temperatura de salida de una de las dos corrientes del horno F-102 (Figura 4) se controla mediante el regulador de temperatura TRC-16 que actúa sobre el suministro de combustible líquido y de gas combustible al horno. El flujo de petróleo combustible líquido al horno F-102 se registra por los instrumentos de control FR-96; la diferencia de presión de vapor de agua y combustible líquido se mantiene automáticamente con el diferencial de presión PDRC-11. Al serpentín del horno F-102 se le inyecta un flujo de vapor recalentado el cual es registrado por el instrumento FR-68.

El reflujo al tope de la torre de vacío es donde el reflujo va a la parte superior del empaque, es enfriado por el enfriador por aire y controlado por el regulador

de flujo, el cual trabaja en cascada con el control de temperatura del tope de la torre, cuya válvula está situada a la salida. También la temperatura se registra por el instrumento de temperatura.

El nivel de diesel de vacío en el plato de extracción ubicada por debajo del empaque se controla por el instrumento de nivel cuya válvula está ubicada en la línea de descarga de las bombas eléctricas en la derivación que conduce el crudo de vacío a tanque. En la Figura 5 se muestra el funcionamiento de dicho proceso en tiempo real.

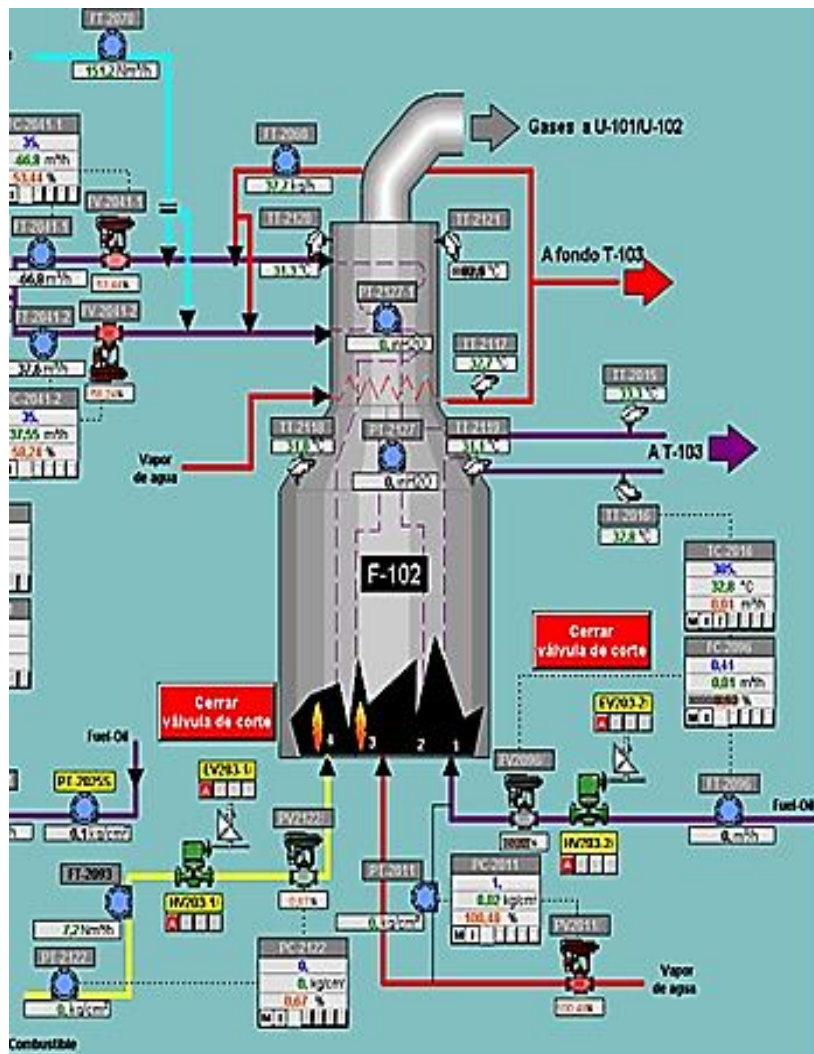


Figura 5. Interfaz gráfica de la torre de destilación al vacío.

Resulta necesario destacar, que el sistema de calentamiento para refinación de petróleo en la planta es totalmente manual. Pues el operario precalienta el horno mediante una antorcha, lo cual pone en riesgo su vida, la de sus compañeros y la propia seguridad de la instalación. Esto evidencia la poca

seguridad y salud laboral de los operadores y empleados; así como la poca seguridad industrial de la planta, ineficiencia y bajo rendimiento en el proceso de refinación y retardo de tiempo no deseado.

1.3.1 Descripción de la instrumentación de la planta “Combinada 2”

Para el funcionamiento de la torre de destilación al vacío (Horno F-102) cuenta con una serie de instrumentos como termopares tipo J y K, manómetros, el sensor de temperatura PT-100, válvulas y el filtro regulador de aire.

El termopar tipo J está formado por dos aleaciones de metales (hierro y constantan) para la medición en la planta de temperaturas de rango entre 0 °C y 300 °C (Figura 6).



Figura 6. Termopar tipo J.

El termopar tipo K (Figura 7) solo puede usarse puntualmente por encima de 1 200 °C por las fuertes des calibraciones. No debe de instalarse sin protección adecuada a altas temperaturas en presencia de atmósferas sulfurosas, reductoras o alternativamente reductoras-oxidantes. Si se expone durante largos periodos de tiempo a temperaturas por encima de 815 °C en ambientes con reducido oxígeno o en vacío se produce el efecto “*greenrot*” que altera la composición del hilo con cromo originando errores de lectura de hasta 100 °C.



Figura 7. Termopar tipo K.

Con el fin de medir la presión en las etapas del proceso los manómetros (Figura 8) constan con un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón.



Figura 8. Manómetro empleado en la planta.

El sensor de temperatura PT-100 posee características favorables debidas a su alta precisión, estabilidad y fiabilidad en la medición al ser construido de platino (Figura 9). Estos instrumentos reciben ese nombre debido a que el material que forma el conductor de la resistencia es de platino y a 0 °C posee una resistencia de 100 ohm. El campo de medición del PT-100 es de 200 °C a 650 °C. Cuenta con una salida de 0 mV a 50 mV mediante dos vías. Este sensor tiene acoplado un transmisor, el TxBlock de la marca Smart, el cual da una salida estandarizada de 4 mA - 20 mA la cual va al PLC para llevar a cabo el control de temperatura. En la Figura 9 se muestran sensores PT-100 utilizados en la planta.



Figura 9. Sensores PT-100.

El sensor PT-100, mide la temperatura del petróleo combustible a la entrada y la salida del Horno F-102, lo cual se demuestra en la Tabla 1 [10]. Así como la temperatura de los gases de combustión a la salida de la zona de radiación, el flujo de vapor de agua al serpentín del horno y por último el flujo de inyector del petróleo combustible.

Tabla 1. Temperatura entrada/salida del petróleo (Horno F-102).

HORNO TUBULAR CILINDRICO (F-102).				
Temperatura del flujo del petróleo combustible a la entrada del F-102	TR-101-23-3	m ³ /h	320-335	Indica en la pizarra
Temperatura del petróleo combustible a la salida del Horno F-102. (I) Flujo.	TRCAH-101- 16 TR-101-23-5	°C	390-410	Registra y regula en la pizarra
Temperatura del petróleo combustible a la salida del Horno F-102. (II) Flujo.	TRCAH-101- 15 TR-101-23-4	°C	390 -410	Registra y regula en la pizarra
Temperatura de los gases de combustión a la salida de la zona de radiación.	TR-101-24--6	°C	800 Máx	Registra e Indica en la pizarra
Flujo de Vapor de Agua al Serpentín del Horno F-102	FR-101-68	m ³ /h	150 -250	Registra en la pizarra
Flujo de Inyector del petróleo combustible al F-102 I Flujo	FRC-101-42-I	m ³ /h	20 - 50	Registra y regula en la pizarra
Flujo de Inyector del petróleo combustible al F-102 II Flujo.	FRC-101-42-II	m ³ /h	20 - 50	Registra y regula en la pizarra
Flujo de Inyector del petróleo combustible Total F-102.	FR-101-40	m ³ /h	40 -100	Registra en la pizarra

Las válvulas son dispositivos mecánicos empleados en la Combinada 2 con el fin de controlar los fluidos (petróleo) en el sistema de tuberías (Figura 10).



Figura 10. Sistemas de válvulas de la planta.

El filtro regulador de aire (Figura 11) tiene como característica principal que el aire comprimido generado por el compresor atraviesa el filtro aire industrial y las partículas sólidas son retenidas por las diferentes capas que lo forman, mientras que las gotas de combustible que recibe el filtro son eliminadas mediante los dispositivos ubicados en su parte inferior.



Figura 11. Filtro regulador de aire de la planta.

1.4 Sistemas de gestión de quemadores (BMS)

El sistema de gestión de quemadores (BMS) es un control de peligro diseñado que utilizan los operadores de petróleo y gas para garantizar la seguridad de encendido, operación y apagado durante el proceso de combustión. También ayuda a ahorrar costos de combustible, minimizar mantenimiento, mejora el tiempo de actividad y crea un entorno seguro para el personal que trabaja con

el calentador. Un sistema de gestión de quemadores también es una medida de seguridad para evitar que los calentadores de proceso puedan explotar en caso de una condición alterada [11].

El objetivo principal del BMS es garantizar el arranque y la detección de la llama principal, controlar un proceso y asegurar las secuencias de apagado adecuadas. Otras funciones incluyen lo siguiente [7]:

- Evitar que el equipo arranque y se encienda hasta que se haya purgado la cámara de combustión.
- Detener la puesta en marcha del equipo cuando las condiciones no sean seguras.
- Controlar la secuencia de componentes durante el arranque y apagado del sistema.
- Proteger contra la admisión de cantidades inadecuadas de combustible al calentador.
- Proporcionar el estado y la retroalimentación sobre la condición de los componentes al operador.

Los beneficios de su uso son múltiples, entre ellos, se pueden encontrar [7]:

- Los sistemas BMS pueden ayudar a mejorar el rendimiento general de la planta.
- El uso del BMS puede ayudar a aumentar la seguridad de los trabajadores y reducir las posibilidades de accidentes.
- Respetuoso del medio ambiente.
- Ayuda a minimizar los gastos al reducir el tiempo de intervención y parada y encendido, además de esto, requiere menos mantenimiento y menos requisitos de capacitación para operar.
- Capacidad de generación de informes mejorada.
- Ayuda a simplificar el funcionamiento de la unidad proporcionando notificaciones de alarma.

1.4.1 Componentes de los sistemas de gestión de quemadores

Los componentes de los sistemas de gestión de quemadores (BMS) son [7]:

- Quemador: Es donde se mezcla combustible, aceite o gas con aire y se quema para producir calor.
- Controlador: Microprocesador utilizado para secuenciar o controlar las válvulas de combustible y los dispositivos de encendido del sistema del quemador.
- Detector de llama: Es un dispositivo que ayuda a detectar la ausencia o presencia de una llama y ofrece una señal adecuada para detectarla.
- Encendedor: Es un dispositivo que se instala permanentemente para proporcionar energía de ignición para encender el quemador principal.
- Válvulas: Usadas para controlar o cerrar el flujo de gas o aceite en el sistema de combustible.

