

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Título del trabajo

**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DE ALIMENTACIÓN DE
COMBUSTIBLE PARA CALDERA PIROTUBULAR,
MEDIANTE SISTEMA DELTAV**

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización Industrial

Presentado por:

Andrés Eduardo Fernández Quimí

Victor Stalin Rocano Castillo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a Dios primeramente, quién ha sido nuestra ayuda y fortaleza a lo largo de toda nuestra vida.

A nuestras familias que nos han dado el apoyo necesario a lo largo de toda nuestra carrera universitaria y que al llegar ahora a la meta de poder concluir la siguen siendo nuestro apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestros padres quién es nos han sido de gran ayuda durante toda nuestra vida y durante el proceso de la elaboración de este proyecto. A familiares cercanos quienes también nos han ayudado económicamente y moralmente. A nuestros compañeros de curso los cuales nos han enseñado el verdadero significado de la amistad y el compañerismo. así mismo agradecemos a la empresa Producargo, por habernos permitido ingresar a sus instalaciones para poder realizar nuestro proyecto de investigación dentro de la empresa.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Andrés Eduardo Fernández Quimí y Victor Stalin Rocano Castillo y damos nuestro consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Autor 1

Autor 2

EVALUADORES

Ing. Efrén Herrera

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Damián Larco

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La empresa Producargo, encargada de la producción de productos derivados de la caña de azúcar, entre ellos el alcohol, requiere la automatización del quemador de una de sus calderas pirotubulares para poder cumplir con estándares ambientales y reducir costos de producción.

Hemos iniciado realizando una investigación acerca del proceso de combustión, asimismo analizando las seguridades de la caldera de nivel de agua presión temperatura y caudal en los distintos puntos de la caldera. también hemos buscado la manera de poder medir los gases de combustión para poder realizar el control, para ello se puede usar el analizador de gases MK8 EGA. Por otro lado, también realizamos una simulación de la combustión de la caldera por medio de la herramienta Simulink de Matlab. Con ello, hemos obtenido ciertos puntos de operación para poder realizar el proceso de control el cual lo hemos programado por medio de un PLC de seguridad y la herramienta TIA Portal y por medio de una pantalla HMI podemos controlar el proceso de la caldera. Además, hemos buscado la forma de conectar este sistema al sistema DeltaV de la empresa usando el módulo VIM2.

Con esto hemos obtenido una optimización en la combustión de la caldera, haciendo que la combustión sea casi ideal. Con esto reducimos las emisiones de CO y se tiene un ahorro de combustible.

Podemos concluir que con un PLC de seguridad de Siemens podemos realizar un control con el que se obtenga una combustión casi ideal reduciendo las emisiones de gases y favoreciendo a la empresa.

Palabras Clave: caldera, gases, combustión, proceso.

ABSTRACT

Producargo, a company in charge of the production of products derived from sugar cane, including alcohol, requires the automation of the burner of one of its pyrotubular boilers in order to comply with environmental standards and reduce production costs.

We have started by carrying out an investigation of the combustion process, also analyzing the boiler's water level, pressure, temperature and flow rate at different points of the boiler. We have also looked for a way to measure the combustion gases to be able to carry out the control, for this we can use the MK8 EGA gas analyzer. On the other hand, we also performed a simulation of the combustion of the boiler by means of Matlab's Simulink tool. With this, we have obtained certain operating points to perform the control process which we have programmed by means of a safety PLC and the TIA Portal tool and through an HMI screen we can control the boiler process. In addition, we have looked for a way to connect this system to the DeltaV system of the company through the VIM2 module.

With this we have obtained an optimization in the combustion of the boiler, making the combustion almost ideal. This reduces CO emissions and saves fuel.

We can conclude that with a Siemens safety PLC we can control the boiler to obtain an almost ideal combustion, reducing gas emissions and benefiting the company..

Keywords: boiler, gases, combustion, process.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE PLANOS	X
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	1
1.3 Objetivos	1
1.3.1 Objetivo General	1
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Marco Teórico	2
1.4.1 Calderas de vapor	2
1.4.2 Combustión en calderas	4
1.4.3 Sistemas de control industriales	8
1.4.4 Sistema de control distribuido DeltaV	11
CAPÍTULO 2	13
2. Metodología	13
2.1 Descripción de la solución propuesta	13
2.2 Instrumentación	17

2.2.1	Medición de presión	17
2.2.2	Medición de temperatura.....	19
2.2.3	Medición de nivel de agua.....	19
2.2.4	Medición de caudal	20
2.3	Control del quemador	21
2.3.1	Analizador de gases MK8 EGA	22
2.3.2	Proceso de ajuste en línea de la combustión con el analizador de gases MK 8 EGA	24
2.3.3	Encendido del quemador	27
2.4	Arquitectura del proyecto	28
2.5	Programación del PLC.....	28
2.6	Simulación en Simulink.....	35
2.7	Conexión al sistema distribuido DeltaV.....	42
2.7.1	Características del Módulo 2 de E/S virtuales serie S DeltaV	42
CAPÍTULO 3		44
3.	Resultados Y ANÁLISIS	44
3.1	Ahorro de combustible.....	50
3.2	Análisis Económico	53
CAPÍTULO 4		55
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	55
	Conclusiones.....	55
	Recomendaciones.....	56
BIBLIOGRAFÍA		57
APÉNDICES.....		59

ABREVIATURAS

HMI	Human – Machine Interface
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PLC	Programmable Logic Controller
SCADA	Supervisor Control And Data Adquisition
DCS	Distributed Control System
EGA	Exhaust Gas Analyzer

SIMBOLOGÍA

$C_aH_bO_c$	Fórmula general del combustible
O_2	Oxígeno molecular
CO_2	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
mA	Miliamperios
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
ppm	Partículas por millón
Hz	Herzt

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura básica de una caldera pirotubular	3
Figura 1.2 Triángulo de Combustión.....	4
Figura 1.3 Gráfica Relación Aire - Combustible	6
Figura 1.4 Estructura general del control centralizado	9
Figura 1.5 Esquema general de un sistema SCADA	9
Figura 1.6 Estructura de un sistema de control distribuido.....	10
Figura 1.7 Estructura básica de un sistema DeltaV	12
Figura 2.1 Analizador de gases MK8 EGA	23
Figura 2.2 Ejemplo. Gráficas con interpolación.....	25
Figura 2.3 Módulo 2 de E/S virtuales serie S DeltaV	42
Figura 3.1 Gráfica Oxígeno vs Lambda	45
Figura 3.2 Gráfica Dióxido de carbono vs Lambda	45
Figura 3.3 Gráfica Monóxido de carbono vs Lambda.....	46
Figura 3.4 Gráfica Vapor de agua vs Lambda	46
Figura 3.5 Gráfica Hidrogeno vs Lambda	47
Figura 3.6 Gráfica de todos los gases vs Lambda	47
Figura 3.7 Gráfico para el cálculo del ahorro potencial de combustible	51
Figura 3.8 Gráfica para el cálculo de la eficiencia de la combustión en la caldera	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Instrumentación de presión.....	18
Tabla 2.2 Instrumentación de temperatura	19
Tabla 2.3 Instrumentación de nivel de agua	20
Tabla 2.4 Instrumentación de caudal	20
Tabla 2.5 Ejemplo. Valores medidos de los gases de combustión de la caldera	24
Tabla 2.6 Ejemplo. Valores comisionados	24
Tabla 2.7 Ejemplo. Cálculo de corrección del aire	26
Tabla 2.8 Entradas digitales a manejar del PLC	29
Tabla 2.9 Salidas digitales a manejar del PLC.....	31
Tabla 2.10 Entradas analógicas a controlar del PLC	32
Tabla 2.11 Salidas analógicas a controlar del PLC.....	33
Tabla 3.1 Mediciones realizadas con un valor de Lambda de 1.01	48
Tabla 3.2 Mediciones realizadas con un valor de Lambda de 1.07	49
Tabla 3.3 Mediciones realizadas con un valor de Lambda de 1.13.....	49
Tabla 3.4 Datos económicos actuales de la empresa	53
Tabla 3.5 Cálculo del ahorro por año.....	54
Tabla 3.6 Cálculo de ganancia en los próximos 3 años	54

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Diagrama P&ID del control de agua.....	15
Plano 2 Diagrama P&ID para el control de combustible y gases	16
Plano 3 Arquitectura de red	28
Plano 4 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 1	37
Plano 5 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 2	38
Plano 6 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 3	39
Plano 7 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 4	40
Plano 8 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 5	41

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La empresa Coazúcar La Troncal se encarga de la producción de azúcar y con los derivados de la caña (mieles) produce alcohol. Para la producción de alcohol es necesario el uso de vapor de agua, para lo cual se requiere calderas pirotubulares que utilizan bunker como combustible. En la actualidad, la entrada del bunker a las calderas se lo realiza de forma manual bajo el criterio del operador. Esto produce bajo rendimiento en la producción de generación de vapor, además una deficiencia en la combustión emitiendo gases que no son regulados bajo las normativas del Ministerio del Ambiente.

1.2 Justificación del problema

- Existen sistemas automatizados para calderas que nos dan un resultado esperado para la solución de nuestra problemática. Estos sistemas se basan en el control según cálculos tomados de la combustión para poder regular los gases como resultado de la combustión.
- Este sistema será programado por medio de los programas más conocidos que existen para la automatización, entre ellos el programa TIA Portal de Siemens. Esto le dará mayor facilidad al usuario para poder manejarlo de una forma sencilla. A esta red la vamos a conectar al sistema DeltaV de la empresa. En otras palabras nuestro producto será de un interfaz familiar pero con la capacidad de conectarlo al sistema de la empresa
- Una de las grandes ventajas de este sistema, será el monitoreo de los parámetros físicos de la caldera (presión, emisión de gases, temperatura, etc). Esto nos ayudará a conocer si es que existe algún problema dentro de ella, emitiendo una señal de alarma para que se pueda realizar la respectiva corrección.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Automatizar la entrada de combustible de la caldera Husts, empleando DeltaV, para llevar su control automático y monitorio de señales críticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Realizar el diagrama P&ID de la caldera que se usa en el proceso de generación de Vapor, para determinar las variables que involucran este proceso y diseño de los controles.
2. Realizar mediciones de los gases de combustión para establecer puntos de operación de caldera en función de aire-combustible vs vapor generado.
3. Programar una red que pueda conectarse al sistema DeltaV de la empresa para el control de la entrada de combustible.
4. Diseñar el interfaz del HMI que se presentará para el manejo del usuario.
5. Reducir las emisiones de gases de la caldera por medio de un sistema controlado
6. Buscar el ahorro de combustible en la caldera.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Calderas de vapor

Las calderas han sido usadas por varios años en varias aplicaciones con la intención de tratar de facilitar varios procesos, tanto industriales como domésticos, en donde se requiera vapor.

Estos equipos están destinados a la generación de vapor por medio del proceso de ebullición de agua. Para lograrlo se calienta una superficie, la cual entra en contacto con el agua. Esta superficie es calentada por algún tipo de combustible. En otras palabras, la caldera generalmente transfiera el calor desde el combustible hasta el agua para generar el vapor.

1.4.1.1 Tipos de calderas

Existen varios tipos de calderas de vapor, las cuales según sus características se podrán utilizar para distintas aplicaciones. Para ello debemos especificar que en el ámbito industrial existe un tipo de calderas que tiene tubos en su interior y según el contenido de estos tubos estas calderas se clasifican de la siguiente manera:

1.4.1.1 Calderas acuotubulares

Este tipo de calderas hacen que el agua que se quiere calentar recorra los tubos, los cuales están dentro de una cámara donde existe la combustión de combustible.

1.4.1.2 Calderas pirotubulares

En ellas quien recorre los tubos son los gases producto de la combustión. Estos tubos atraviesan la cámara llena de agua para poder calentarla. Estos gases luego son expulsados por medio de una chimenea.

1.4.1.2 Partes principales de una caldera pirotubular

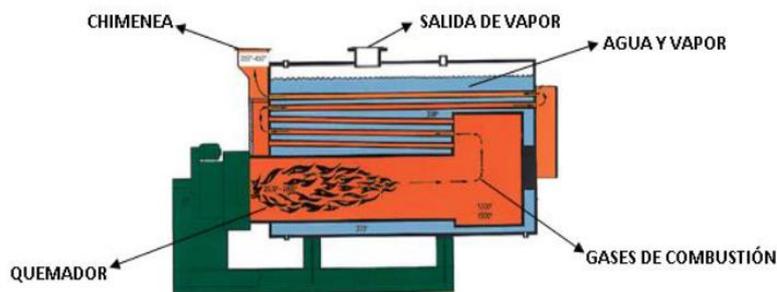


Figura 1.1 Estructura básica de una caldera pirotubular

Una caldera pirotubular está compuesta por las siguientes partes principales:

- **Quemador:** Es el encargado de realizar la combustión.
- **Hogar:** Es el espacio donde se realiza la combustión.
- **Puerta del hogar:** Sirve para la alimentación del combustible de la caldera para generar la combustión.
- **Tubos de humo:** Son aquellos que transportan el humo generado por la combustión. Estos atraviesan la cámara de agua para calentarla.
- **Cámara de agua:** En ella se encuentra el agua que se usará para la ebullición para la generación del vapor.
- **Bomba de agua:** Alimenta de agua a la caldera.
- **Chimenea:** Es la salida de los humos generados por la combustión.

- **Salida de vapor:** Expulsa el vapor generado por la ebullición del agua para los fines necesarios.

1.4.2 Combustión en calderas

1.4.2.1 Combustión

Proceso de oxidación que se da entre un combustible y un comburente donde se libera calor. En este proceso la oxidación se realiza de manera rápida y existe una llama. En el proceso de combustión técnica, se tiene la presencia de una fuente de ignición para que se genere la combustión y, luego de la ignición, la combustión se mantiene estable.

Para que haya una combustión es necesaria la existencia de tres factores importantes: combustible, comburente y una fuente de ignición. El combustible puede ser algún sólido (carbón o sus alteraciones), líquido (gasolina, búnker) o gas (gas natural o licuados del petróleo). El comburente generalmente es el oxígeno atmosférico (O_2) y este debe estar en el espacio y tiempo adecuado junto con la fuente de ignición, que es una fuente de energía, para que se pueda iniciar la combustión. El conjunto de estos tres elementos es llamado triángulo de combustión o triángulo de fuego.

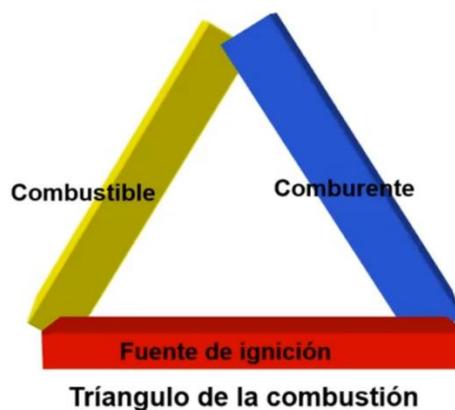
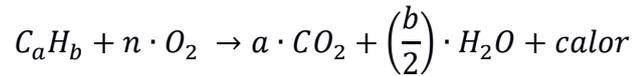


Figura 1.2 Triángulo de Combustión

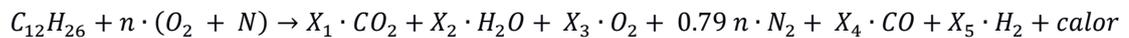
Como resultado de este proceso de combustión tendremos calor más ciertos gases, llamados gases de combustión. En una combustión básica tendremos como gases de combustión al dióxido de carbono y gases de agua.



Ecuación 1.1 Proceso de combustión básica

1.4.2.2 Combustión en calderas

Adentrándonos al proceso de combustión específicamente de una caldera, como material comburente usamos el oxígeno inmerso en el aire, como lo mencionamos anteriormente. Pero en el aire no existe solamente oxígeno, también existen otros componentes como el nitrógeno, el cual está presente en el aire en un 78%, y otros gases más en menor proporción. Como combustible tenemos el búnker quien reaccionará al oxígeno y el nitrógeno presente en el aire. La presencia del nitrógeno en el aire modifica un poco el proceso de combustión dando como resultado la siguiente ecuación:



Ecuación 1.2 Proceso de combustión dentro de una caldera con búnker

Donde el $C_{12}H_{26}$ representa al combustible y $O_2 + N$ representa al aire que se usa para la generación de la combustión. Y como resultados tenemos más gases de combustión, entre ellos el CO_2 , uno de los mayores contaminantes del medio ambiente. En otras palabras, debemos decir que nuestra caldera es un gran contaminante, pero esta contaminación puede ser reducida aumentando la eficiencia de la combustión y para que haya una mayor eficiencia en la combustión se necesita una mayor cantidad de aire reduciendo así el CO producido.

Para una cuantificación de la combustión, se ha realizado la relación de aire/combustible la cual supone una interacción ideal entre los elementos que se usan en la combustión. Esta relación está dada por la siguiente fórmula:

$$A/F = \frac{Masa\ de\ aire}{Masa\ de\ combustible}$$

Ecuación 1.3 Relación aire – combustible.

En la vida real, el combustible y el aire no interactúan perfectamente por lo que existe un exceso de aire lo que cuantifica esta relación. Con aquellos datos podríamos realizar una gráfica como la siguiente:

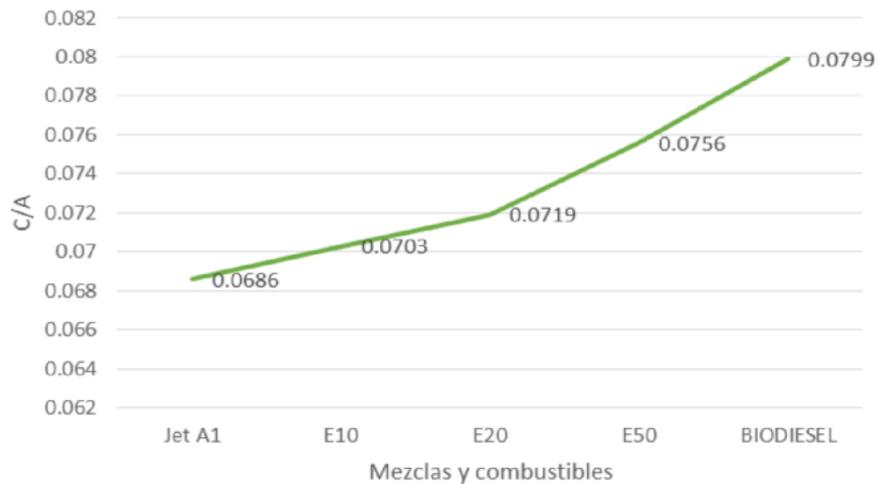


Figura 1.3 Gráfica Relación Aire - Combustible

Esta gráfica puede variar dependiendo del porcentaje de exceso de aire que se le añade a la combustión.

Existe otro factor el cual nos va a determinar cuánto aire y combustible debe mezclarse para una óptima combustión. Este factor no vamos a denominar lambda el cual es una relación que está dada por la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{\text{Volumen real de la combustión}}{\text{Volumen de aire estequiométrico}}$$

Ecuación 1.4 Cálculo de lambda

Cuando hablamos del volumen real estamos hablando acerca del aire disponible que tenemos para la combustión, mientras que el aire estequiométrico es el aire en una cantidad teóricamente ideal. Por obvias razones, es muy difícil saber el volumen de un gas por eso existe una aproximación para esta relación en donde usaremos la cantidad de dióxido de carbono que hay en los gases de combustión. Esta aproximación es la siguiente:

$$\lambda \approx \frac{CO_{2max}}{CO_{2medido}}$$

Ecuación 1.5 Aproximación de lambda

Esta ecuación nos indica que el valor de lambda depende del dióxido de carbono máximo que representa al dióxido de carbono en una combustión completa sobre el dióxido de carbono medido en la combustión real.

Este valor de lambda nos dirá qué tan rico o pobre es nuestra combustión. Dando así que:

Si $\lambda = 1$, entonces la mezcla es teóricamente ideal

Si $\lambda < 1$, entonces la mezcla es rica en combustible

Si $\lambda > 1$, entonces la mezcla es rica en aire y pobre en combustible

Para nuestros cálculos vamos a tomar el caso en que la mezcla es rica en aire. Esto significa que la mezcla va a tener un exceso de aire que podemos cuantificar por medio de la siguiente ecuación:

$$e\% = V_{n \text{ aire}} - V_{n \text{ aire estequiométrico}}$$

Ecuación 1.6 cálculo de exceso de aire

Asimismo, este valor tiene una aproximación que es la siguiente:

$$e\% \approx k \left(\frac{21}{21 - \%O_2} - 1 \right) \cdot 100$$

Ecuación 1.7 Aproximación del cálculo de exceso de aire

Para esta aproximación es necesario medir el porcentaje de oxígeno que hay en la combustión. Para esto existen algunos instrumentos tales como los analizadores de gases. Por otro lado, existe el factor k el cual va a depender del combustible que estamos usando para el proceso de combustión, de la siguiente manera:

Para gas, $k = 0.9$

Para fuel – oil, $k = 0.94$

Para carbón, $k = 0.97$

1.4.3 Sistemas de control industriales

Para mayor facilidad dentro del ambiente industrial, las empresas crean distintos sistemas de control industriales. Estos sistemas integran todo tipo de componentes y dispositivos con la finalidad de monitorizar el sistema, gestionar operaciones y automatizar el sistema. Esto lo realizan por medio de servidores y controladores como los PLCs (Controlador Lógico Programable), RTU (Unidad Terminal Remota), HMI (Interfaz Humano – Máquina), entre otros.

La estructura general de un sistema de control industrial está dada por dos partes: la parte operativa, donde se ubican todos los elementos y dispositivos que ayudarán a controlar la planta, estos dispositivos pueden ser los sensores y actuadores. En la parte de control tenemos lo que gobierna y controla la planta, esta parte normalmente está constituida por dispositivos de control como los PLCs.

1.4.3.1 Arquitecturas de los sistemas de control industrial

Existen varias arquitecturas dentro del control industrial, de las cuales vamos a ver dos de ellas que son las más conocidas:

1.4.3.1.1 Sistema de control centralizado:

En este tipo de arquitectura existe un único dispositivo de control que monitorea, gestiona y automatiza todos los procesos. Normalmente esta arquitectura se usa para sistemas poco complejos.

Una gran ventaja de este tipo de arquitectura es que no es necesario una interconexión entre procesos ya que todo está gobernado por un mismo controlador, así se disminuyen costos.

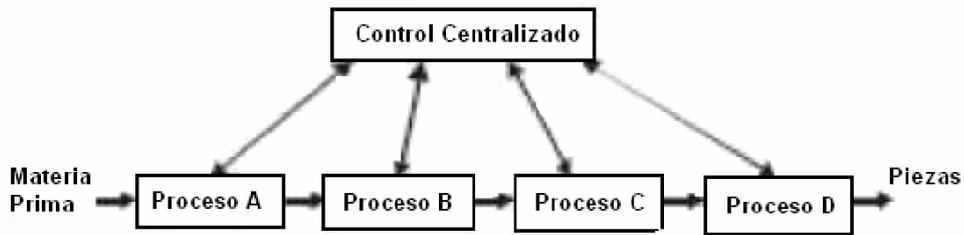


Figura 1.4 Estructura general del control centralizado

1.4.3.1.2 Sistema SCADA:

Estos sistemas fueron creados a raíz de la alta complejidad de sistemas distribuidos que se requerían dentro de las industrias, ahora, suponiendo que dicha industria tiene instalado un sistema centralizado era necesario que este sistema deba suplir aquellas necesidades.

El concepto SCADA viene de las siglas de Supervisor Control And Data Acquisition, esto es un sistema de control, supervisión y adquisición de datos. En un sistema SCADA existe un dispositivo de monitoreo y supervisión que gobierna todo el sistema, esta es la estación central, también llamada Máster o MTU (Unidad Terminal Maestra). Al máster están conectados varios dispositivos de control los cuales controlan los procesos por separado los cuales pueden estar distribuidos en toda la industria. Estas unidades de control se denominan Unidades Remotas o RTU, y están conectados a los sensores, actuadores y las maquinarias que se quieran controlar.

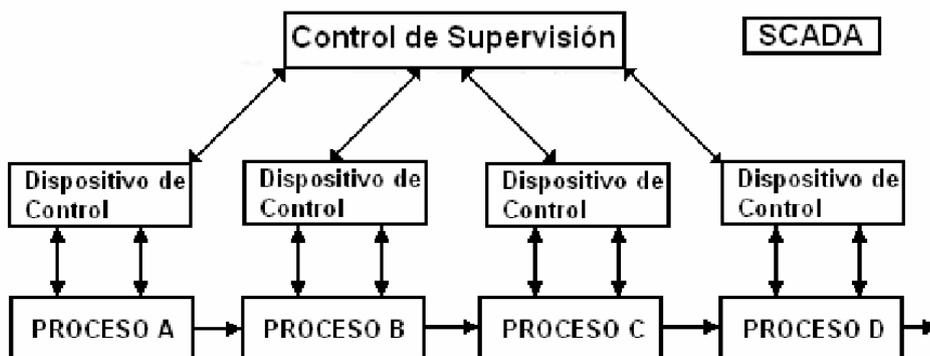


Figura 1.5 Esquema general de un sistema SCADA

Cabe mencionar que en un sistema SCADA es necesaria la fase de adquisición de datos. Esta fase está conformada por los equipos de medición dentro del sistema quienes recopilarán los datos para que el sistema los pueda procesar, controlar y supervisar. Estos equipos deberían tener un sistema de comunicación para que pueda transmitir aquellos datos a los controladores.

En la fase de supervisión, que es la que nos da el máster, ayudará al usuario a comandar cada uno de los controladores a través del master. Esto significa que es el usuario quien dará las instrucciones a los controladores para que puedan manipular los datos recopilados en cada proceso. En otras palabras, aunque tenemos varios controladores que comandan cada proceso por separado, todo lo podemos manipular y controlar desde el máster. Aunque con esto existe una desventaja y es que en los sistemas SCADA si existe una falla en alguno de los controladores, se debe paralizar todo ya que se debe buscar la falla desde el máster.

1.4.3.1.3 Sistema de control distribuido

Los sistemas de control distribuidos, o también conocidos por sus siglas en inglés DCS (Distributed Control System), son sistemas similares a los SCADA con la diferencia de que en ellos los controladores se pueden comunicar entre sí de tal manera que si hay alguna falla en alguno de ellos no es necesario paralizar todo el proceso.

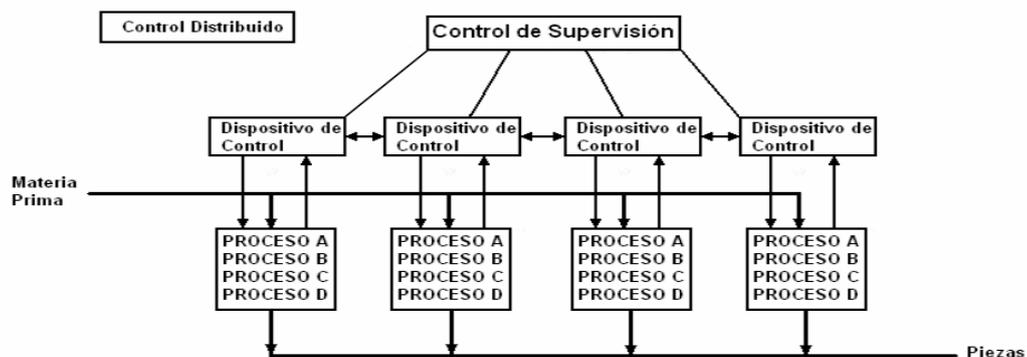


Figura 1.6 Estructura de un sistema de control distribuido

Algo importante que mencionar es que al tener varios dispositivos de control a cada uno se le puede asignar un proceso sencillo, ya que al tener una independencia de los demás, este podrá cumplir su función de manera más eficiente. Aún así todos estos dispositivos de control tienen una señal de reloj sincronizada, de tal manera que todos tienen una misma marca de tiempo.

1.4.4 Sistema de control distribuido DeltaV

La empresa Emerson desarrolló su propio sistema de control distribuido llamado DeltaV. Este es un sistema robusto que puede ser aplicado en varios sistemas complejos y de control avanzado en la industria. Cuenta con un soporte para plantas tanto continuas y discretas, dando una amplia gama de aplicaciones. Además, este es un sistema abierto, esto significa que se integra sin problema a sistemas de otras tecnologías de comunicación.

Posee varias herramientas de ingeniería que pueden ser usadas en varias funciones de configuración. Estas herramientas son el DeltaV Explorer, DeltaV Configuration y el Control Studio las cuales se pueden usar para la configuración de lógicas de control, históricos, alarmas, HMI, eventos y la configuración de la red del sistema.

Funciona con una arquitectura del tipo “peer to peer”, que traducido sería “entre pares”. A diferencia de la arquitectura “cliente-servidor”, este tipo de arquitectura funciona por nodos y cada nodo puede comportarse como servidor o cliente. Y es que en esta arquitectura a cada nodo se lo trata por igual, sin darle a un nodo mayor importancia que a otro.

Una red típica de un sistema DeltaV tiene los siguientes elementos:

- Estación de trabajo: Es una computadora personal con el software para la programación del sistema

- Controlador: Puede ser cualquier PLC que se use para el control de los procesos
- Nodo: Es cualquier dispositivo conectado a la red, puede ser una estación de trabajo o un controlador.
- Red de control: Es la red que conecta a todos los nodos del sistema.

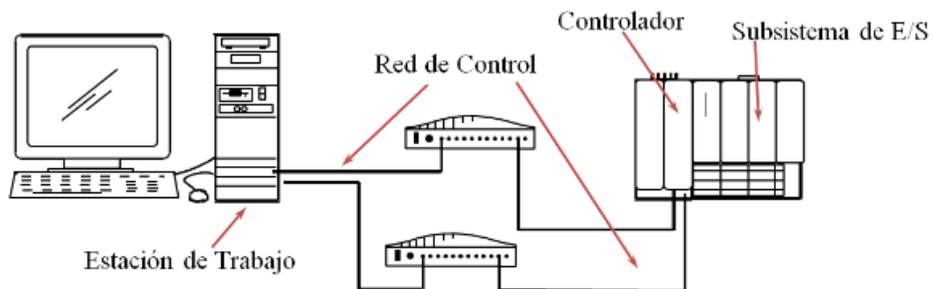


Figura 1.7 Estructura básica de un sistema DeltaV

Una de las ventajas del sistema DeltaV es que mientras está funcionando es posible agregar más elementos al sistema. Sin necesidad de tener que paralizar la producción podemos añadir más nodos al sistema. Pero debemos recordar que existe un límite para los nodos. Un sistema DeltaV puede soportar hasta 100 controladores, 65 estaciones de trabajo, 300 subsistemas remotos I/O y de 25 a 30000 I/O

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la solución propuesta

Realizado el análisis del problema presentado en la empresa Producargo – Azúcar La Troncal, hemos presentado como solución la realización de un lazo de control en la entrada de bunker de la caldera por medio del sistema DeltaV de la empresa. Esto significa que, se realizó la programación del control, que puede ser realizado por un programa como el TIA Portal, y con esto introducir este control al sistema DeltaV establecido de la empresa. Y como ya hemos mencionado anteriormente, no será necesaria la paralización de la producción de la empresa para realizar esta operación.

Para realizar este lazo de control definimos que la variable que controlaremos será la cantidad de combustible que entra a la caldera, la entrada de gas para la ignición, así como la entrada de agua a la caldera. Éstas están controladas por válvulas, las cuales según varios parámetros se abrirán o cerrarán para permitir el ingreso de más cantidad o menor cantidad de combustible o aire a la caldera.

En el momento de realizar este control es necesario tener en cuenta que los sistemas cumplan con los requerimientos de seguridad. estos requerimientos nos dictarán qué tan segura es la caldera para tres factores:

- ☞ Las vidas humanas
- ☞ Los equipos y productos
- ☞ Medio ambiente

Por otro lado, los parámetros que determinarán el ingreso del combustible y del aire serán los siguientes:

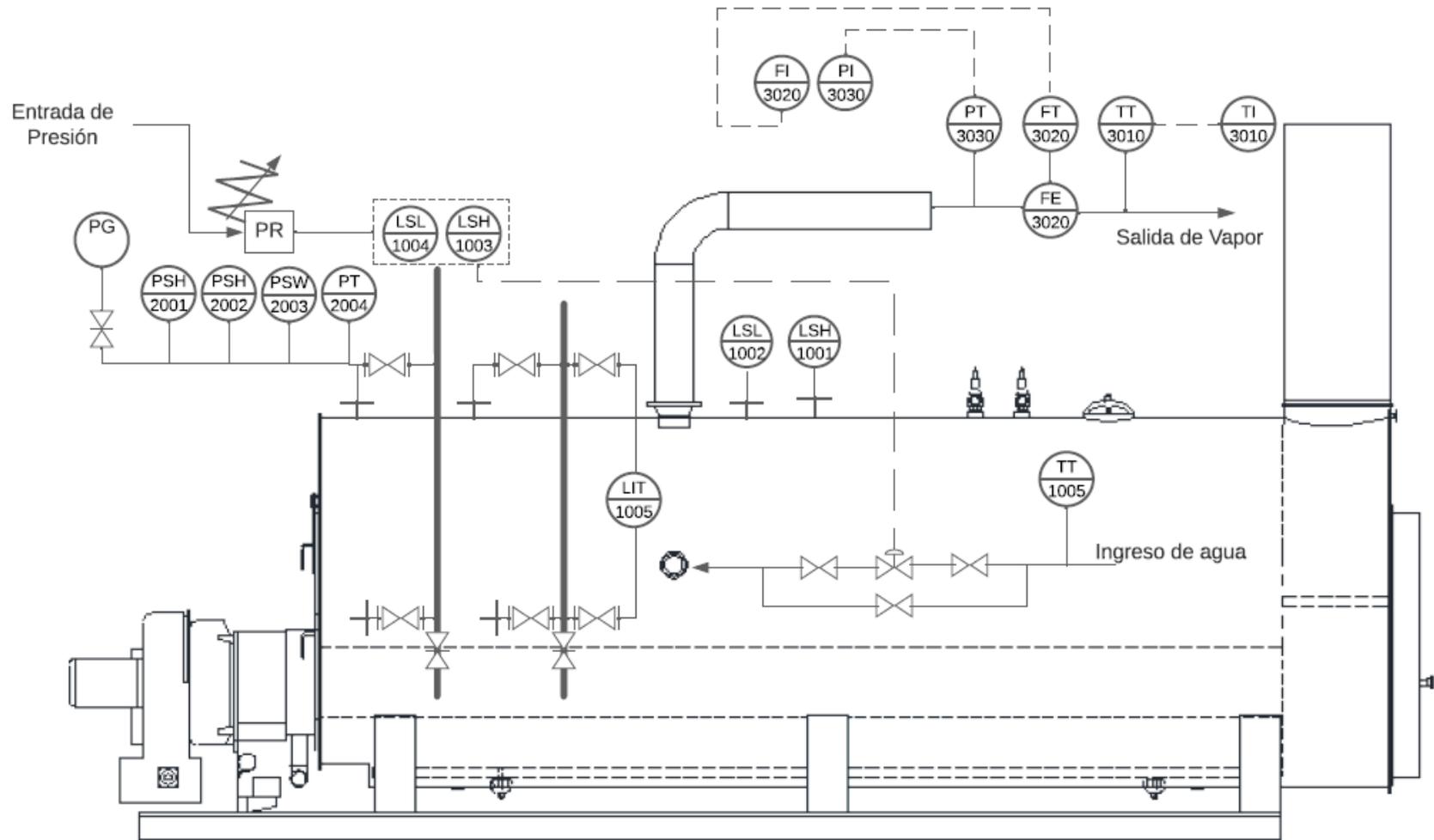
- Presión en la caldera, tanto en el interior de la caldera como en la salida de vapor de la caldera,
- La temperatura en la caldera, para eso debemos medir la temperatura de entrada del agua, temperatura de salida del agua, asimismo la temperatura

de la entrada y salida de los gases de combustión, la temperatura en el interior de la caldera y la temperatura en la salida de vapor de la caldera.

