

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**“INSTRUMENTACIÓN PARA UN QUEMADOR DE
MEDIOS POROSOS INERTES”**

ESTEBAN ALBERTO ARRIAGADA QUISPE

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRÓNICO**

PROFESOR GUÍA:

ALEJANDRO SUÁREZ S.

PROFESOR CORREFERENTE:

DANIEL ERRAZ L.

PROFESOR CORREFERENTE:

MARIO TOLEDO T.

“A mi Padre, Abuelas, Hermanas y mi Mamá.”

Agradecimientos

Comenzar por mi padre y familiares por su apoyo incondicional en mi formación. De igual manera a la institución por la paideía de los saberes técnicos entregados, como también por la cantidad de personas que conocí. Entre maestros, compañeros, amigos y funcionarios.

Entre estos últimos a los funcionarios Ildefonso Reyes y Eliana Oyarce, con quienes pude compartir una etapa de labores en la biblioteca. A José Duque y Daniel Galleguillos por su colaboración en el desarrollo de este trabajo sobre todo cuando de encender los quemadores se trataba. Y a Jaqueline Souza por su asistencia al momento de calibrar los sensores de presión.

Agradecer la oportunidad de colaborar con Francisco Lara en el desarrollo de su trabajo de memoria el que nos juntaba en diferentes aristas del proyecto de instrumentación y que siempre pudimos sacar las misiones adelante.

Al centro de Robótica por permitir desarrollar las PCB en los talleres y espacios a los cuales tiene acceso.

A los miembros de QUEMPIN SpA. quienes propusieron el desafío de este trabajo de memoria y por su total colaboración y recomendaciones en su elaboración.

A los que por cosas del destino pude y puedo llamar Amigos, y compartir diversas aventuras dentro y fuera de la universidad. En esto quiero mencionar a Christian Fuentes, quien contribuyo con un pack de resistencias de todos los colores y con los cuales pude diseñar todos los circuitos presentados en este trabajo, también a Gabriel Reyes, con quienes pude desarrollar una cofradía única y la fundación de nuestra consultora, Ninja Hacker SpA. De igual manera a los amigos de la vida José Miguel, Gerardo Rojas, Sebastian Astargo.

A los diversos memoristas del departamento de mecánica con quienes pude colaborar multidisciplinariamente con sus proyectos y así también aprender un poco más de su arte.

Resumen.

El presente trabajo de título consiste en el desarrollo de la instrumentación y control para un quemador de medios porosos inertes (MPI). Con el propósito de diseñar una estrategia de automatización en su puesta en marcha. A través del acondicionamiento eléctrico de las diferentes señales físicas presentes en el proceso, se diseñan diferentes topologías de circuitos electrónicos para ser interpretados por la unidad de control, tales como PLC y μC .

Con implementación del diseño de un sensor para estimar el caudal de Aire y del actuador para el caudal de Gas, se genera un prototipo para el control de la razón Aire-Combustible sobre la operación del quemador.

Estos desarrollos se enmarcan en el desafío propuesto por la empresa QUEMPIN SpA. en el Programa de Memorias Multidisciplinarias impartido en la Universidad Técnica Federico Santa María.

Abstract

The present work consists of the development of an instrumentation system for an inert porous media burner (MPI), with the purpose of designing an automation strategy in its operation and control over the Air - Fuel ratio.

Through the electrical conditioning of the different physical signals present in the process, different topologies of electronic circuits are designed to be interpreted by both a PLC and microcontrollers. For your control.

With the implementation of the design of a sensor to estimate the Air flow and the design of an actuator for the Gas flow, a prototype is generated to control the Air-Fuel ratio on the operation of the burner.

These developments are part of the challenge proposed by the company QUEMPIN SpA. In the Multidisciplinary Memories Program taught at the Federico Santa María Technical University.

Glosario.

- MPI: Medios Porosos Inertes.
- Planta: Conjunto de elementos en el sistema del quemador.
- NCh: Norma Chilena.
- AM: Amplitud modulada.
- PLC: Programmable logic controller.
- μC : Micro - controlador.
- AO_i : Amplificador operacional i-ésimo.
- AI_i : Amplificador operacional de instrumentación i-ésimo.
- S.F.C.: Sequential Function Chart. (Gráfico de Función Secuencial)
- ω_s : Velocidad giro soplador, medidas en $[RPM]$.
- PWM: Pulse Width Modulation. (Modulación por Ancho de Pulso)

Unidades

- inH₂O: Pulgada de columna de Agua.
- KPa : Kilo Pascal.
- $\frac{L}{min}$: Litros por minuto
- RPM: Revoluciones por minuto.
- V: Volt.
- A: Ampere.
- °C: Grados Celcius.