En la Figura 12 se muestra un sistema de gestión de quemadores (BMS).



Figura 12. Sistemas de gestión de quemadores (BMS).

1.4.2 Importancia de un BMS

Cuando no se dispone de un sistema de gestión de quemadores, aumentan las posibilidades de incendios y accidentes, además de la ausencia de un control de temperatura adecuado. Sin embargo, esto hará que el gas del quemador principal ocasione una situación muy crítica que puede causar daños, resultando peligrosa y costosa [7].

En la Figura 13 se muestra un diagrama visual de un sistema de gestión de quemador (BMS).

Por otro lado, la seguridad en cualquier proceso es un tema fundamental a nivel internacional, por lo tanto, diferentes entidades han establecido estándares y procedimientos para el cumplimiento de las normas y códigos establecidos según sea el caso. Organizaciones como *National Fire Protection Association* (NFPA), *Instrument Society of America* (ISA), *International Electrothechnical Comission* (IEC) y *American Petroleum Institute* (API) han realizado distintas publicaciones donde se explica detalladamente los requisitos de los sistemas de protección, los cuales describen las posibles acciones que el BMS debe ejecutar cuando se detecta una alarma [7].

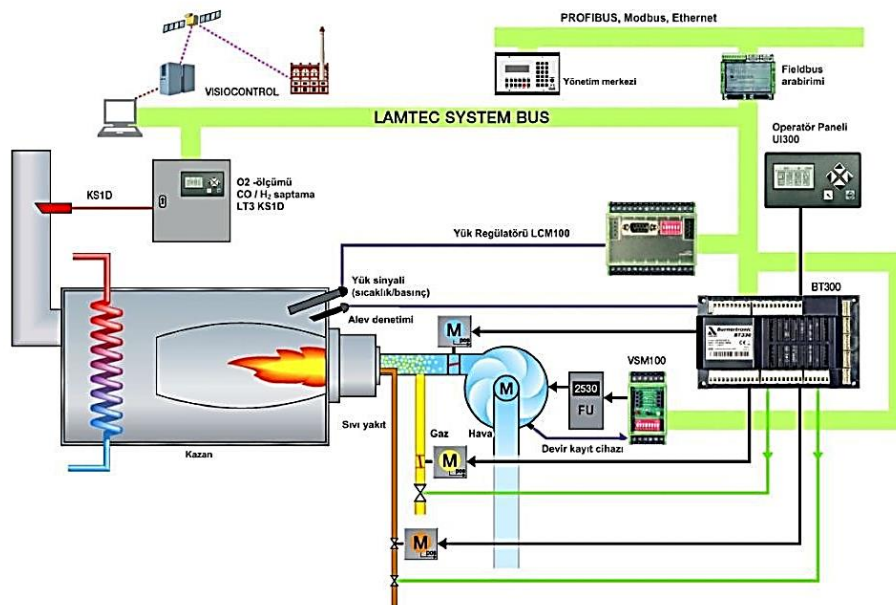


Figura 13. Diagrama visual de un sistema de gestión de quemador (BMS).

1.4.3 Normas y códigos existentes de los BMS

La seguridad en cualquier proceso es un tema fundamental a nivel internacional, por lo tanto, diferentes entidades han establecido estándares y procedimientos para el cumplimiento de las normas y códigos establecidos según sea el caso. Organizaciones como NFPA, ISA, IEC y API han realizado distintas publicaciones donde se explica detalladamente los requisitos de los sistemas de protección. Allí también se describen las posibles acciones que el BMS debe ejecutar cuando se detecta una alarma [12].

- NFPA 86 (2019) – *Standard for ovens and furnaces*: La norma aplica para lugares calentados independientemente de la fuente de calor y establece los procedimientos para la inyección y extracción de gases inflamables de un horno de tratamiento térmico. Los sistemas de control de caudal y mezclado deben cumplir con esta norma en cuanto a bloqueos, requisitos de purga entre otros.
- IEC 62508 – *International Electrotechnical Commission*: Proporciona la normatividad que debe aplicarse en el diseño de *hardware* y *software* para sistemas de seguridad sin importar el tipo de industria que vaya a implementar el sistema [13].
- ISA – *International Society of Automation*: El documento es similar a IEC 61511 y aplica a los Sistemas Instrumentados de Seguridad (*Security Instrumented System*, SIS) y en general determina las actividades del ciclo de vida de seguridad funcional que indicaran los requerimientos mínimos de operación [14].
- Norma cubana NC TS 1268 de 2018: Calidad del aire. Emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas del sector siderúrgico.

Requerimientos del sistema BMS

Cuando se pretenda realizar el arranque del sistema, se deberán cumplir los siguientes requerimientos [11]:

- Que todas las válvulas de combustibles estén cerradas.
- La posición de las válvulas de corte y venteo en quemadores y válvula de corte de gas a pilotos sean correctos.
- Que el tiempo de purga sea el adecuado.
- Que el flujo de purga sea el adecuado.
- El estado de lectura de los detectores de llamas en quemadores.
- Temperatura de gases de combustión.
- Flujo de gas al horno.
- Presión de gas combustible en cabezal en quemadores y pilotos.
- Perfil de temperatura.
- Botón de paro de emergencia.

Tradicionalmente al desarrollar el control de una caldera, las acciones de modulación de la misma se desarrollaban con equipos analógicos (continuos), las secuencias de arranque y parada, así como los enclavamientos, son acciones digitales (todo/nada) que implicaban equipos digitales [15].

En la actualidad, debido a los avances en los sistemas basados en microprocesador es posible integrar estos dos sistemas en uno solo, aunque se siguen manteniendo algunos condicionantes en lo que se refiere a los equipos dedicados a la seguridad de la caldera. Es por esto que la norma recomienda tener dos sistemas, uno dedicado a la protección, arranque y parada de la caldera u horno llamado BMS y otro dedicado a los sistemas de control llamado CCS (*Central Control System*) [16].

1.4.4 Esquema del P&ID con sistema BMS

En el siguiente esquema (Figura 14), se muestra un P&ID (*Piping & Instrumentation Diagram*) simple para un sistema de quemador de combustión a gas. La tubería y las válvulas que se muestran son típicas para un solo quemador. Los sistemas de quemadores múltiples a menudo están equipados con colectores de válvulas de cierre individuales e interruptores de límite de presión de combustible individuales. Cada quemador, si existen varios en el mismo horno, debe estar equipado con su propio sensor de llama [17]:

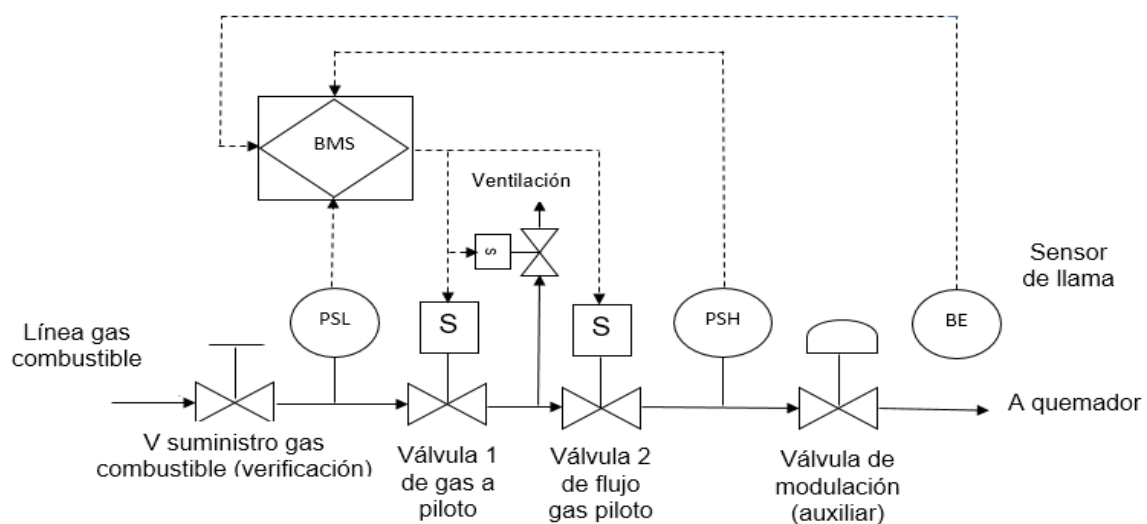


Figura 14. P&ID simple para un sistema de quemador de combustión a gas.

1.4.5 Instrumentación de un sistema de quemador (BMS)

El BMS instrumentado de seguridad está conformado por sensor de llama, válvula de cierre de seguridad, regulador de suministro de gas y el interruptor de nivel de líquido (apagado por nivel bajo) [7], [17].

Sensor de llama

Un sensor de llama ultravioleta típico (Figura 15), este sensor de llama es sensible a la luz ultravioleta solamente, no a la luz visible o infrarroja y trabaja con un voltaje de 120 VCA hasta 440 VCA y posee un tiempo de respuesta de 3 a 5 segundos, un rango de 4.4 a 4.5 micras aproximadamente, puede funcionar con una longitud de onda inferior a 300 nm. El motivo de esta sensibilidad específica es garantizar que el sensor no sea "engañado" por el brillo visible o infrarrojo de las superficies calientes dentro de la cámara de combustión si alguna vez la llama se apaga inesperadamente. Dado que la luz ultravioleta es emitida solo por una llama activa alimentada con gas, el sensor actúa como un verdadero detector de llama y no como un detector de calor [7].



Figura 15. Sensor de llama ultravioleta típico.

Válvula de cierre de seguridad

Aquí se muestra uno de los modelos más populares de válvula de cierre de seguridad de gas combustible que se utiliza en los Estados Unidos para los sistemas de gestión de quemadores, fabricado por Maxon (Figura 16), este modelo particular de válvula de cierre tiene una ventana de visualización donde una etiqueta de metal vinculada al mecanismo de la válvula marcada como "Abierta" (en rojo) o "Cerrada" (en negro) indica positivamente el estado

mecánico de la válvula. Tiene entre 8" y 3/4" de tamaño, un rango de temperatura de gas de -50 °C a 100 °C. Como la mayoría de las válvulas de cierre de seguridad en los sistemas de quemadores, esta válvula se acciona eléctricamente y se cerrará automáticamente por la tensión del resorte en caso de pérdida de energía [7].



Figura 16. Válvula de cierre de seguridad de gas combustible.

Se muestra en la Figura 17 otra válvula de cierre de seguridad, está fabricada por ITT. Una inspección minuciosa de la placa de identificación de esta válvula de seguridad de ITT revela varios detalles importantes. Al igual que la válvula de seguridad Maxon, se acciona eléctricamente, con una corriente de "retención" indicada como 0,14 A, a 120 VCA. Dentro de la válvula hay un interruptor "auxiliar" diseñado para actuar cuando la válvula ha alcanzado mecánicamente la posición "abierta" completa.

Un interruptor adicional, etiquetado como interbloqueo de sobre carrera del sello de la válvula, indica cuándo la válvula ha alcanzado de forma segura la posición de "cierre" completo. Este interruptor de "sello de válvula" genera una señal de prueba de cierre utilizada en los sistemas de gestión de quemadores para verificar una condición de apagado seguro de la línea de combustible [7].



Figura 17. Válvula de cierre de seguridad.