- Nivel del agua dentro de la caldera
- Caudal en la línea de alimentación de agua de la caldera y en la salida de vapor de la caldera.

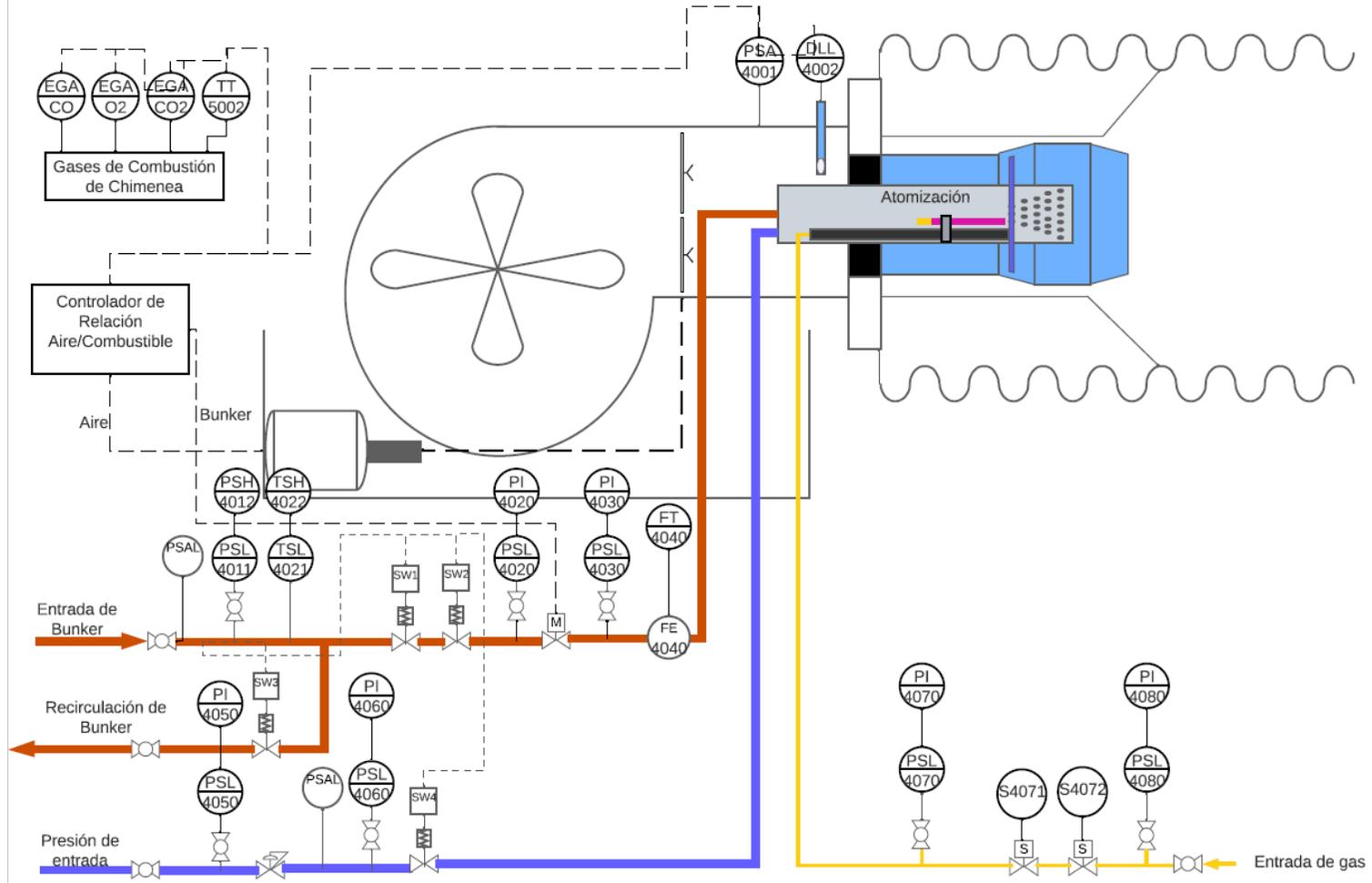
Para realizar la medición de estos parámetros es necesario instalar en la caldera varios indicadores en sus diferentes puntos. Para indicar los lugares en donde se instalarán los indicadores hemos realizado los siguientes diagramas P&ID.

PI&D de Agua y Vapor de caldera



Plano 1 Diagrama P&ID del control de agua

PI&D de Combustible y Gases de Combustión



Plano 2 Diagrama P&ID para el control de combustible y gases

Al revisar estos diagramas, tenemos que la mayoría de las conexiones están en la parte superior o el lomo de caldera que es la parte del vapor. Ahí es donde tenemos la salida de vapor y las conexiones para los presostatos. Unas pocas conexiones al costado que es que son básicamente para los indicadores de nivel, entrada de agua y las purgas en la parte inferior. Básicamente, cuando alguien va a una instalación de calderas, lo que debe hacer es reconocer dónde están ubicados los elementos, teniendo ubicados los elementos es más fácil poder hacer un seguimiento de que elemento es el que está fallando.

Por eso, lo que tenemos como fundamento de los sistemas de seguridad es:

- ✎ Evitar que la caldera opere a una presión superior a la permitida
- ✎ Evitar que la caldera opere sin agua
- ✎ Evitar que ingrese combustible sin haber combustión
- ✎ Evitar que la caldera opere sin aire
- ✎ Que la secuencia de encendido se cumpla siguiendo las condiciones de seguridad

Esto significa que para poder tener un correcto funcionamiento se debe tener seguridades en algunas áreas de la caldera. En donde en cada una de ellas estamos monitoreando las variables de tal manera que nos aseguremos que funcionen de manera correcta teniendo en cuenta los fundamentos antes mencionados. estas áreas son las siguientes:

- Agua y Vapor
- Combustibles
- Gases

2.2 Instrumentación

Existen varios tipos de instrumentos de medición que usamos para el avance de este proyecto. Estos instrumentos los describimos a continuación:

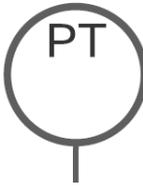
2.2.1 Medición de presión

Para la medición de presión usaremos en su gran mayoría los transductores. Este es un dispositivo de medición que registrará la presión en distintos puntos de la

caldera y la transformará en una señal eléctrica analógica, esta señal normalmente suele ser de 4 – 20 mA. También usaremos algunos indicadores de presión, estos solamente nos darán una lectura de la medición tomada.

Dentro de nuestro diagrama tenemos lo siguiente:

Tabla 2.1 Instrumentación de presión

Simbología	Descripción
	Indicador de presión, puede ser un manómetro
	Transductor de presión
	Alarma de alta presión
	Regulador de presión

Las ubicaciones en donde es necesaria la medición de la presión son las siguientes:

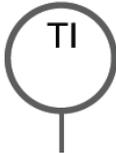
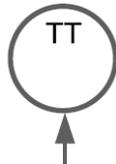
1. Dentro del tanque de agua
2. Entrada del combustible
3. Entrada de aire
4. Entrada de gas

2.2.2 Medición de temperatura

Para la medición de temperatura en algunos casos usaremos indicadores y en otros transductores. Asimismo los indicadores que transductores de temperatura funcionan de forma similar a los de presión, hoy los transductores convierten la temperatura medida a una señal eléctrica de 4-20 mA, mientras que el indicador solamente muestra la temperatura a medida.

En los diagramas descritos anteriormente tenemos lo siguiente:

Tabla 2.2 Instrumentación de temperatura

Simbología	Descripción
	Indicador de temperatura, puede ser un termómetro
	Transductor de temperatura

las ubicaciones en donde se tiene una medición de temperatura son las siguientes:

1. Entrada de combustible
2. Salida de vapor de combustión (chimenea)

2.2.3 Medición de nivel de agua

Para la medición de nivel tenemos asimismo algunos transductores e indicadores, así como también algunas alarmas que nos dirán cuando haya un nivel alto y un nivel bajo de agua.

Esto lo encontramos en el diagrama P&ID de agua y vapor, en el cual tenemos descrito lo siguiente:

Tabla 2.3 Instrumentación de nivel de agua

Simbología	Descripción
	Transmisor con indicador de nivel
	Alarma de nivel bajo
	alarma de nivel alto

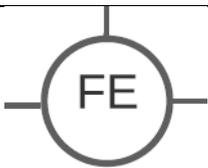
La medición del nivel de agua la tendremos únicamente en la cámara de agua de la caldera.

2.2.4 Medición de caudal

Para la medición del caudal estamos usando instrumentos como los transmisores, indicadores y también un elemento primario que es simplemente un sensor de caudal.

En los diagramas P&ID estos instrumentos se presentan de la siguiente manera:

Tabla 2.4 Instrumentación de caudal

Simbología	Descripción
	Elemento primario para la medición del caudal. puede ser un sensor

	Indicador de caudal
	Transmisor de caudal

La medición de caudal la tenemos dentro del sistema de control del agua a la salida del vapor de agua. Así como también se usa un sensor a la entrada de combustible para el quemador de la caldera.

2.3 Control del quemador

Al controlar estas variables, tenemos que buscar la máxima eficiencia de la combustión. Para esto se debe tratar de ajustar en línea cualquier modificación que ocurra en la cantidad o en las condiciones de entrada tanto del aire como de combustible, los equipos de control deben ser capaces de detectarlo y contraponerse a eso, para asegurar que haya una máxima eficiencia a lo largo del tiempo. Esa máxima eficiencia nos ayudará a tener menor cantidad de emisiones posibles.

Cuando ponemos en marcha a la caldera lo que se hace es poner fija la curva de combustión para ese momento. Pero cuando existen esas alteraciones en las entradas podemos tener 2 situaciones en las que podríamos caer. Una es que la combustión sea rica en combustible y pobre en aire lo que dará como resultado combustible no quemado, presencia de hollín o humo negro. La otra situación es cuando tenemos un exceso de aire y una entrada pobre de combustible. Ambas situaciones son ineficientes y la primera situación podría ser peligrosa.

Y aquí donde entran en juego los analizadores de gases los cuales sirven para poder contemplar las reducciones de emisiones y el uso de combustible. Esto es necesario

ya que si nosotros sabemos cómo están saliendo los gases, vamos a tener una idea de cómo está siendo la combustión y así sacar nuestras propias conclusiones.

Estos analizadores de gases pueden actuar de 2 formas diferentes: uno pudiera ser simplemente un monitoreo de gases, este es un analizador en continuo que nos va diciendo qué gases están saliendo por chimenea. Esto puede ser un analizador de gases perenne instalado al pie de la chimenea o un típico analizador portátil que nos dice el típico reporte de gases que se tiene por caldera. El problema es que este nos hace un reporte puntual para ese momento, no nos da un análisis en continuo de lo que va pasando en la caldera.

El otro tipo de situaciones que se tiene en análisis de gases se da cuando tenemos el analizador en conjunción con un controlador. En esta ocasión el analizador trabaja en nuestro sistema de medición de gases con nuestro controlador de tal manera que analizan como se salen los gases por chimenea y son capaces de ajustar de cierto modo esas condiciones ayudando a reducir las emisiones.

2.3.1 Analizador de gases MK8 EGA

De la empresa Autoflame, su nombre lo toma de la familia de analizadores MK8 y de las siglas de Analizador de Gases de Descarga (Exhaust Gas Analyzer), diseñado específicamente para trabajar en calderas. Este equipo da un monitoreo y control continuo de emisiones.

Un gran beneficio de este equipo es que nos da una medición exacta de los gases que salen por chimenea y cuando opera con un controlador tiene la capacidad de reajuste de combustión, manteniendo la combustión a un máximo nivel de eficiencia según la capacidad del quemador. Además, este equipo almacena los datos medidos en su memoria durante 3 años, teniéndolos disponibles para la descarga a Excel.



Figura 2.1 Analizador de gases MK8 EGA

Los analizadores de gases en MK8 EGA se pueden presentar de 2 maneras, de la forma estándar y la forma americana. Con la forma estándar nosotros podemos obtener las mediciones de los gases básicos de combustión, estos son O_2 , CO , , con las mediciones de NO se estima las emisiones de NO_x . utilizando la forma americana, además de las mediciones mencionadas, también tendremos una lectura de SO_2 y NO_2 .

Algunas características de estos equipos son las siguientes:

- ☞ Ajusta combustión en línea en función de 3 parámetros, porcentaje de O_2 , CO y CO_2 .
- ☞ Máxima eficiencia de combustión a lo largo del tiempo.
- ☞ Ahorros el consumo de combustible del 1 al 2%
- ☞ Opción de límite de temperatura y emisiones para O_2 , CO_2 y NO .
- ☞ Conexión Modbus y 6 señales analógicas de 4 – 20 mA. Esto nos ayuda para la integración a otros controladores
- ☞ No necesita calibración. Esto ya que las celdas están calibradas de fábrica.

Algunas especificaciones técnicas del analizador son las siguientes:

- ☞ Fuente de Alimentación: 110-240V, 50-60Hz
- ☞ Temperaturas ambiente límites: $5^{\circ}C$ ($41^{\circ}F$) a $40^{\circ}C$ ($104^{\circ}F$)
- ☞ Calificación medioambiental: IP20 (NEMA1)

2.3.2 Proceso de ajuste en línea de la combustión con el analizador de gases MK 8 EGA

Para realizar este control es necesario usar la curva de aire combustible. Esta curva es realizada por medio del mismo analizador de gases. Básicamente lo que se hace es interpolar los puntos de datos que se han obtenido del analizador de gases. En otras palabras, el analizador de gases ir a tomando datos cada minuto y estos datos los irá poniendo dentro de una gráfica que obviamente tendrá una tendencia a ser una línea continua, algo que realmente no lo es pues son solamente son puntos aislados, pero para hacer este ajuste necesitamos que no sean puntos aislados. Por lo tanto, vamos a interpolar esos puntos que fueron tomados del analizador para que sea una gráfica dinámica.

Este ajuste también se lo realiza en base a los gases de combustión puede ser el oxígeno, el dióxido de carbono o monóxido de carbono, de entre ellos el parámetro más importante es el oxígeno porque nos dirá cuánto aire en exceso estamos introduciéndole a la caldera.

Para entender un poco lo que se está proponiendo hacer vamos a usar un ejemplo dónde se han tomado los siguientes datos de la caldera:

Tabla 2.5 Ejemplo. Valores medidos de los gases de combustión de la caldera

	Medido
O ₂	3.5%
CO ₂	9.7%
CO	2 ppm

En este ejemplo vamos a decir que la empresa nos pide otros valores de gases de combustión.

Tabla 2.6 Ejemplo. Valores comisionados

	Fuel Rico	Valor Comisionado	Aire Rico
O ₂	2.8%	3.0%	3.4%
CO ₂	10.2%	10.0%	9.7%

CO	8 ppm	5 ppm	0 ppm
----	-------	-------	-------

El equipo lo que hará es hacer una comparación entre lo medido y lo que queremos, y lo hará por medio de interpolación lineal. Se grafica los puntos deseados en nuestra gráfica, y por medio de interpolación nosotros vemos cuánto hay que cerrar o cuánto hay que abrir el damper de aire

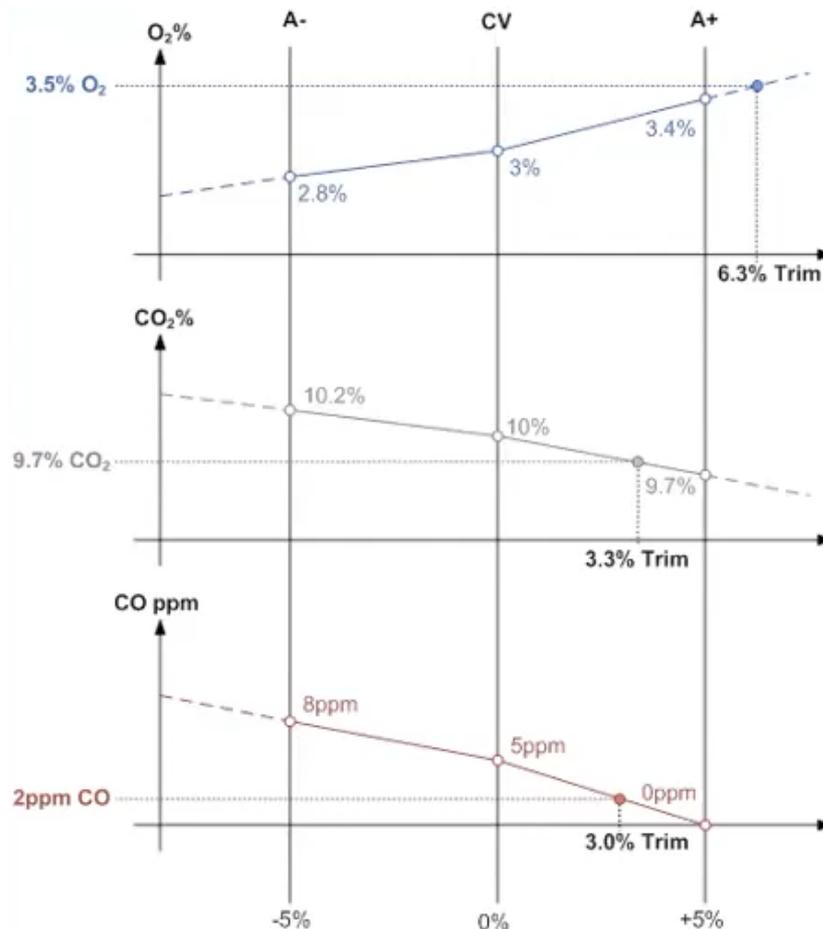


Figura 2.2 Ejemplo. Gráficas con interpolación

Estas gráficas son realizadas por el mismo equipo. En ellas podemos darnos cuenta que, en el caso del oxígeno, se requiere un 3% y el tener un 3.5% el equipo determina que se debería cerrar el damper de aire un 6.3%. Para el caso del dióxido de carbono, se requiere un 10% y en la actualidad se tiene un 9.7% por lo tanto el equipo determina que se debería cerrar el damper de aire un 3.3%.

Asimismo para el monóxido de carbono se quiere 5 ppm pero se tiene 2 ppm y el equipo determina que se debería cerrar el damper de aire un 3.0%.

La pregunta que nos surge ahora es: Si el equipo ha determinado 3 porcentajes para cerrar el damper de aire entonces ¿cuánto debo cerrarlo exactamente? Para responder esta pregunta, se realiza un cálculo de la media aritmética tomando en cuenta que entre estos 3 el mayor peso va a recaer sobre el porcentaje calculado con el oxígeno.

Tabla 2.7 Ejemplo. Cálculo de corrección del aire

	Corrección Inicial	“Peso”	Corrección Final
O ₂	-6.3%	1.5	-9.4%
CO ₂	-3.3%	1.0	-3.3%
CO	-3.0%	1.0	-3.0%
Subtotal		3.5	-15.7%
Corrección del aire			-4.5%

Como podemos darnos cuenta, al momento de hacer el cálculo leemos multiplicado al oxígeno con un factor de 1.5 para darle mayor peso a la corrección tomada por él. Así mismo, al momento de hacer la media aritmética, la división no será dispuesta para 3 si no para 3.5 con eso nos da un resultado de que se debe cerrar el damper de aire en un 4.5%.

El equipo realiza esta corrección de manera continua según lo que se haya configurado podría ser cada 30 segundos. O sea que cada 30 segundos el equipo tomará datos y hará esa comparación para calcular qué tanto se debe abrir o cerrar el damper de aire.

2.3.3 Encendido del quemador

Algo que también se analizó es cómo se está encendiendo el quemador. nuestro sistema de control debe estar diseñado para darle un arranque al quemador de tal manera que cumpla con las especificaciones dadas.

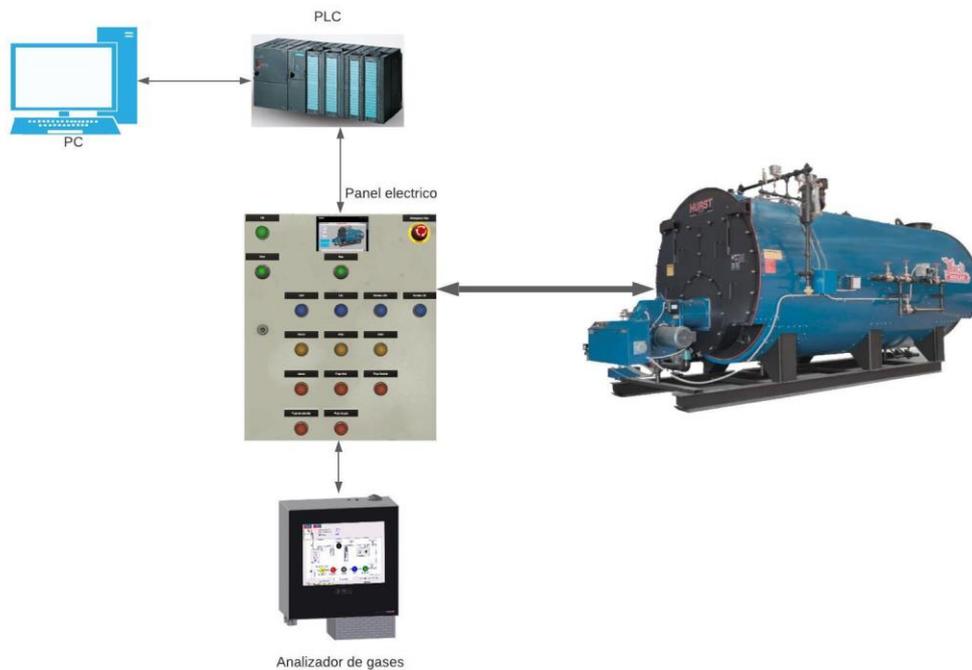
Para esto, lo primero que necesitamos establecer es cuál sería la secuencia del quemador. Esta secuencia está definida de tal manera que no haya ninguna falla en cuanto a la seguridad de nuestra caldera. La secuencia de encendido sería la siguiente:

1. El sistema debe asegurarse que todas las conexiones de la seguridad de la caldera están funcionando correctamente
2. Se enciende el ventilador y se abre la compuerta para que pueda entrar aire a la cámara de la caldera. Se verifica por medio del medidor de presión que se haya a la salida del ventilador. Para el encendido se abre la compuerta a un 100%, pero una vez que se haya estabilizado se la dejará semiabierta.
3. Se enciende la chispa de encendido por medio de una bobina y se abren las válvulas piloto para el ingreso de gas, generando la llama piloto.
4. Una vez que sea generado esta llama se desactiva la chispa de encendido, se cierran las válvulas de gas y se activan las válvulas para el ingreso de combustible. Como en un principio la caldera está completamente fría, las válvulas para el ingreso de combustible se abren al 100%. De esta manera la caldera llegará su punto de operación.
5. Cuando la caldera haya llegado a su punto de operación, la compuerta del ingreso de combustible quedará semiabierta para que pueda dar el combustible necesario para trabajar como se debe.
6. De aquí en adelante, se controla la caldera por medio de los procesos descritos anteriormente.

2.4 Arquitectura del proyecto

Es necesario que todo esto esté comandado por un cerebro. Para esto hemos propuesto utilizar el PLC de Siemens S7 – 1200. Se ha escogido este PLC por su bajo costo pero muy útil para varias aplicaciones. La programación de este PLC lo hemos realizado por medio del programa TIA Portal V16.

La arquitectura de control que se usará para este proyecto será de control distribuido siendo el PLC dicho anteriormente el maestro de la red, del cual se comandará todo el sistema de la caldera. A él estará conectado todos los sensores, los actuadores y el analizador de gases MK 8 EGA. Para realizar la conexión de todos los sensores y actuadores con el PLC se propone tener un panel eléctrico para tener un mayor orden al momento de conectar a todo lo que está en la caldera.



Plano 3 Arquitectura de red

2.5 Programación del PLC

Lo primero que debemos tener en cuenta para realizar la programación en el PLC es analizar cuáles van a ser las variables de entrada y de salida del PLC. en otras

palabras, qué es lo que el PLC va a leer y qué es lo que va a controlar. Para hacer este análisis nosotros nos vamos a valer del diagrama P&ID que hemos realizado en un inicio de esta sección. Con eso nosotros nos podemos dar cuenta que existen 2 tipos de variables que el PLC estará manejando, estas son variables digitales y variables analógicas. En las siguientes tablas, vamos a ver Cuáles son estas variables específicamente:

Tabla 2.8 Entradas digitales a manejar del PLC

Tipo de variable	Dirección	Descripción
Entrada digital	I0.0	Botón de emergencia
Entrada digital	I8.0	Varilla de alto nivel en la caldera
Entrada digital	I8.1	Varilla de muy bajo nivel de agua en la caldera
Entrada digital	I8.2	Contacto de magnetrol para alto nivel de agua
Entrada digital	I8.3	Contacto de magnetrol para bajo nivel de agua
Entrada digital	I8.4	Presostato de muy alta presión
Entrada digital	I8.5	Presostato de alta presión
Entrada digital	I8.6	Presostato de presión de trabajo
Entrada digital	I8.7	Relé térmico de motor de bombas de agua de caldera
Entrada digital	I9.0	Relé térmico de motor de ventilador
Entrada digital	I9.1	Emergencia doble
Entrada digital	I9.2	Emergencia doble
Entrada digital	I9.3	Encendido de caldera

Entrada digital	I9.4	Inicio de arranque de caldera
Entrada digital	I17.0	Indicador de flujo de aire
Entrada digital	I17.1	Presostato de baja presión de ingreso de búnker
Entrada digital	I17.2	Presostato de alta presión de ingreso de bunker
Entrada digital	I17.3	Termostato de baja temperatura de bunker
Entrada digital	I17.4	Termostato de alta temperatura de bunker, problemas de explosiones
Entrada digital	I17.5	Presostato de baja presión de búnker antes de válvula de control
Entrada digital	I17.6	Presostato de baja presión de bunker final, ingreso de quemador
Entrada digital	I17.7	Presostato de baja presión de ingreso de aire de atomización
Entrada digital	I18.0	Presostato de baja presión final de aire de atomización
Entrada digital	I18.1	Presostato de baja presión final, ingreso de gas piloto (ignición)

Entrada digital	I18.2	Presostato de baja presión de ingreso de gas para ignición
-----------------	-------	--

Tabla 2.9 Salidas digitales a manejar del PLC

Tipo de variable	Dirección	Descripción
Salida digital	Q0.1	Indicador de emergencia
Salida digital	Q28.0	Indicador de muy bajo nivel de agua de caldera
Salida digital	Q28.1	Indicador de alto nivel de agua de caldera
Salida digital	Q28.2	Indicador de apertura de agua de caldera
Salida digital	Q28.3	Indicador de corte de ingreso de agua para caldera
Salida digital	Q28.4	Indicador de muy alta presión
Salida digital	Q28.5	Indicador de alta presión
Salida digital	Q28.6	Indicador de flujo de aire en el hogar de la caldera
Salida digital	Q28.7	Indicador de llama encendida
Salida digital	Q29.0	Indicador de presión de búnker en la entrada
Salida digital	Q29.1	Indicador de temperatura baja en el búnker
Salida digital	Q29.2	Indicador de baja presión de entrada de aire de atomización
Salida digital	Q29.3	Indicador de baja presión de gas de ignición

Salida digital	Q29.4	Válvula solenoide de ingreso de gas a ignición 1
Salida digital	Q29.5	Válvula solenoide de ingreso de gas a ignición 2
Salida digital	Q29.6	Activación de ventilador
Salida digital	Q29.7	Electrodo de ignición
Salida digital	Q32.0	Válvula de seguridad de ingreso de bunker 1
Salida digital	Q32.1	Válvula de seguridad de ingreso de bunker 2
Salida digital	Q32.2	Válvula de recirculación de ingreso de bunker 3
Salida digital	Q32.3	Válvula de aire de atomización

Tabla 2.10 Entradas analógicas a controlar del PLC

Tipo de variable	Dirección	Descripción
Entrada analógica	IW128	Medidor de nivel de agua por presión diferencial
Entrada analógica	IW130	Indicador de la presión interna de caldero en operación
Entrada analógica	IW132	Presión de salida de vapor de agua de la caldera
Entrada analógica	IW134	Medidor de flujo de vapor salida de caldera
Entrada analógica	IW136	Sensor de llama de quemador

Entrada analógica	IW138	Medidor de flujo de bunker a caldera
Entrada analógica	IW140	Presión de ingreso de agua
Entrada analógica	IW144	Emisiones de CO en gases de chimenea
Entrada analógica	IW146	Emisiones de O2 en los gases de chimenea
Entrada analógica	IW148	Emisiones de CO2 en los gases de chimenea
Entrada analógica	IW160	Temperatura de gases de chimenea
Entrada analógica	IW162	Temperatura de vapor de agua a la salida
Entrada analógica	IW164	Temperatura de agua al ingreso de caldera

Tabla 2.11 Salidas analógicas a controlar del PLC

Tipo de variable	Dirección	Descripción
Salida analógica	QW208	Válvula de control de ingreso de búnker
Salida analógica	QW210	Control de damper para regulación de aire

Con todas estas variables de entradas y salidas analógicas y digitales se procede a realizar la programación del PLC por medio del programa TIA Portal de Siemens.

Tomando en cuenta lo que se habló en el capítulo 1 y lo mencionado en el apartado 2.3.2, nos daremos cuenta que al modificar el valor del ingreso de aire a la caldera va a variar el valor de lambda, lo cual puede afectar al proceso de combustión. Así

que en nuestra programación buscaremos mantener un lambda fijo, para tener una combustión lo más ideal posible. Sabiendo que en la vida real lo ideal no existe y que normalmente una combustión tiene un lambda mayor que uno (combustión rica en aire y pobre en combustible) buscaremos un lambda que sea amigable con el medio ambiente y al mismo tiempo que nos dé una combustión óptima.

Eso significa que necesitamos conocer en qué valores de porcentaje de cada uno de los gases vamos a tener lambda fijo. Para esto es necesario realizar ciertas mediciones con el analizador de gases, buscando mantener este valor constante mientras variamos el resto de los parámetros.

Para realizar estas mediciones vamos a buscar que la caldera trabaje en cierto porcentaje de su potencia. Esto significa que veremos cuánto este aire y de combustible será necesario introducir a la caldera para que ésta trabaje a un porcentaje del 50%, por ejemplo. Con esta potencia medimos la emisión de los gases de la caldera. Así obtendremos algunos puntos de operación, de tal manera que si yo le digo a la caldera que necesita trabajar con un lambda fijo de 1.07 con una potencia del 50% sabremos cuánto aire y combustible estará ingresando la caldera y así mismo conoceremos las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono y oxígeno que están saliendo por la chimenea de la caldera.

Eso nos va a ayudar a que, en el momento de programar, vamos a tener una pequeña base de datos con todos estos puntos de operación para que en un futuro cuando le digamos a la caldera que debe trabajar a cierto porcentaje de potencia buscando tener este lambda fijo, el programa abrirá las válvulas tanto de aire como de combustible para obtener esa potencia.

Teniendo en cuenta esta lógica se ha procedido a realizar este programa que se adjunta en el Apéndice A. Así mismo como ya hemos mencionado anteriormente, tratamos de buscar la facilidad del usuario para que pueda manipular todos esos parámetros y pueda controlar la caldera. Para eso también se ha diseñado una pantalla HMI que lo encontraremos en el Apéndice B.

2.6 Simulación en Simulink

Como se ha mencionado anteriormente la corrección de los puntos de operación se lo realiza por medio del analizador de gases, pero al no tenerlo adquirido hemos realizado una simulación de la caldera. Esta simulación está realizada dentro del programa de Matlab, en la extensión de Simulink. La idea es realizar un cálculo del valor de lambda y el porcentaje de la composición de los gases de combustión para de esa manera poder controlar el ingreso de combustible dependiendo de esos gases.