Índice general

1.. <i>Introducción</i>	3
1.1. <i>Objetivos</i>	4
2.. <i>Descripción de la Planta</i>	5
2.1. <i>Quemador de Medios Porosos Inertes</i>	5
2.2. <i>Componentes de Planta</i>	6
2.3. <i>Secuencia de funcionamiento del quemador MPI</i>	7
2.3.1. <i>Estado de Espera</i>	7
2.3.2. <i>Estado de Pre-barrido</i>	8
2.3.3. <i>Estado de Encendido</i>	8
2.3.4. <i>Estado de Operación</i>	9
2.3.5. <i>Estado de Pausa</i>	10
2.4. <i>Fenómenos Físicos</i>	10
2.4.1. <i>Calor</i>	10
2.4.2. <i>Temperatura</i>	12
2.4.3. <i>Presión</i>	13
2.4.4. <i>Caudal</i>	14
2.4.5. <i>Medidores Volumétricos</i>	15
2.4.6. <i>Medidores térmicos</i>	20
2.4.7. <i>Reguladores de Caudal</i>	22
2.4.8. <i>Detección de Flama</i>	23

3..	<i>Acondicionamiento de Señales.</i>	25
3.1.	Presión.	25
3.1.1.	Topología	25
3.1.2.	Calibración	27
3.2.	Presostato.	29
3.3.	Ionización de Flama.	31
3.3.1.	Generador de tensión Dual.	31
3.3.2.	Oscilador senoidal puente de Wiew.	32
3.3.3.	Conexión Sonda de Ionización.	34
3.3.4.	Detector de Flama y salida Digital.	37
3.4.	Temperatura.	40
3.4.1.	Topología	40
3.4.2.	Calibración	41
3.5.	Caudal Aire.	45
3.6.	Caudal Gas.	46
3.6.1.	Medidor de pulsos.	46
3.6.2.	Flujómetro.	47
4..	<i>Control y automatización.</i>	50
4.1.	Máquina de Estados.	50
4.2.	Implementación en PLC.	51
4.2.1.	Matriz de Incidencia y Transición.	51
4.2.2.	Matriz de habilitación de transiciones y dinámica de actividades.	52
4.2.3.	Cálculo de Transiciones.	54
4.3.	Realización SFC mediante Ladder	55
5..	<i>Conclusiones.</i>	64

1. INTRODUCCIÓN.

Desde los orígenes de la humanidad, el fuego ha sido un elemento de gran interés para el ser humano. Su manipulación ha permitido el desarrollo de innumerables aplicaciones en la vida diaria, así como en diversos procesos de producción. En la actualidad, la generación de altas temperaturas es esencial en muchas fábricas, y se logra a través de la combustión de combustibles fósiles, lo que se asocia con la emisión de diferentes contaminantes, como material particulado y gases de efecto invernadero. Por tanto, es necesario encontrar formas más eficientes de realizar estos procesos de combustión.

En este contexto, surge QUEMPIN SpA., una empresa spinoff de la Universidad Técnica Federico Santa María, dedicada a la innovación en tecnologías de combustión. Esta empresa se dedica al desarrollo de tecnologías de procesos térmicos, y fabrica quemadores industriales que incorporan medios porosos inertes (MPI) en aplicaciones de hornos utilizados en panaderías. Gracias a estos quemadores, se logran generar altas temperaturas de una manera más eficiente en comparación con los quemadores de flama libre. Esto se debe a que la generación de calor se produce mediante el efecto de la radiación en el medio poroso, en lugar de solamente la convección producida por la flama libre.

1.1. Objetivos.

Dentro de los objetivos de este trabajo de memoria se encuentran los siguientes:

- Instrumentación debe cumplir con la norma NCh3111 : "Quemadores de aire forzado que utilizan combustible gaseoso".
- Acondicionamiento eléctrico de variables presentes en la planta, tales como:
 1. Temperatura.
 2. Presión.
 3. Detección de Flama.
 4. Caudal de Aire.
 5. Caudal de Gas.
- Diseño de circuitos en PCB.
- Programación unidad de control PLC.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.

2.1. *Quemador de Medios Porosos Inertes*

En el contexto actual del panorama energético mundial, existe una clara tendencia hacia la reducción de emisiones y el uso más eficiente de los combustibles fósiles, lo que conlleva beneficios tanto económicos como medioambientales. En este sentido, la combustión en medios porosos inertes se presenta como una alternativa altamente prometedora, ya sea como fuente energética en procesos industriales o como post-procesamiento para gases resultantes de la combustión.

La ventaja de la combustión en medios porosos inertes radica en la presencia del medio sólido inerte, el cual absorbe el calor liberado durante la reacción exotérmica y lo conduce hacia la zona de entrada de la mezcla combustible-aire. En esta zona, la energía es transferida por convección a la mezcla fresca, que es precalentada antes de ser quemada. Este proceso aumenta gradualmente la temperatura en el frente de llama generado, lo que puede derivar, en algunos casos, en la obtención de temperaturas super-adiabáticas, es decir, temperaturas más elevadas que las obtenidas con la combustión convencional de flama libre.[1]

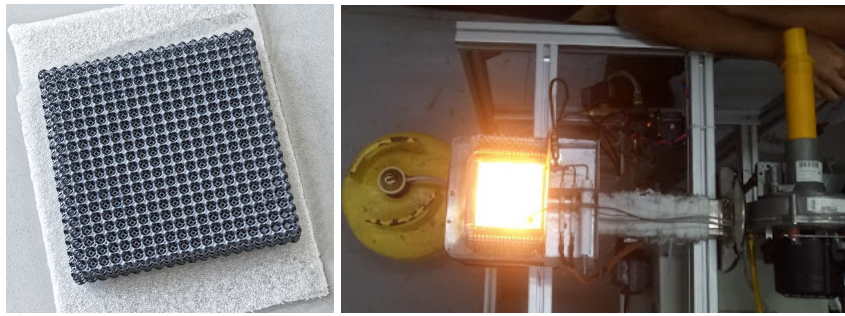


Fig. 2.1: Quemador de Medios Porosos Inertes.