Ambos interruptores están clasificados para transportar 15 A, a 120 VAC, lo cual es importante cuando se diseñan los detalles eléctricos del sistema para garantizar que el interruptor no tenga demasiada corriente.

Regulador de suministro de gas

Usando un calentador de línea estándar como ejemplo, se comienza observando el regulador de suministro de gas. Esto regula el suministro de gas a todos los controles neumáticos en el BMS. Inicialmente conduce a la protección del piloto, que luego alimenta el interruptor de nivel, seguido por el apagado por alta temperatura y el termostato. En la Figura 18 se muestra el regulador de suministro de gas [18].



Figura 18. Regulador de suministro de gas.

El protector del piloto mostrado en la Figura 19, está directamente en la llama del piloto, monitoreando el quemador piloto independiente. Si la llama se apaga por algún motivo, cierra el suministro de gas al resto del sistema, esto evita que el gas natural entre en el quemador sin una llama piloto y se emita a la atmósfera. Se asegura de que la luz piloto esté encendida y que el gas se esté consumiendo [18].



Figura 19. Protector del piloto.

Interruptor de nivel de líquido (apagado por nivel bajo)

Como medida de seguridad, cuando hay un BMS, también hay un interruptor de nivel de líquido (Figura 20), que se usa como apagado por bajo nivel. Cuando el medio de transferencia de calor cae por debajo de cierto nivel, podría exponer el tubo de fuego, creando a su vez puntos calientes y comprometiendo el tubo de fuego. Si se dispara el interruptor de nivel, corta todo el suministro de gas al BMS, eliminando todo el fuego hasta que el nivel del líquido supera ese punto.

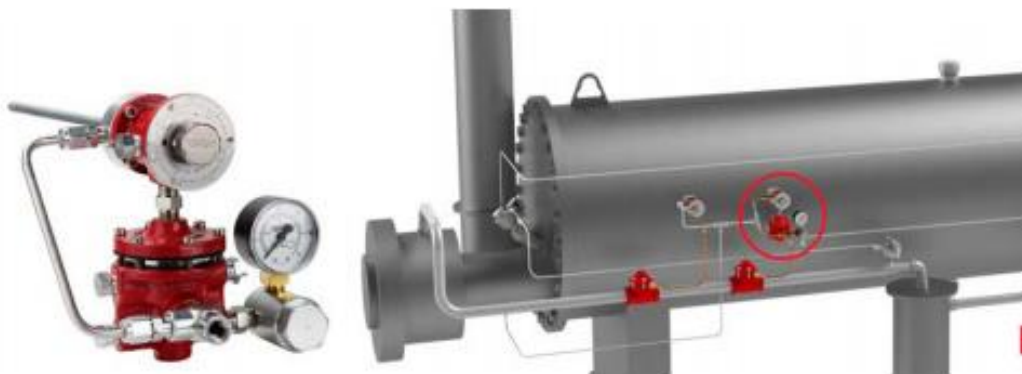


Figura 20. Interruptor de nivel de líquido.

El termostato neumático (Figura 21), se instala donde se sumergirá en el líquido a calentar, el mismo controla la temperatura del líquido (y se expande y contrae con el cambio de temperatura de ese fluido). Esto posiciona el tapón piloto para ventilar o emitir una señal neumática para controlar la cantidad de combustible que recibe el quemador a través de una válvula neumática de control de baja presión [18].



Figura 21. Termostato neumático.

PLC S7 1200

Es utilizado para secuenciar o controlar las válvulas de combustible y los dispositivos de encendido del sistema del quemador. El PLC S7 1200 es un Controlador Lógico Programable (PLC en inglés) compacto que dispone de los siguientes componentes [19]:

- Fuente de alimentación 24 VCC (400 mA).
- Conexiones para señales de entradas y salidas.
- Puerto Profinet integrado para comunicación.
- Posibilidad de incorporar una tarjeta de memoria.

Sus aplicaciones son diversas pues posibilita aplicar hasta con ocho módulos, situados a la derecha del autómatas las conexiones de entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Además, permite aplicar hasta con tres módulos situados a la izquierda los protocolos de comunicación. Estos módulos amplían la capacidad de intercambio de datos con otros equipos.

En el plano de conexiones (Figura 22), se puede ver:

- El PLC se alimenta con fase neutro 230 voltios además de la toma de tierra.
- Su fuente de alimentación interna saca 24 voltios de corriente continua.
- Los contactos de las entradas reciben 24 voltios por un extremo y se conectan a las entradas del PLC por el otro extremo (lógica PNP).
- Todas las masas o negativos del PLC deben unirse con la principal que saca la fuente de alimentación.

- Las salidas reproducen la tensión que se conecta en los bornes 1L, 2L y entre 1 y 2M conectarse las dos entradas analógicas y entre B1 Y0M se conecta la salida analógica.

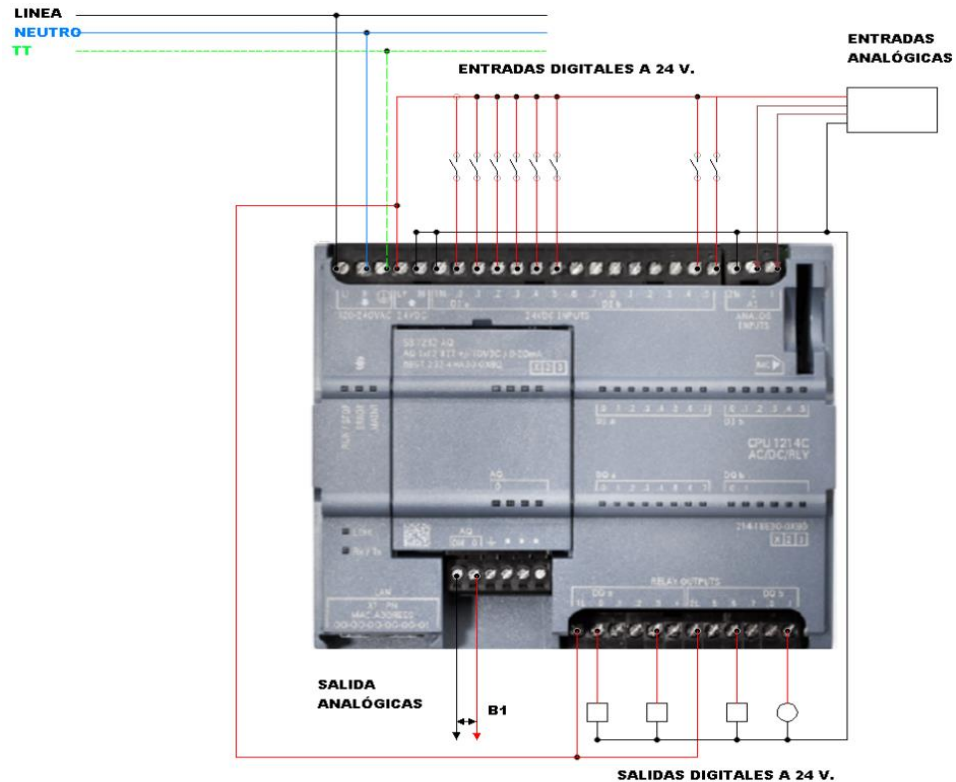


Figura 22. Conexiones del PLC S7 1200.

1.4.6 Algoritmo de encendido del sistema BMS

Cuando se quiera ejecutar el encendido del sistema, se deberán efectuar todas y cada una de las siguientes condiciones (Figura 23).

En el algoritmo que se muestra más adelante, se procede a una etapa de inicio de purga, verificando correctamente el cierre de las válvulas antes de comenzar el proceso, luego se inicia la apertura de la válvula de aire, se confirma el flujo del mismo, de no cumplirse esta acción, se verifica el estado de la válvula retornando a abrirla nuevamente en caso de que esté cerrada, de cumplirse se procederá a abrir la válvula 1 de gas a piloto y la válvula 2 de flujo gas a piloto; se confirma la presión de ambas, de no ser la correcta se verifica el estado de la válvulas de gas a piloto y de flujo gas piloto (válvula 1 y 2), de confirmar la presión y el estado correcto de ambas válvulas, sigue un proceso de ignición, el sensor de flama confirmará la ausencia o presencia de la llama, de no confirmar esta acción en un tiempo determinado, el BMS mandará a

cerrar la válvula piloto, ejecutando todo el proceso desde el inicio, pero de si confirmar se abrirá la válvula de gas auxiliar de entrada al quemador.

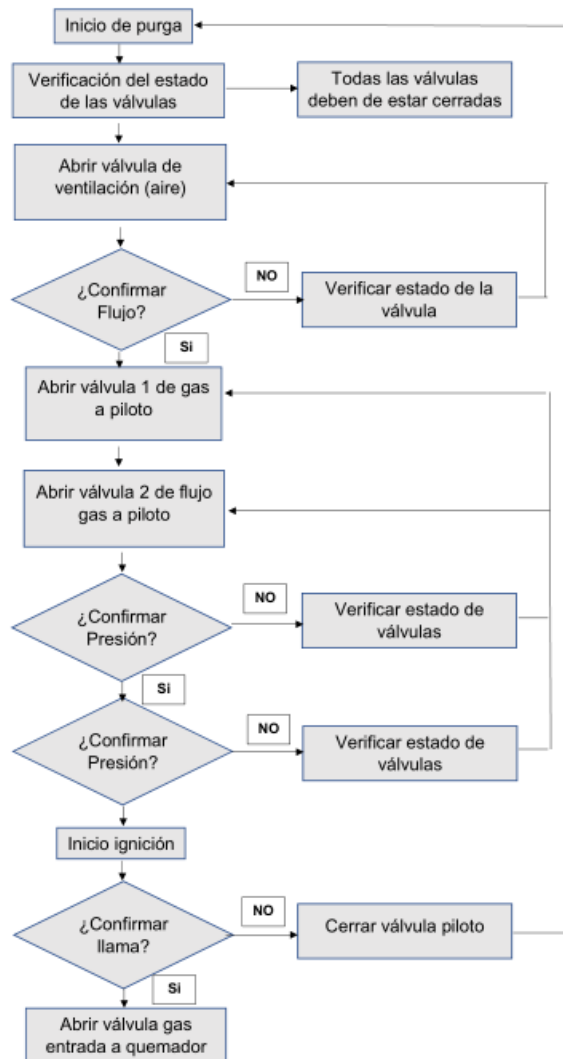


Figura 23. Algoritmo de encendido del sistema BMS.

Conclusiones parciales

1. Se abordaron conceptos acerca de las torres de destilación al vacío, sus tipos, características, composición, así como las características de calentadores a fuego directo de crudo de residuo, y el calentador a fuego directo, como sistemas de encendido para el calentamiento de petróleo a torres de destilación al vacío.
2. Este estudio permitió caracterizar el sistema de gestión de quemadores (BMS), sus características, tipos, funciones y beneficios de su uso, así como una esquematización de un P&ID simple para un sistema de

quemador de combustión a gas, y por último la instrumentación de un sistema de quemador (BMS), basado en el instrumentado de seguridad.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Este capítulo presenta la propuesta y simulación de un sistema de control automático, basado en un BMS dedicado a la seguridad de la combustión, para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío del (Horno F-102) de la planta “Combinada 2” de la Refinería “Hermanos Díaz” de Santiago de Cuba.