Para la simulación dentro del Simulink hemos realizado algunos cálculos que dependen de las ecuaciones mencionadas en el capítulo uno. Entre estas ecuaciones tenemos el cálculo del oxígeno en función del exceso de aire porcentual, el cual se despeja de las ecuaciones 1.6 y 1.7 dando como resultado la siguiente ecuación:

$$O_2 = \frac{21}{(n - n_e)(1 - k)} \frac{n_e - n}{1}$$

Ecuación 2.1 Cálculo del oxígeno en función del exceso de aire

Con esto debemos de tener en cuenta que la ecuación general que tenemos de la combustión en las calderas (Ecuación 1.2) debe ser igualado. En otras palabras, necesitamos calcular los valores de X_1 , X_2 , X_3 , X_4 y X_5 . Para realizar este cálculo vamos a usar la ecuación 1.5 y la ecuación que acabamos de calcular (ecuación 3.1). Realizando los despejes respectivos, tenemos como resultado lo siguiente:

$$X_1 = \frac{12 \cdot a}{\lambda}$$

Ecuación 2.2 Cálculo de X_1

$$X_2 = \left[0.21n - \left(X_1 + X_3 + \frac{X_4}{2} \right) \right]$$

Ecuación 2.3 Cálculo de X_2

$$X_3 = \frac{21}{100} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda - 0.06} \cdot n_e$$

Ecuación 2.4 Cálculo de X₃

$$X_4 = 12a \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)$$

Ecuación 2.5 Cálculo de X₄

$$X_5 = 13a - X_2$$

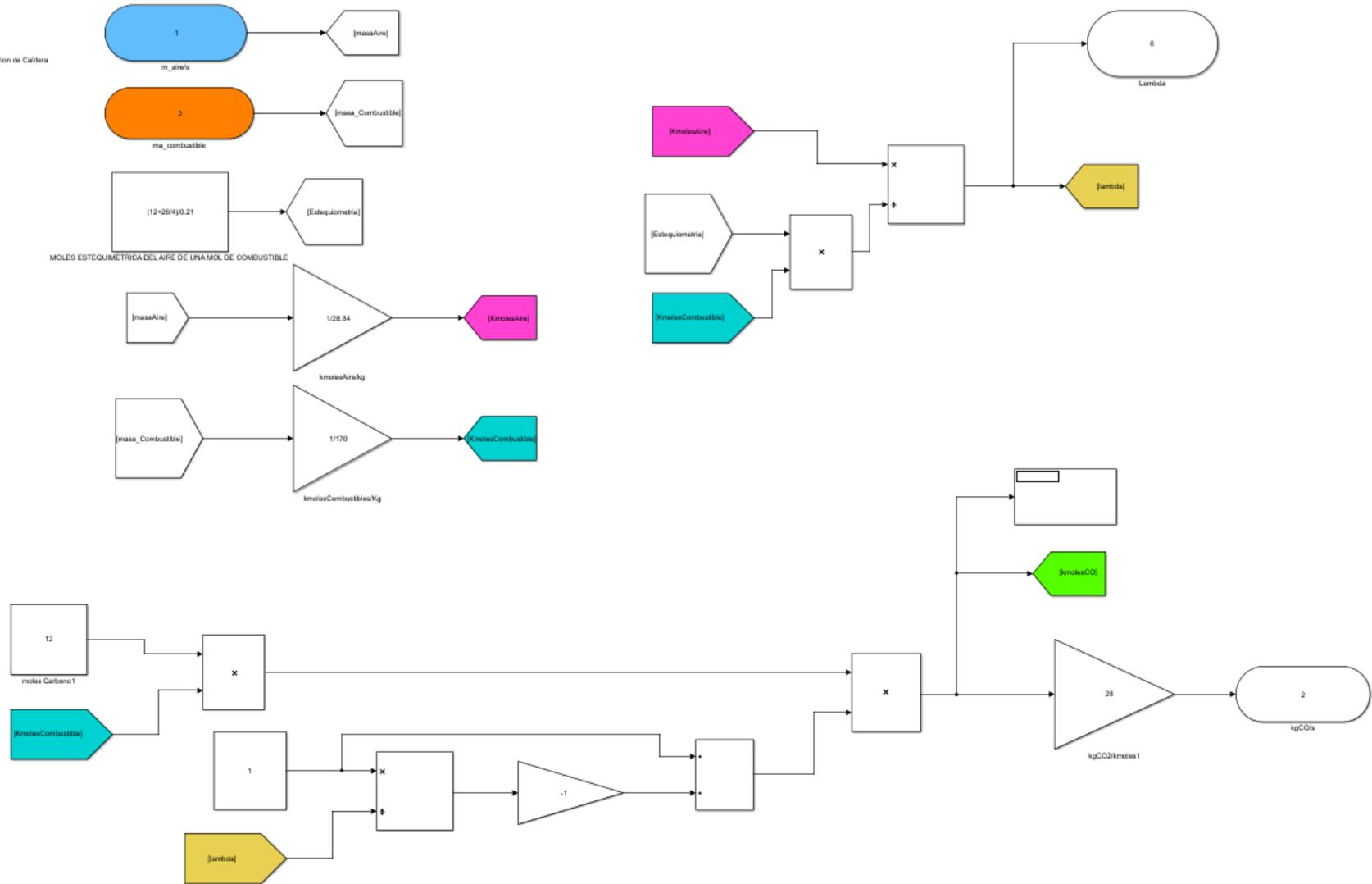
Ecuación 2.6 Cálculo de X₅

Estas ecuaciones lo que nos están diciendo es que los gases que surgen como resultado de la combustión van a depender del valor de lambda. En otras palabras, a medida que vayamos lambda, también variará la cantidad de gases que se está emitiendo.

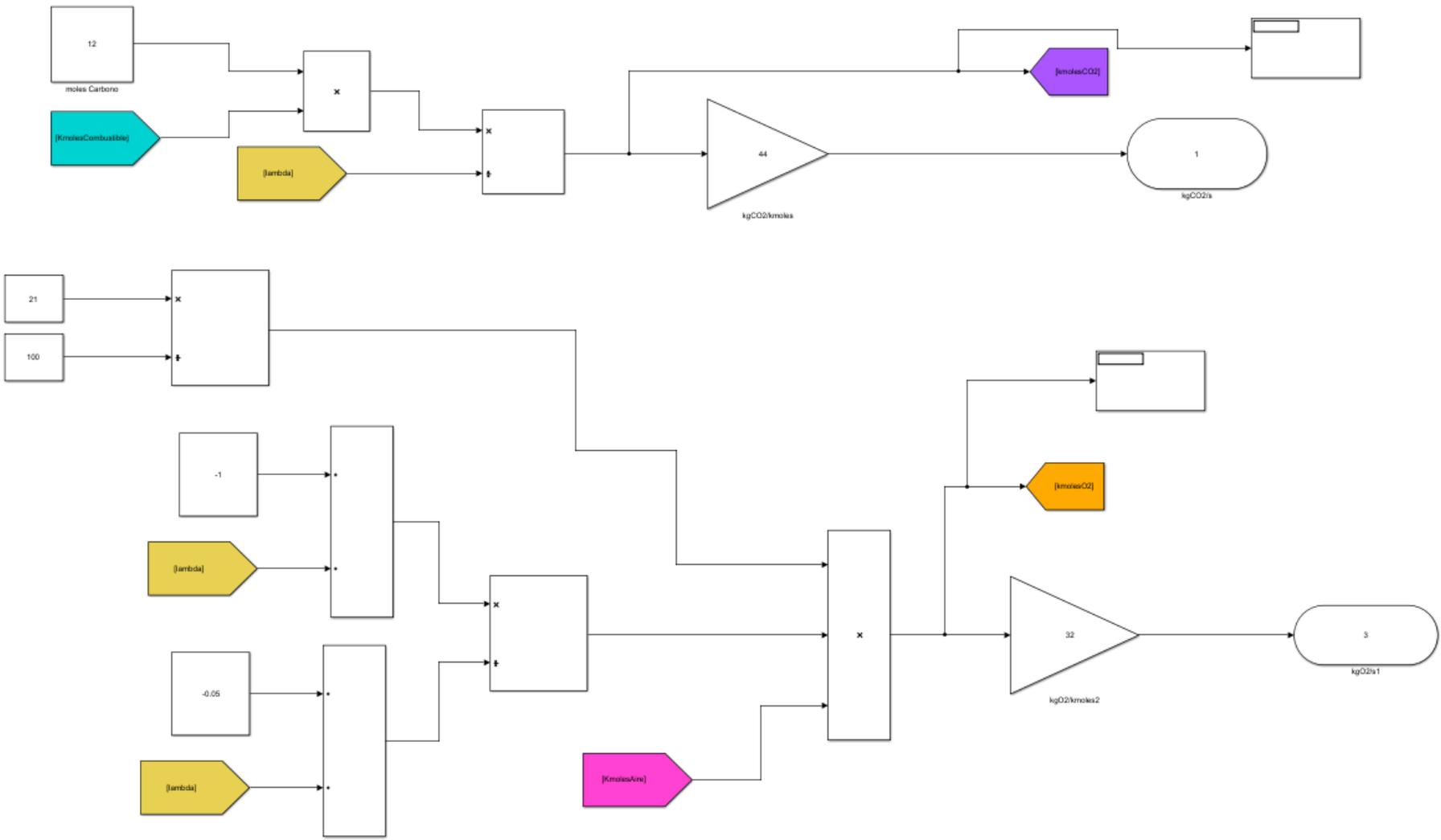
Con todas estas ecuaciones nosotros podemos realizar la simulación en Simulink por medio de diagramas de bloques lo cual presentamos a continuación. Aquí nosotros podemos ver que para realizar el cálculo de la cantidad de gases de combustión se usan todas estas ecuaciones tomando como entradas la cantidad de aire y la cantidad de combustible que se está ingresando a la combustión.

En el programa, para tener un mayor orden, sea encapsulado todo este diagrama de bloques en un subsistema reduciendo así el tamaño de la programación principal, algo que podemos ver en la figura 3.2. En ella estamos ingresando los valores tanto de aire como de combustible de manera manual, y teniendo en cuenta la ecuación de la combustión que está ingresado en el subsistema nosotros podemos ver de manera puntual los valores solicitados de cada uno de los gases existentes en la combustión.

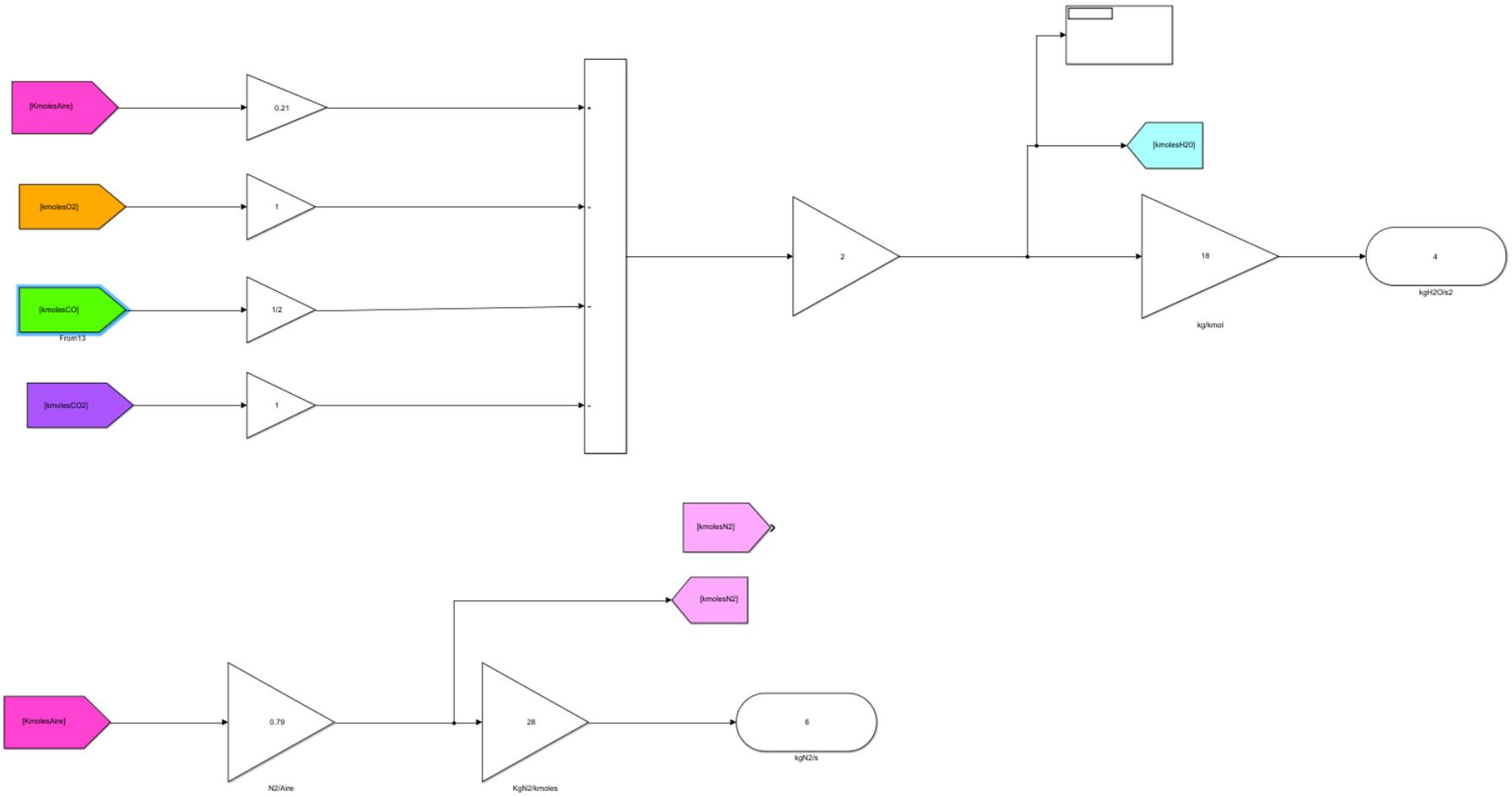
Proyecto Integrador
 Simulación Combustión de Caldera
 Andres Fernandez
 Victor Rocano



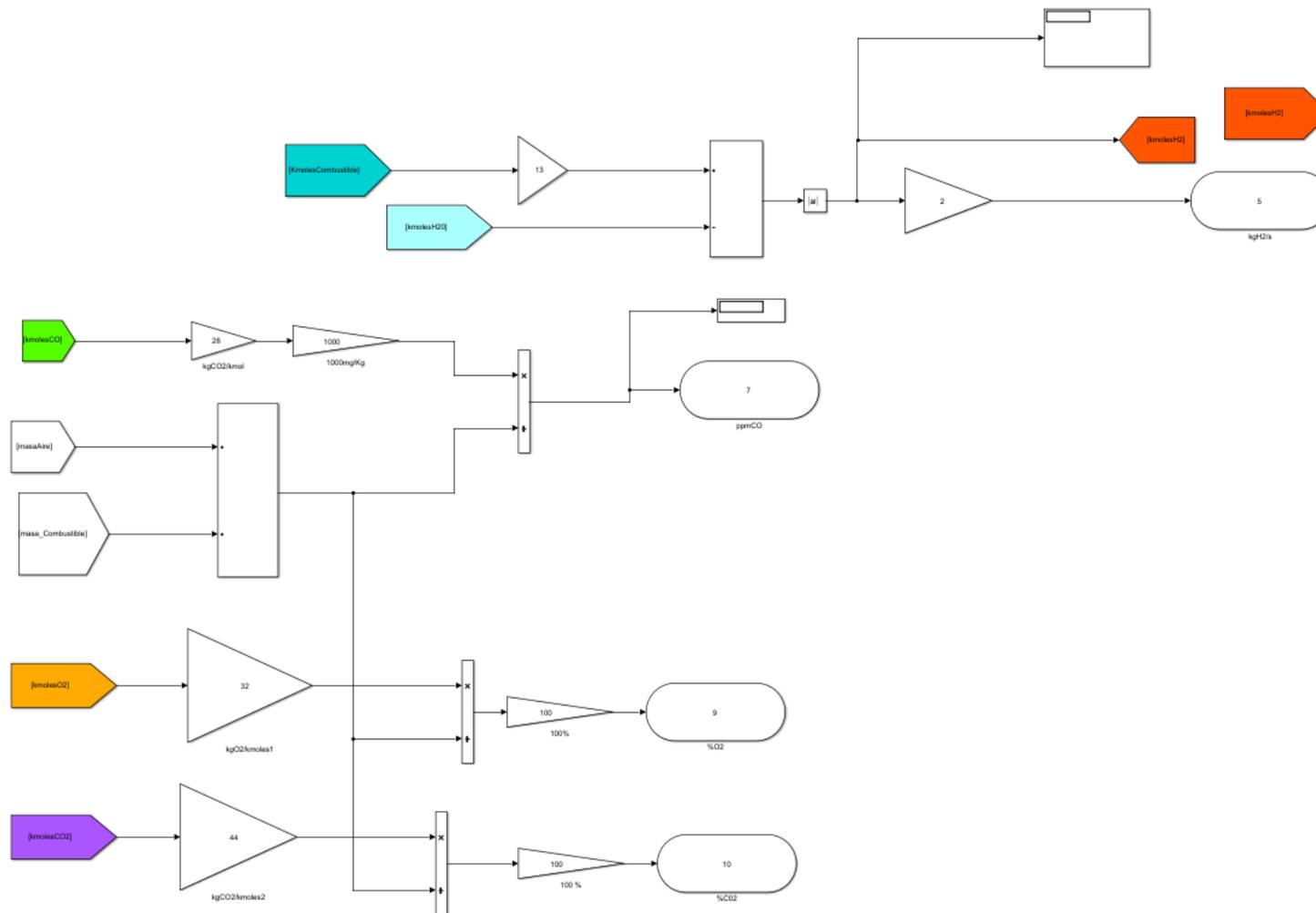
Plano 4 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 1



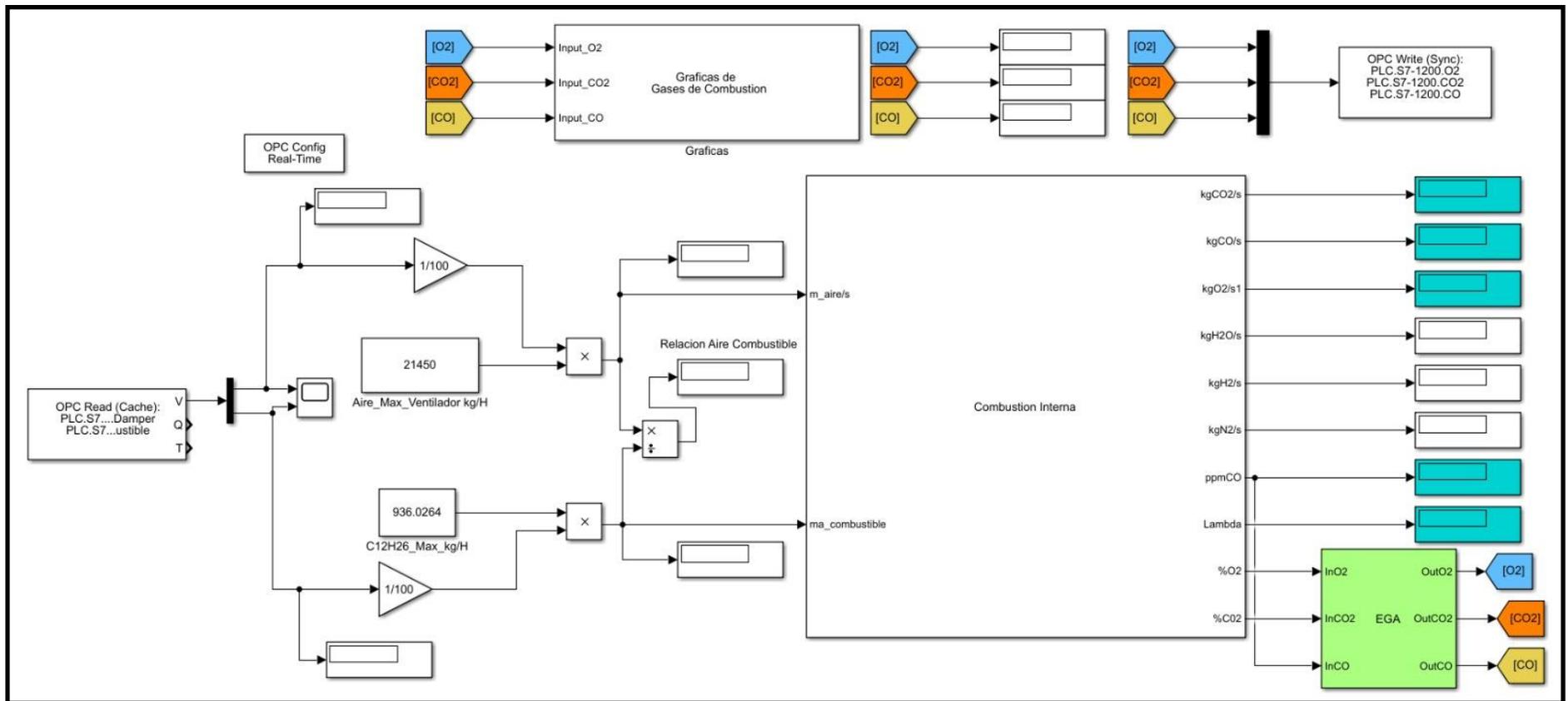
Plano 5 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 2



Plano 6 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 3



Plano 7 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 4



Plano 8 Diagrama de bloques de la combustión en Simulink. Parte 5

2.7 Conexión al sistema distribuido DeltaV

Como ya hemos mencionado anteriormente la idea de nuestro proyecto es realizar una red que pueda conectarse al sistema DeltaV de la fábrica. Al tener una red basada en Siemens es necesario buscar la manera de conectar esta red al sistema distribuido DeltaV. Para eso Emerson ha creado ciertos módulos para la conexión mencionada.

El módulo que se usaría es el Módulo 2 de E/S virtuales (VIM2), el cual provee una interfaz para redes Ethernet I/O y para dispositivos que se usen, como los controladores de protocolo Modbus TCP o Ethernet/IP, protocolos que maneja la tecnología de Siemens.

Cuando este módulo es conectado y se lo usa para una conexión ethernet el controlador DeltaV va a detectar automáticamente que este módulo VIM2 ha sido puesto en servicio



Figura 2.3 Módulo 2 de E/S virtuales serie S DeltaV

2.7.1 Características del Módulo 2 de E/S virtuales serie S DeltaV

Según la página web del fabricante Emerson, las principales características de este módulo son las siguientes:

- Ofrece una simulación completamente no intrusiva de todos los módulos de E/S serie S DeltaV
- Ofrece simulación de todos los buses digitales DeltaV™ y de bloques funcionales FOUNDATION Fieldbus
- Ofrece una simulación completa de hasta 64 módulos de E/S DeltaV™ por controlador
- Emula cuatro tarjetas seriales DeltaV™ y admite hasta 128 conjuntos de datos de tarjetas seriales de información, de hasta 128 dispositivos de red

en simplex y 256 en instalaciones simplex dobles, además de 16 dispositivos en instalaciones redundantes

- La asignación de direcciones IP configurable por el usuario permite utilizar VIM2 en prácticamente cualquier entorno de planta, más allá del esquema de conexión en red
- VIM2 es fácil de usar y está bien integrado en el sistema DeltaV
- La aplicación VIMNet Explorer ofrece la capacidad plug and play para que la instalación de VIM2 sea fácil e intuitiva
- El diseño avanzado de VIM2 ofrecerá años de uso ininterrumpido

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como hemos mencionado en el capítulo anterior, a medida que se varía la cantidad de aire y de combustible ingresado a la caldera va a variar las emisiones de gases y así mismo el valor de lambda. En el capítulo anterior también habíamos analizado por medio de algunas fórmulas que las emisiones de estos gases dependen del valor de lambda. La pregunta que nos debe surgir ahora es, a medida que voy variando el valor de lambda ¿qué tanto varía la cantidad de gases que existen como producto de esta combustión?

En nuestra simulación de Simulink, lo que deberíamos hacer es ir variando poco a poco la cantidad de combustible y de esa manera ir tomando nota sobre la cantidad de cada uno de los gases que surgen del producto de la combustión. Con estos datos podríamos hacer unas gráficas, las cuales las realizamos en un script de Matlab. En el Apéndice C encontraremos la programación de este script. Las gráficas obtenidas son las siguientes:

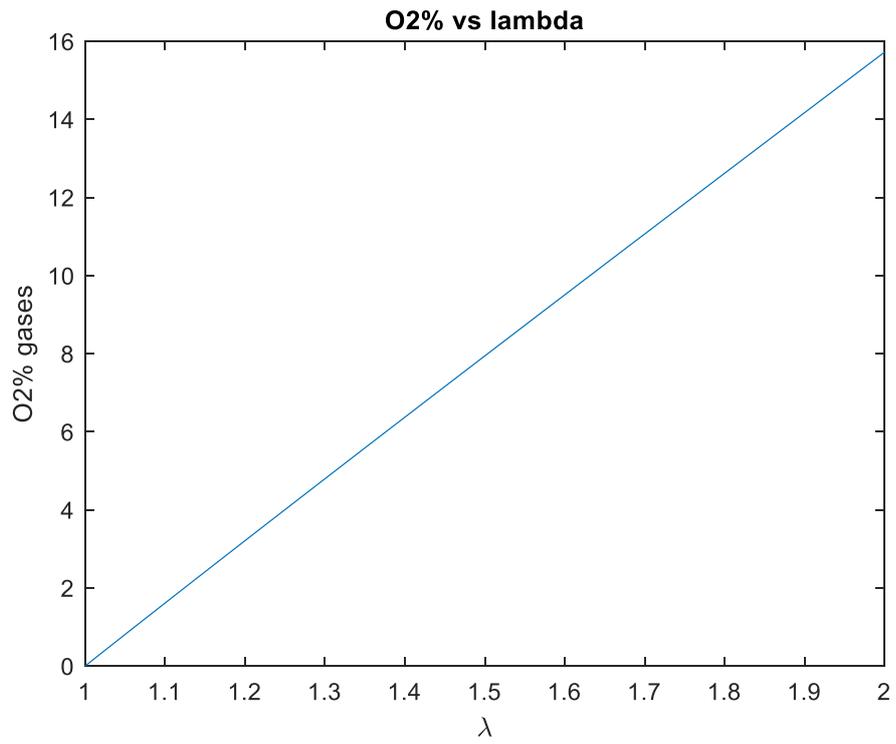


Figura 3.1 Gráfica Oxígeno vs Lambda

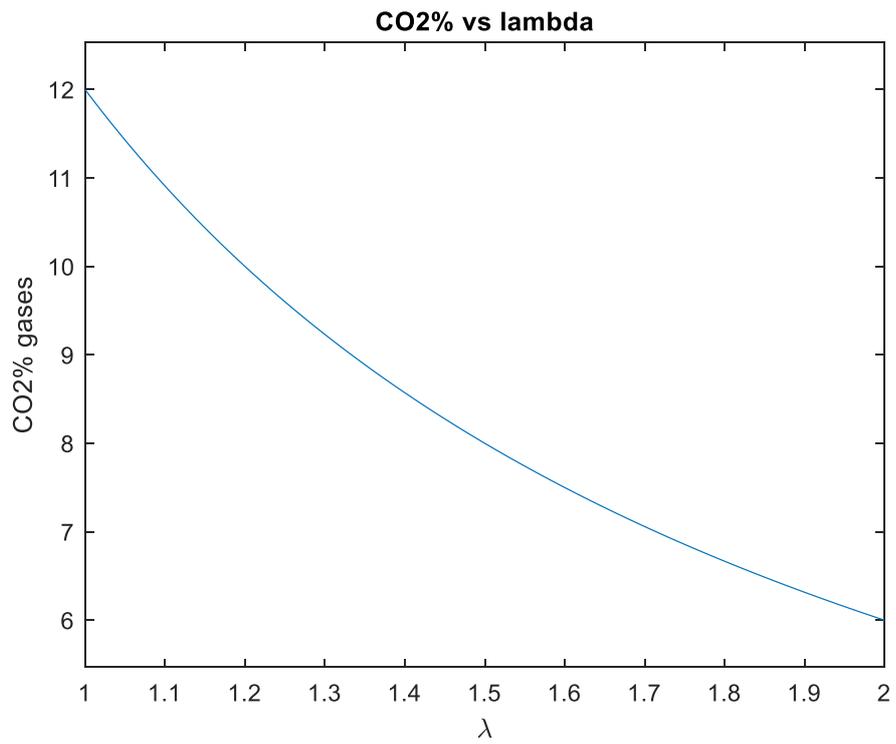


Figura 3.2 Gráfica Dióxido de carbono vs Lambda

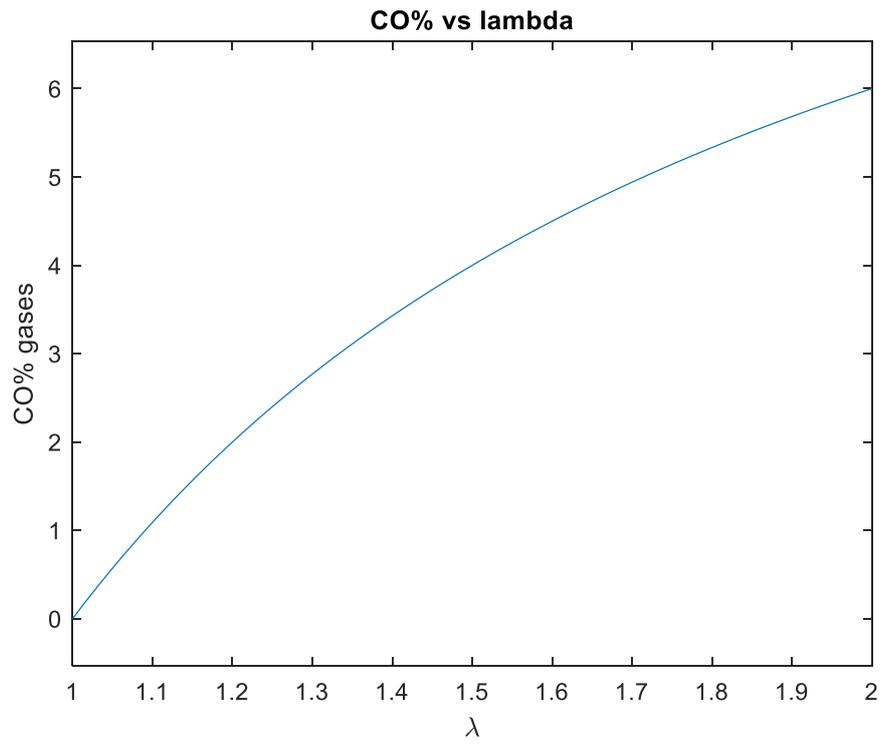


Figura 3.3 Gráfica Monóxido de carbono vs Lambda

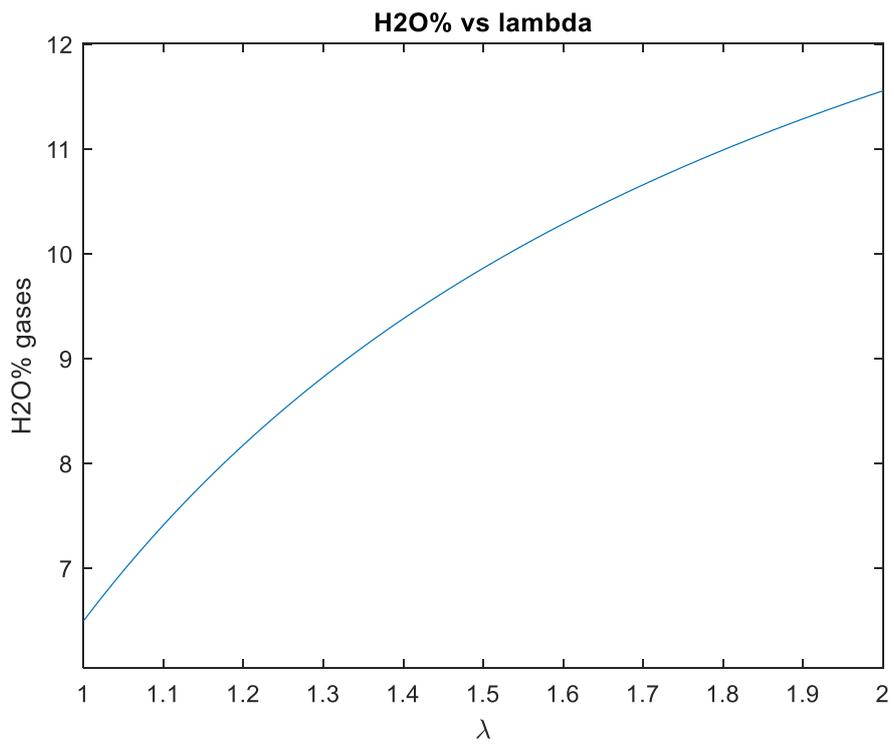


Figura 3.4 Gráfica Vapor de agua vs Lambda

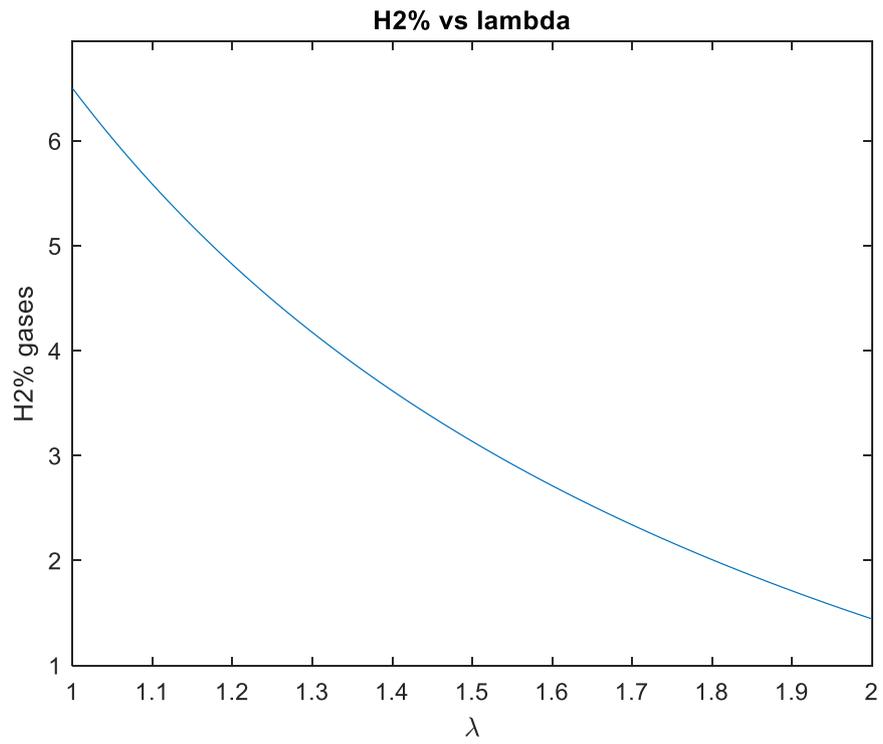


Figura 3.5 Gráfica Hidrogeno vs Lambda

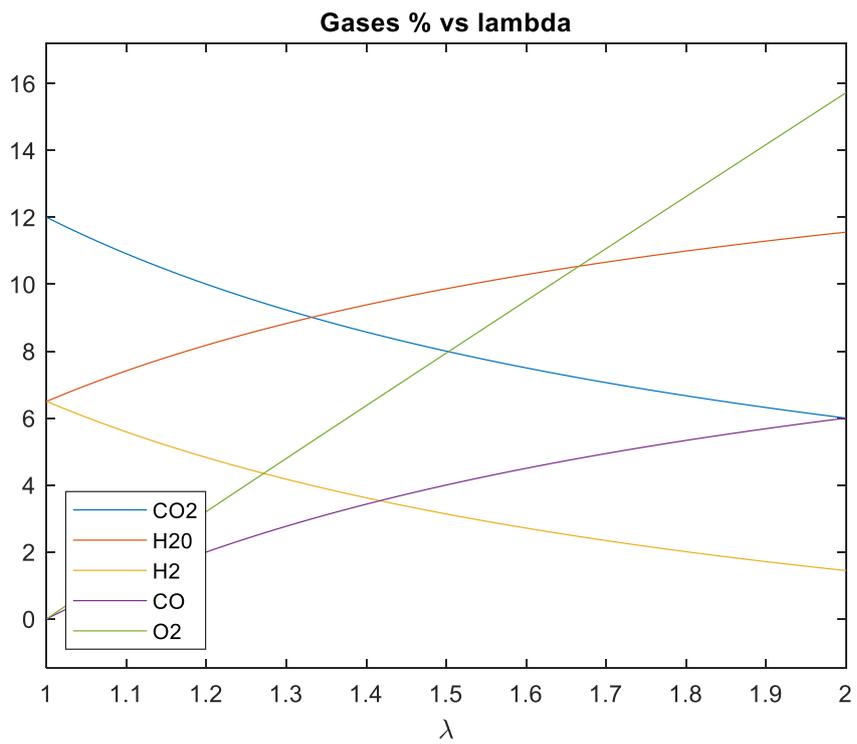


Figura 3.6 Gráfica de todos los gases vs Lambda

La última gráfica que tenemos es la unión de todos los gases en una sola gráfica para hacer una comparación entre ellas. En esta gráfica podemos darnos cuenta de algo importante y es que a medida que se va variando el valor de lambda también va a ir variando la cantidad de gases que existen como producto de la combustión. Como podemos darnos cuenta, si lambda es más pequeño vamos a tener mayor dióxido de carbono, mayor hidrógeno, pero disminuirá los valores de monóxido de carbono, de oxígeno y de vapor de agua. Mientras que si lambda es mayor el oxígeno va a aumentar junto con el monóxido de carbono y el vapor de agua, pero los valores de dióxido de carbono e hidrógeno disminuirán.