2.2. Componentes de Planta.

Los quemadores MPI fabricados se encuentran constituidos por diversos componentes que deben ser operados en una secuencia específica para lograr su correcto funcionamiento. Este conjunto de componentes establece un sistema que puede ser analizado según la teoría de control como una planta.

En la figura 2.2 se puede observar la interconexión de estos componentes en la planta, mientras que en la tabla 2.1 se describen los símbolos utilizados en el diagrama.

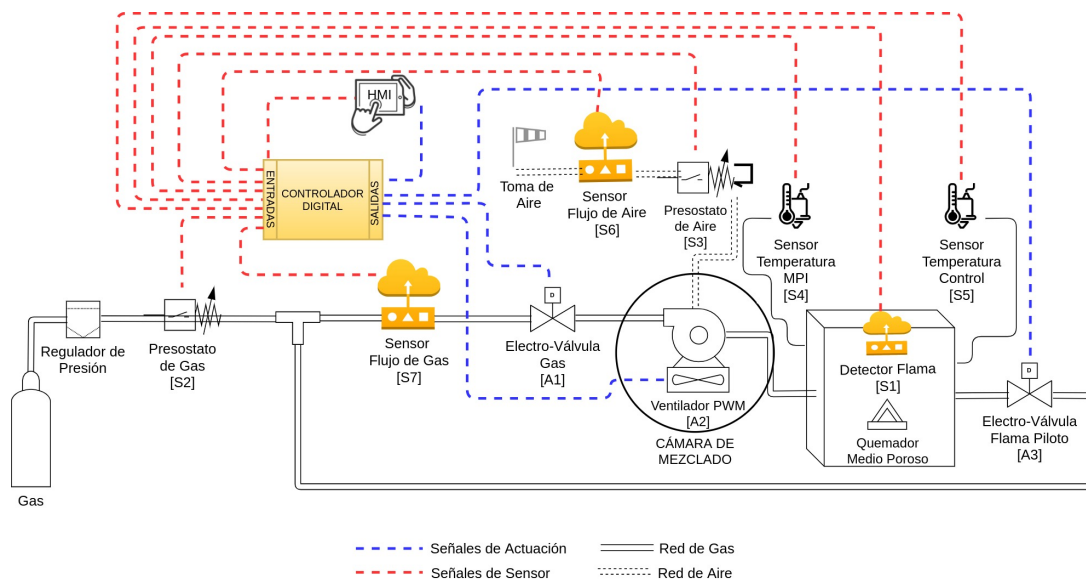


Fig. 2.2: Diagrama de Interconexión Planta: Quemador MPI.

Símbolo	Tipo	Descripción
S1	Entrada	Detector de Flama.
S2	Entrada	Presostato de Gas.
S3	Entrada	Presostato de Aire.
S4	Entrada	Sensor Temperatura MPI.
S5	Entrada	Sensor Temperatura Control.
S6	Entrada	Sensor Flujo de Aire.
S7	Entrada	Sensor Flujo de Gas.
S8	Entrada	Instrucciones por HMI.
A1	Salida	Electro-Válvula Gas.
A2	Salida	Ventilador PWM.
A3	Salida	Electro-Válvula Flama Piloto.
A4	Salida	Chispero eléctrico
A5	Salida	Monitoreo señales HMI.

Tab. 2.1: Tabla de Símbolos. Planta MPI.

2.3. *Secuencia de funcionamiento del quemador MPI*

Debido a sus características constructivas e inercia térmica, los quemadores MPI tienen una secuencia de funcionamiento específica para su correcta operación. Esta secuencia consta de cinco estados: Espera, Pre-barrido, Encendido, Operación y Pausa. Cada uno de estos estados controla el comportamiento de los diferentes componentes y eventos temporales del quemador, los cuales se describen a continuación:

2.3.1. *Estado de Espera*

En este estado, todos los componentes del quemador están conectados pero inactivos, a la espera de la señal de inicio. Se verifica que la temperatura del cabezal ($T_{Cabezal}$) esté por debajo de la temperatura de seguridad en el cabezal ($T_{Seguridad\ Cabezal}$)

para proteger la integridad del medio poroso ante cambios bruscos de temperatura. También se verifica la presencia de gas antes de iniciar la operación.

2.3.2. Estado de Pre-barrido

Este estado se produce antes de encender el quemador MPI y tiene como objetivo principal limpiar los ductos de los gases residuales presentes durante el intervalo de tiempo de preventilación (T_{PV}). Para ello, se activa el soplador a su máxima velocidad (ω_{s1}) y se monitorea la presencia de aire requerida dentro de los tiempos de detección (T_{DA}).

El quemador MPI vuelve al estado de Espera si no detecta la presencia de aire en el tiempo de detección de aire, pierde el suministro de gas, detecta señal de presencia de flama o mediante el pulsador de parada de emergencia.

2.3.3. Estado de Encendido.

En este estado, se procede a encender la flama piloto y estabilizar el cabezal de combustión hasta que alcance la incandescencia. Para ello, la planta sigue una secuencia determinada de activación de sus componentes asociada a temporizadores que garantizan un encendido exitoso del quemador.