2.1 Requerimientos del sistema BMS

Teniendo en cuenta las características de la Planta “Combinada 2” de la Refinería “Hermanos Díaz”, en esta primera etapa del trabajo se tuvieron en cuenta los siguientes requerimientos:

- Primeramente, está el de purga, antes de arrancar el sistema es necesario hacer una purga con aire fresco que desplace el volumen que está en la cámara de combustión. El objetivo principal es desplazar cualquier mezcla de aire y combustible que pueda quedar en el interior, cabe destacar que este proceso de purga debe cumplir las siguientes condiciones:
 - Que el tiempo de purga sea el adecuado.
 - Que el flujo de purga sea el adecuado.
- El tiempo de purga y el flujo de purga tienen que ser el adecuado, para desplazar correctamente cualquier mezcla de aire y combustible que pueda quedar en el interior en la cámara de combustión, para poder proceder luego a la etapa de encendido.
- Que todas las válvulas de combustible estén cerradas.
- El estado de lectura del detector de llama en el quemador, que definirá la presencia o ausencia de llama en el quemador.

2.2 Estructura de control BMS propuesta

Teniendo en cuenta las características de la Planta “Combinada 2” de la Refinería “Hermanos Díaz”, se propone la siguiente estructura de control con P&ID simple para un sistema de quemador de combustión a gas.

Las tuberías y las válvulas que se muestran (Figura 24) son típicas para un solo quemador, los sistemas de quemadores múltiples a menudo están equipados con colectores de válvulas de cierre individuales e interruptores de límite de presión de combustible individuales.

Cada quemador, si existen varios en el mismo horno, debe estar equipado con su propio sensor de llama: tenga en cuenta el uso de válvulas de cierre de doble bloqueo y purga para aislar positivamente el suministro de gas combustible del quemador en caso de un apagado de emergencia.

Las dos válvulas de bloqueo están especialmente diseñadas para este propósito, mientras que la válvula de purga a menudo no es más que una válvula solenoide eléctrica.

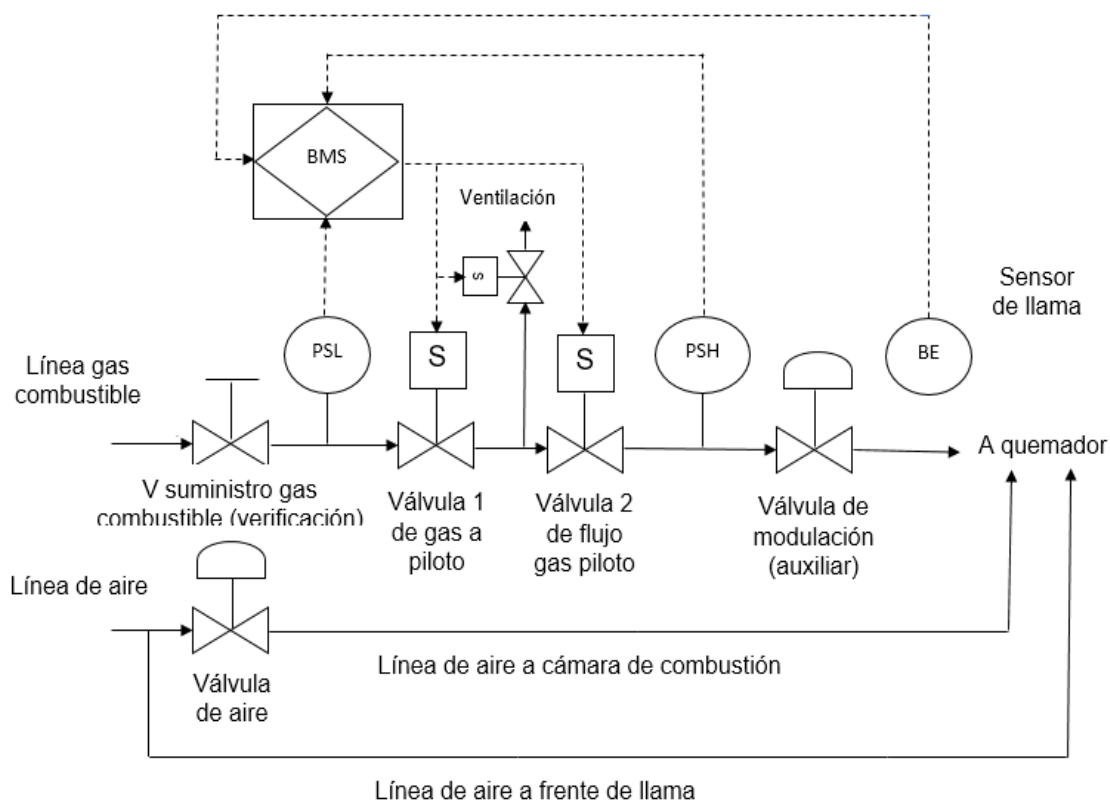


Figura 24. P&ID simple para un sistema de quemador de combustión a gas.

La mayoría de los sistemas de gestión de quemadores cumplen una doble función: gestionar el apagado seguro de un quemador en caso de una situación peligrosa y el arranque seguro de un quemador en condiciones normales.

La puesta en marcha de un gran sistema de quemadores industriales generalmente incluye un largo tiempo de purga antes de la ignición donde la compuerta de aire de combustión se deja totalmente abierta y el soplador funcionando durante varios minutos para purgar positivamente la cámara de combustión de cualquier vapor de combustible residual.

Después del tiempo de purga, el sistema de gestión de quemador encenderá el quemador (o, a veces, encenderá un quemador más pequeño llamado piloto, que a su vez encenderá el quemador principal).

Un sistema de gestión de quemadores ejecuta todas las funciones de pre-encendido y temporización para garantizar que los quemadores se enciendan de forma segura y sin incidentes.

2.3 Instrumentación propuesta

Teniendo en cuenta las características de la Planta “Combinada 2” de la Refinería “Hermanos Díaz”, se proponen los siguientes instrumentos:

2.3.1 Sensor de llama tipo 95UV

Tipo 95UV contiene un sensor de llama ultravioleta, respondiendo a la radiación ultravioleta desde 295 a 320 nanómetros de longitud de onda. Este sensor está articular mente adaptado para las aplicaciones de gas (Figura 25).

Características [20]:

- Material de la caja del detector: Fundición de aluminio recubierta con polvo de poliéster cocido al horno. Peso de la caja: 4.3 libras (1'96 Kg).
- Montaje: Requiere de una de las 2 roscas de montaje.
- Conjunto Brida de montaje: P/N 60-2602 Tubo de montaje 1" NPT hembra, con conexión del aire de enfriamiento 3/8" NPT hembra, incluye una conexión aislante de 1" NPTx 3" de longitud macho-macho (P/N 35-127-1). P/N 60-2693 Tubo de montaje 1" BSP hembra, con conexión del aire de enfriamiento 3/8" BSP hembra, incluye una conexión aislante de 1" BSPx 3" de longitud macho-macho (P/N 35-127-3).
- Peso de la Brida de montaje: 0,62 libras (0,28 Kg).
- Rango de temperatura: -40 °F a +150 °F (-40 °C a +65 °C).
- Humedad: 0% a 95% de humedad relativa, no condensada.
- Entrada de alimentación: 24 VCC, +10%, -15% corriente: 0,35 A, 8,5 VA.

- Conexión eléctrica: Conector rápido de 12 pins, un cuarto de vuelta.
- Salida del relé: Relé de llama SPST un simple inversor normalmente abierto.
- Relé de fallos SPST un simple inversor normalmente cerrado.
- Carga de los contactos: Mínima: 10 mA @ 5 VCC.
- Máxima: 2 A @ 30 VCC.
- Salida analógica: 4-20 mA CC., referenciada a 24 VCC., común, carga máxima conectada: 750 ohms.
- Indicación de estado: Display alfanumérico de LEDS con 8 caracteres permitiendo la capacidad de escrutar los parámetros.
- Interface del operador: 4 Teclas del tipo pulsador.
- Especificación del cable: P/N 59-497:
 - Multinúcleo, 12 conductores (colores codificados) con envolvente metálica y pantalla trenzada.
 - 6 conductores 18 AWG y 4 conductores 22 AWG, más un par trenzado 22 AWG.
- Cubierta del cable: Polyolefina irradiada y modificada (retardadora del fuego-baja emisión de humo y no produce gas halogenado).
- Máxima temperatura: 257 °F (125 °C).
- Diámetro exterior nominal: 0,41" (10.4 mm).
- Diámetro exterior nominal: 0,43" (10.9 mm).
- Longitud máxima del cable: 1000 pies (305 mts).



Figura 25. Sensor de llama tipo 95UV.

2.3.2 Válvula Solenoide 8210G76

Vías normalmente cerradas, operación de control comercial e industria de quemadores de gas, ideal para aplicaciones de alta presión, cuerpo de construcción de latón, montaje en cualquier posición $\frac{3}{4}$ NPT, NC, FM, UL, CSA, 120 V CA (Figura 26).

Características [21]:

- Alta gama de clasificaciones de presión, tamaños y resistencia. Los materiales proporcionan una larga vida útil y baja.
- Válvulas de alto flujo para líquidos, corrosivos y aire/inerte servicio de gas.
- Rango de temperatura ambiente 32 a 125 °F.
- Diseño del cuerpo 2 vías, cuerpo material latón.
- Conexión eléctrica conducto de $\frac{1}{2}$ con conductores de 18"
- Temperatura máxima del fluido 125 °F. Max ODP Fuel gas 50 psi OPD mínimo 0 PSI.
- Voltaje 120/60/110/50AC de 2 vías, normalmente cerrada, gas combustible.



Figura 26. Válvula Solenoide 8210G76.

2.3.3 Presostato electrónico EPS200

La serie EPS200 es un presostato electrónico fabricado por BCM *sensor technology* (Figura 27). Tiene una pantalla que se utiliza en sistemas de presión y monitoreo. Esto produce un transductor de presión de alta precisión. Su transductor de salida se convierte en señal digital a través de un convertidor de 16 bits A/D y se procesa a través de un microprocesador. También se puede aplicar para monitorizar la presión de proceso en sistemas de automatización industrial y para generar una señal de conmutación para activar o desactivar el sistema en puntos de ajuste.

Características [22]:

- Rango de presión mínima: 0 bar (0 psi).
- Rango de presión máxima: 600 bar (8.702,26 psi).
- Pantalla LED de cuatro dígitos con una altura de dígitos de 20mm. También se basa en la CPU y la frecuencia de muestreo es de 4.



Figura 27. Presostato electrónico EPS200.

2.3.4 Transformador de encendido T11, Brahma

Indicados para el encendido de equipos comerciales e industriales a gas natural/GLP o diésel como calderas, quemadores y otros (Figura 28).

Características [23]:

- Uso: calderas, quemadores, etc.
- Voltaje primario: 220 VCA/50 Hz.
- Voltaje secundario: 1x9000.
- Consumo: 240 VA.
- Corriente de salida: 20 mA.
- Ciclo de trabajo: 33% en 3 minutos.
- Rango de temperatura de operación: -10/+60 °C.
- Peso 2 Kg.



Figura 28. Transformador de encendido T11, Brahma.