Recordando lo que representa el valor de lambda, podemos decir que a medida que le aumentamos el valor de combustible teniendo constante en el aire el valor de lambda irá disminuyendo, acercándose a uno, y al llegar a valor a uno podemos decir que tenemos una combustión ideal, y de esa manera nosotros podemos optimizar la combustión que queremos.

Pero existe un factor que debemos tener en cuenta, ese factor es el factor ambiental. se supone que nuestro proyecto debería ayudar a este factor disminuyendo la cantidad de dióxido de carbono producida por esta combustión. para realizarlo entonces debemos de buscar el valor de lambda más efectivo, por así decirlo, para no emitir demasiado dióxido de carbono pero que al mismo tiempo sea una combustión aceptable.

Para hacer una comparación entre los valores de lambda teniendo en cuenta que buscamos un valor aceptable, hemos realizado mediciones con 3 distintos valores de lambda. Estas mediciones las encontramos en las siguientes tablas:

Tabla 3.1 Mediciones realizadas con un valor de Lambda de 1.01

	Lambda = 1.01							
Potencia de Caldera %	115	100	90	80	70	60	50	10
Fuel (%Valvula)	100	86.96	78.26	69.57	60.87	52.17	43.48	8.70
Aire(%Damper)	65.77	57.19	51.47	45.76	40.04	34.31	28.60	5.72
O2%	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19
CO2%	19.16	19.16	19.16	19.16	19.16	19.16	19.16	19.18

CO ppm	1.03	1.03	1.03	1.04	1.05	1.03	1.05	0.99
Aire/Combustible	15.07	15.07	15.40	15.07	15.07	15.07	15.07	15.07

Tabla 3.2 Mediciones realizadas con un valor de Lambda de 1.07

	Lambda = 1.07							
Potencia de Caldera %	115	100	90	80	70	60	50	10
Fuel (%Valvula)	100	86.96	78.26	69.57	60.87	52.17	43.48	8.70
Aire(%Damper)	69.77	60.67	54.60	48.54	42.47	36.40	30.33	6.07
O2%	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
CO2%	17.09	17.09	17.09	17.09	17.09	17.09	17.09	17.09
CO ppm	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59
Aire/Combustible	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00

Tabla 3.3 Mediciones realizadas con un valor de Lambda de 1.13

	Lambda = 1.13							
Potencia de Caldera %	115	100	90	80	70	60	50	10
Fuel (%Valvula)	100	86.96	78.26	69.57	60.87	52.17	43.48	8.70
Aire(%Damper)	73.77	64.15	57.73	51.32	44.90	38.49	32.06	6.42
O2%	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.71	2.725
CO2%	15.34	15.34	15.34	15.34	15.34	15.33	15.35	15.33
CO ppm	12.80	12.80	12.79	12.80	12.79	12.81	12.76	12.83
Aire/Combustible	16.91	16.91	16.90	16.90	16.90	16.91	16.90	16.91

Como podemos darnos cuenta en estas 3 tablas vemos que cuando tenemos un valor de lambda fijo, aun cuando variamos la apertura de la válvula de combustible y del damper de aire, las emisiones de gases se mantienen constantes también. Además podemos comprobar que a medida que se aumente el valor de lambda las emisiones de CO 2 disminuyen.

En el capítulo anterior nosotros habíamos mencionado que la manera en cómo el analizador de gases realiza la corrección de la apertura de las válvulas es por medio de la interpolación de los puntos de operación. Al tener ahora un caso real con nuestra caldera, vamos a tomar estos 3 valores de lambda como aquellos puntos que el analizador de gases usaría para realizar la interpolación.

En otras palabras, tomaremos el valor de lambda de 1.07 como el valor fijo en el cual va a funcionar nuestra caldera. Con esto tendremos una emisión de oxígeno de 1.53%, una emisión de dióxido de carbono de 17.09% y 7.59 ppm de monóxido de carbono.

Algo que debemos tener en cuenta es que toda caldera al ser un equipo en el cual se realiza una combustión es un equipo contaminante, pero al tener un sistema de automatización Podría emitir menos contaminación que es lo que nosotros estamos presentando en esta tesis.

3.1 Ahorro de combustible

Uno de los grandes beneficios que obtiene la empresa al implementar este proyecto sería el ahorro de combustible (bunker). En la actualidad, sin haber implementado el proyecto, el consumo de búnker de la caldera es de 3630 Gal/Dia.

Tomando en cuenta de que la caldera normalmente opera en un 90% de su capacidad, lo que significa que la válvula de combustible estará abierta en un 78.26%, se estima que el consumo de búnker con el sistema implementado será de 2892 Gal/Dia.

Gracias a un proceso de fiscalización realizado por la empresa se ha obtenido gráficos que nos ayudarán entender un poco cuál sería el ahorro del combustible. Usando datos tomados simulación, podemos explicar este ahorro con el siguiente ejemplo:

Se ha hecho la antes del ajuste, obteniendo los siguientes datos:

Oxígeno: 7.1%

Temperatura 222 °C

Monóxido de carbono 0 ppm

Luego del ajuste se han obtenido los siguientes datos:

Oxígeno: 2.9%

Temperatura: 198 °C

Monóxido de carbono: 90 ppm

Con esos datos, podemos compararlos dentro de la siguiente gráfica: cuáles son

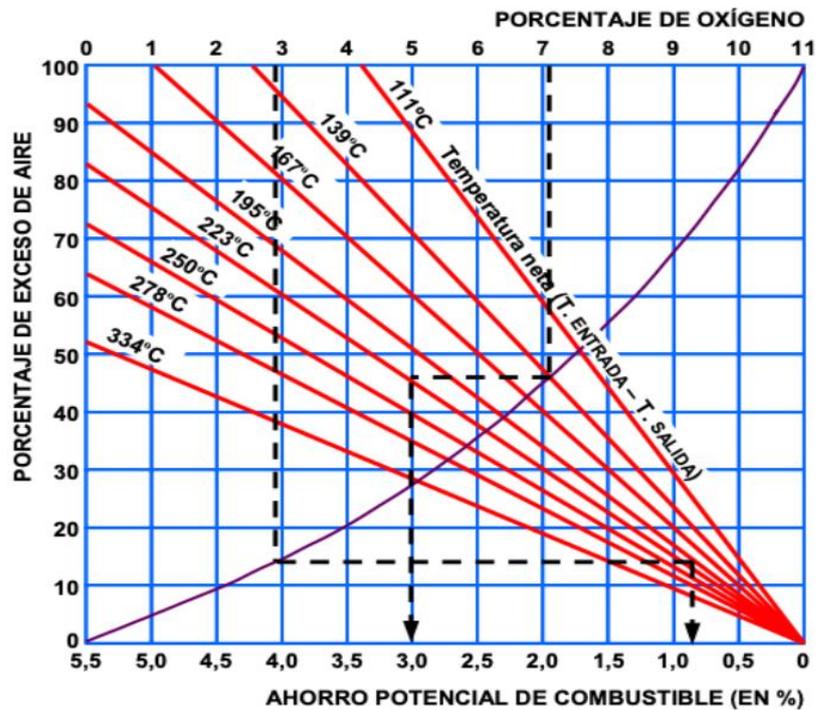


Figura 3.7 Gráfico para el cálculo del ahorro potencial de combustible

En esta gráfica, nos colocamos en el porcentaje inicial de oxígeno del 7% y lo interceptamos con la curva morada la cual es la que se usará para la comparación de los datos para el cálculo respectivo. Ese dato se lo compara con la temperatura medida, en este caso sería de 222 °C dándonos un ahorro del 3%. Pero una vez que se ha hecho el ajuste, y siguiendo los mismos pasos del caso anterior tenemos un ahorro del 0.7%. El cálculo del ahorro potencial del combustible es la resta de estos puntos:

$$3\% - 0.7\% = 2.3\%$$

Esto significa que el ahorro del combustible es del 2.3% gracias al ajuste que tenemos.

Por otro lado, tenemos que con este ajuste también hemos mejorado la eficiencia de la combustión en la caldera. Esto lo podemos corroborar con la siguiente gráfica:

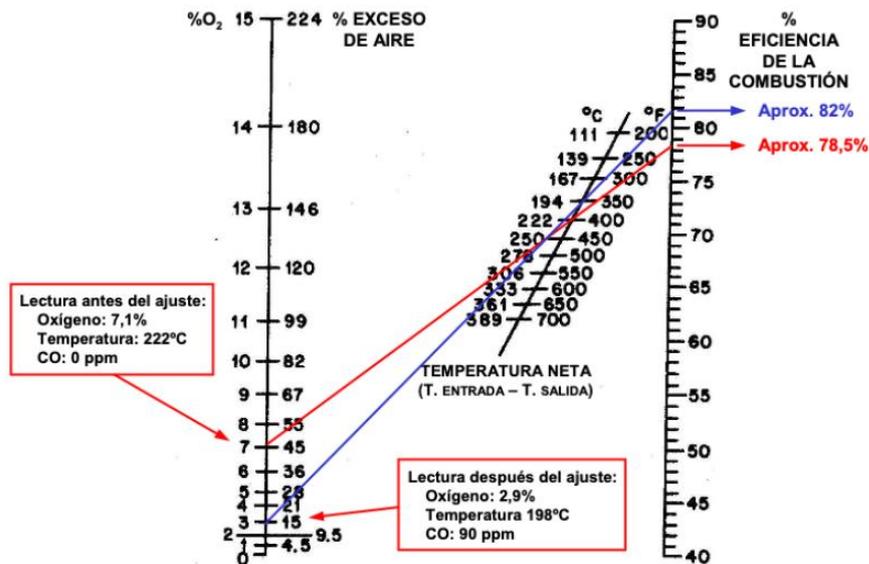


Figura 3.8 Gráfica para el cálculo de la eficiencia de la combustión en la caldera

Como se puede apreciar en la gráfica, al tener el ajuste dado por el sistema automatizado la eficiencia de la combustión aumentado del 78.5% al 82%.

Además, es necesario saber que las calderas que se están pretendiendo automatizar son calderas que se usan para la producción de alcohol. Los registros de la empresa nos dicen que, por cada litro de alcohol, el 50% de gastos es por el combustible. Se estima que al implementar este sistema se puede aumentar la eficiencia de la caldera en un 20%, reduciendo los gastos de producción en un 10%.

3.2 Análisis Económico

Para la implementación de este proyecto es necesario la adquisición de algunos elementos que mencionamos a continuación:

Equipo	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
PLC S7-1215 FC	1	1500	1500
Fuente de alimentación PLC	1	90	90
Analizador de gases MK8 EGA + Sensores para la chimenea	1	25800	25800
Módulo de entradas digitales	2	155.80	311.6
Módulo de entradas analógicas	2	309.87	619.74
Módulo de salidas digitales	1	163.40	163.40
Módulo de salidas analógicas	2	320.91	641.82
Transmisor de nivel	1	141.68	141.68
Transmisor de flujo	2	474.58	949.16
Transmisor de presión	9	171.00	1539
Transmisor de temperatura	2	73.00	146.00
Pantalla HMI Confort Panel	1	474.66	474.66
Ingeniería	1	3500	3500
Total			35877.06

Teniendo en cuenta la ganancia de la empresa podemos, realizar un cálculo del ahorro que nos dará este proyecto. En la actualidad se tienen los siguientes datos:

Tabla 3.4 Datos económicos actuales de la empresa

		Unidades
Capacidad de alcohol por día	160000	lt/día
Días de elaborables	264	días
Costo promedio por litro de alcohol	0.97	dólares
Margen de ganancia sin control de bunker	20%	porcentaje
Porcentaje de gasto en combustible	45%	porcentaje
Ahorro de combustible con control Automático	2.30%	porcentaje

Usando el ejemplo en el cual tenemos un ahorro de 2.3% podemos decir que el cálculo del ahorro monetariamente sería el siguiente:

Tabla 3.5 Cálculo del ahorro por año

		Unidades por Millones
Ingreso Total	40972800	40.97
Gastos excluyendo el combustible	16716902.4	16.72
Gastos de producción sin ahorro	32778240	32.78
Gasto de Combustible sin ahorro	16061337.6	16.06
Gastos de Combustible con ahorro	15579497.5	15.58
Gastos de producción con ahorro	32296399.9	32.30
Nuevo margen de ganancia	21.176	
Ahorro por año	481840.128	0.482

Esto significa que gracias al proyecto tendremos un ahorro de 481 840 USD por año. El cual, si lo proyectamos a largo plazo, en los siguientes 3 años tendremos la siguiente ganancia:

Tabla 3.6 Cálculo de ganancia en los próximos 3 años

	Año 0	Año1	Año2	Año3
Inversión de control de calderas	107631	16144.65	16144.65	16144.65
Ahorro por año	0	481840	481840	481840
Ganancia por año	-107631	358064.35	823759.7	1289455.05

En donde, en el primer año habremos recuperado lo invertido en el proyecto. De ahí en adelante solamente se invertiría en mantenimiento, elevando mucho más nuestra ganancia.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Al realizar este proyecto, vimos necesario como primer paso el realizar un diagrama P&ID de todo lo que se quiere controlar. Esto ya que con el diagrama P&ID podemos saber cuáles van a ser los sensores y actuadores presentes en el sistema. De hecho, estos sensores y actuadores serán las entradas y salidas de nuestro controlador, porque con los sensores nosotros podemos saber cuál es el estado actual de nuestro sistema, mientras que con los actuadores nosotros podemos manipular el sistema.
2. Antes de encontrar los puntos de operación es necesario tener en consideración cuál es el comportamiento de una combustión. Algo que pudimos sí visualizar en los datos que obtuvimos en los puntos de operación es que aun cuando existía una modificación en la apertura de las válvulas tanto de aire como de combustible, el porcentaje de emisión de los gases no variaba. Esto podría sonar un poco raro si no tuviéramos claro que existe el valor de lambda, el cual es un valor muy importante dentro de la combustión. En otras palabras, si una persona quiere automatizar algún sistema en donde se produce una combustión es necesario que esta persona pudiera estudiar y comprender el comportamiento de la combustión.
3. Algo interesante que podemos darnos cuenta al momento de analizar los resultados es que al obtener una combustión lo más cercano a una combustión ideal, esta nos ayuda monetariamente también.
4. Como ya habíamos mencionado desde un principio, y aun en el título de nuestra tesis, se supone que deberíamos realizar este proceso de automatización por medio de un sistema DeltaV, el cual habíamos dicho es de la empresa Emerson. esto se lo dispuso ya que la empresa que funciona como nuestro cliente tiene un sistema DeltaV instalado. Con esto podríamos pensar que toda la automatización deberíamos realizarlo con productos de la empresa Emerson. Pero no es así. No

es tan necesario tener estos productos, ya que al realizar la programación en un programa conocido y con productos que son más reconocidos, como lo son los productos de Siemens, estos productos pueden conectarse y acoplarse al sistema DeltaV.

5. El programa Matlab, junto con su herramienta Simulink, nos pueden servir como simuladores de un sistema real. Esto es algo que realmente ya lo hemos analizado en materias como Sistemas de Control o Control Avanzado. Y es interesante darnos cuenta que en la vida real, esto sí nos puede ser muy útil. En nuestro caso se nos dificultó adquirir el analizador de gases, lo cual nos hubiera ahorrado bastante tiempo y esfuerzo. Pero era necesario tomar mediciones para poder realizar un control adecuado. Es por eso que tuvimos que buscar ayuda de estas herramientas.

Recomendaciones

1. Adquirir el analizador de gases. Éste les puede ayudar bastante en el proceso de una nueva investigación sobre calderas.
2. Realizar un estudio exhaustivo sobre el comportamiento de la combustión. Si es posible pedir ayuda a un experto en el tema.
3. Siempre tener en cuenta las seguridades de la caldera porque podría afectar al funcionamiento de la caldera, al medio ambiente y además a las vidas humanas.

BIBLIOGRAFÍA

Barrera, C., Betoret, N., Castelló, M., Pérez, E. (2018). *Aspectos básicos relacionados con el funcionamiento de una caldera*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Rivera, F. (2008). *Generación de Vapor*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Larios, H. T. (2011). *Diseño del Plan de mantenimiento preventivo del área de calderas del Hospital Nacional Santa Elena de Santa Cruz de Quiché*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Ávila, A., Pérez, J. (2010). *Modelado y simulación de una caldera para la implementación de lazos de control con PLC*. Instituto Politécnico Nacional. México DF, México.

Rosado, A. (2003). *Sistemas Industriales Distribuidos*. Universidad de Valencia. Valencia, España.

Quispe, O. G. (2016). *Diseño e implementación de un módulo de pruebas para la simulación de operaciones del Sistema de Control de Procesos (PCS) y del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) DeltaV Emerson para el área de proyectos y servicios de la empresa SEIN SA*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Santin, A. (2007). *Sistemas Operativos Distribuidos, Peer 2 Peer*. Accedido el 21 de noviembre del 2022 desde: <https://www.dit.upm.es/~joaquin/so/p2p/p2p.pdf>

García, R. (2001). *Combustión y combustibles*. Accedido el 29 de noviembre del 2022 desde: <https://www.kimerius.com/app/download/5780666669/Combusti%C3%B3n+y+combustibles.pdf>.

Barrera, C., Betoret, N., Castelló, M., Pérez, E. (2018). *Principios básicos de la combustión*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

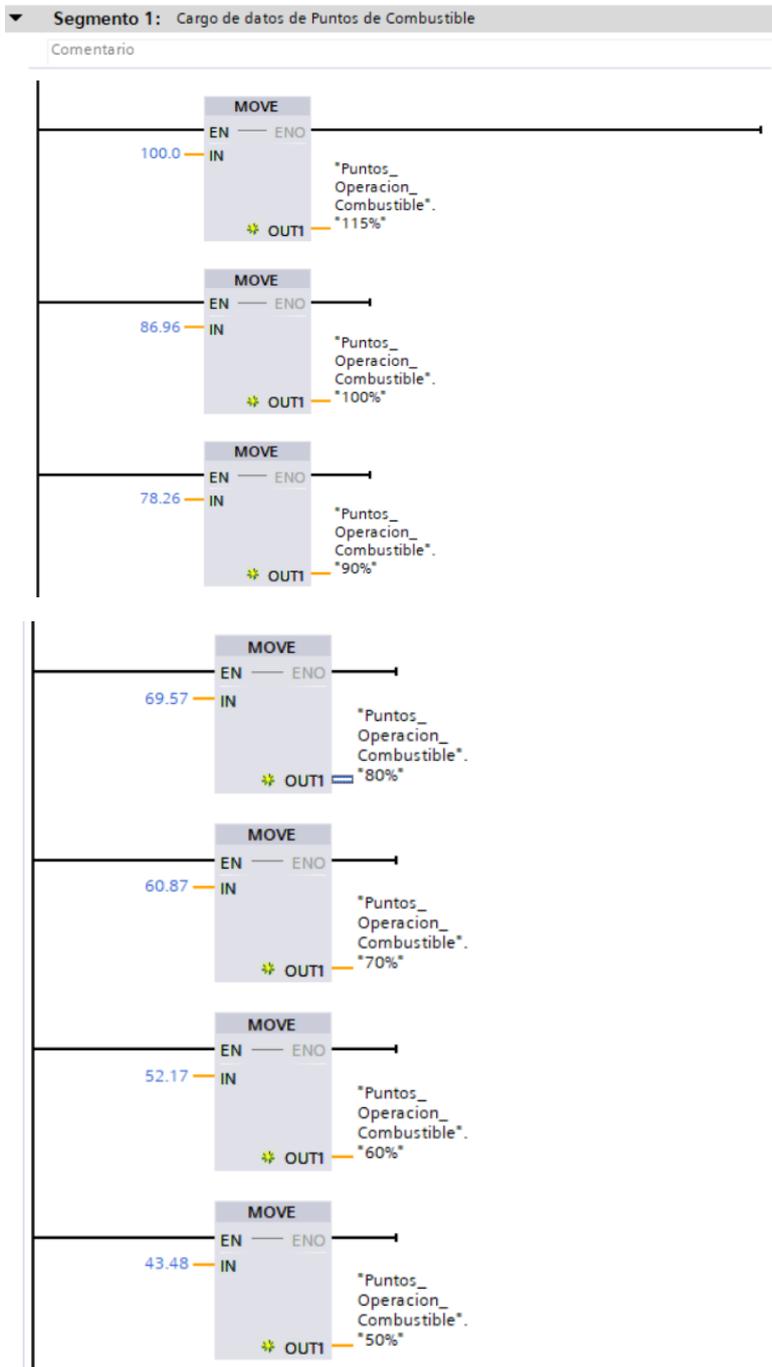
Cepeda, R., León, J. (2016). *Ahorro del uso de combustible de una caldera acuotubular implementando lazos de control sobre la combustión*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.

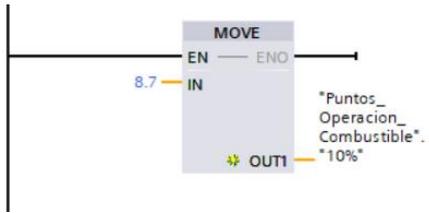
González, M. (2021). *Instrumentación y control de una caldera industrial*. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.

APÉNDICES

APÉNDICE A

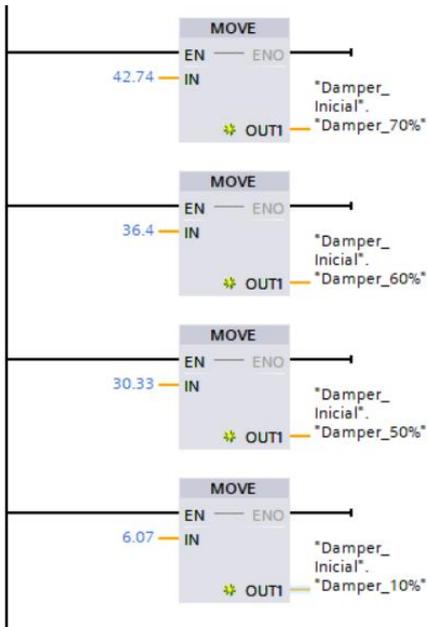
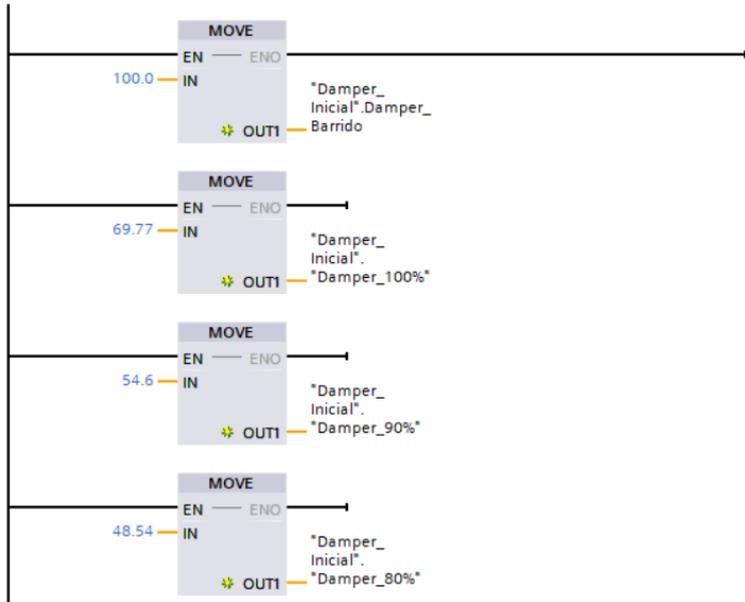
Programación en TIA Portal





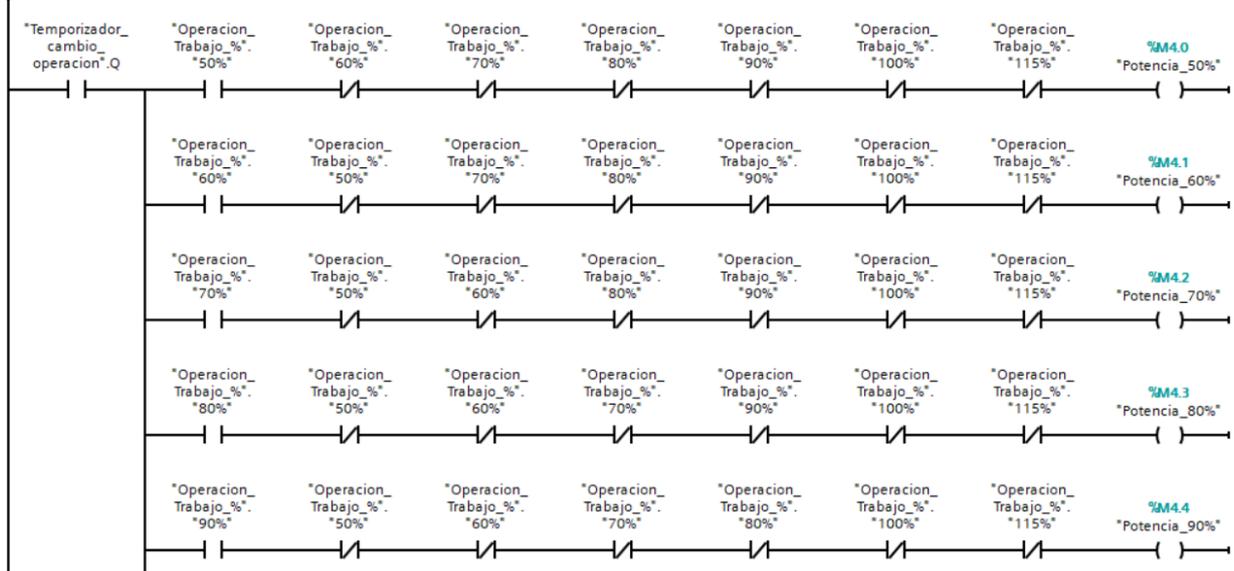
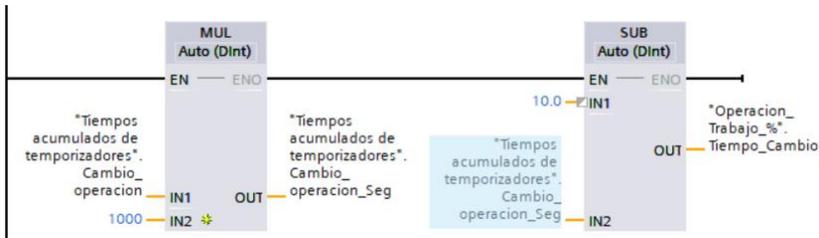
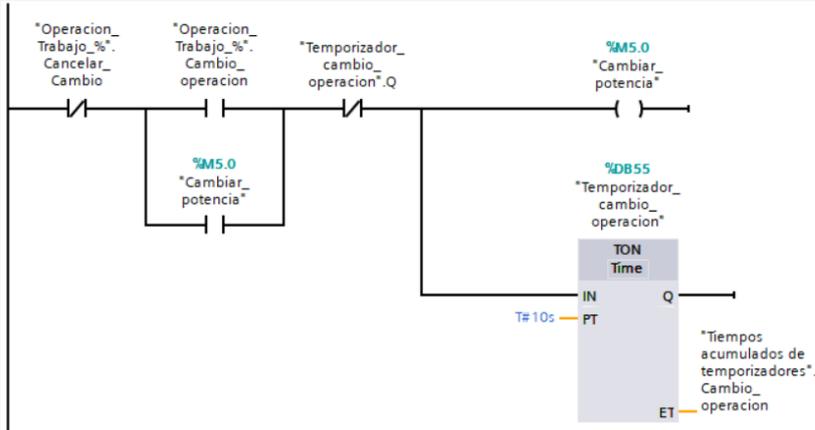
Segmento 2: Cargo de datos de damper inicial

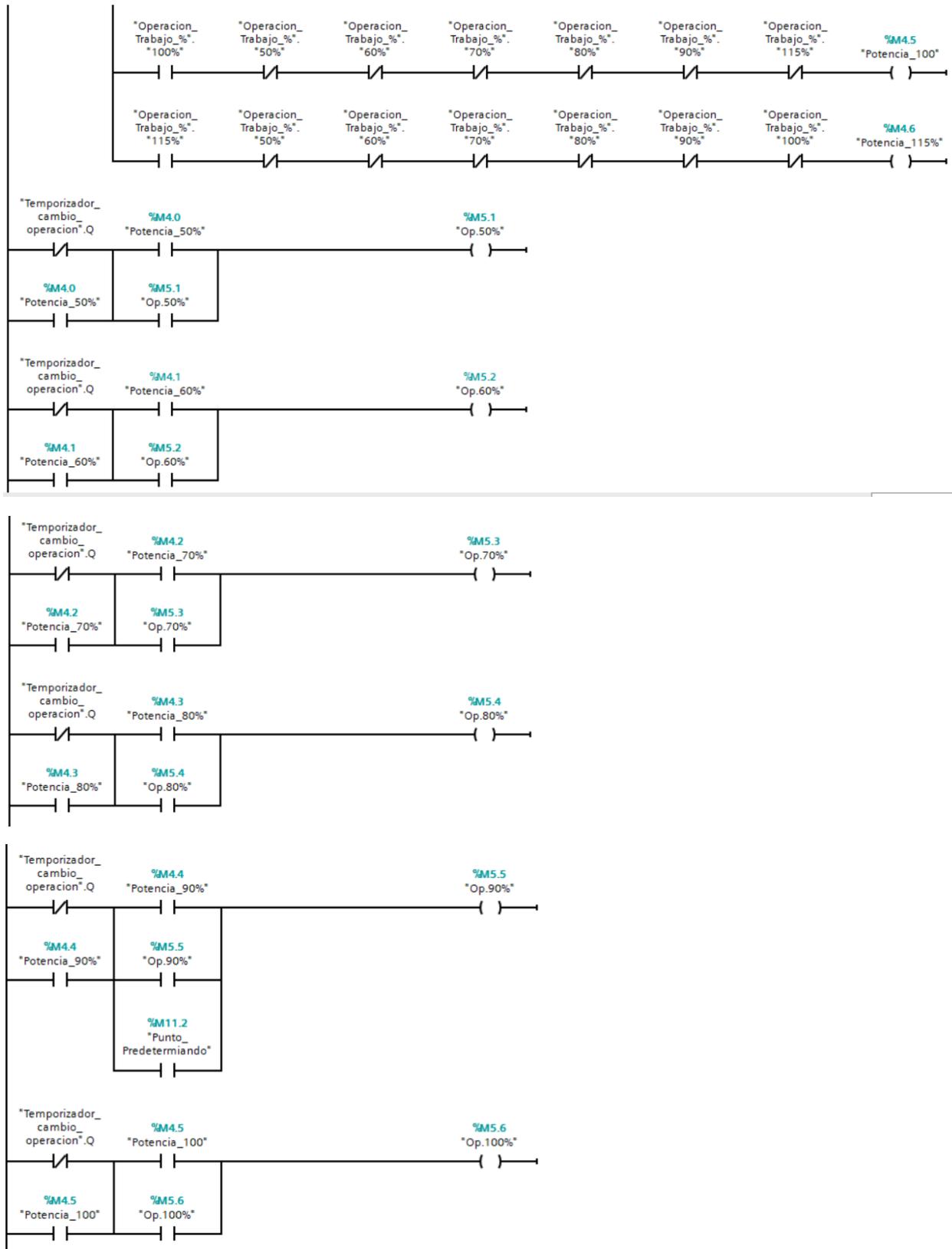
Comentario

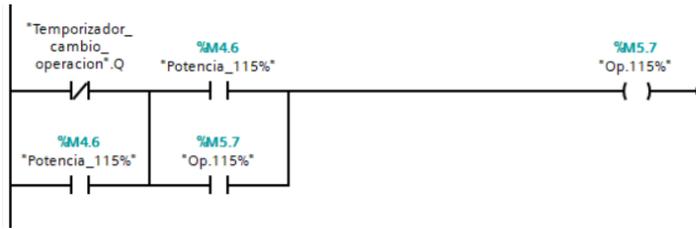


▼ **Segmento 3:** Selección de puntos de operacion

Comentario

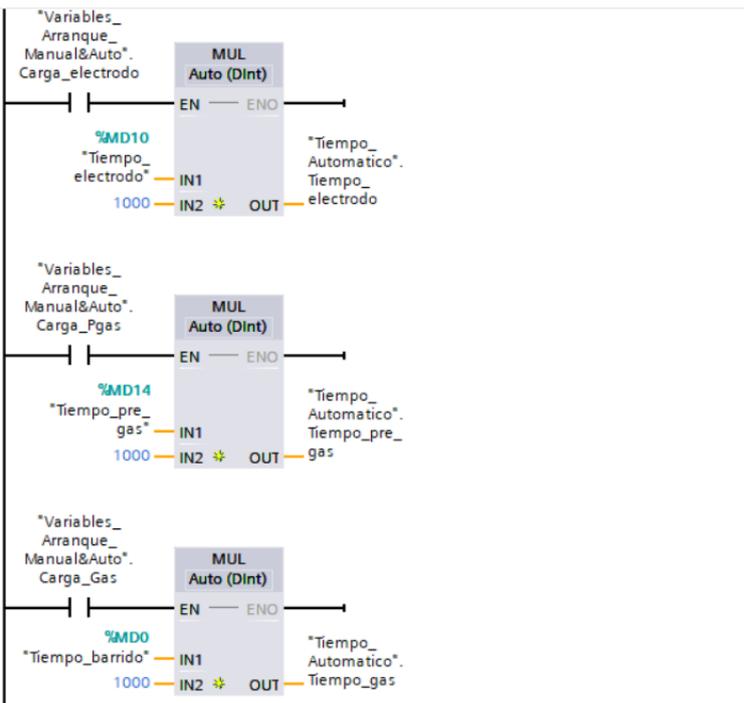
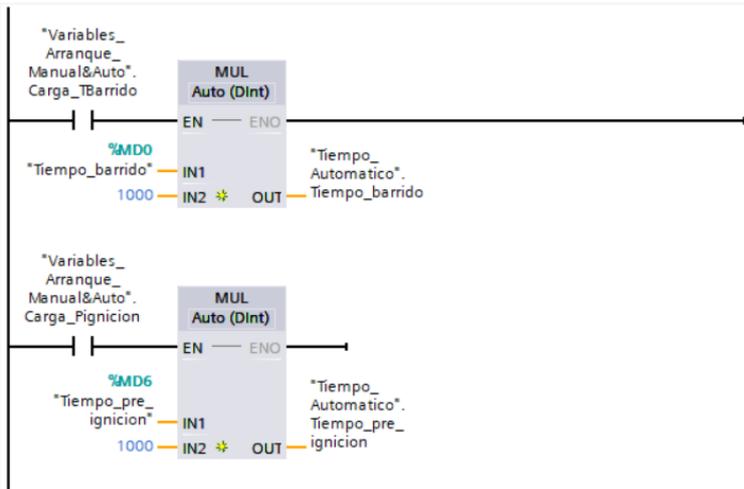