El soplador reduce su velocidad de giro a una velocidad ω_{s2} y activa el chispero de encendido, al mismo tiempo que se inicia el temporizador del “tiempo de pre-encendido” (T_{PEN}). Una vez transcurrido este tiempo, se activa la válvula de gas que suministra la flama piloto, junto con el inicio de la cuenta de los temporizadores de “tiempo de post-encendido” (T_{PSE}), “tiempo de seguridad” (T_{SEG}) y “tiempo de apertura entre válvulas” (T_{VAL}).

Una vez transcurrido el tiempo T_{PSE} , se desactiva el chispero de encendido y se verifica que la flama piloto se haya encendido antes de que se cumpla el tiempo T_{SEG} mediante la detección de la presencia de la flama. Si no se detecta la presencia de la flama, el sistema se bloquea y pasa al estado de espera.

Cuando se cumplen los tiempos T_{SEG} y T_{VAL} , se abre la válvula de gas que suministra al cabezal del quemador y se inician los temporizadores de “tiempo de encendido exitoso” (T_{EE}) y de “tiempo de estabilización” (T_{EST}).

Una vez transcurrido T_{EE} , se activa la señal de Encendido Exitoso. Finalmente, al cumplir el tiempo T_{EST} , se pasa al siguiente estado de operación. La secuenciación de los temporizadores descrita, se puede observar en la figura (2.3).

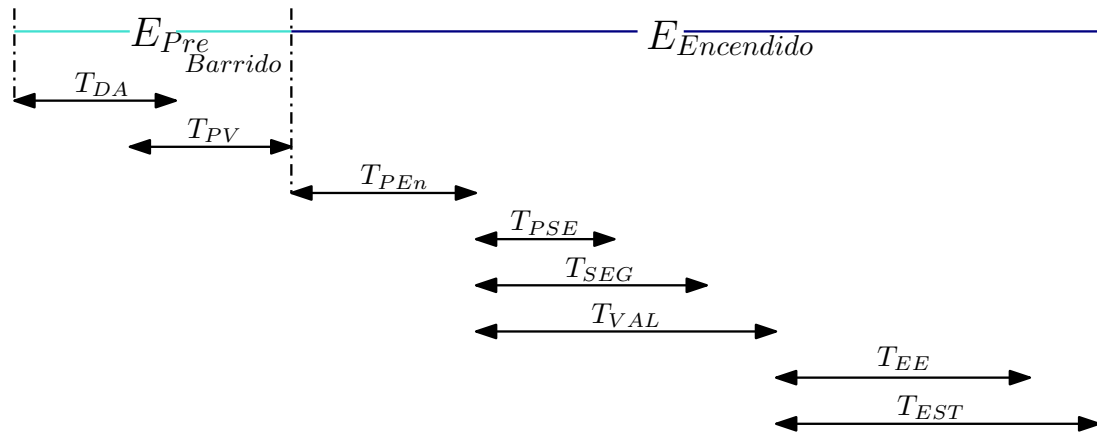


Fig. 2.3: Diagrama de secuenciación temporizadores.

2.3.4. Estado de Operación.

En este estado la planta asegura su operación de trabajo, suministrando la fuente de calor requerida en la cámara horno, la que suele estar en torno a los $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para conseguir esto el soplador gira a una velocidad operación ω_{s3} , la cual es menor que las anteriores ($\omega_{s1} > \omega_{s2} > \omega_{s3}$).

La planta cuenta con un sensor de “temperatura de control” ($T_{Control}$) dispuesta en la cámara del horno, con la cual permite definir la temperatura máxima ($T_{ControlMax}$) y mínima ($T_{Controlmin}$) de trabajo deseada en el horno.

Cuando la temperatura supera ($T_{ControlMax}$) el sistema debe apagarse, llevando a la planta al estado siguiente de Pausa.

2.3.5. Estado de Pausa.

En este estado, la planta detiene el suministro de gas al quemador y a la flama piloto al bloquear las válvulas correspondientes. La unidad de control monitorea continuamente la temperatura de control $T_{Control}$ hasta que se reduce a un valor inferior a la temperatura de control mínima $T_{Controlmin}$. Además, se verifica que la temperatura del cabezal sea menor que la temperatura de seguridad de encendido.

Una vez que ambas condiciones se cumplen, la planta es conducida al estado de encendido para reanudar su operación.

2.4. Fenómenos Físicos.

En los hornos con quemadores MPI se pueden presentar varios fenómenos físicos, como la combustión, la transferencia de calor, la convección y la radiación.

La convección se produce cuando el aire caliente se mueve en el horno, llevando consigo el calor y distribuyéndolo por toda la cámara del horno. Por último, la radiación térmica se produce cuando la energía térmica se transfiere a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas (infrarrojas).

En particular para la operación de estos quemadores se presentan fenómenos que se deben acondicionar para que la unidad de control pueda hacer funcionar el proceso. A continuación se describen estos fenómenos para su posterior acondicionamiento electrónico.

2.4.1. Calor.

El calor es la transferencia de energía térmica de un objeto o sistema a otro debido a una diferencia de temperatura. Esta transferencia puede ocurrir por conducción, convección o radiación. El calor siempre fluye desde un objeto caliente a uno más frío hasta que ambos alcanzan un equilibrio térmico.