2.3.5 Quemador de Gas FP 250/M

Quemador de gas progresivo (alta-baja llama) y modulantes (PID) con cuerpo de aluminio, ventilador de alta presurización, regulación del cabezal de combustión para obtener un gran rendimiento y elevada estabilidad de llama. Disponible para gas natural (metano) o GLP (propano) (ver Figura 29).

Características [24]:

- Tipo: FP250/M.
- Potencia calórica mínima: 1.000.000 Kcal/h.
- Potencia calórica máxima: 2.500.000 Kcal/h.
- Potencia mínima: 1.160 KW.
- Potencia máxima: 2.900 KW.
- Alimentación: Trifasico.



Figura 29. Quemador de Gas FP 250/M.

2.3.6 CPU 1214C PLC Siemens S7-1200

Se trata de un controlador compacto (Figura 30) que facilita la realización de tareas productivas sencillas, pero de alta precisión. Su diseño, es escalable, flexible y reduce los requisitos de espacio en el cuadro de control. Por esta flexibilidad y adaptabilidad, el *software* es fácil de aprender y de usar, con una navegación sencilla gracias a que los símbolos y los menús están estandarizados en todas las vistas.

Con los controladores S7-1200, las tareas productivas son compactas, escalables y flexibles. Este *hardware* está disponible en versiones estándar y de seguridad, y es escalable en términos de rendimiento y equipamiento. Con E/S integradas, interfaz integrada, PROFINET para programación, conexiones HMI, E/S distribuidas y arquitecturas de unidades distribuidas, el equipo S7-

1200 es altamente adaptable según las necesidades individuales de los procesos, gracias a sus módulos de señal enchufables, así como también por sus módulos de comunicación.

Este es el controlador utilizado para secuenciar o controlar las válvulas de combustible y los dispositivos de encendido del sistema del quemador, además de las características mencionadas anteriormente, cuenta con las siguientes [25]:

- Tensión de alimentación: 24 VDC
- Consumo (valor nominal): 500 Ma, Solo CPU
- Con memoria integrada: 100 Kbyte
- Número de entrada digitales: 14
- Número de salidas digitales: 10
- Número de entradas analógicas: 2
- Interfaz PROFINET (estándar abierto de Ethernet)
- Dimensiones: 110x100x75 mm
- Versión de firmware: V4.4
- Paquete de programación: STEP 7 V16 o superior



Figura 30. CPU 1214C PLC Siemens S7-1200.

2.4 Diseño del algoritmo del sistema

2.4.1 GRAFCET

Básicamente, el GRAFCET es un modelo de representación gráfica, de los sucesivos comportamientos de un sistema lógico, predefiniendo por sus entradas y salidas. También es un diagrama funcional normalizado, que permite hacer un modelo del proceso a automatizar, contemplando entradas, acciones a realizar, y los procesos intermedios que provocan estas acciones [26].

Inicialmente fue propuesto para documentar la etapa secuencial de los sistemas de control de procesos a eventos discretos. No fue concebido como un lenguaje de programación de autómatas, sino un tipo de grafo para elaborar el modelo pensando en la ejecución directa del automatismo o programa de autómatas.

Varios fabricantes en sus autómatas de gama alta hacen este paso directo, lo que lo ha convertido en un potente lenguaje gráfico de programación para autómatas, adaptado a la resolución de sistemas secuenciales. En la actualidad no tiene una amplia difusión como lenguaje, puesto que la mayoría de los autómatas no pueden programarse directamente en este lenguaje, a diferencia del lenguaje *ladder*. Pero se ha universalizado como herramienta de modelado que permite el paso directo a programación, también como *ladder*.

2.4.2 Algoritmo en GRAFCET

Una vez que comienza el proceso de encendido inicia con una purga con aire fresco, la cual tiene una duración de 5 minutos, para evitar cualquier posible acumulación de gas en la cámara de combustión; luego se procede con la verificación de las condiciones de las líneas de suministro (todas las válvulas cerradas) (Figura 31).

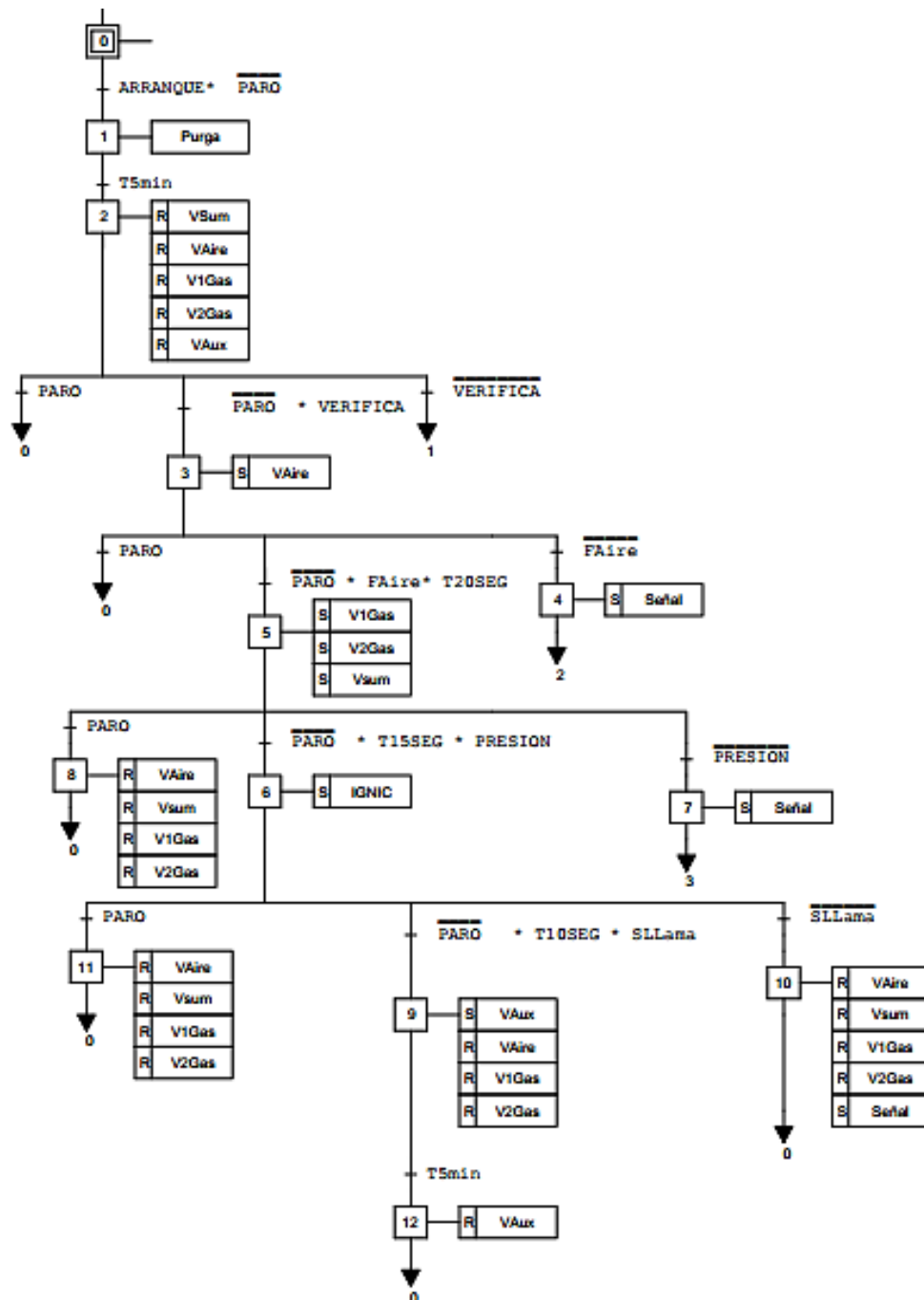


Figura 31. GRAFCET

Luego de verificar las condiciones de las líneas de suministro, el proceso de encendido debe seguir los siguientes pasos:

- Se abre la válvula de aire (VAire). Si se presiona Paro el sistema va a su estado inicial.
- Si no hay flujo de aire se encenderá una señal de alarma, retornando a la etapa (1) de verificación.

- Luego se ejecuta la apertura de las válvulas: suministro (Vsum), V1gas y V2gas. Si se presiona Paro el sistema va a su estado inicial.
- Si no hay flujo de aire se encenderá una señal de alarma, retornando a la etapa (2) de verificación.
- Posteriormente se procede a la etapa de ignición.
- Después se procede a abrir la válvula auxiliar, quedando cerrado a su vez las válvulas de aire, V1gas, V2gas de seguridad.
- Finalmente, se cierra la válvula auxiliar regulando la intensidad de la llama y el flujo de combustible al quemador.

2.4.3 Verificación de la propuesta de solución

La verificación de la propuesta de sistema de gestión de quemadores (BMS) para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102), en la planta “Combinada 2” de la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz” en Santiago de Cuba se simuló en el programa STEP7-Micro/WIN luego de realizar la programación en *ladder* (KOP) que se muestra en el anexo 5.

El STEP7-Micro/WIN es el entorno de desarrollo y programación para PLC S7-200. Es un *software* de SIEMENS que permite configurar, programar y mantener un proyecto, orientado tanto a trabajo *offline* como *online*.

Se ha seleccionado este programa debido a que dispone de una multitud de subáreas que permiten realizar distintas tareas, como son [27]:

- Desarrollar el programa del PLC.
- Asignar nombres simbólicos a las variables de un proyecto.
- Mapear y cargar en memoria un conjunto de valores de salida.
- Monitorizar y escribir en tiempo real sobre las variables y el programa de un PLC en marcha.
- Visualizar el comportamiento del programa en ejecución dentro de un PLC.
- Configurar características del PLC, como la velocidad del puerto de comunicación o el grado de protección con contraseña del equipo.
- Definir la interfase de comunicaciones del PC con el PLC y gestionar dicha comunicación.

La forma de programación de PLC que ofrece este entorno está muy orientada a lenguaje KOP o de contactos, y resulta muy visual pues se trata de un sistema que representa gráficamente el flujo de información, y con cajas la ejecución de funciones.

Aunque con este *software* no es posible programar la CPU 1200, pero al ser de la misma familia Siemens, y en la programación no tener ninguna función especial, la simulación es válida.

2.5 Valoración económica e impacto medio ambiental

En la siguiente valoración económica no se tuvieron todos los elementos necesarios para estimar con mayor precisión la factibilidad de la propuesta, ni el tiempo de recuperación de inversión de la misma, debido a políticas de seguridad de la propia industria, que imposibilitaron los datos necesarios para la investigación.

2.5.1 Valoración económica

Se plantea que el sistema que está en la planta “Combinada 2” de la Refinería 2 destilación al vacío (Horno F-102), está totalmente en control manual y tiene un costo anual de 52 870 CUP por las operaciones, consumiendo de 15-20 minutos aproximadamente encenderlo.

Por otra parte, se invierte en un sistema de gestión de quemador (BMS), que consume un tiempo aproximado de encendido de 6 minutos, que tiene un costo de 11 795 USD que convertido a (25 CUP) su equivalente es 263 105 CUP.