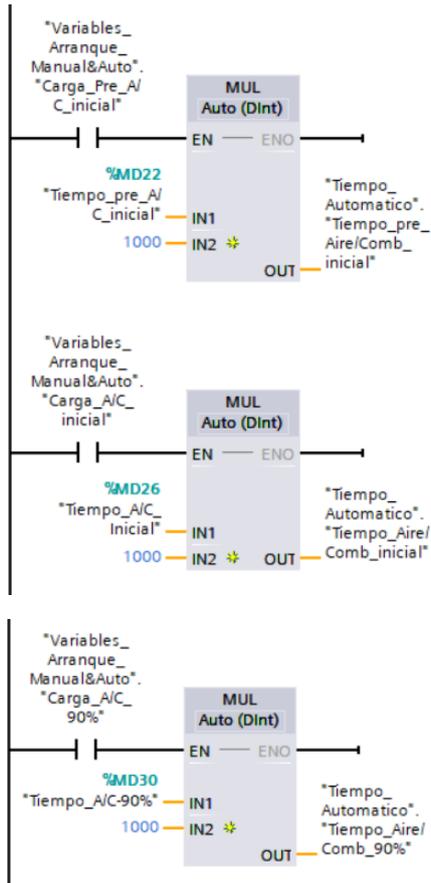




Segmento 4: Ingreso de tiempo para configurar arranque automatico

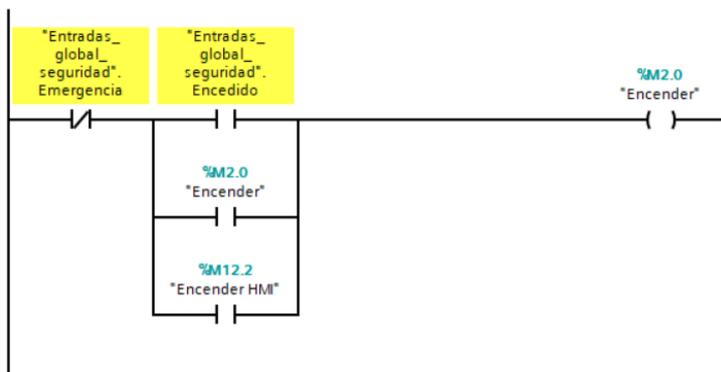
Comentario





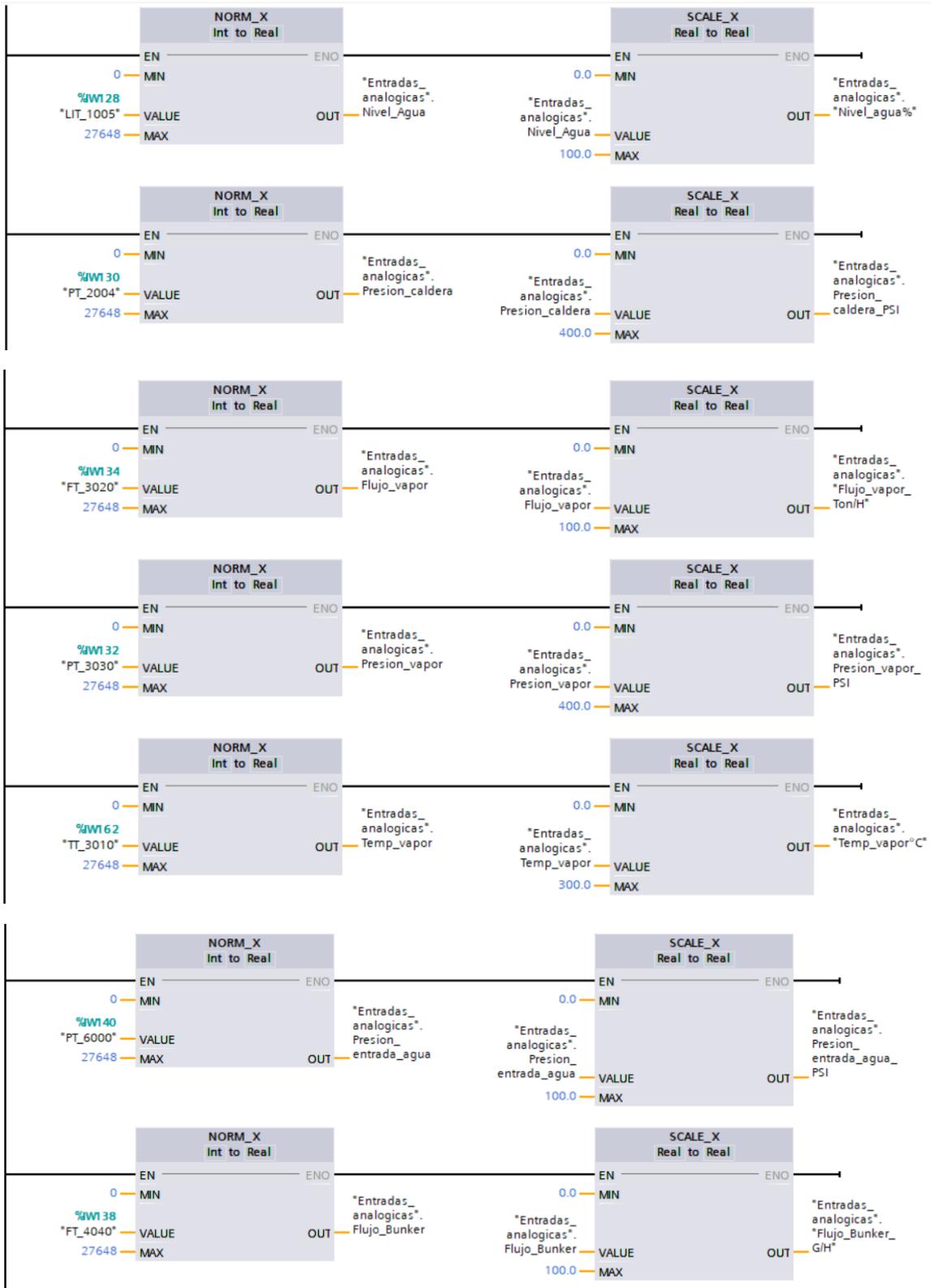
Segmento 5: Parado de emergencia y encendido

Comentario



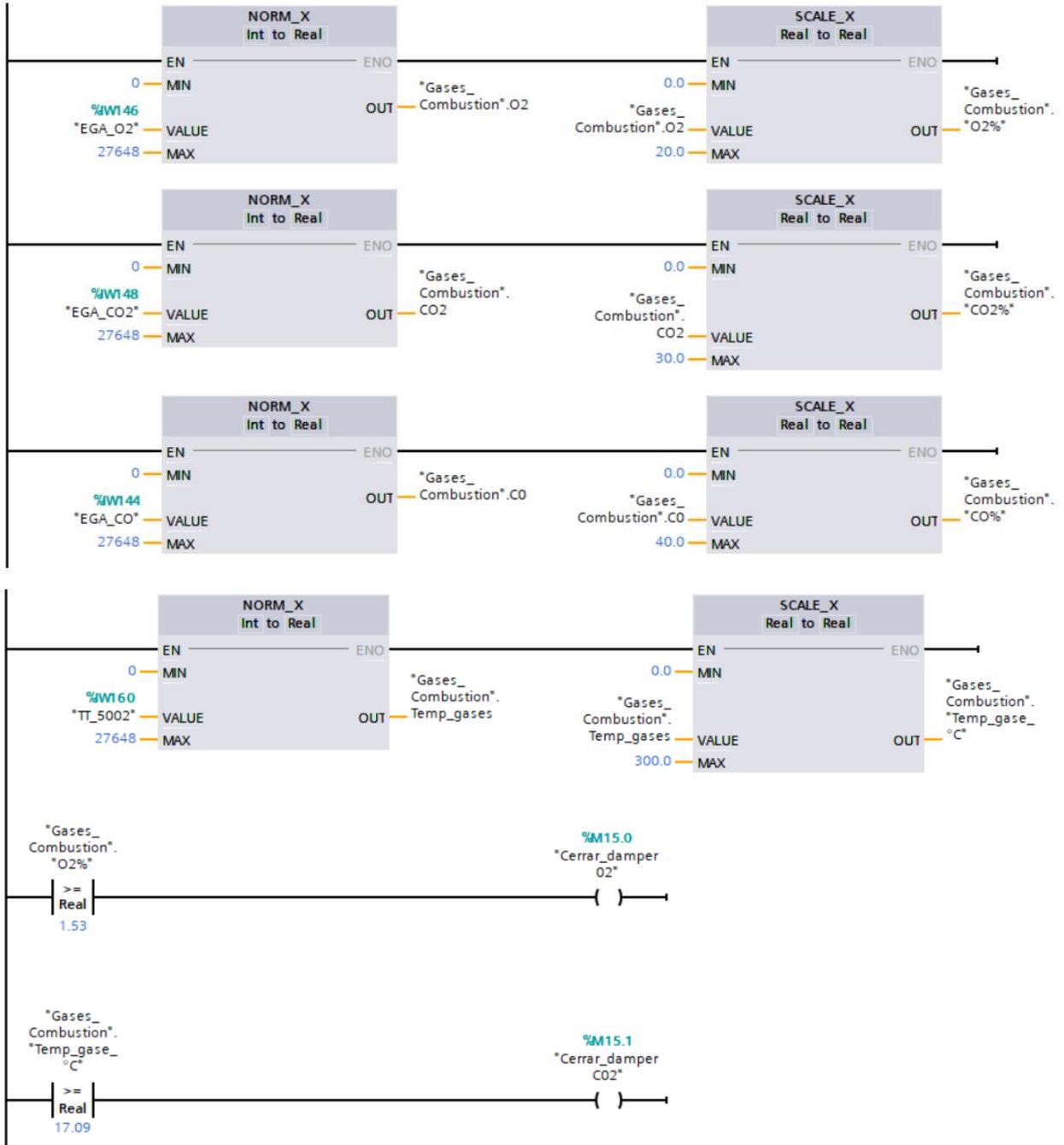
Segmento 6: Entradas analogicas de seguridad de caldera

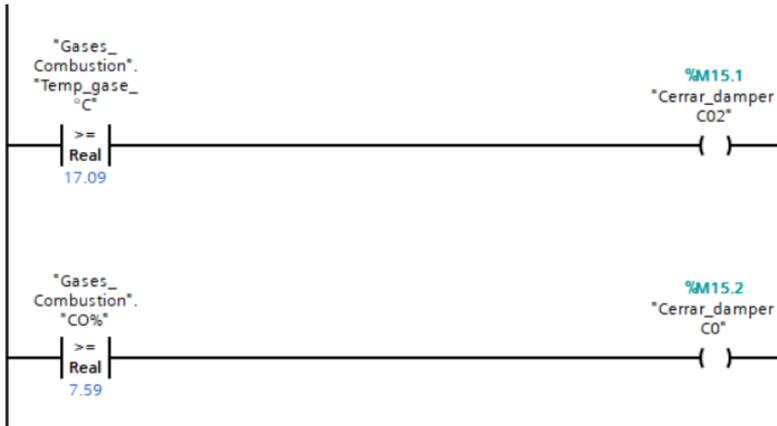
Comentario



Segmento 7: Gases de combustion

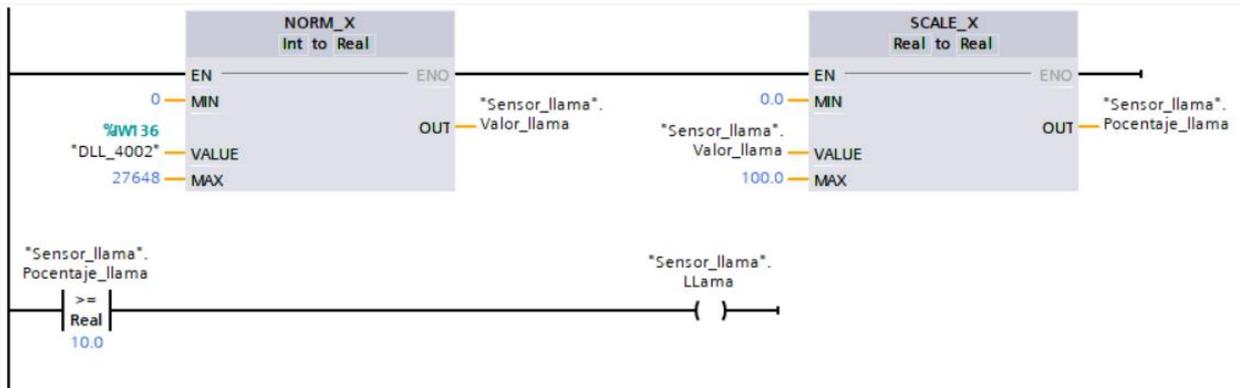
Comentario





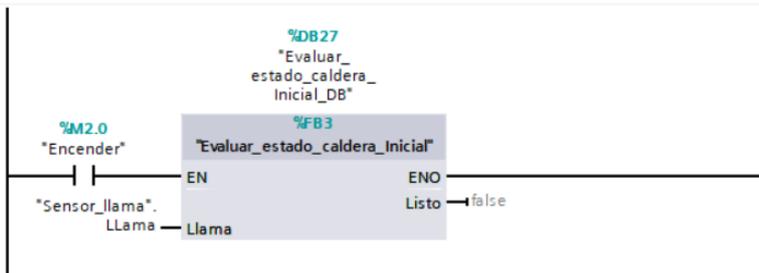
Segmento 8: Sensor de llama

Comentario



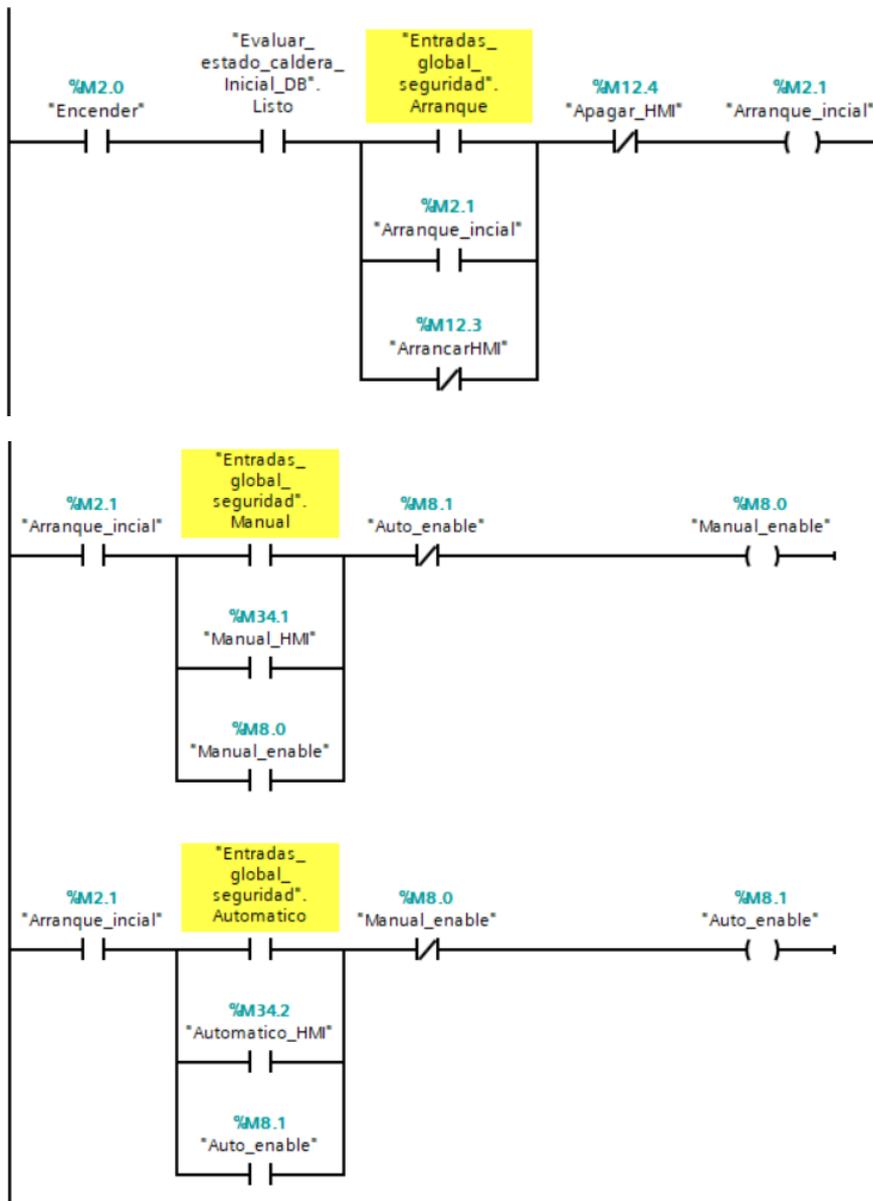
Segmento 9: Entradas de seguridad, evaluacion

Comentario



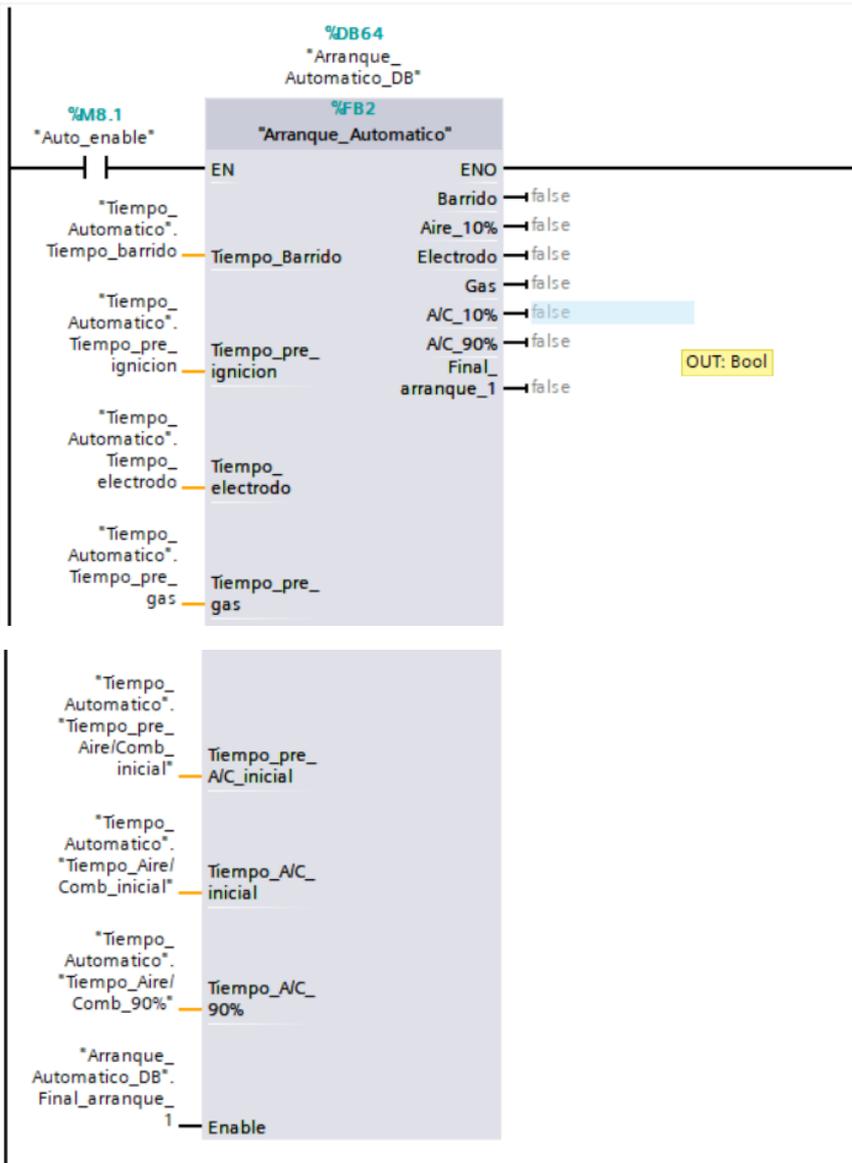
Segmento 10: Entrada de seguridad de Arranque y reseteo cuando la función 'Evaluar estado de caldera inicial' detecte error de arranque