Es importante notar que el calor es una forma de energía en tránsito y no debe confundirse con la temperatura, que es una medida de la energía térmica contenida en un

objeto.

Conducción.

La conducción es un proceso en el que el calor se transmite a través de la interacción directa de las partículas de un material. Las partículas con mayor energía cinética transfieren parte de su energía a las partículas adyacentes con menor energía, generando un flujo de calor.

Convección.

La convección es la transferencia de calor mediante el movimiento de un fluido, como un líquido o un gas. A medida que el fluido se calienta, se vuelve menos denso y tiende a ascender, mientras que el fluido frío desciende. Este movimiento en forma de corrientes genera la transferencia de calor.

Calor Radiante.

El calor radiante es una forma de transferencia de calor que ocurre a través del espacio en forma de radiación electromagnética, en lugar de requerir un medio material para su propagación. Esta radiación electromagnética abarca un amplio espectro, desde ondas de radio y microondas hasta luz visible, infrarrojo, ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

Las leyes mencionadas sobre el calor radiante son principios básicos que describen su comportamiento:

1. Un cuerpo caliente emite calor radiante en todas las direcciones alrededor de él. Esto significa que un cuerpo caliente irradia energía térmica en forma de radiación electromagnética.
2. El calor radiante se propaga en línea recta en un medio homogéneo. Esto significa que, en ausencia de obstáculos o interferencias, la radiación viaja en una trayectoria directa.

3. A diferencia de la conducción y la convección, el calor radiante puede transmitirse a través del vacío. No se requiere un medio material para que la radiación electromagnética se propague, lo que la distingue de las otras formas de transferencia de calor.
4. La intensidad del calor radiante disminuye a medida que aumenta la distancia entre la fuente de radiación y el objeto receptor. Esta disminución sigue una relación inversa al cuadrado de la distancia, lo que significa que la radiación se dispersa y debilita a medida que se aleja de la fuente.
5. Cuando un rayo de calor incide sobre una superficie pulida, se refleja siguiendo la ley de reflexión. Esto significa que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, y ambos ángulos se encuentran en un plano normal a la superficie.

Estas leyes y principios son fundamentales para comprender cómo se propaga y se comporta el calor radiante en diversas situaciones.

2.4.2. *Temperatura.*

La temperatura se define como la medida de la energía cinética promedio de las partículas en un sistema. A medida que las partículas se agitan más rápidamente, aumenta su energía cinética y, por lo tanto, la temperatura del sistema.

Esta se mide en diferentes escalas, como Celsius $^{\circ}C$, Fahrenheit $^{\circ}F$ y Kelvin K . La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales.

Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor, y por el tipo de instrumento indicador.[2]

Para su medición se utilizan Termopares, estos se basan en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas uniones se mantienen a distinta temperatura. Esta circulación

de corriente obedece a dos efectos termoelectricos combinados: el efecto Peltier, que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión, y el efecto Thomson, que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.[6]

2.4.3. Presión.

La presión es una magnitud física que se define como la fuerza que actúa sobre una superficie por unidad de área.

Se puede medir en distintas unidades, como el pascal Pa , el bar, las atmósferas atm , los kilogramos por centímetro cuadrado kg/cm y las libras por pulgada cuadrada psi . En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad de presión es el pascal, que se define como la presión ejercida por una fuerza de un newton sobre una superficie de un metro cuadrado.

El uso de sensores de presión, como el sensor piezoresistivo XGZP de 10 KPa , permite medir la presión en el rango de operación del quemador y generar una señal de tensión proporcional a la presión medida. Esto es útil para monitorear el flujo de aire y asegurar que se estén suministrando las cantidades adecuadas para una combustión eficiente. La figura (2.4) muestra el encapsulado del sensor, mientras que la figura (2.5) muestra su esquema eléctrico interno y la disposición de sus pines de conexión.

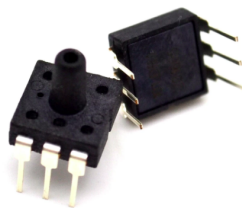


Fig. 2.4: Encapsulado Sensor Presion XGZP 10 KPa.

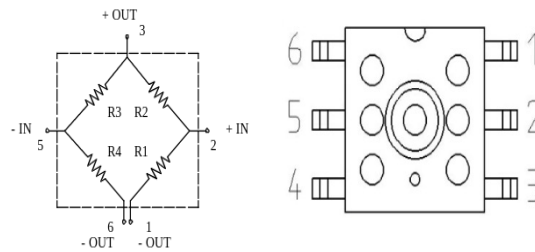


Fig. 2.5: Esquema configuración interna Sensor de Presión XGZP 10 KPa.

Además de los sensores de presión, también se utilizan presostatos para detectar la presencia de un cierto nivel de presión y activar un mecanismo que cierra un interruptor. Esto es útil para detectar cambios en la presión del sistema y tomar acciones adecuadas, como detener el suministro de aire o combustible si la presión es demasiado baja para garantizar una combustión segura. En la figura (2.6) ilustra un ejemplo de presostato implementado.



Fig. 2.6: Presostato.