Instrumentación	Modelo	Cantidad	Precio USD
Sensor de llama	95 UV	1	154.36
Válvula solenoide	8210G76	2	330.24
Presostato electrónico	EPS200	1	170
Transformador de encendido	T11 Brahma	1	2.449
Quemador de gas	FP 250/M	1	310.00
PLC Siemens	S7 1200	1	499.99
Total	-----	7	1 797.279

2.5.2 Impacto medio ambiental

Los sistemas de quemadores BMS, tienen grandes beneficios al reducir el impacto ambiental. La introducción de mejoras tecnológicas en el equipamiento y la aplicación de innovaciones han permitido alejar al hombre de riesgo,

mejorando su calidad de vida laboral, mejorar los resultados productivos y disminuir la agresión al medio ambiente.

La seguridad es la prioridad principal en todas las operaciones industriales y los procesos de combustión traen aparejados un conjunto único de inquietudes de seguridad. Un sistema de gestión de quemadores (BMS) apropiado ofrece una combustión segura y una excelente implementación también ayuda a alcanzar una operación confiable. Los principales aspectos medio ambientales a tener en cuenta en el sistema BMS son:

- Disminución del consumo de combustible y con ello las emisiones tóxicas al medio ambiente cada vez que se encienda el horno.
- Disminución del riesgo de accidentes, pérdidas o lesiones humanas, pérdidas materiales, al encender el horno de manera automática.
- Contribución a un mejor ambiente industrial y laboral.
- Mejor reincorporación de excedente de material al sistema.

Conclusiones parciales

1. Se plantearon los requerimientos que debe cumplir el sistema de quemador BMS propuesto antes de su puesta en marcha.
2. Se propuso una estructura de control (BMS) para el encendido automático de la torre de destilación al vacío (Horno F-102), basado en un P&ID simple para un sistema de quemador de combustión a gas.
3. Se verificó la propuesta de solución para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102), simulando en el programa Step 7-Micro/Win.
4. Se realizó la valoración económica e impacto medio ambiental de los sistemas de gestión de quemadores BMS.

CONCLUSIONES GENERALES

1. En el siguiente trabajo mostró como resultado el cumplimiento a las tareas de investigación planteadas, así como el diseño de un sistema BMS para el calentamiento de petróleo a la torre de destilación al vacío (Horno F-102).
2. Los sistemas de gestión de quemadores BMS se ocupan de administrar los riesgos que pudieran surgir de la operación de los quemadores de gas. Por ende, se necesita utilizar instrumentación y equipos acordes a las condiciones del proceso.
3. Esta investigación demuestra cuán factible pudiera ser la utilización de un BMS en la Planta “Combinada 2” de la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz” en Santiago de Cuba a pesar de lo costoso que resulta su implementación, resulta muy necesario su implementación tanto por los beneficios medioambientales como por la seguridad industrial y laboral de cada uno de sus empleados y trabajadores.

RECOMENDACIONES

1. Implementar el sistema BMS propuesto en la torre de destilación al vacío (Horno F-102) en la Refinería de Petróleo “Hermanos Díaz”.
2. Seguir desarrollando el sistema BMS propuesto en proyectos futuros.
3. Cumplir con cada una de las normas establecidas y medidas de seguridad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

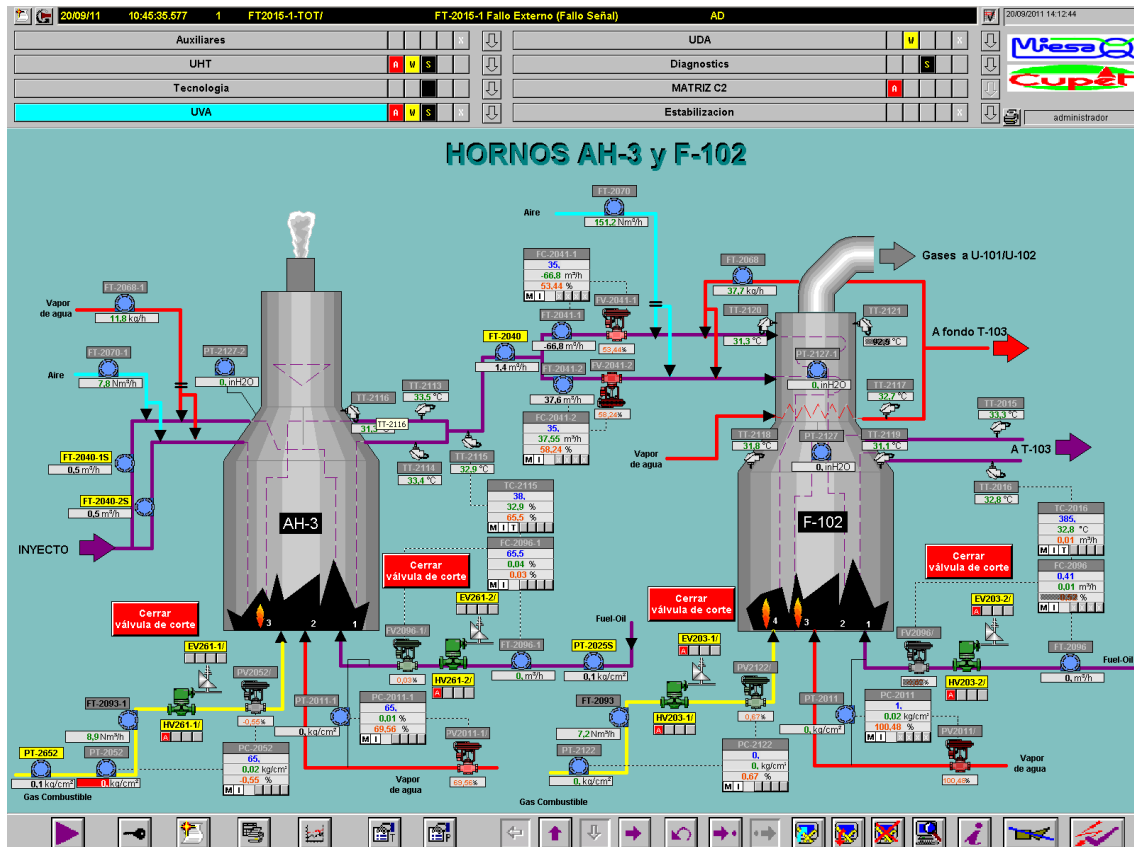
- [1] Lobelles Sardiñas, G. O, Morejón Gil, R., García Conde, L. E., y Yara Font Prieur, D., «Mejora tecnológica en el horno F-203 de Refinería Cienfuegos SA para elevar su eficiencia energética.», *Ing. Energética*, vol. 42, n.º 3, pp. 35-44, 2021.
- [2] E. S. Spiritus, «Cuba: La gran batalla es contra nuestras limitaciones y deficiencias», *Escambray*, 13 de mayo de 2013. <http://www.escambray.cu/2013/cuba-la-gran-batalla-es-contra-nuestras-limitaciones-y-deficiencias/> (accedido 12 de enero de 2023).
- [3] P. C. Janeta Bravo, «Estudio y análisis de la actualización del sistema de control de caldera de la central térmica trinitaria», B.S. thesis, Espol, 2018.
- [4] Diannelys Cobas Sánchez, «Evaluación de la columna de destilación atmosférica T-101 de la Refinería Hermanos Díaz», 2019.
- [5] H. Z. Kister, J. R. Haas, D. R. Hart, y D. R. Gill, *Distillation design*, vol. 1. McGraw-Hill New York, 1992.
- [6] «Control de hornos y calderas (BMS y CCS) – LSI Group». <http://www.lsi-group.net/productos/control-de-hornos-y-calderas-bms-y-ccs/> (accedido 18 de noviembre de 2022).
- [7] A. del P. Romero Castañeda, «Sistema de automatización “Burner Management System” (BMS) para horno incinerador asociado al proceso de fabricación de cemento», Francisco Jose de Caldas, Bogota, Colombia, 2021.
- [8] V. L. Molina Bautista, «Procedimiento para optimizar el diseño y operación de sistemas de bombeo de fluidos industriales con comportamiento estacionario y no estacionario.», B.S. thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi: UTC., 2021.
- [9] J. Martínez, J.M. Vega, L. E. Ale Ruiz, E. Erdmann, y E. E. Tarifa, «Verificación de las temperaturas de corte en la destilación atmosférica del petróleo mediante Hysys», *AAIQ Asoc. Argent. Ing. Quím. - CSPQ*, 2013.
- [10] «NRIB – 1003: 216. Norma de proceso tecnologico del Bloque ELOU + AVT de la Planta Refineria 2». Refineria «Hermanos Diaz», 2003.
- [11] Y. Wang, Y. Sai, y D. Yuan, «Key technologies for energy saving and emission reduction of heating furnaces in petrochemical plants», *Therm. Sci.*, vol. 25, n.º 4 Part B, pp. 3159-3168, 2021.

- [12] I. A. García Bertel y L. A. Angulo Delgado, «Normalización de un horno utilizado en la industria petroquímica bajo el estándar NFPA 86», 2017.
- [13] «IEC 62508:2010 | IEC Webstore». <https://webstore.iec.ch/publication/7141> (accedido 12 de enero de 2023).
- [14] A. ISA, «ISA 84.00. 01-2004 (IEC 61511 modified)», *Funct. Saf. Saf. Instrumented Syst. Process Ind. Sect.*, 2004.
- [15] S. Chiné Roca, «Sistema de control y monitorización energética de caldera», Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica, Universitat de Lleida, Escola Politècnica Superior, 2018.
- [16] «Analysis and Optimization Discussion on Control System Architecture of Electrochemical energy storage Power Station | The 4th International Conference on Information Technologies and Electrical Engineering». <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3513142.3513164>
- [17] M. D. Scott y B. Lampson, «Implementing Safety Instrumented Burner Management Systems: Challenges and Opportunities», en *Mary K O'Connor Process Safety Symposium. Proceedings 2015.*, Mary Kay O'Connor Process Safety Center, 2015.
- [18] S. Gersen, B Slim, y R Zeijlmaker, «The Development of a Natural Gas/Hydrogen Boiler System», presentado en International Gas Union Research Conference 2020, mar. 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339899796_The_Development_of_a_Natural_GasHydrogen_Boiler_System
- [19] «SIMATIC S7-1200 | Controladores SIMATIC | Siemens Mexico». <https://new.siemens.com/mx/es/productos/automatizacion/systems/industrial/plc/s7-1200.html>
- [20] FIREYE, «Detector de llama integrado con relé de llama interno TIPO 95IR/95UV/95DS». [En línea]. Disponible en: <http://fireye.com>
- [21] «Válvula Solenoide 8210G76». <https://cicsa-maxon.com.mx/valvula-solenoide-8210g76/>
- [22] «EPS202 - Presostato electrónico by BCM SENSOR TECHNOLOGIES bv | DirectIndustry». <https://www.directindustry.es/prod/bcm-sensor-technologies-bv/product-56103-795221.html>