Comentario



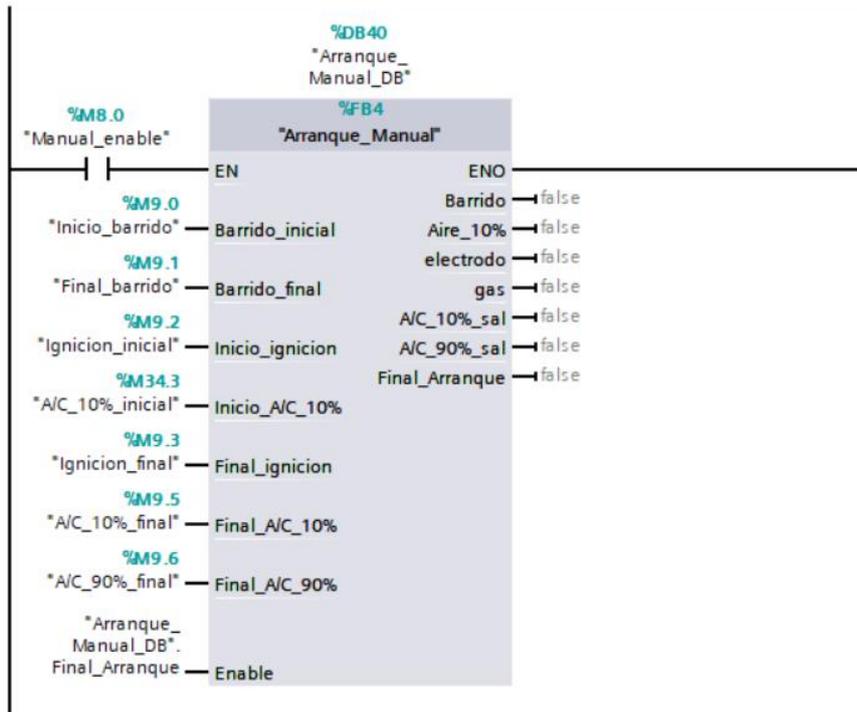
Segmento 11: Arranque Automatico

Comentario



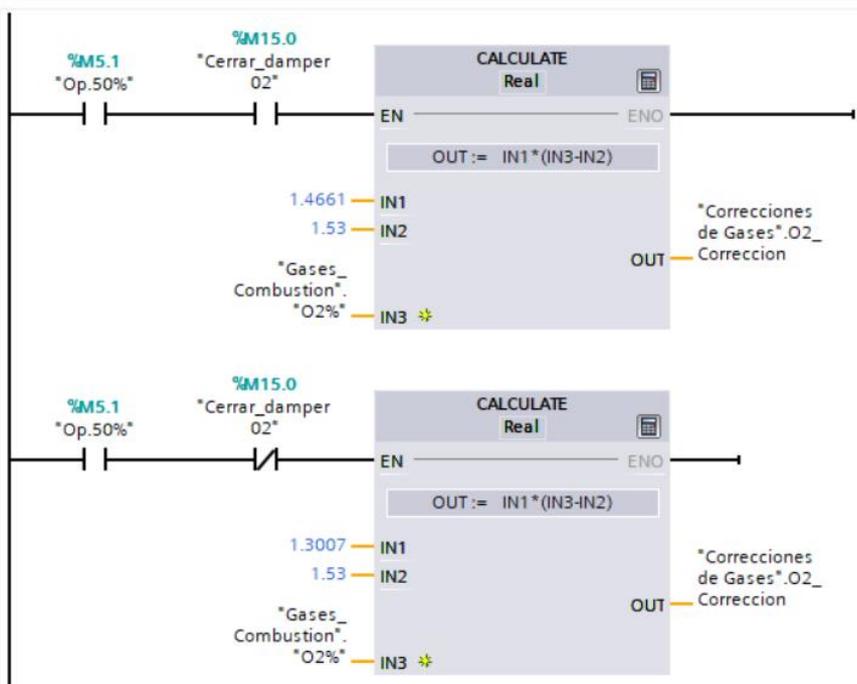
Segmento 12: Arranque Manual

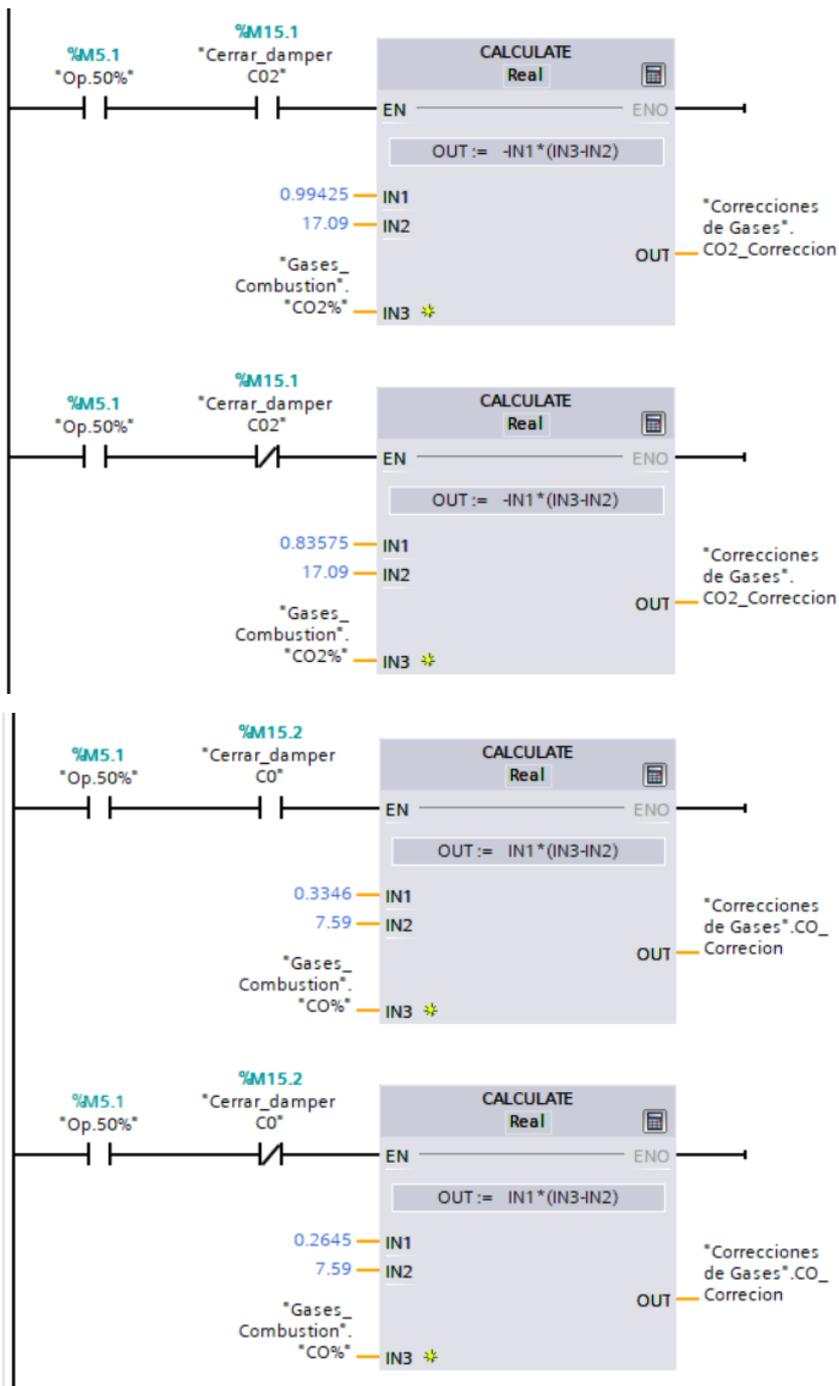
Comentario



Segmento 13: Cálculos de correccion de damper al operar al 50%

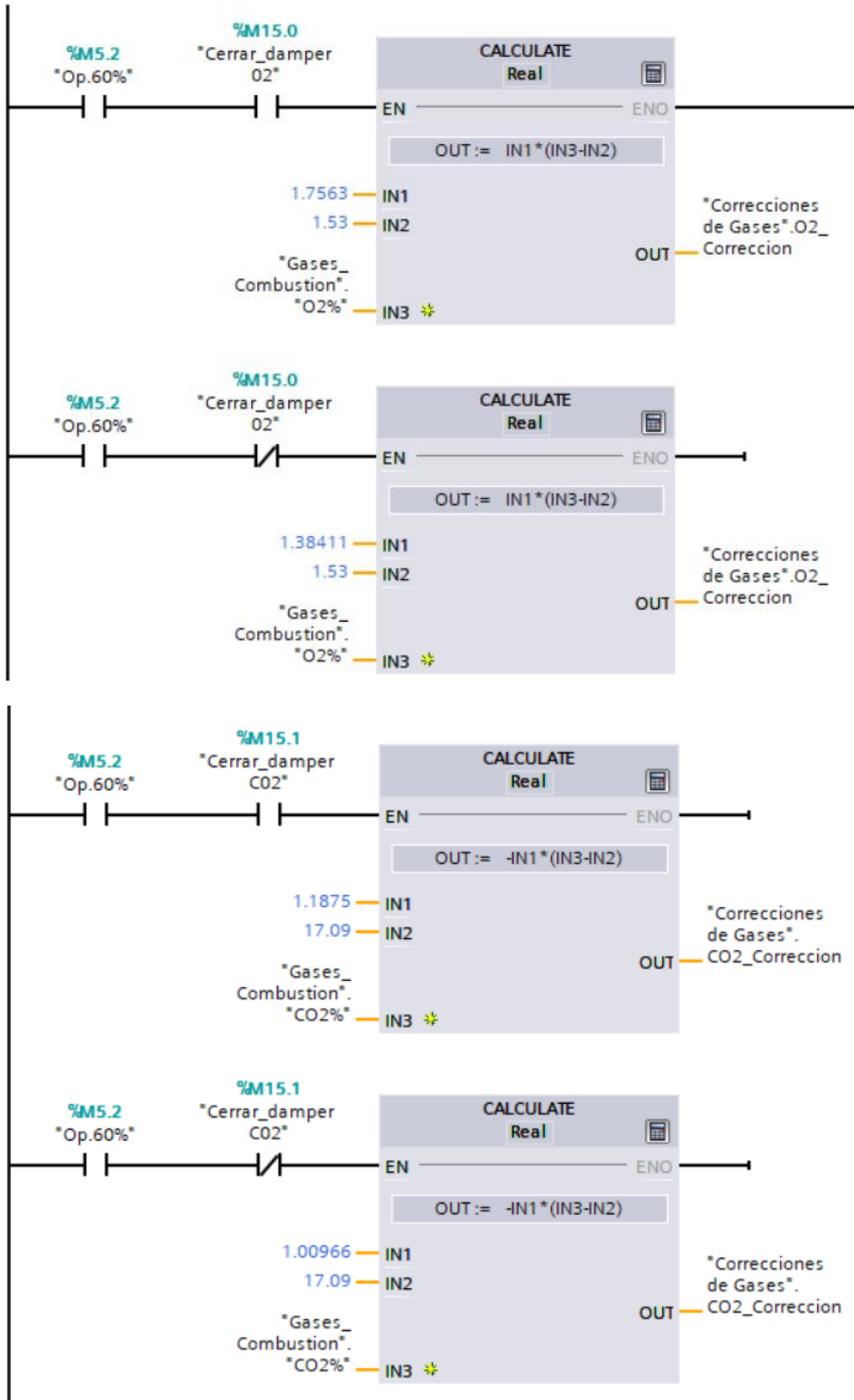
Comentario

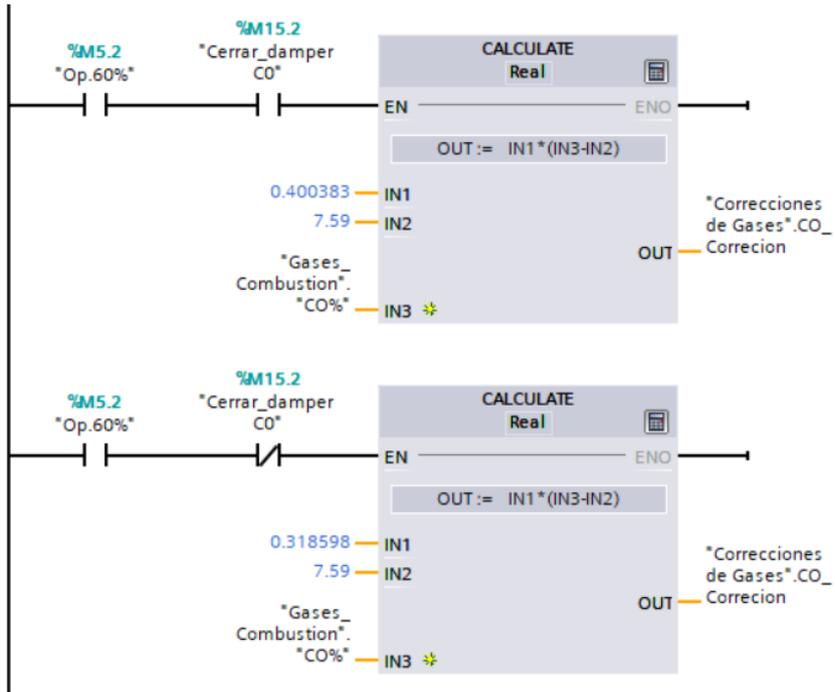




Segmento 14: Cálculos de correccion de damper al operar al 60%

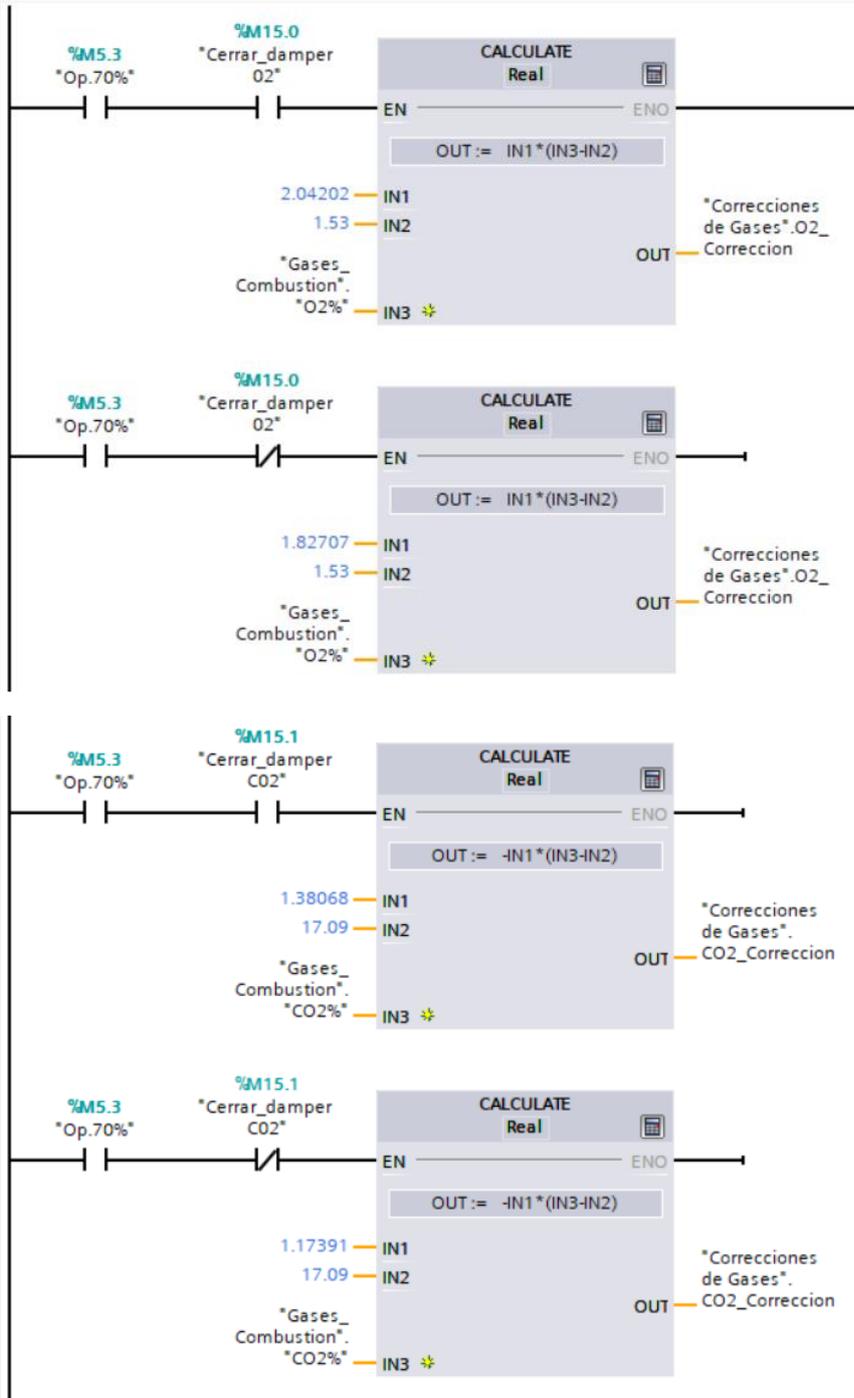
Comentario

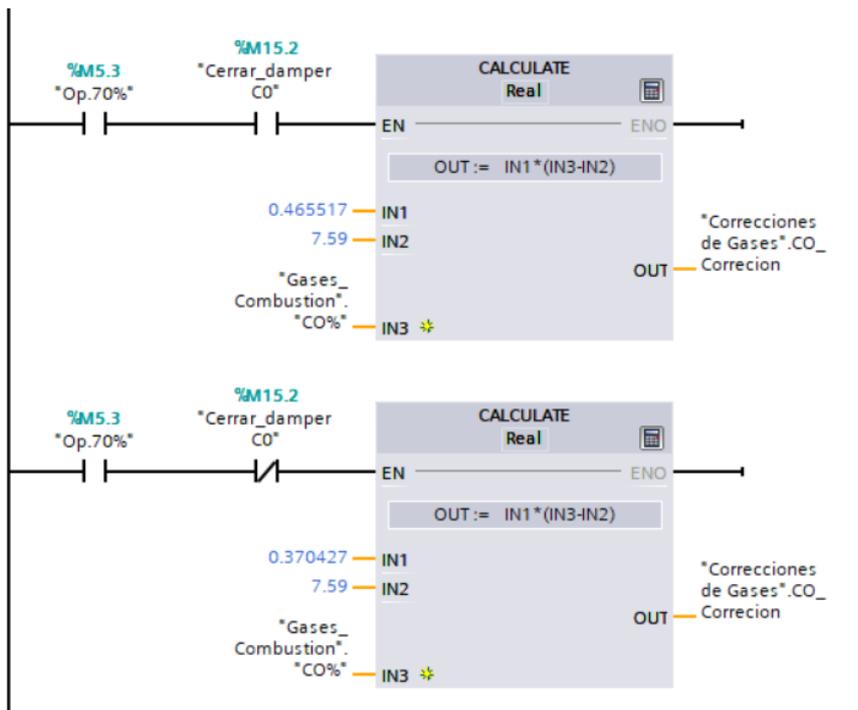




Segmento 15: Cálculos de correccion de damper al operar al 70%

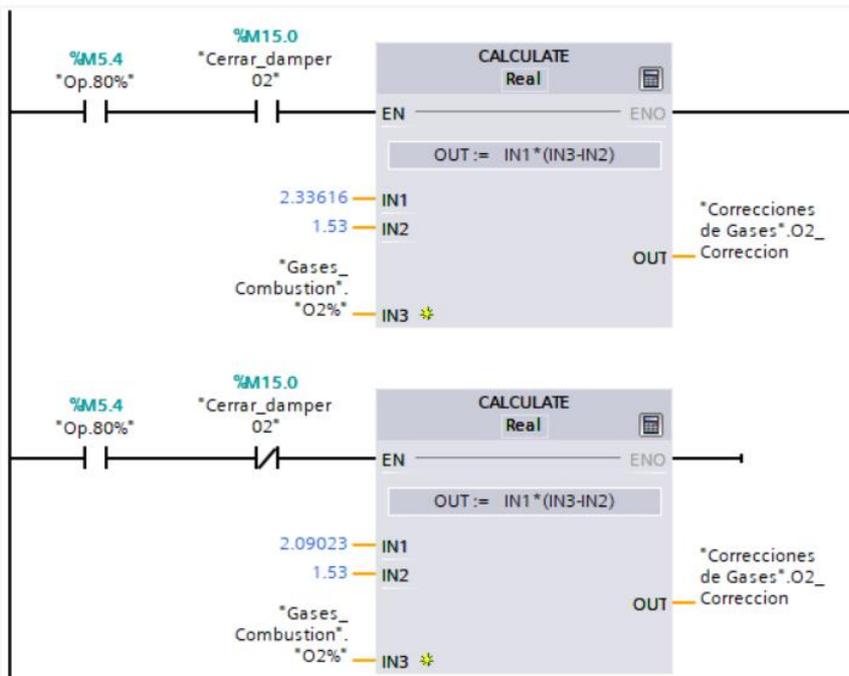
Comentario

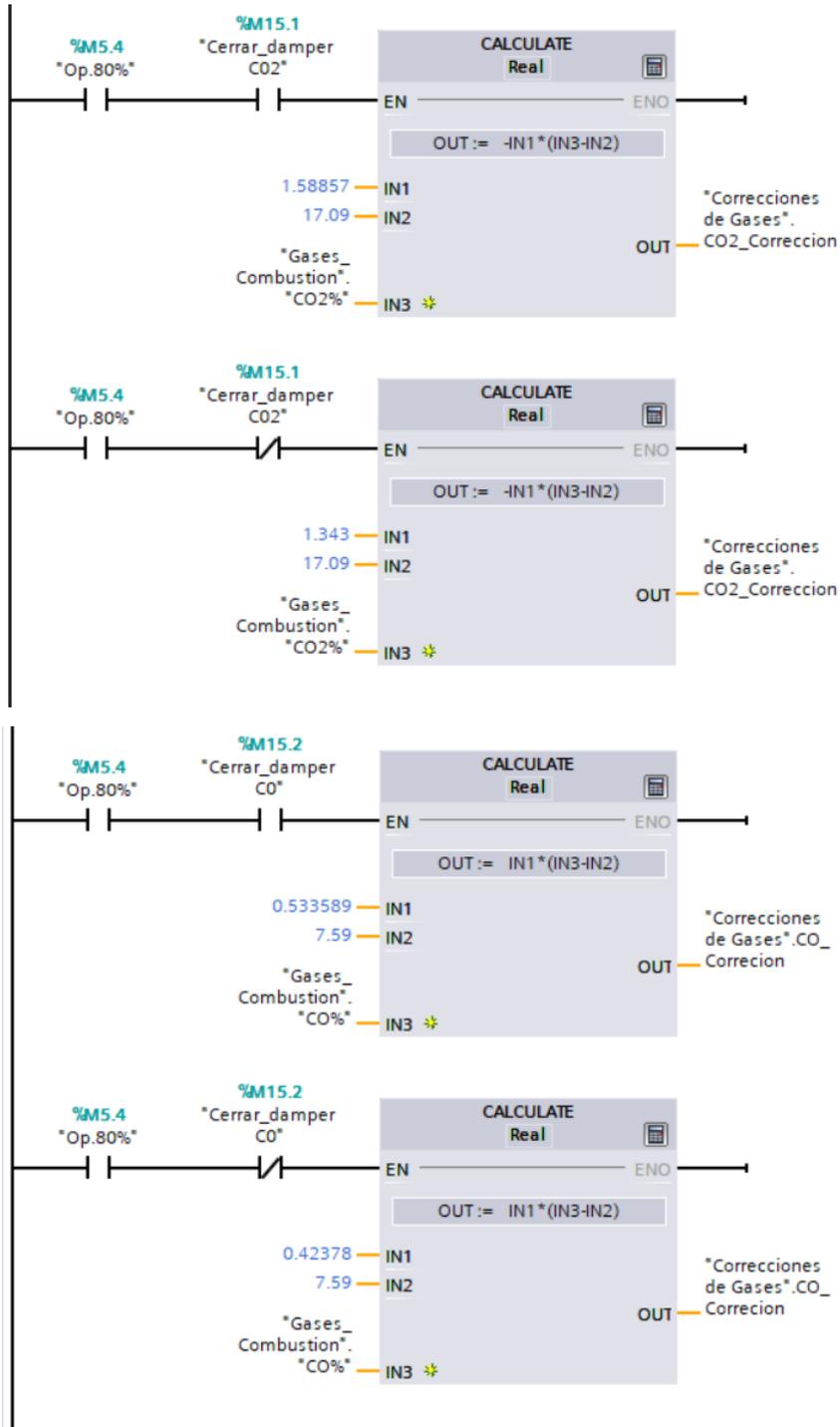




Segmento 16: Cálculos de correccion de damper al operar al 80%

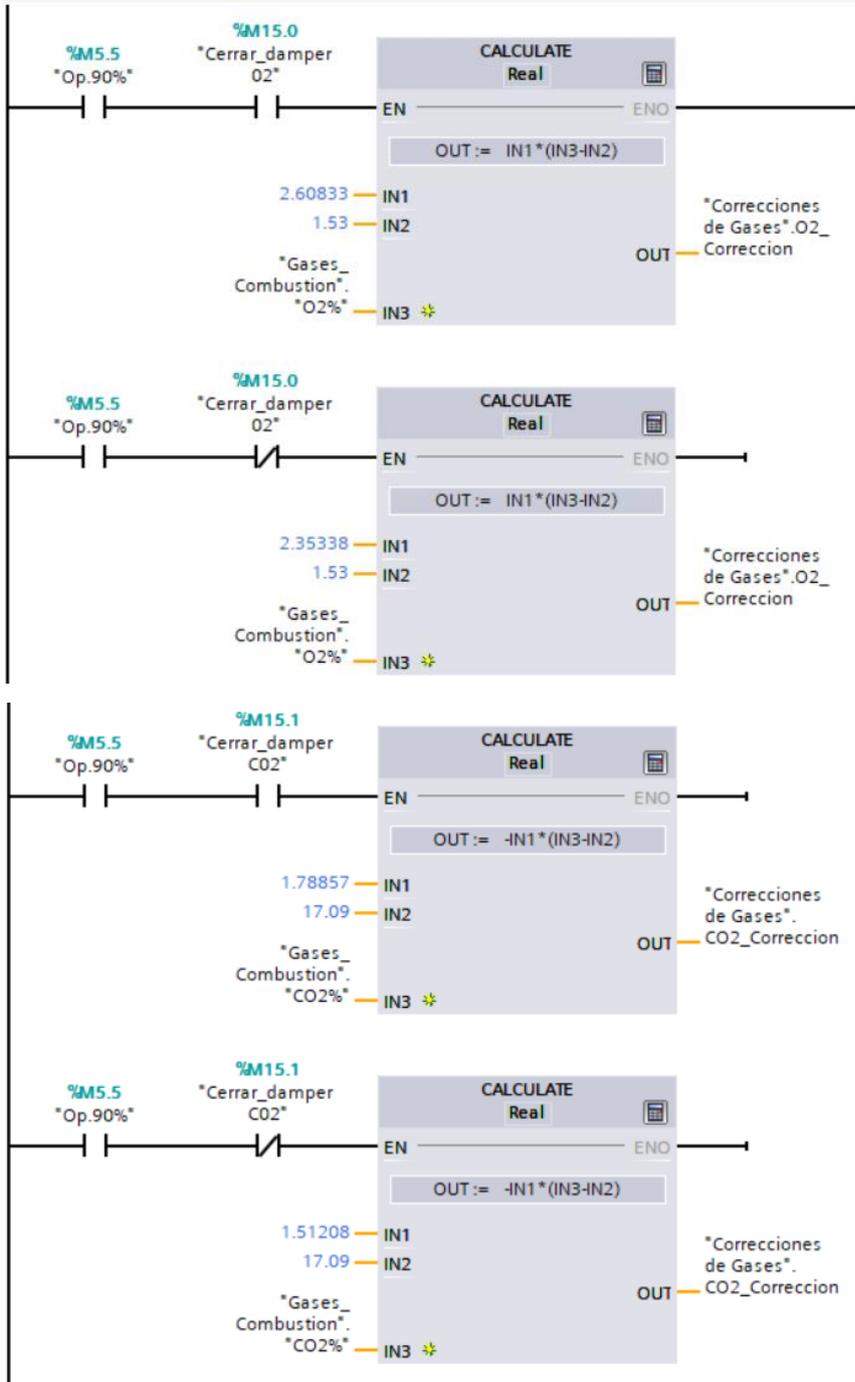
Comentario

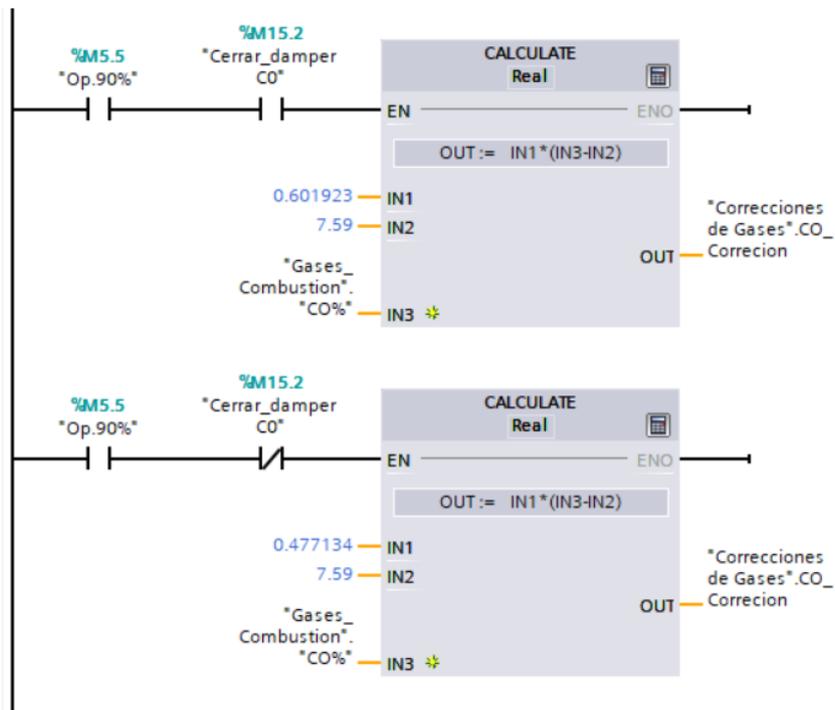




Segmento 17: Cálculos de correccion de damper al operar al 90%

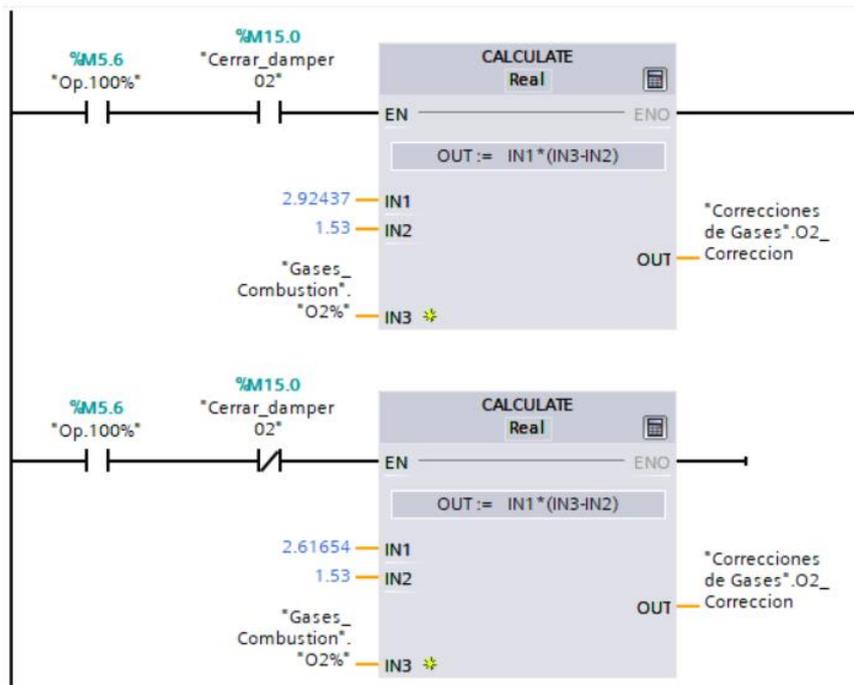
Comentario

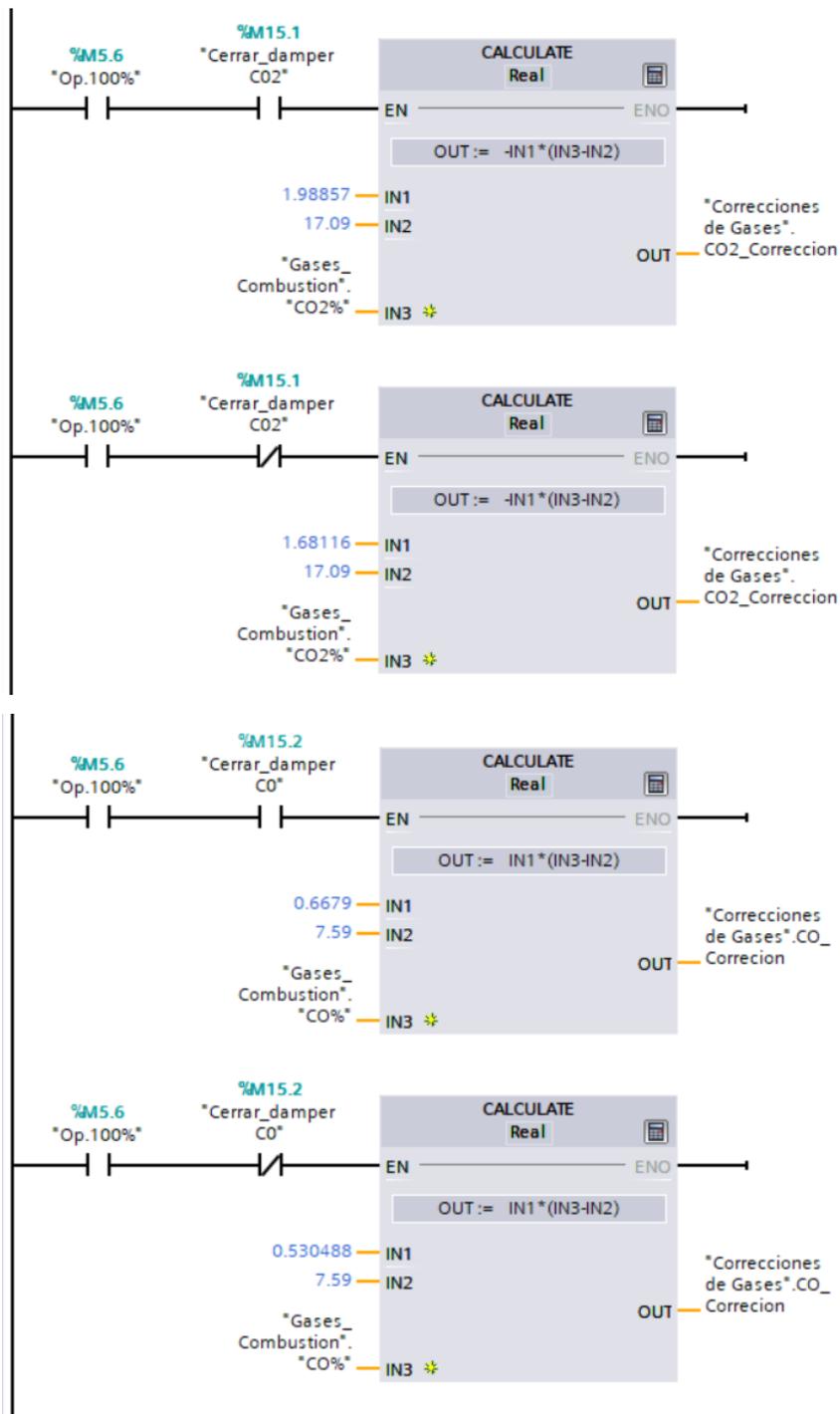




Segmento 18: Cálculos de correccion de damper al operar al 100%

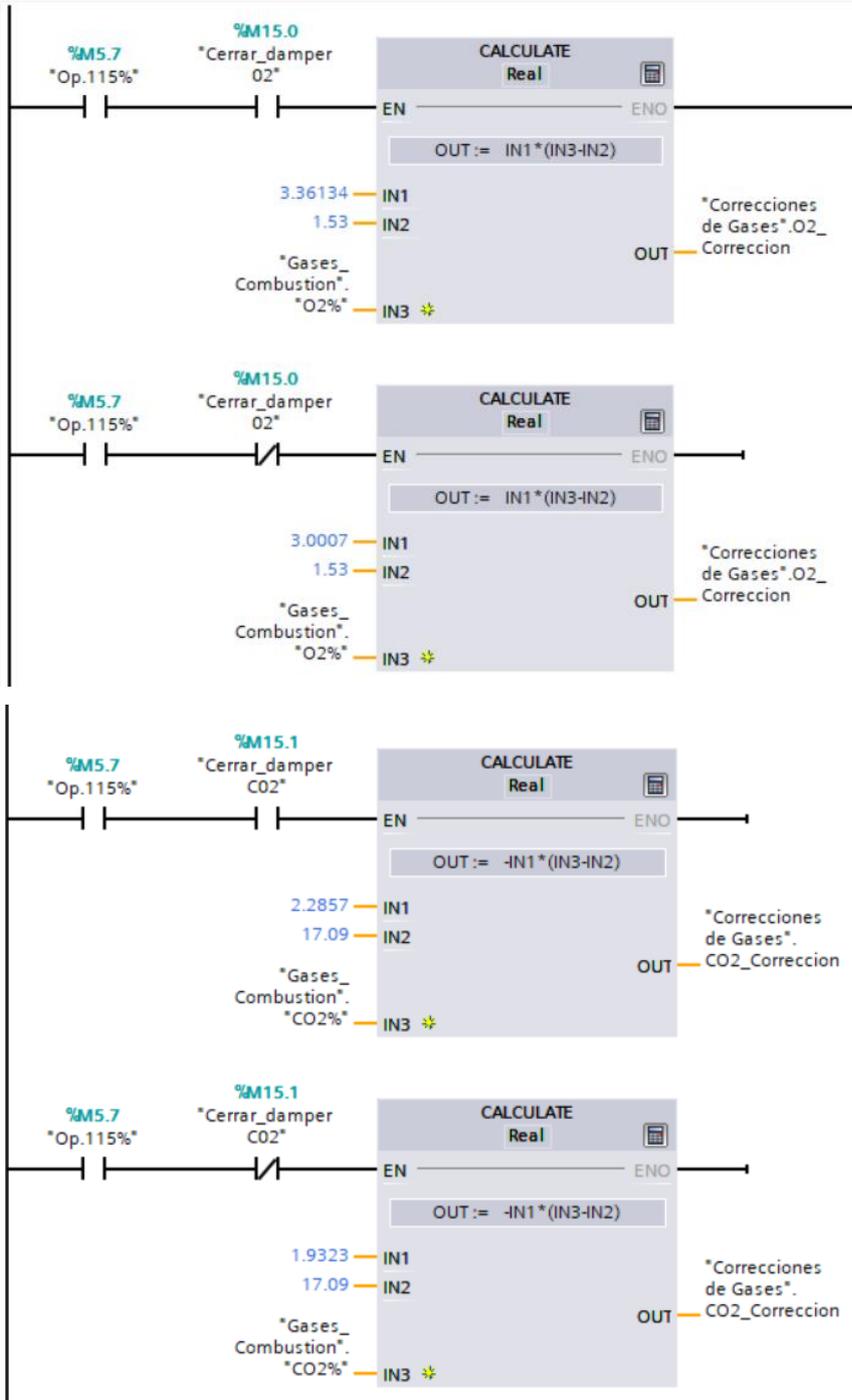
Comentario

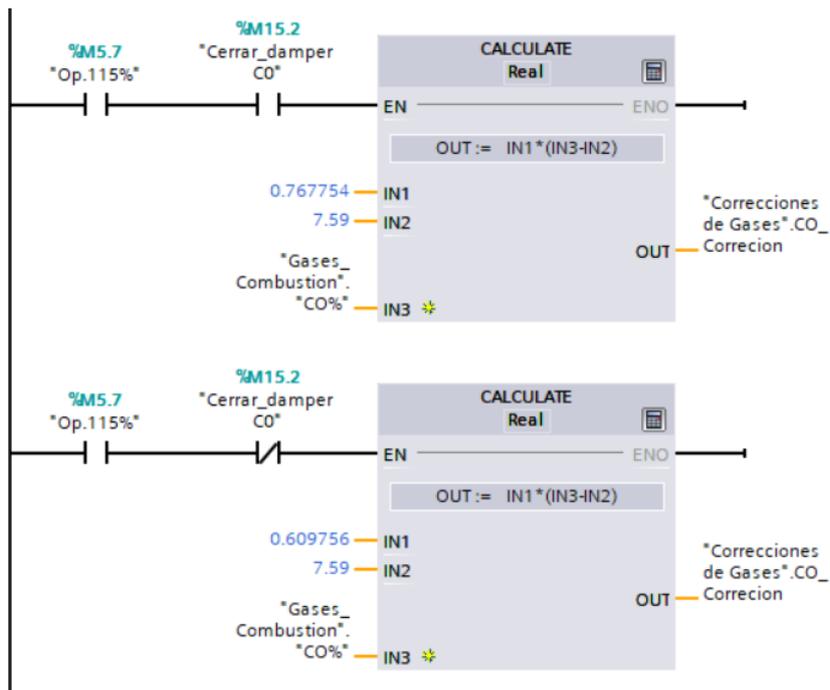