2.4.4. Caudal.

El caudal, en dinámica de fluidos, se refiere a la cantidad de fluido que fluye a través de una sección de conducto, ya sea una tubería, cañería, oleoducto, río, canal, entre otros, en un intervalo de tiempo determinado. Por lo general, se mide en términos de flujo volumétrico, es decir, el volumen de fluido que atraviesa un área específica en una unidad de tiempo. La unidad de medida estándar en el Sistema Internacional es el metro cúbico por segundo (m^3/s), aunque en ciertos casos también se utiliza el litro

por minuto (L/min).

Es de vital importancia medir el caudal de combustible y aire que ingresan a un quemador de inyección de combustible múltiple (MPI) para poder controlar su funcionamiento y garantizar un rendimiento óptimo. Existen diferentes métodos para medir tanto el caudal volumétrico como el caudal másico, dependiendo de la necesidad específica.

2.4.5. Medidores Volumétricos.

Los medidores volumétricos se utilizan para determinar el caudal en volumen de un fluido, ya sea mediante un proceso de desplazamiento directo o deducido a partir de variables como la presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida y torbellino. Es importante destacar que en la industria, la medición del caudal volumétrico se realiza principalmente a través de elementos que generan una presión diferencial al paso del fluido. Algunos de los elementos utilizados incluyen la placa orificio o diafragma, la tobera y el tubo de Venturi.

Tubo de Venturi.

El tubo de Venturi es un medidor de caudal volumétrico que se basa en el principio de Bernoulli para medir la diferencia de presión generada por el estrechamiento de una sección de tubería. Consiste en un tubo que presenta una sección estrecha en el centro, lo que provoca una reducción en la sección transversal del fluido. A medida que el fluido fluye a través del tubo, la velocidad aumenta en la sección estrecha, lo que resulta en una caída de presión medida por sensores colocados en cada lado de dicha sección. La diferencia de presión entre los dos sensores se utiliza para calcular el caudal volumétrico del fluido mediante una ecuación derivada del teorema de Bernoulli. Los tubos de Venturi se utilizan comúnmente en la industria para medir el caudal de fluidos en tuberías.

La fórmula para el caudal, obtenida mediante elementos de presión diferencial, se

basa en la aplicación del teorema de Bernoulli. Este teorema establece que la suma de la altura cinética, la altura de presión y la altura potencial en una tubería horizontal es constante, como se puede observar en la Figura 2.7.

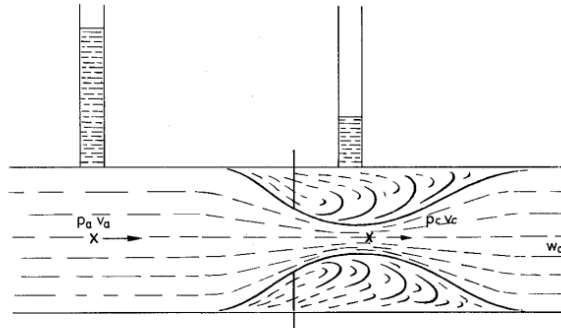


Fig. 4.1 Teorema de Bernoulli.

Fig. 2.7: Teorema de Bernoulli.

En la figura, P_a y P_c representan las presiones absolutas y V_a y V_c las velocidades en las zonas anterior a la placa, donde el fluido llena todo el conducto, y en la vena contraída, respectivamente. S_a y S_c son las secciones correspondientes. Las ecuaciones (2.1) y (2.2) describen la relación entre estas variables:

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_0} = \frac{V_c^2}{2} + \frac{P_c}{\rho_0} \quad (2.1)$$

$$Q_v = S_a \cdot V_a = S_c \cdot V_c \quad (2.2)$$

En estas ecuaciones, ρ_0 representa la densidad del fluido (aire) y Q_v el caudal volumétrico. Al despejar V_c de la ecuación (2.1) y sustituirlo en la ecuación (2.2), se obtiene la siguiente expresión para el caudal volumétrico:

$$Q_v = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}} \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3), β representa la relación entre los diámetros, es decir, $\beta = d/D$, donde d es el diámetro de la vena comprimida y D es el diámetro de la tubería.

En la figura (2.8) se puede notar la disposición geométrica para su diseño.

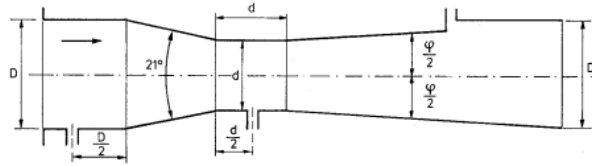


Fig. 2.8: Tubo de Venturi - Parámetros.

En esta aplicación se utilizan los siguientes valores:

- $D = 2,60 \text{ cm}$
- $d = 1,82 \text{ cm}$
- $\beta = 0,7$

La ecuación (2.3) nos permite determinar el caudal de aire que ingresa a la planta a partir de la diferencia de presiones medidas.

Con base en este principio, se ha diseñado un tubo de Venturi que puede ser impreso en 3D. Las Figuras (2.9), (2.10) y (2.11) muestran los parámetros de diseño, una vista en 3D del sólido de revolución y su implementación en el soplador de la planta, respectivamente.