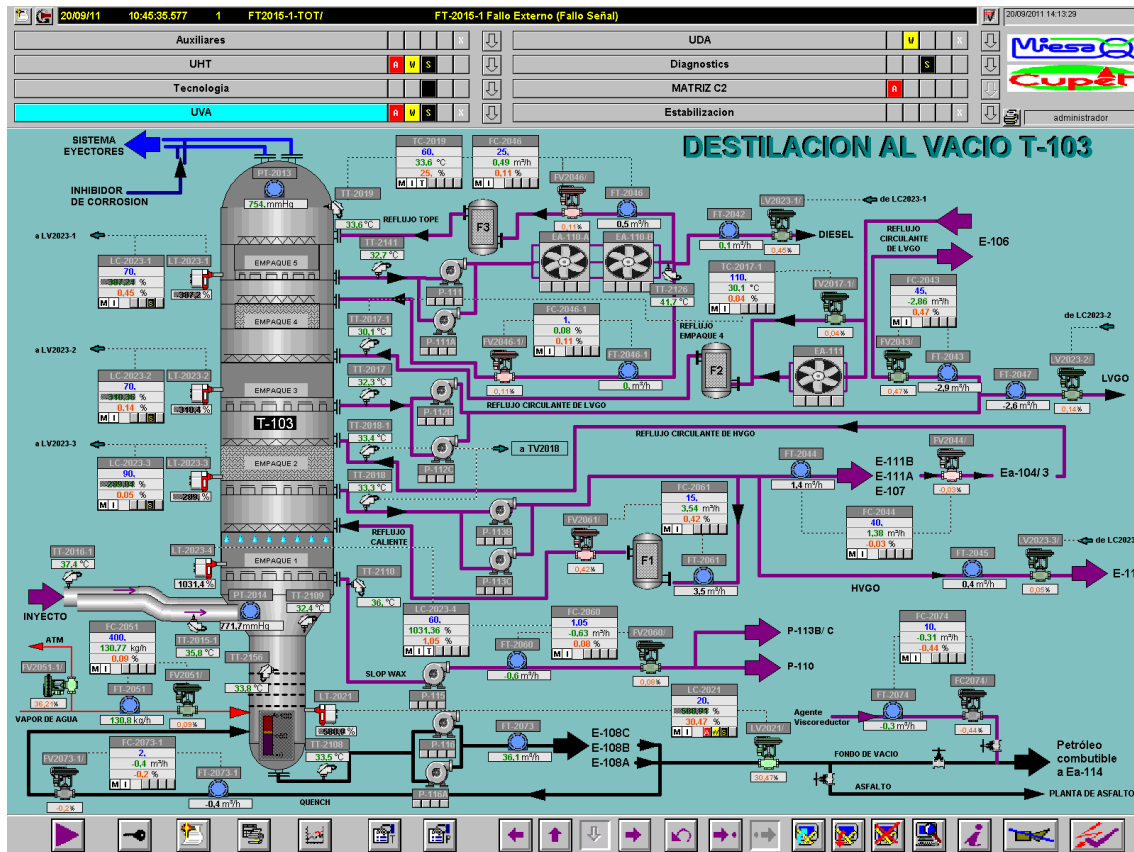
- [23] Servicios Técnicos e Importaciones, STI Ltda, «Transformadores de encendido T11, Brahma | STI Ltda». <https://sti-gas.com/?s=Transformadores+de+encendido+T11%2C+Brahma&lang=es>
- [24] «Quemadores Industriales a Gas FP 250/M». <http://fricaval89.com/productos/quemadores-industriales/gas/FP-250-M-calderas.html>
- [25] SIEMENS, «Hoja de datos CPU 6ES7214-1AG40-0XB0». 2020.
- [26] A. Burgos, M. L. Alvarez, N. Iriondo, y I. Sarachaga, «Metodología para la transformación de diseños en GRAFCET a código IEC 61131-3», *Inf. Tecnológica*, vol. 31, n.º 6, pp. 133-146, dic. 2020, doi: 10.4067/S0718-07642020000600133.
- [27] SIEMENS, «Manual del sistema de automatización S7-200». 2008.

ANEXOS

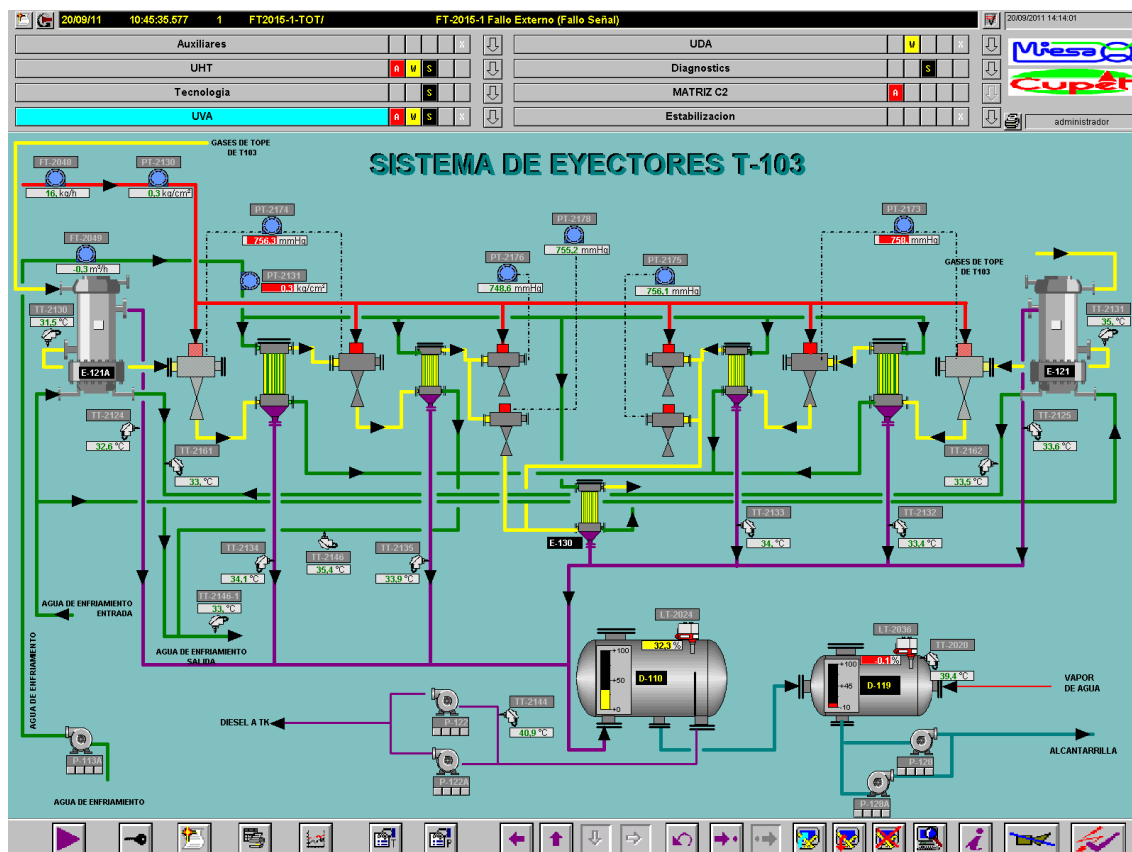
Anexo 1: Interfaz gráfico de los Hornos AH-3 y F-102



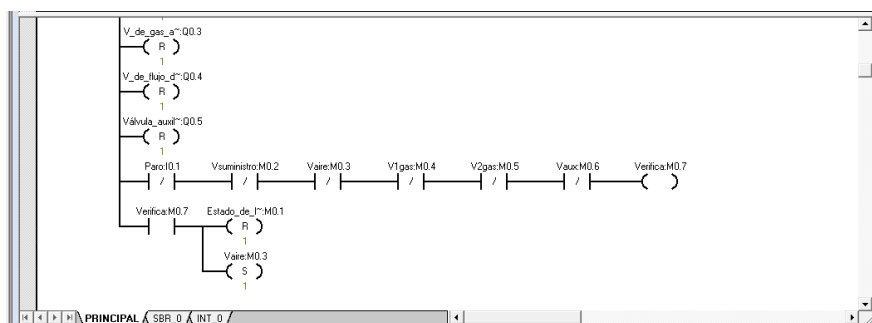
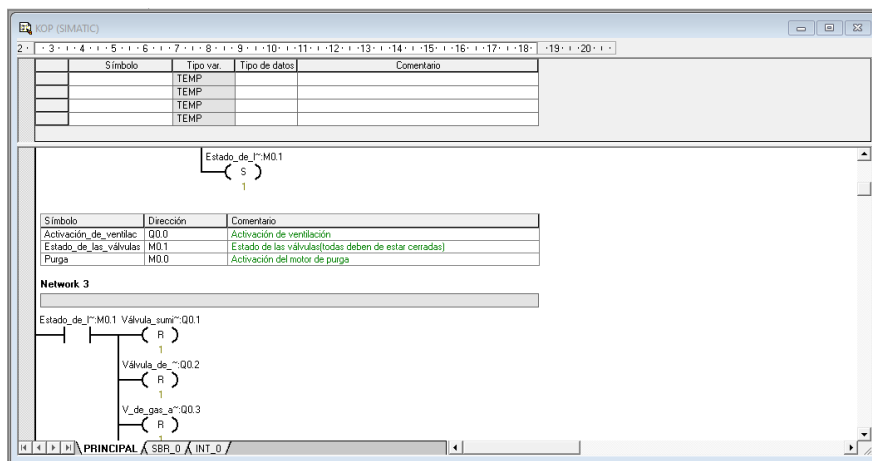
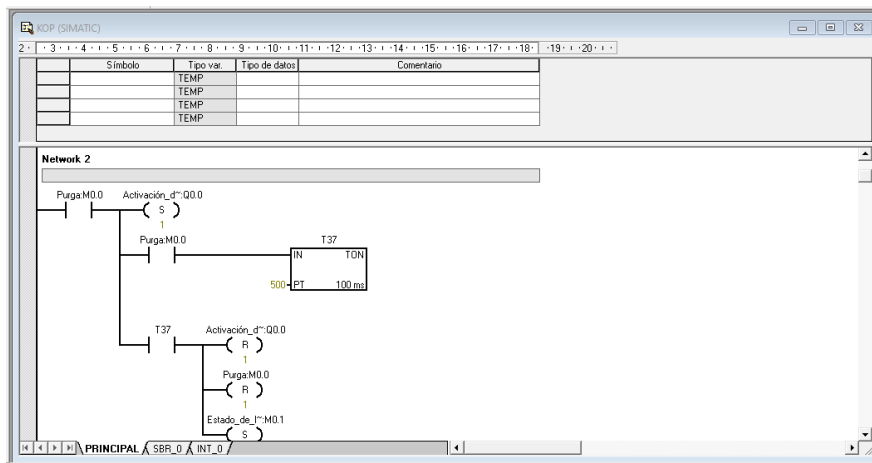
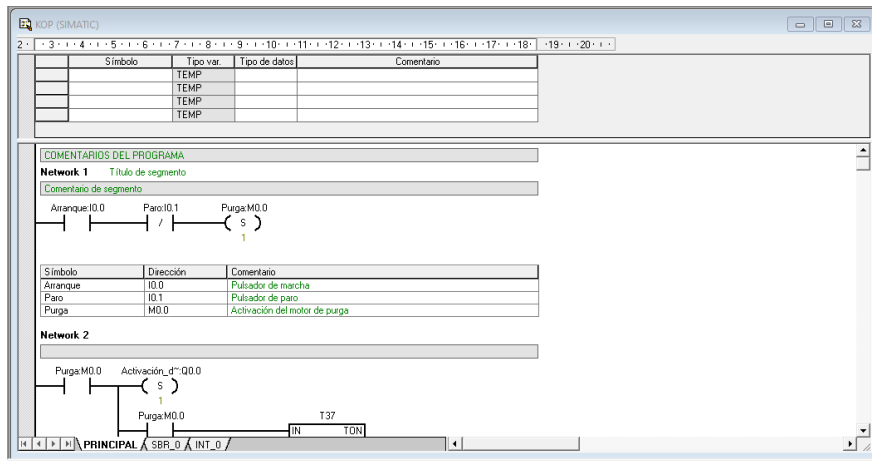
Anexo 2: Interfaz gráfica de la Destilaci3n al vacío T-103