Segmento 19: Cálculos de correccion de damper al operar al 115%

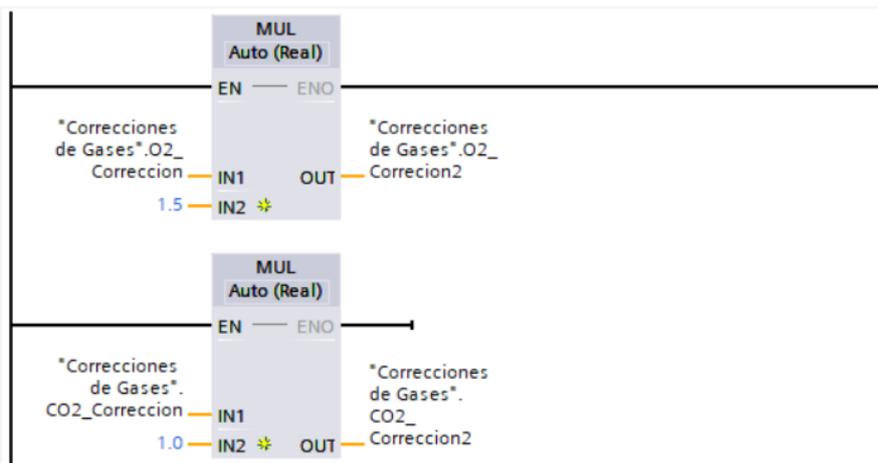
Comentario

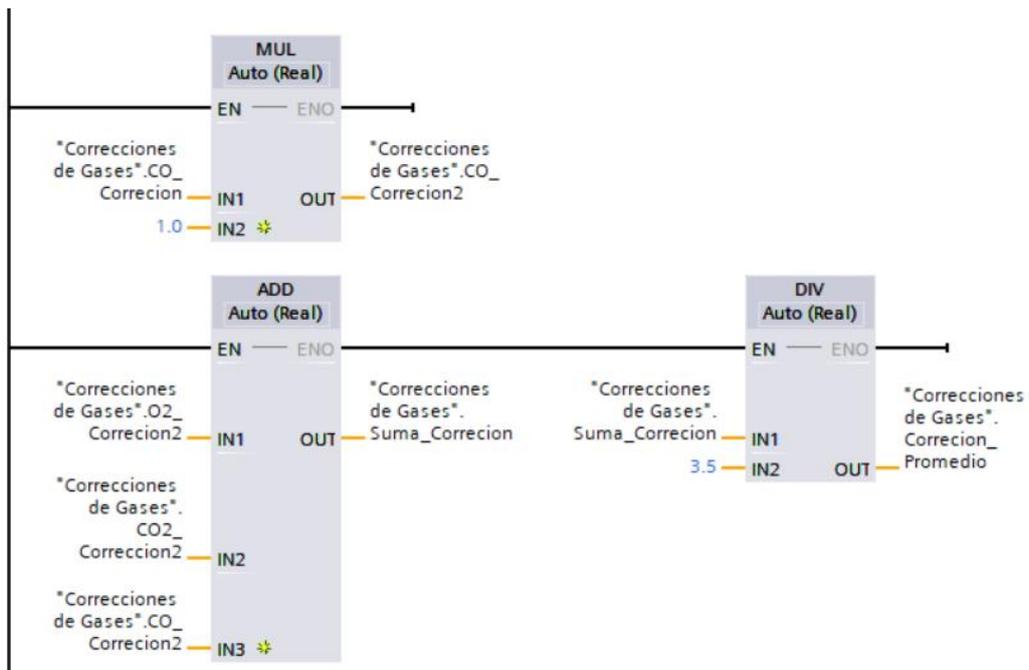




Segmento 20: Cálculo de damper con correcion aritmetica de O2, CO2 y CO

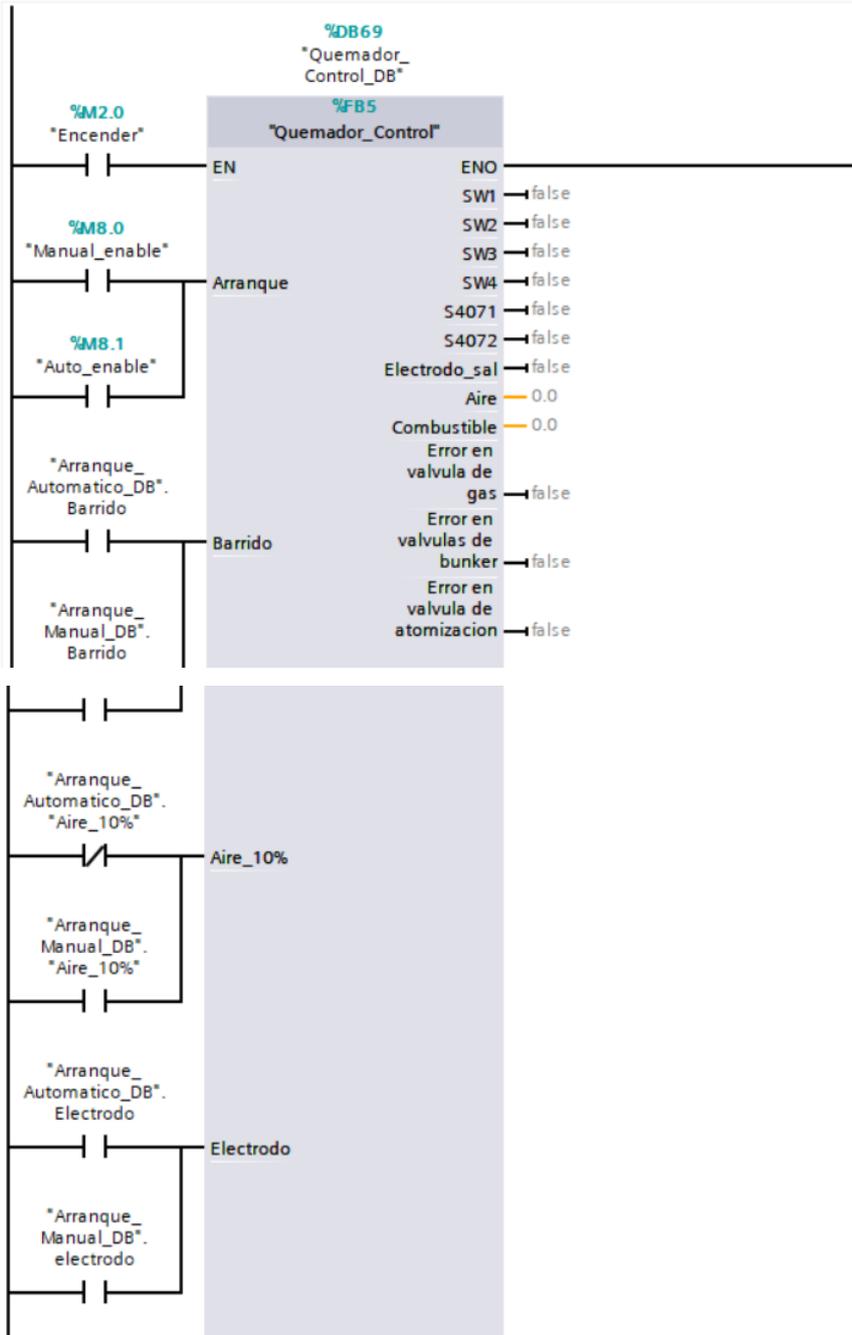
Comentario

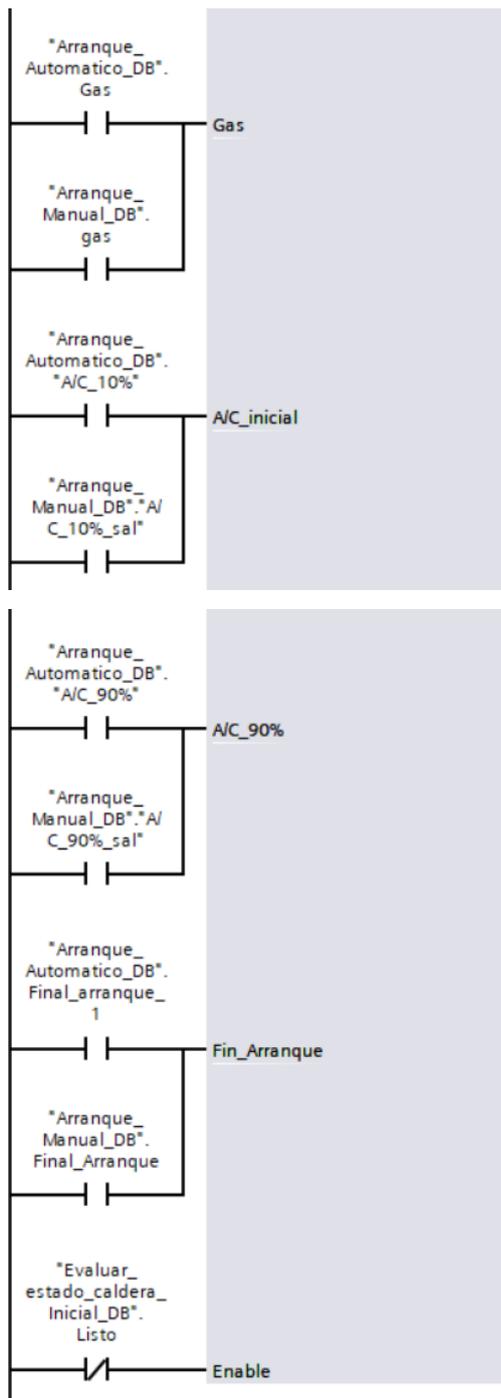


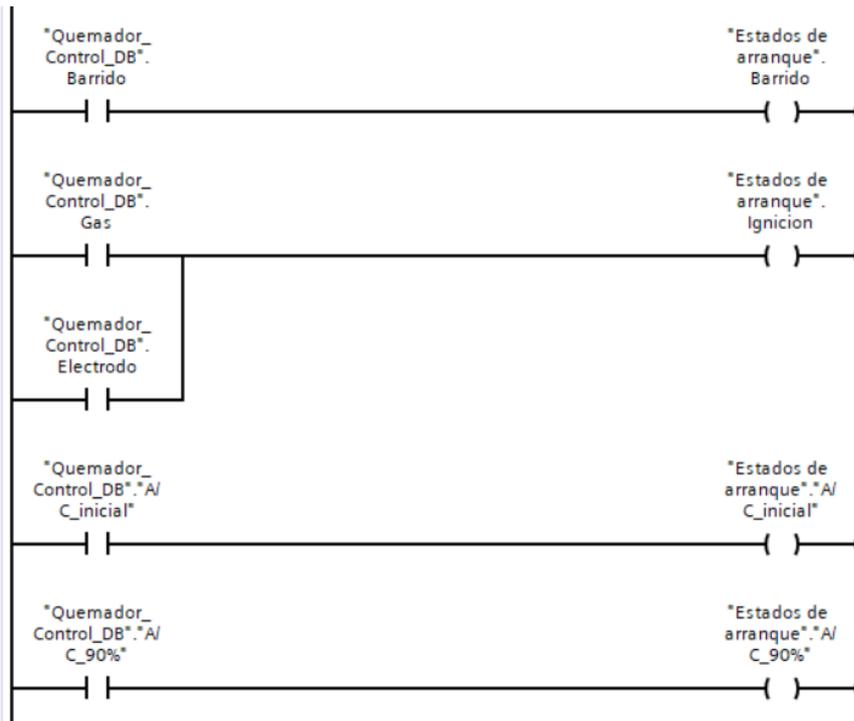


Segmento 21: Control_Quemador_Valvulas

Comentario



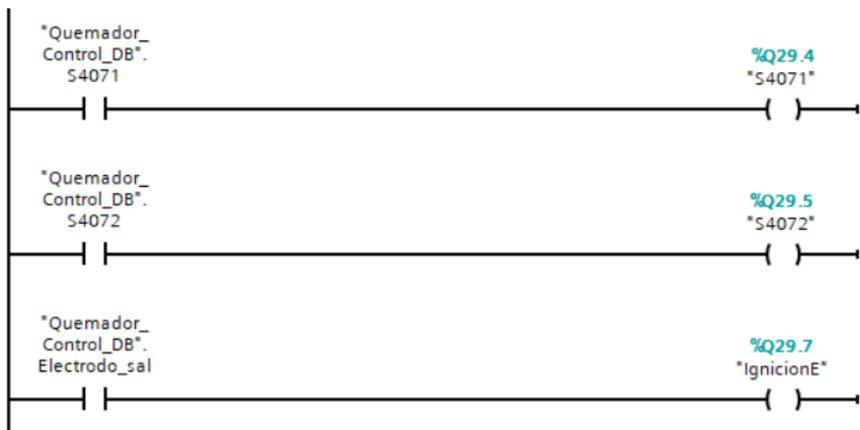




Segmento 22: Salidas del PLC

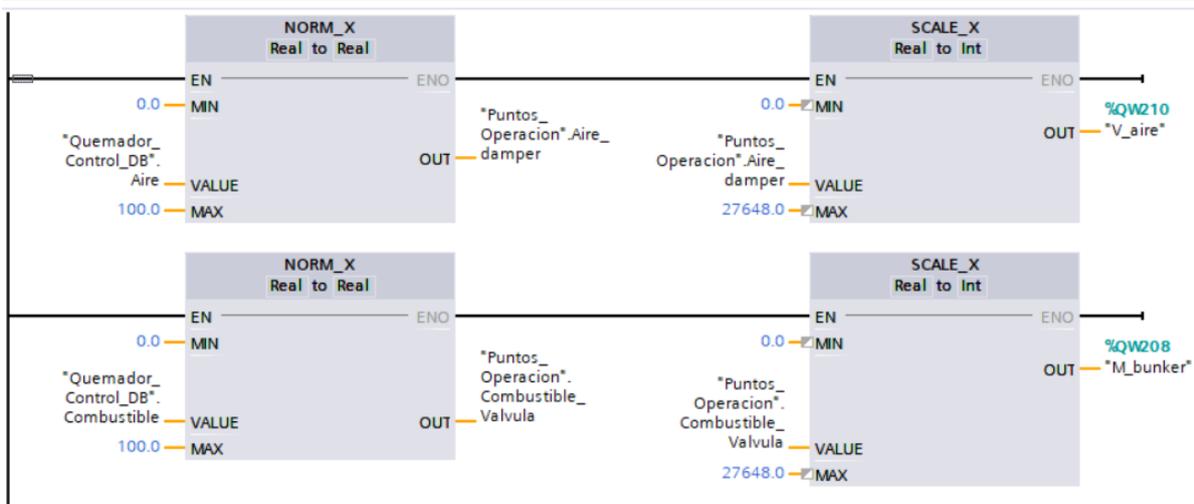
Comentario





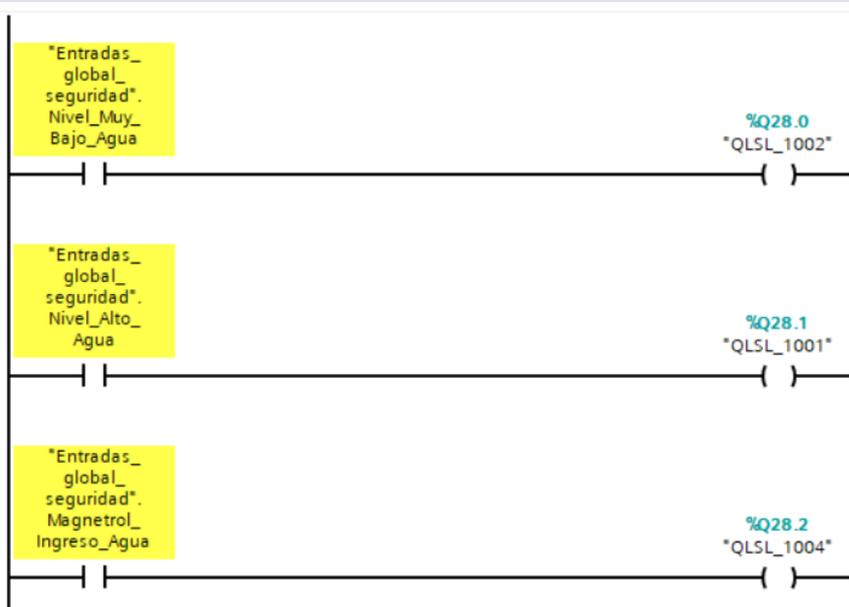
Segmento 23: Salidas analogicas de Cotrol Aire / Combustible

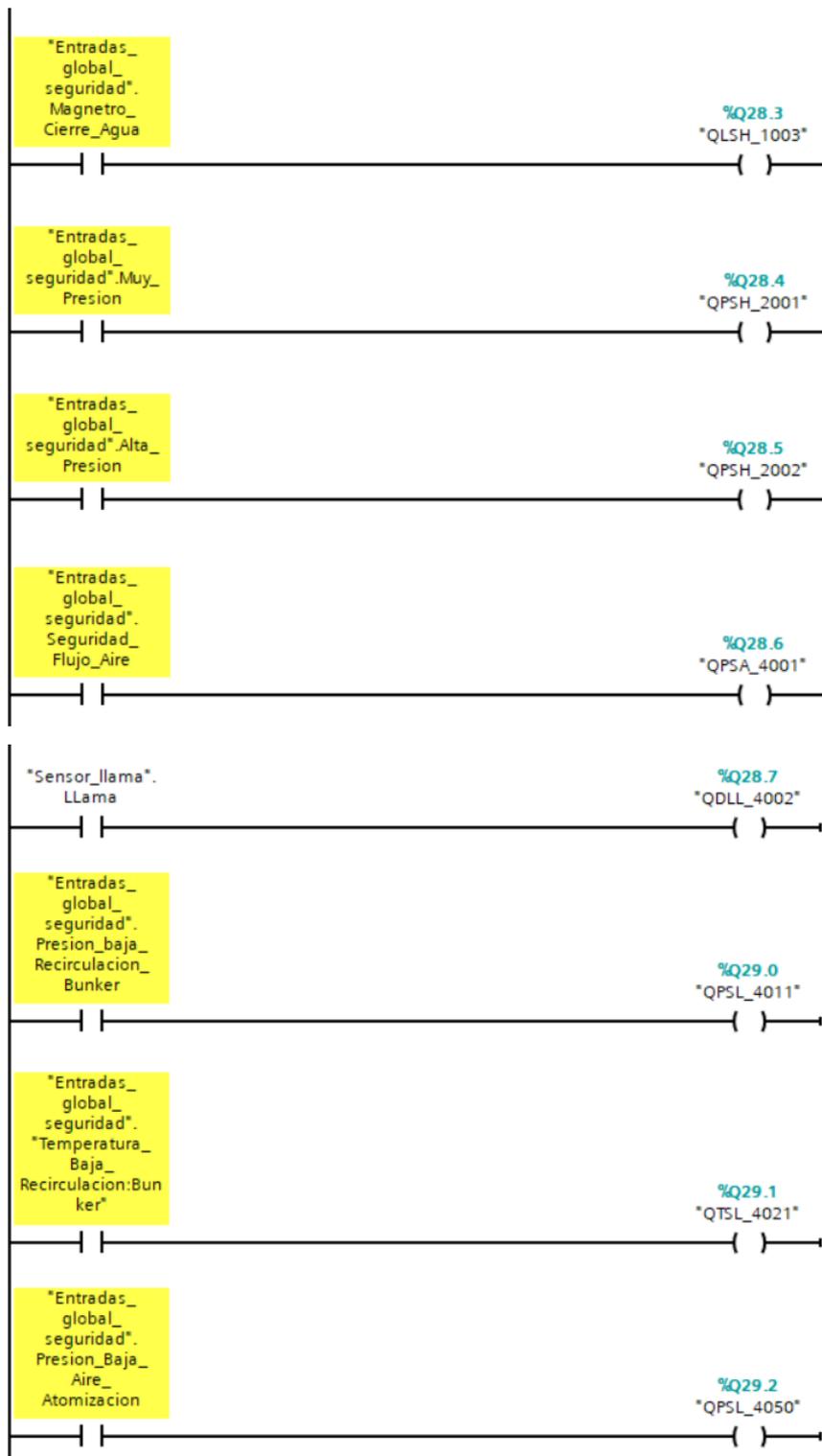
Comentario

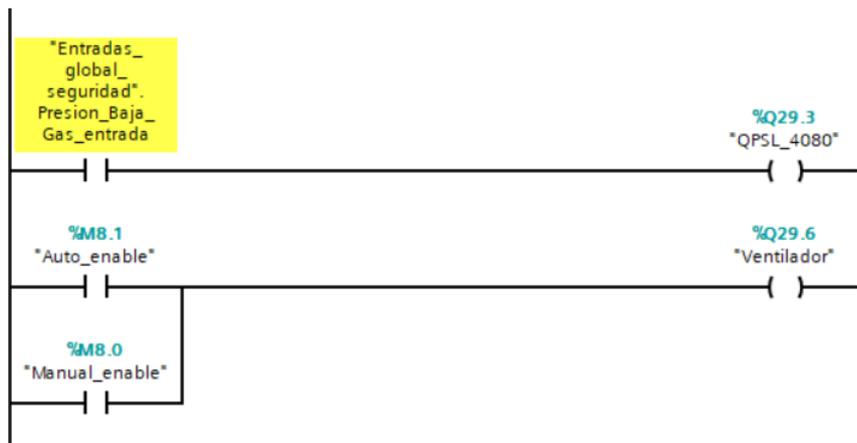


Segmento 24: Indicadores de señales de seguridad

Comentario



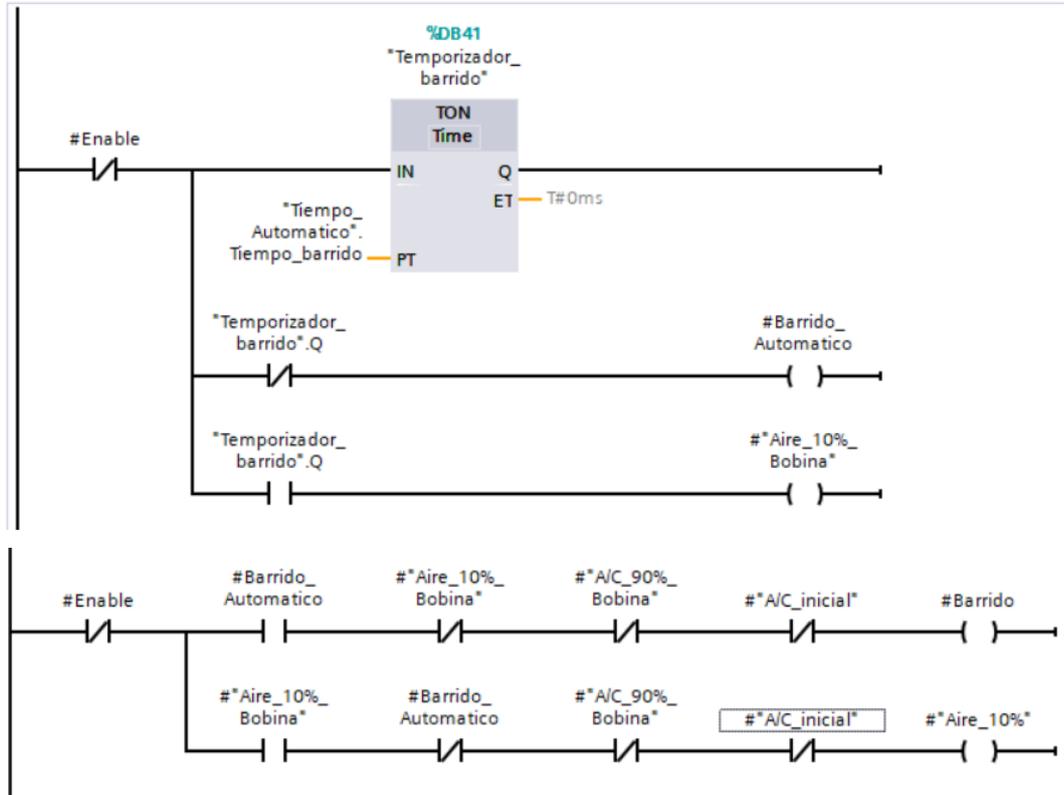




Título del bloque:
Arranque Automático

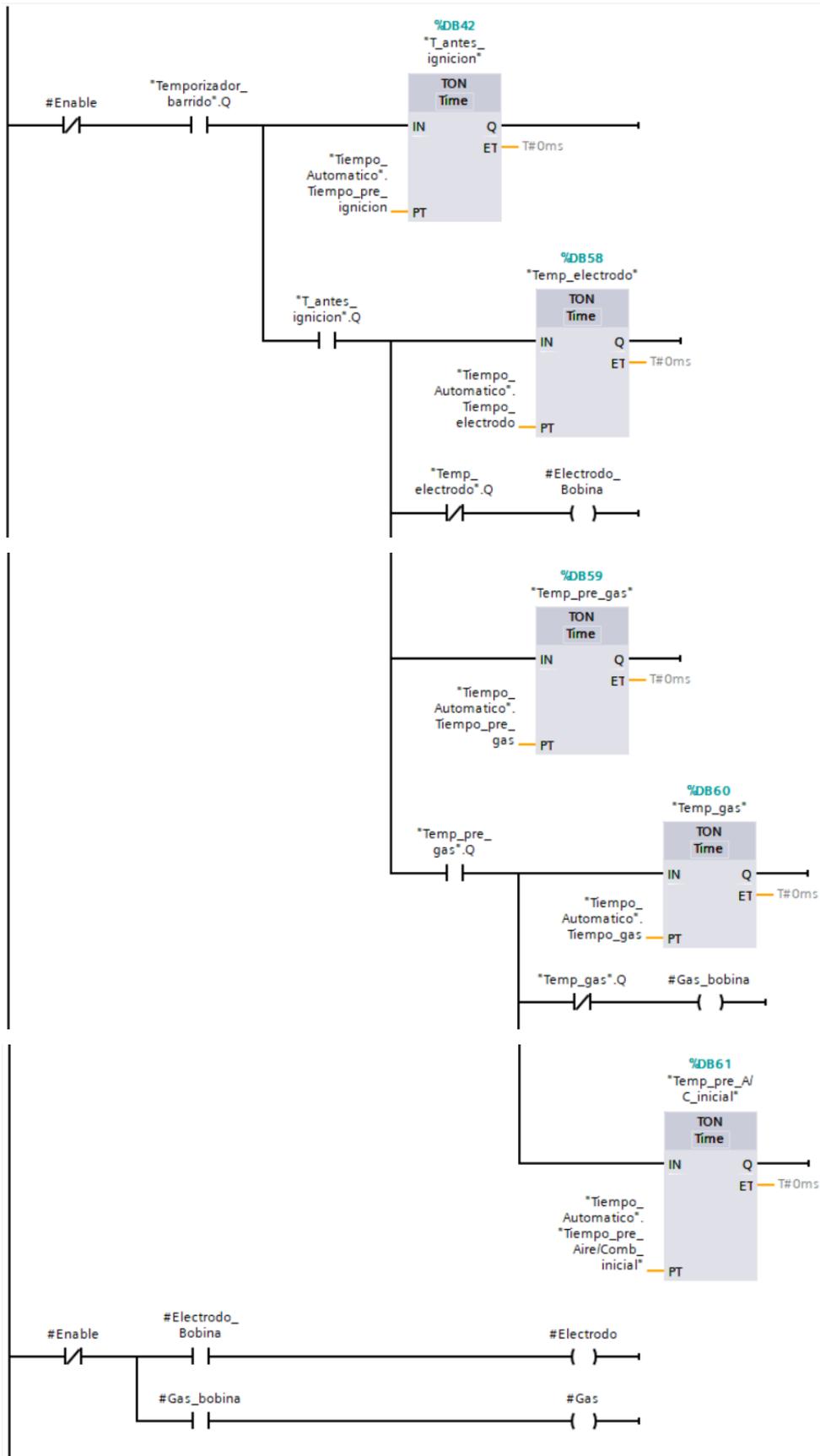
Segmento 1: Barrido

Comentario



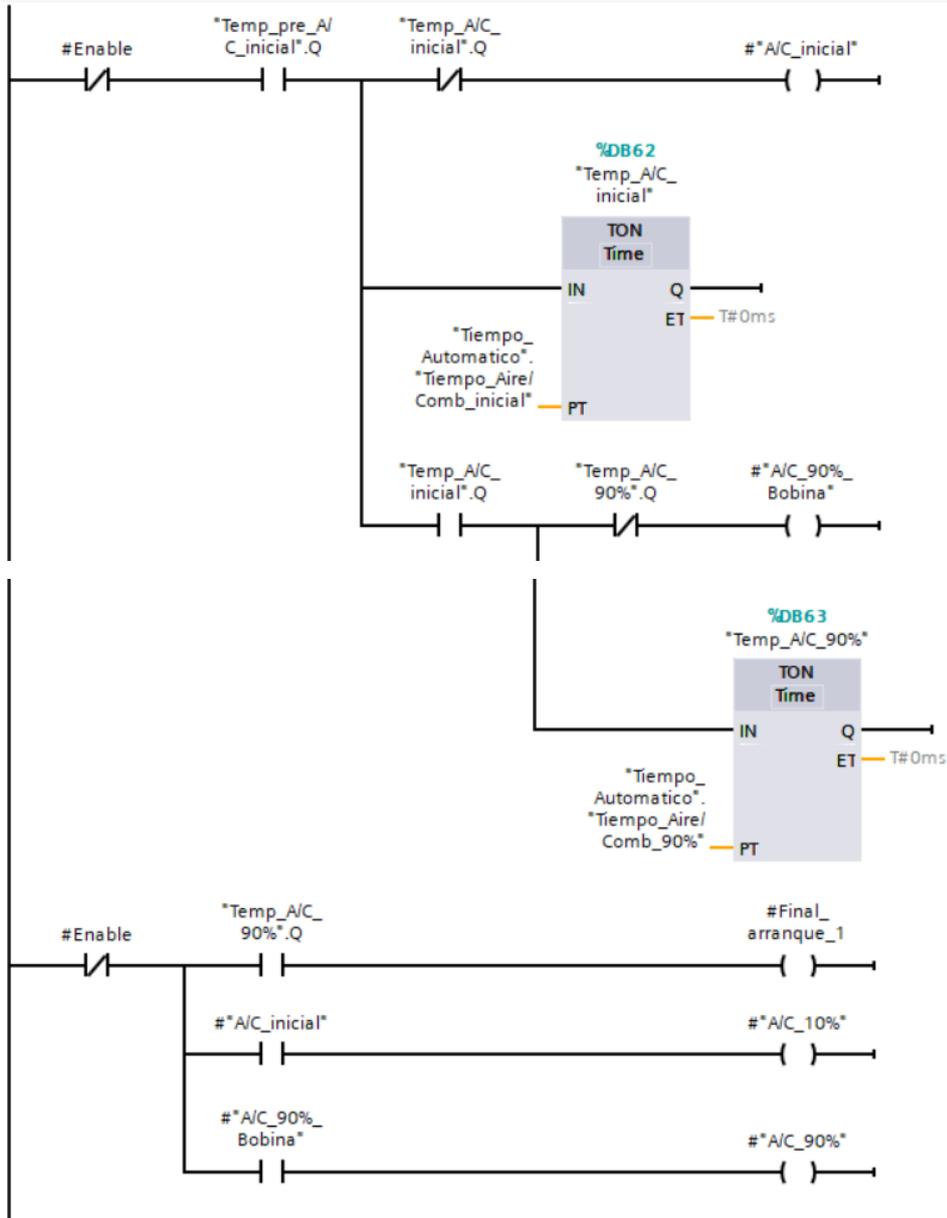
Segmento 2:

Comentario



Segmento 3: A/C 10% Y A/C 90%

Comentario

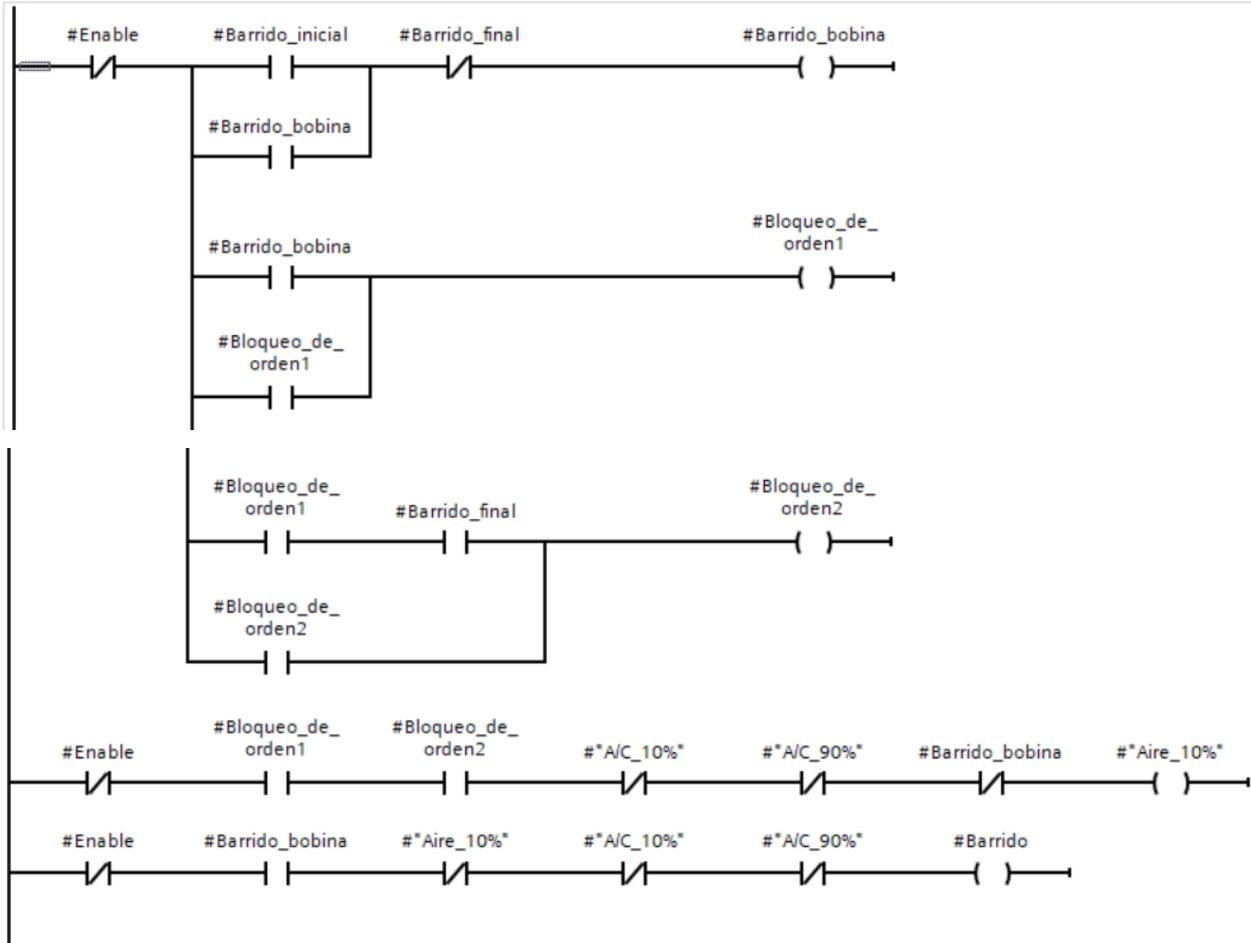


Título del bloque:

Arranque Manual

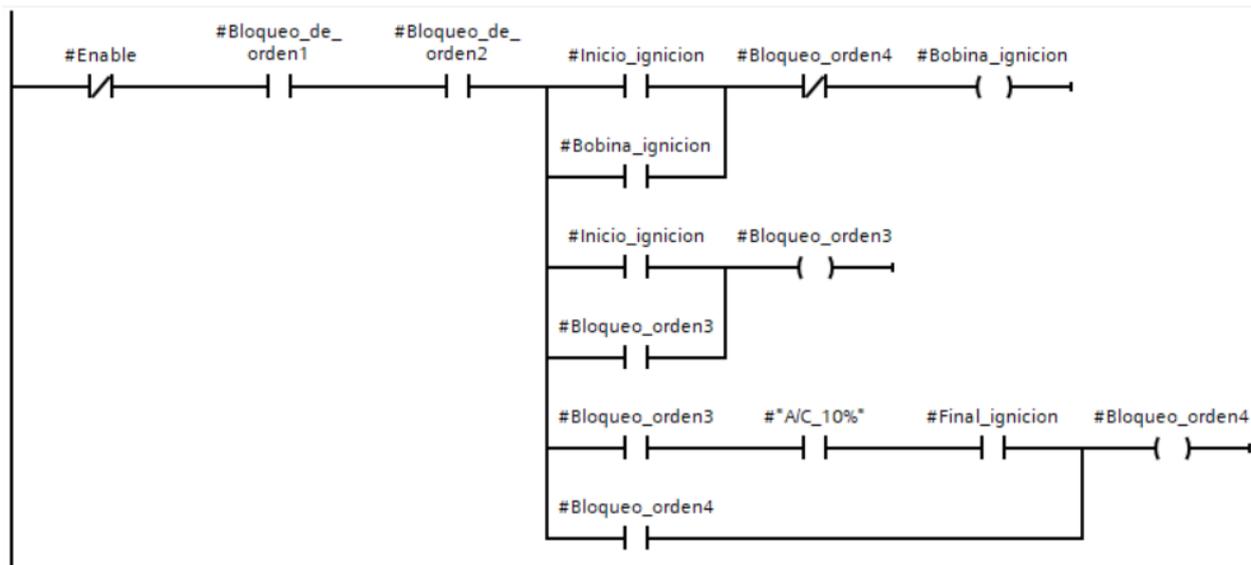
Segmento 1: Inicio_Barrido_Final_Barrido