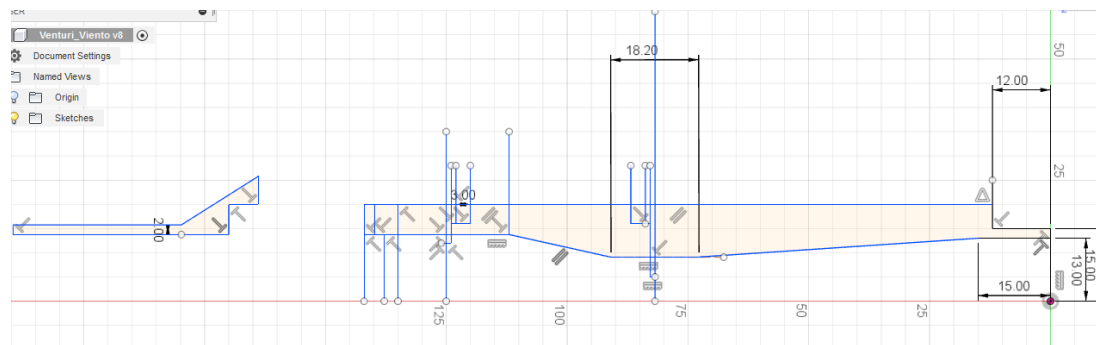


Fig. 2.9: Tubo de Venturi - Parámetros de fabricación.

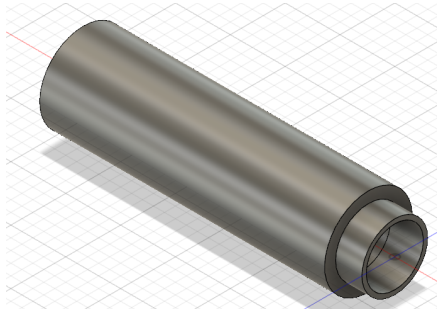


Fig. 2.10: Tubo de Venturi - Vista del sólido de revolución.



Fig. 2.11: Tubo de Venturi - Montado en el soplador.

Medidor de Disco Oscilante

Otro tipo de medidor utilizado es el medidor de disco oscilante. Este medidor consta de una cámara circular con un disco plano móvil que tiene una ranura en la cual se intercala una placa fija. La placa separa la entrada de la salida e impide que el disco gire durante el paso del fluido. La cara inferior del disco siempre está en contacto con la parte inferior de la cámara en el lado opuesto, dividiendo así la cámara en compartimentos separados de volumen conocido.

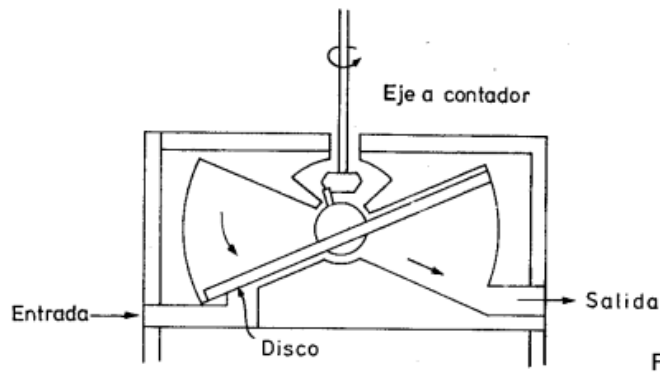


Fig. 2.12: Medidor de disco oscilante.

Cuando el fluido pasa a través del medidor, el disco adopta un movimiento similar al de un trompo que ha caído, de modo que cada punto de su circunferencia exterior sube y baja alternativamente, estableciendo contacto con las paredes de la cámara desde la parte inferior hasta la superior. Este movimiento de balanceo se transmite a través del eje del disco a un tren de engranajes. Sin embargo, la potencia disponible es baja, lo que limita la utilización de accesorios mecánicos. Este tipo de medidor se utilizaba originalmente en medidores de agua y de gas.

En el caso de los medidores de gas basados en este principio, se añade un pequeño imán en el mecanismo giratorio que mueve los engranajes de medición. Este imán puede ser detectado por un sensor magnético que genera pulsos de detección. Esto se ilustra en la Figura (2.13).



Fig. 2.13: Medidor de gas con detector magnético.

Este medidor realiza el conteo volumétrico del gas en metros cúbicos (m^3) que circula. Cada vez que se alcanza un volumen de $0,1 m^3$, se emite un pulso magnético que es detectado por el transmisor de pulsos de baja frecuencia.

De esta manera, se puede conocer el caudal en m^3/s , como se expresa en la ecuación (2.4):

$$Q_{Gas} = \frac{0,1 m^3}{\Delta t s} \quad (2.4)$$

Sin embargo, para esta aplicación se requiere que esta medida se presente en litros por minuto (L/min). Para esto, se ajustan las unidades para calcular el caudal de gas en las unidades necesarias, como se muestra en la ecuación (2.5):

$$Q_{Gas} = \frac{100}{\Delta t/60} \frac{L}{min} = \frac{6000}{\Delta t} \frac{L}{min} \quad (2.5)$$

2.4.6. Medidores térmicos

Los medidores térmicos de caudal se basan comúnmente en dos principios físicos:

1. La elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente.
2. La pérdida de calor experimentada por un cuerpo caliente inmerso en el fluido.

Este medidor consta de 2 medidores de temperatura separados y en su punto medio proporciona un calor constante. En el diagrama de la figura 2.14, se puede notar su representación.