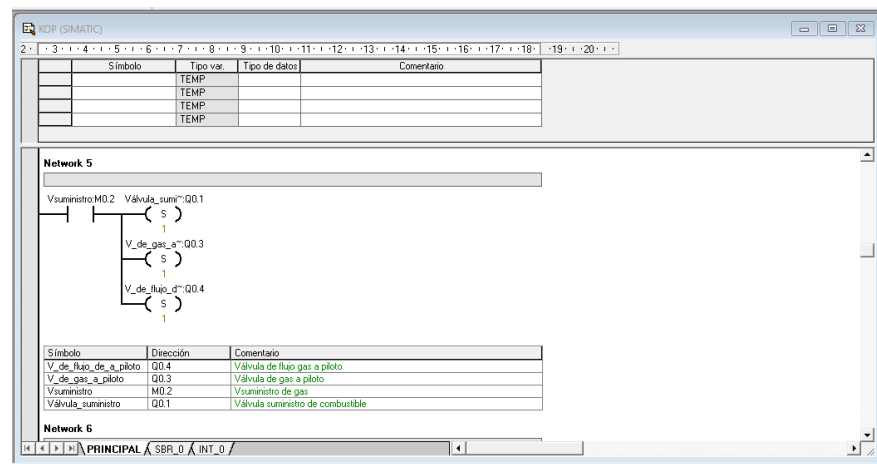
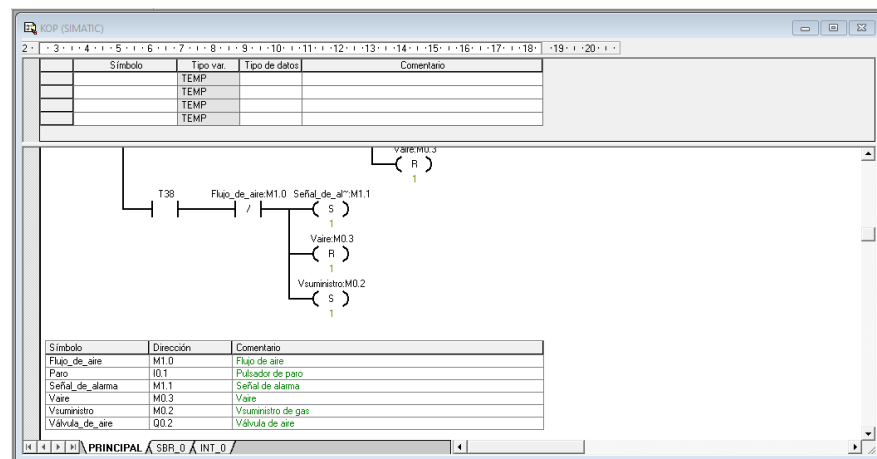
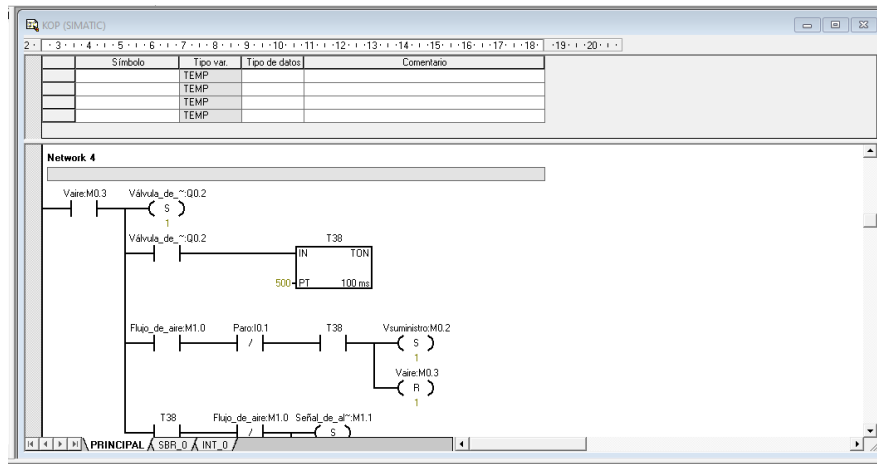


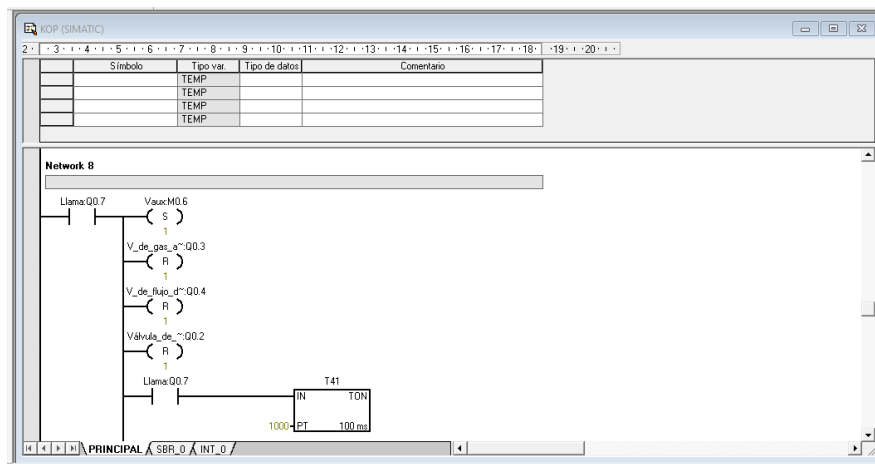
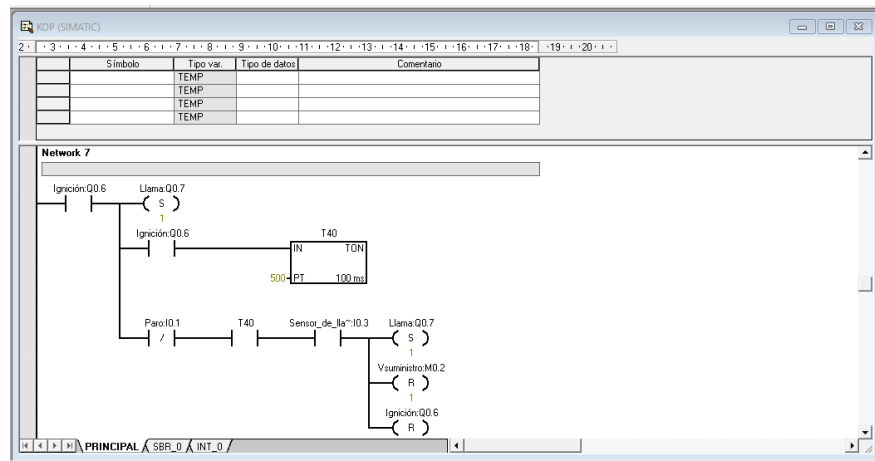
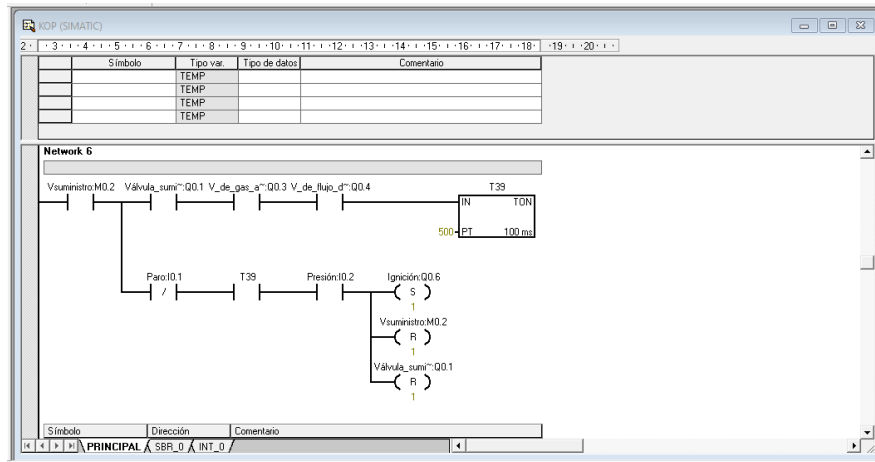
Anexo 3: Interfaz gráfico del Sistema de eyectores T-103

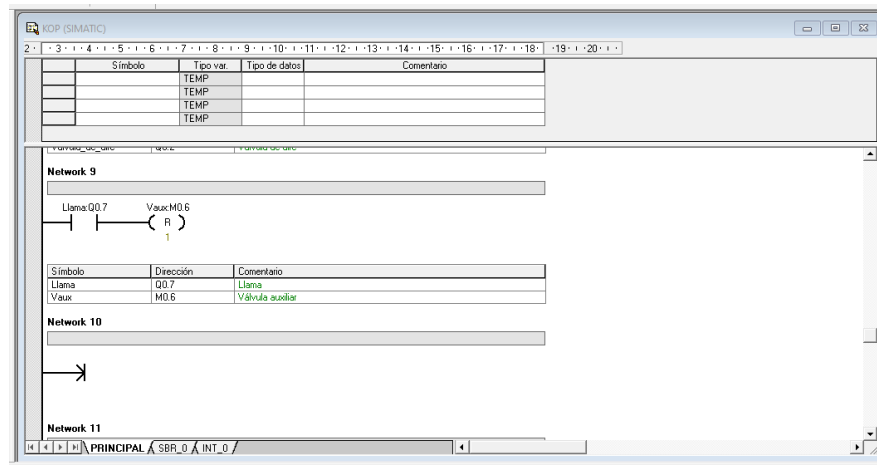
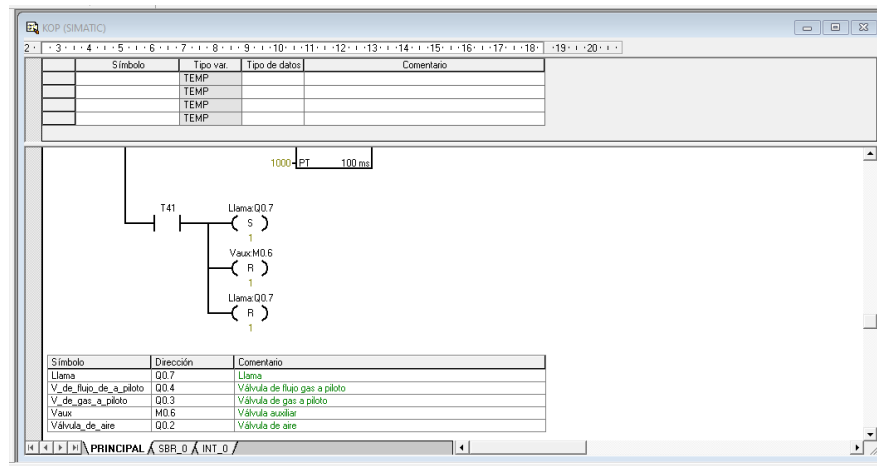


Anexo 4. Programación en STEP7-Micro/WIN.









Anexo 5. Simulación