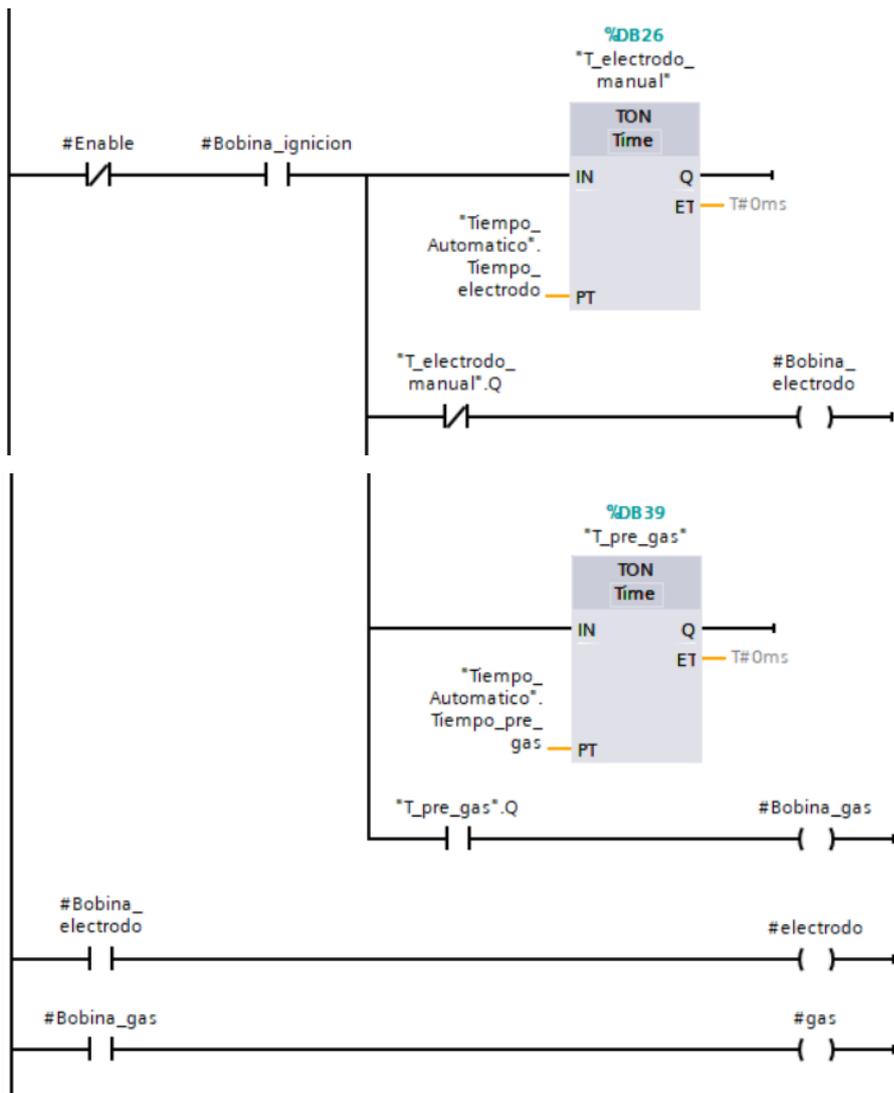
Comentario



Segmento 2: Ignicion

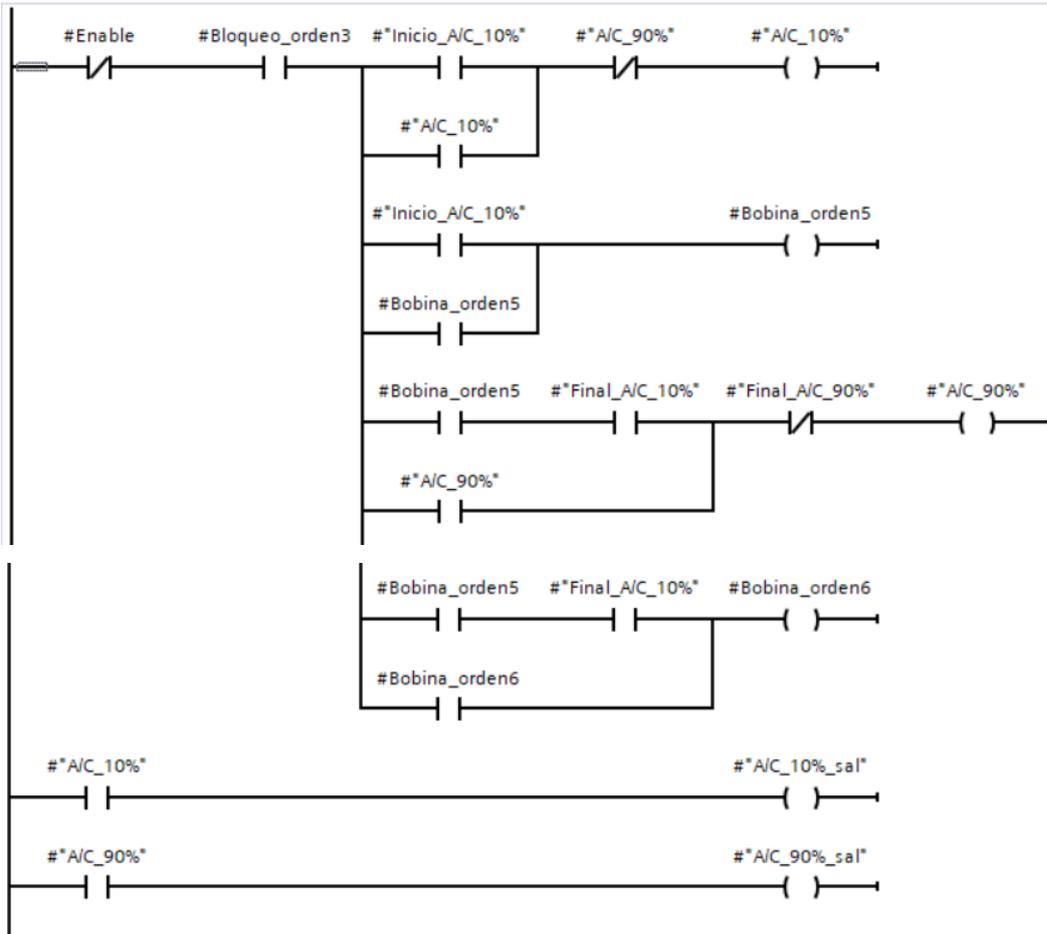
Comentario





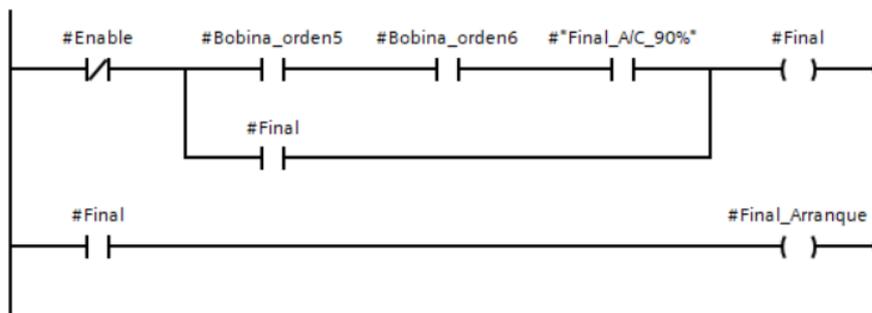
Segmento 3: A/C inicio 10% y final del 10% , Inicio y final 90%

Comentario



Segmento 4:

Comentario

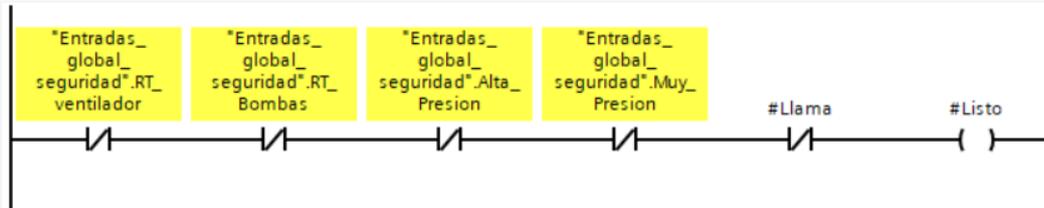


Título del bloque:

Evaluar estado de caldera

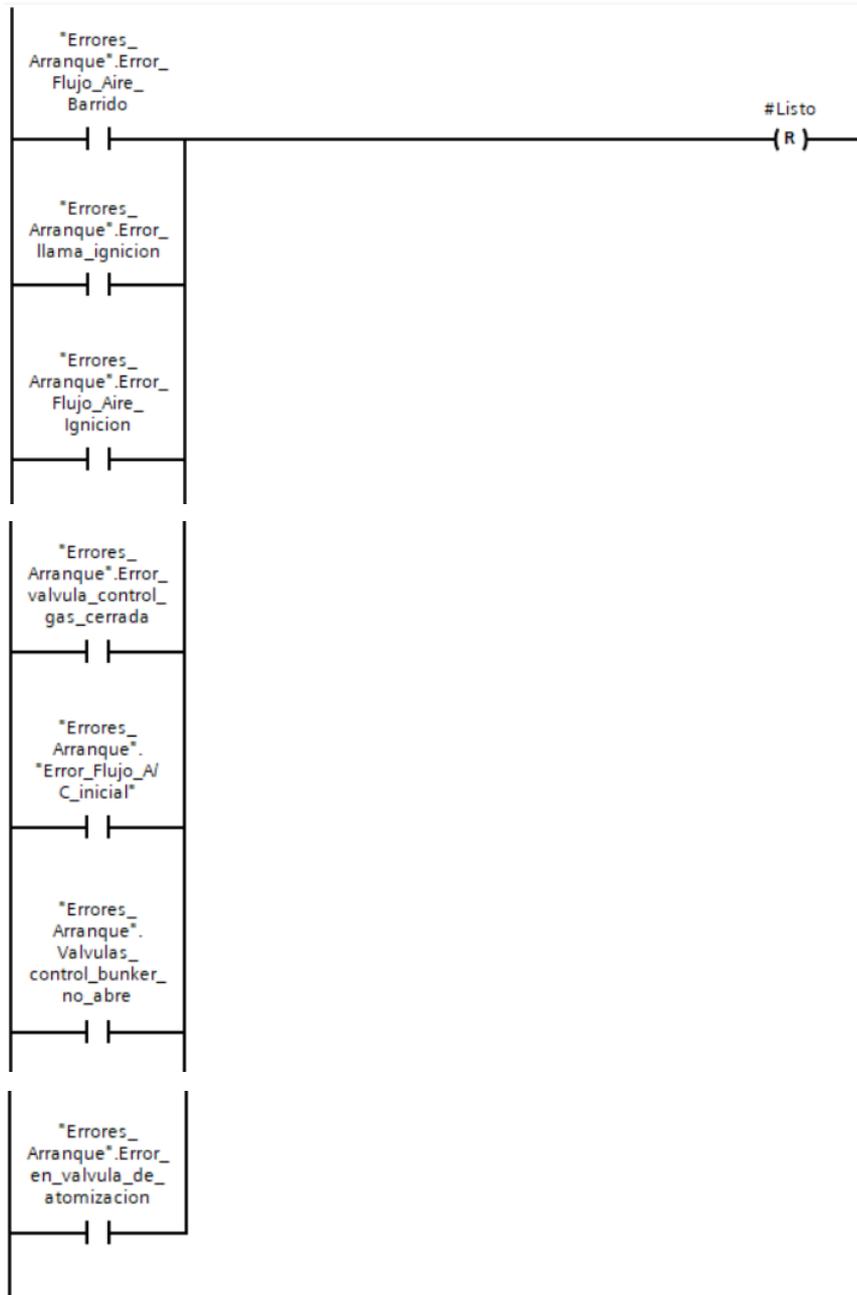
Segmento 1: Seguridad primaria antes del arranque

Comentario



Segmento 2: Errores por arranque_Reseteo del arranque

Comentario



Título del bloque:

Control del Quemador

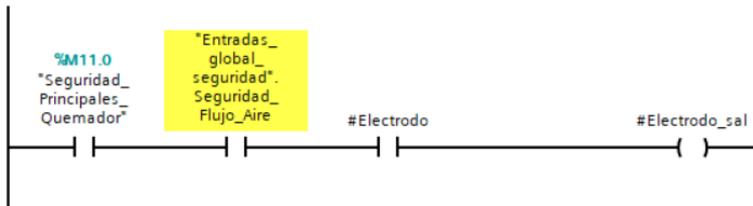
Segmento 1: Seguridad_Principal_Quemador

Comentario



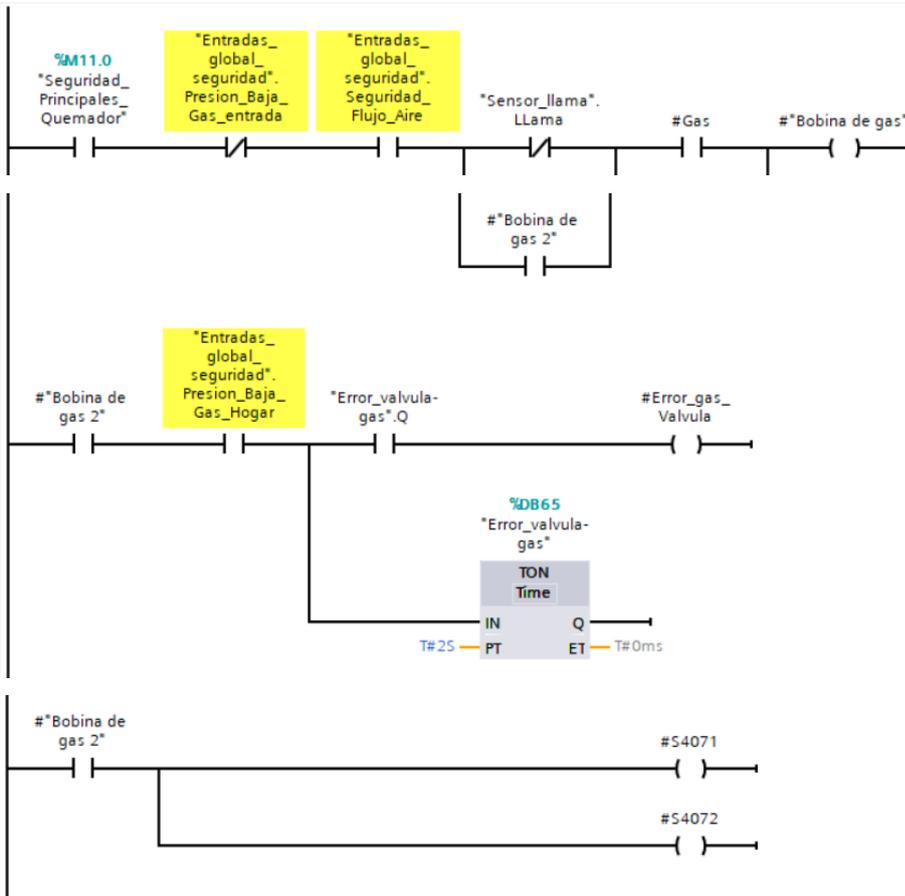
Segmento 2: Electrodo

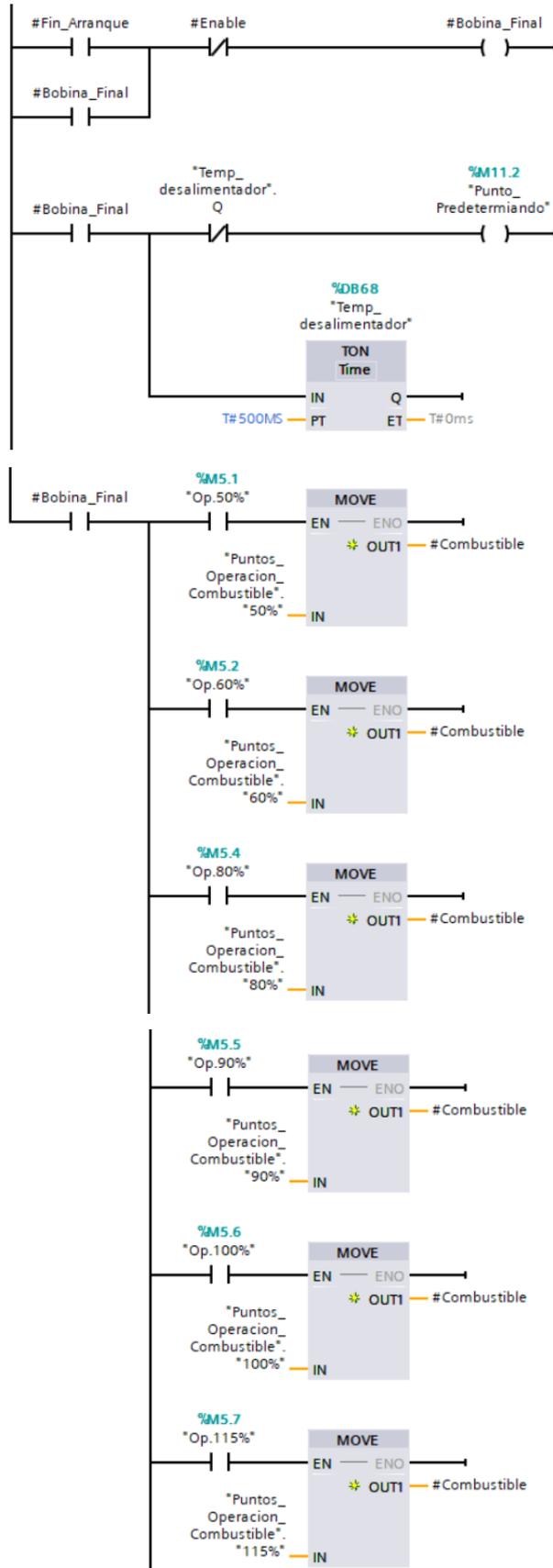
Comentario

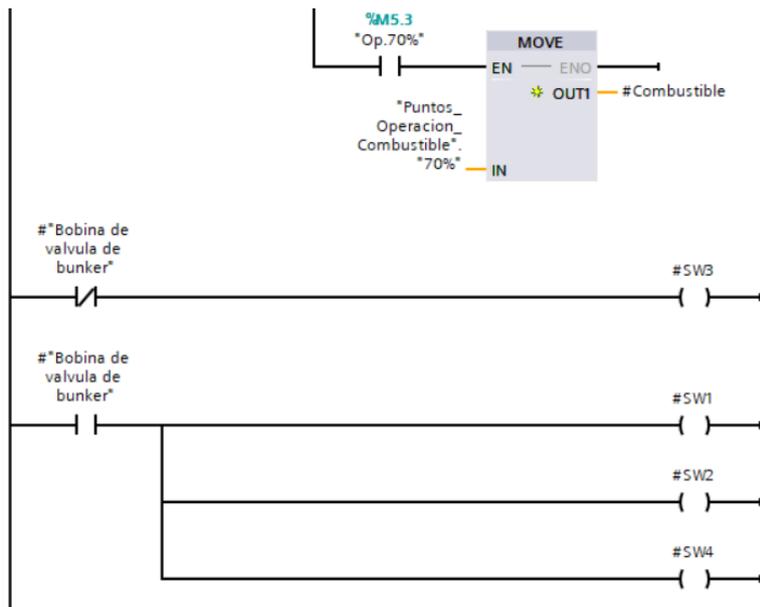


Segmento 3: Valvulas de entrada de gas

Comentario

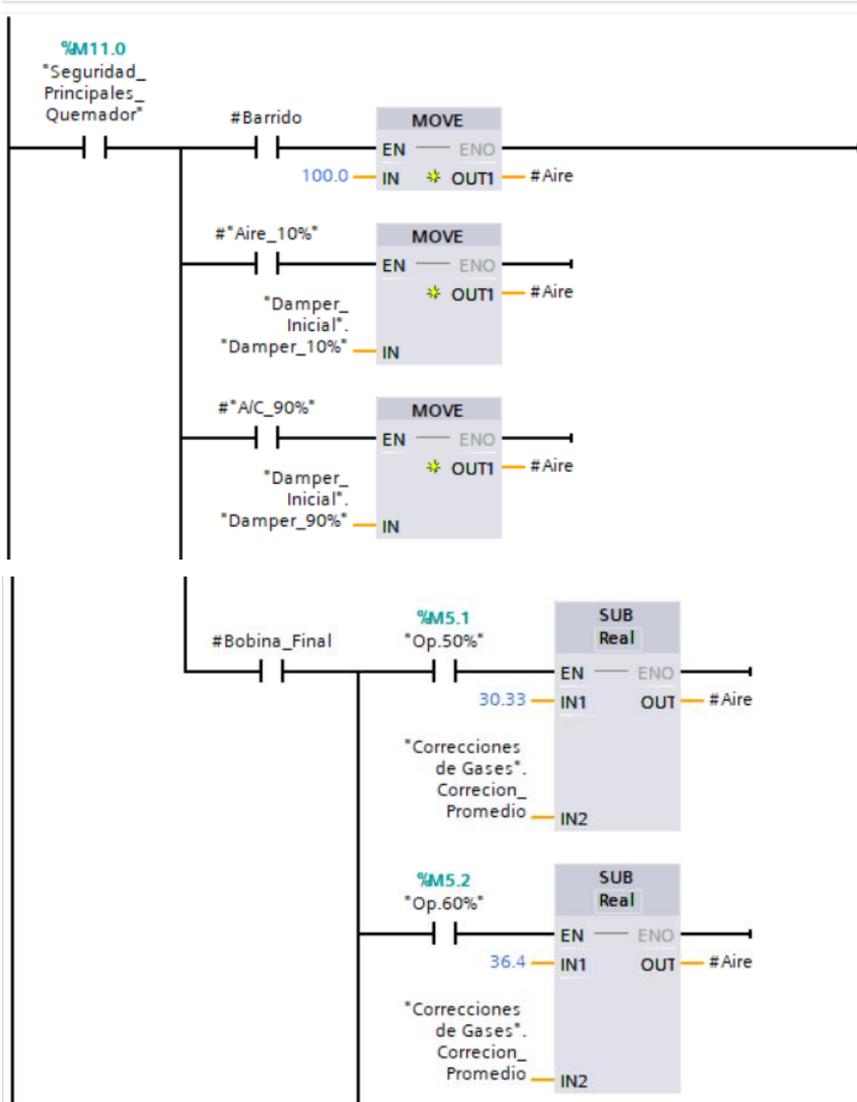


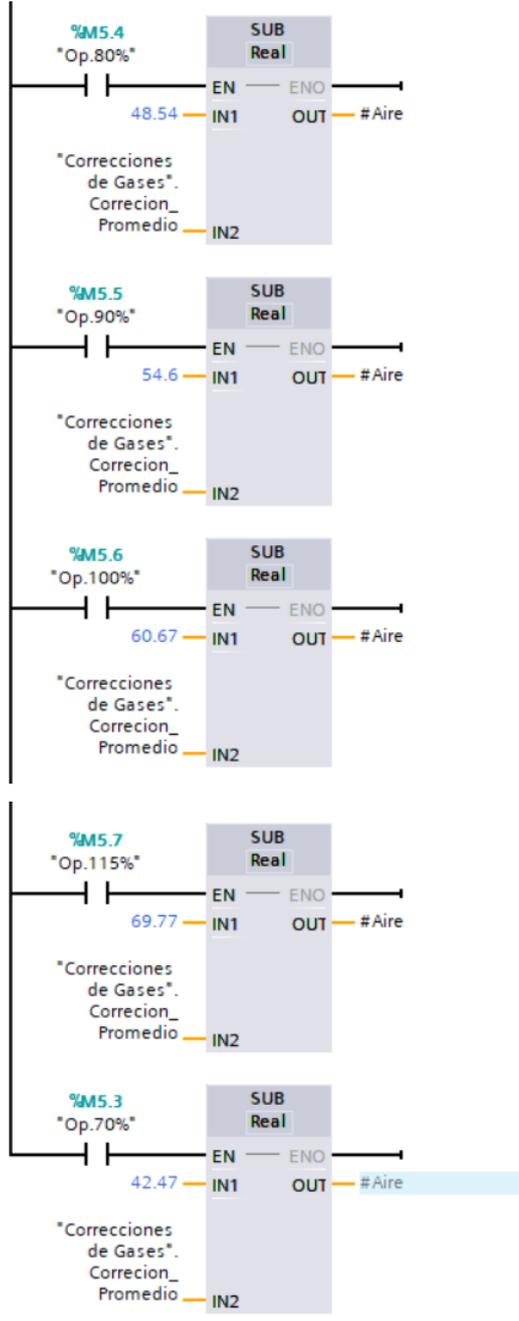




Segmento 5: Control de damper de quemador

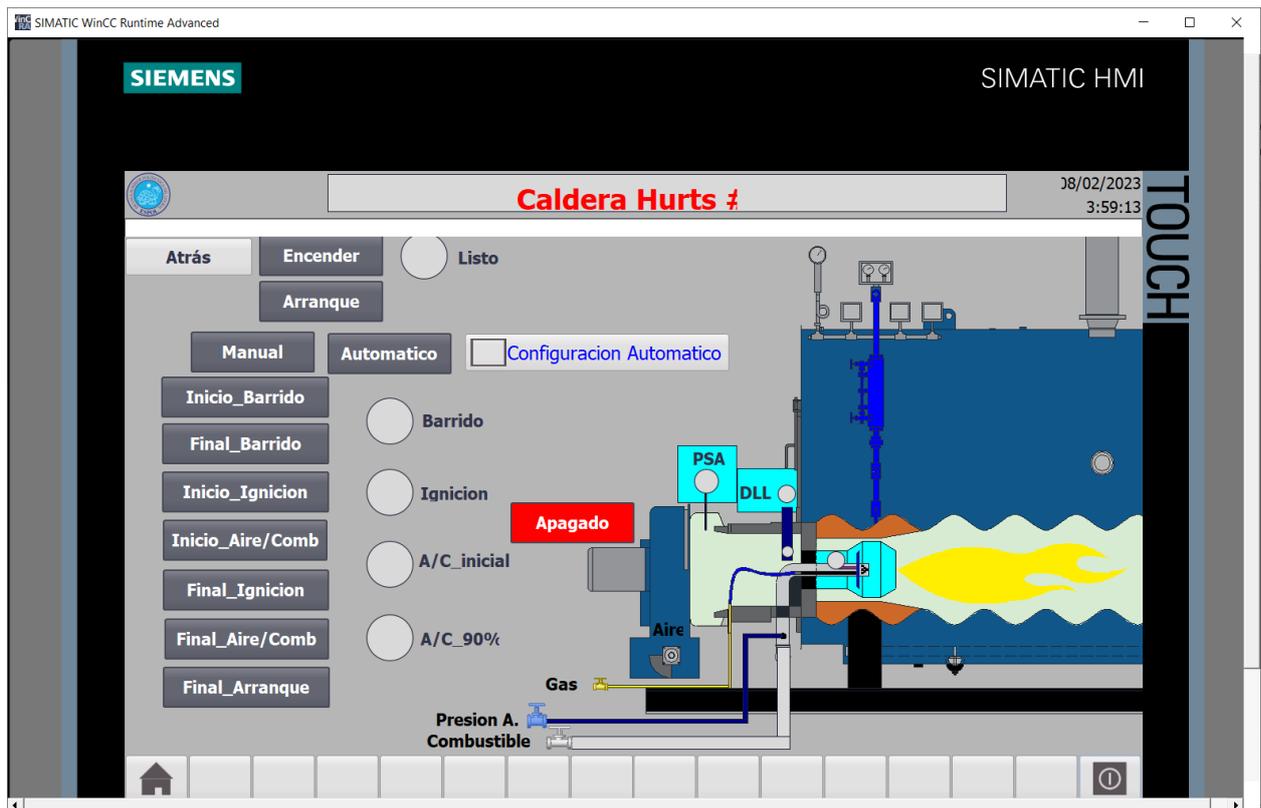
Comentario

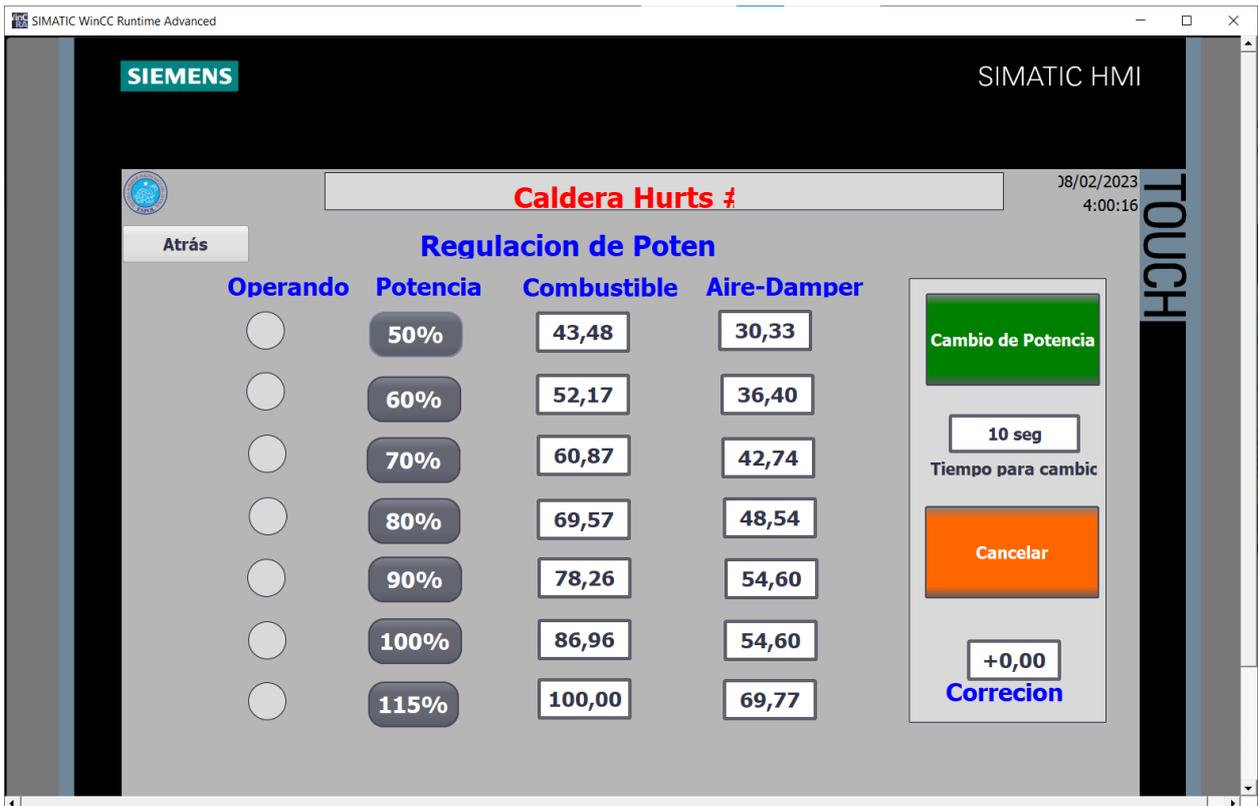
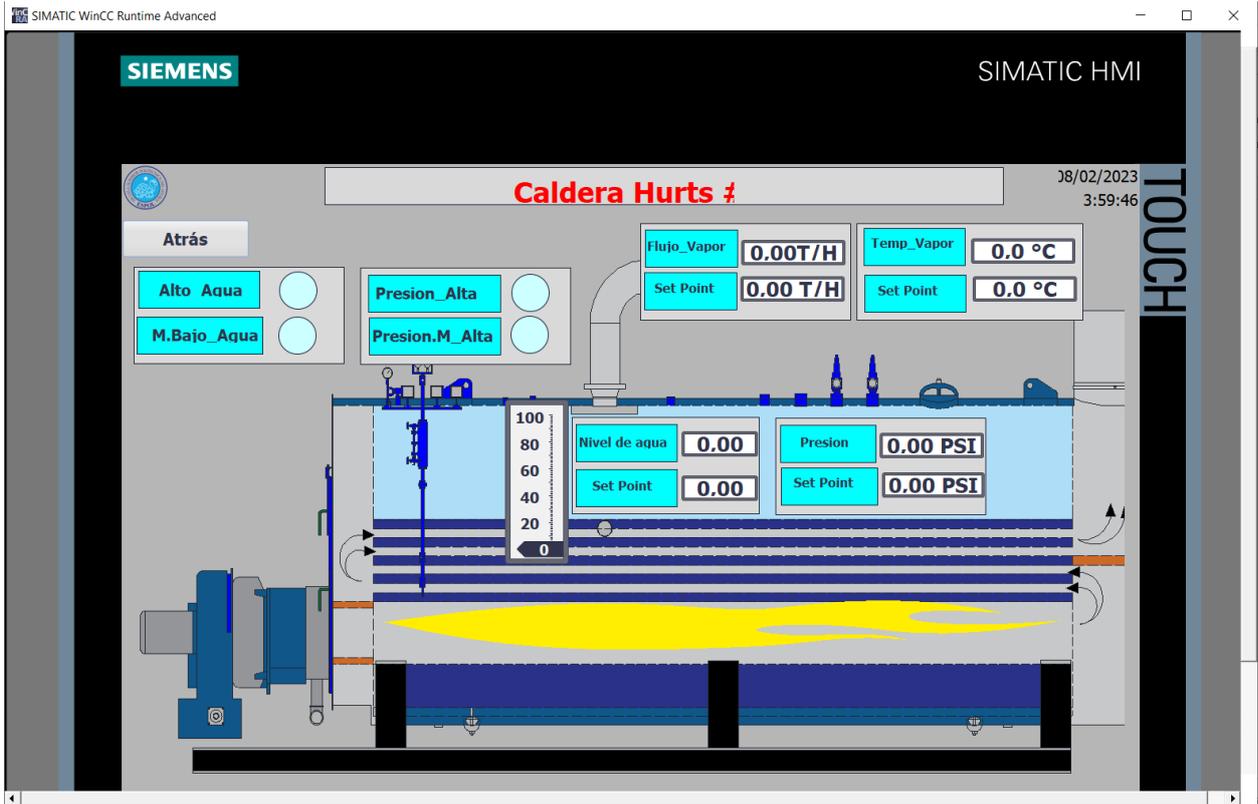




APÉNDICE B

Diseño de la pantalla HMI





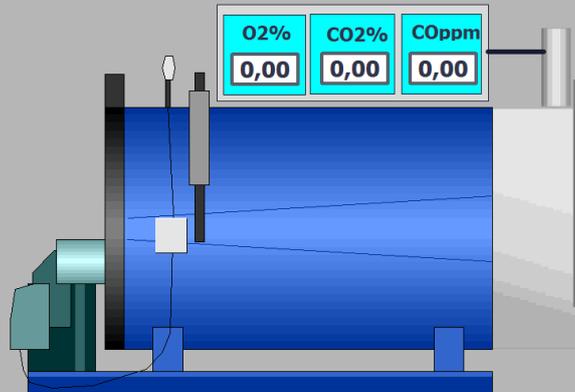


Caldera Hurts

08/02/2023
4:00:42

Atrás

Control de Gases de combustion



TOUCH

APÉNDICE C

Programación de la graficación hecha en un Script de Matlab:

```
clc
clear
close all
%Graficas de Curvas de Gases vs lambda
%O2 vs lambda
ne=(12+13/4)/0.21;
a=1
syms lambda
O2=0.21*lambda*((lambda -1)/(lambda-0.06))*ne;
figure(1)
ezplot(O2,[1,2])
ylim([0 16])
ylabel('O2% gases')
title('O2% vs lambda')
%C02 vs lambda
CO2=12*a/lambda;
figure(2)
ezplot(CO2,[1,2])
ylabel('CO2% gases')
title('CO2% vs lambda')

figure(3)
%C0 vs lambda
CO=12*(lambda-a)/lambda;
ezplot(CO,[1,2])
ylabel('CO% gases')
title('CO% vs lambda')

figure(4)
%H2O vs lambda
H2O=(-12*(a*(lambda-0.06)-0.0329*(lambda*ne-
30.3951*(lambda-0.06))*lambda))/(lambda*(lambda-0.06));
ezplot(H2O,[1,2])
ylabel('H2O% gases')
title('H2O% vs lambda')

figure(5)
%H2 vs lambda
H2=(13*(a*(lambda-0.06)*(lambda+0.923077)-
0.030369*(lambda*ne-30.3951*(lambda-
0.06))*lambda))/(lambda*(lambda-0.06));
ezplot(H2,[1,2])
ylabel('H2% gases')
```

```

title('H2% vs lambda')

figure(6)
CO2=12*a/lambda;
ezplot(CO2,[1,2])
hold on
H20=(-12*(a*(lambda-0.06)-0.0329*(lambda*ne-
30.3951*(lambda-0.06))*lambda))/(lambda*(lambda-0.06));
ezplot(H20,[1,2])
hold on
H2=(13*(a*(lambda-0.06)*(lambda+0.923077)-
0.030369*(lambda*ne-30.3951*(lambda-
0.06))*lambda))/(lambda*(lambda-0.06));
ezplot(H2,[1,2])
hold on
CO=12*(lambda-a)/lambda;
ezplot(CO,[1,2])
hold on
O2=0.21*lambda*((lambda -1)/(lambda-0.06))*ne;
ezplot(O2,[1,2])
legend({'CO2','H20','H2','CO','O2'},'Location','southwest')
title('Gases % vs lambda')

```