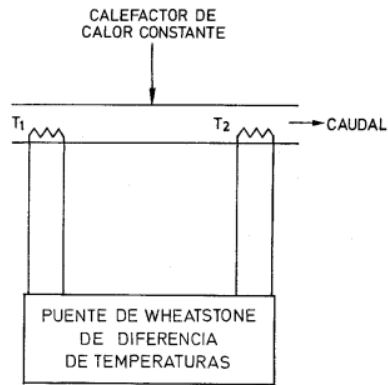


Fig. 2.14: Diagrama Medidor Térmico.

Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es idéntica en las dos sondas. Cuando el fluido circula, transporta una cantidad de calor hacia el segundo elemento de medición de temperatura, y se presenta una diferencia de temperaturas que va aumentando progresivamente entre las dos sondas a medida que aumenta el caudal. Esta diferencia es proporcional a la masa que circula a través del tubo.

El instrumento GFC MASS FLOW CONTROLLER permite medir el caudal basado en este principio. Además, este dispositivo tiene la capacidad de controlar el caudal mediante una señal de control. Este instrumento se puede notar en la figura (2.15.)



Fig. 2.15: Medidor y controlador de caudal AALABORG.

2.4.7. Reguladores de Caudal

Los reguladores de caudal son componentes importantes en cualquier sistema de flujo, ya que permiten controlar la cantidad de fluido que se mueve a través del sistema. En el caso de esta planta, se utilizan dos tipos de reguladores de caudal: uno para la línea de aire y otro para la línea de gas.

Para regular el caudal de aire, se modula la velocidad de giro del rodete presente en el soplador mediante la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM). Esta técnica consiste en variar el ciclo de trabajo de una señal cuadrada para controlar la cantidad de energía que se entrega al dispositivo. De esta manera, se puede ajustar la velocidad de giro del soplador y, por lo tanto, el caudal de aire que se mueve a través del sistema.

Para regular y fijar el caudal de gas, se utiliza un monoblock de gas. Este dispositivo es un conjunto de reguladores de presión y caudal que se encargan de mantener un flujo constante de gas a través del sistema. El monoblock de gas está diseñado para adaptarse a las condiciones de la red de gas y asegurar que el flujo de gas sea constante y seguro. De esta manera, se puede controlar el caudal de gas que se mueve a través del sistema y mantenerlo constante en todo momento.

En la figura 2.16 se puede observar el conjunto soplador y monoblock de gas, componentes clave en la regulación de caudal de aire y gas en la planta.



Fig. 2.16: Conjunto Soplador y Monoblock de Gas.

2.4.8. Detección de Flama

La detección de flama es crucial en la industria debido a su importancia en términos de seguridad. En particular, los quemadores de gas en hornos requieren que la flama producida por el combustible sea estable y de alta calidad, y que se mantenga así mientras el quemador esté en funcionamiento. En caso de que la flama falle, el sistema de protección debe actuar rápidamente para evitar la entrada de combustible y reducir el riesgo de incendio y una eventual explosión. Los detectores de flama aprovechan diversas características, como el calor y la ionización, para su funcionamiento.

Detector de Ionización - Rectificación

Los detectores de ionización basados en la rectificación, también conocidos como detectores de flama por flama piloto, son dispositivos utilizados para detectar la presencia de flama en sistemas de combustión. Este tipo de detector de flama funciona mediante la medición de la corriente eléctrica producida por la ionización de las moléculas de gas en la presencia de una flama, como se puede observar en la figura (2.17).

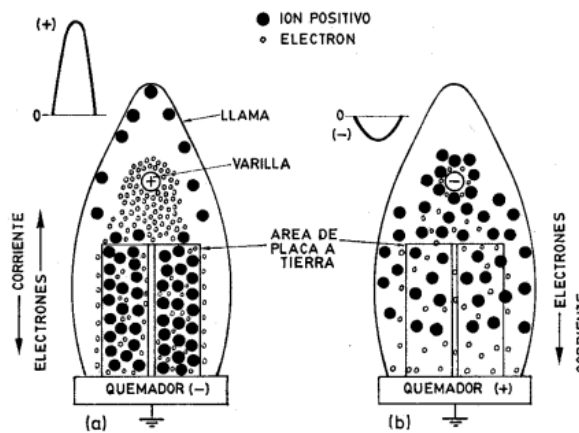


Fig. 2.17: Detector de flama por electrodos de rectificación.

En estos detectores, al aplicar una tensión alterna en los electrodos, el flujo de corriente circula con mayor facilidad en un sentido que en otro en presencia de una

flama, lo cual produce una corriente eléctrica alterna que se rectifica para generar una señal continua de baja tensión. Esta señal es acondicionada electrónicamente para detectar la presencia de la flama [4].

Estos detectores son más sensibles que los detectores térmicos y se utilizan comúnmente en aplicaciones donde se requiere una detección rápida y precisa de la flama, como en calderas y hornos industriales.

3. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.

3.1. Presión.

3.1.1. Topología

El sensor de presión XGZP 10 KPa, genera una señal de tensión continua del orden de los [mV]. La que es acondicionada por un circuito electrónico a niveles de tensión permitidas por la unidad de control, cuya topología es mostrada en la figura (3.1)

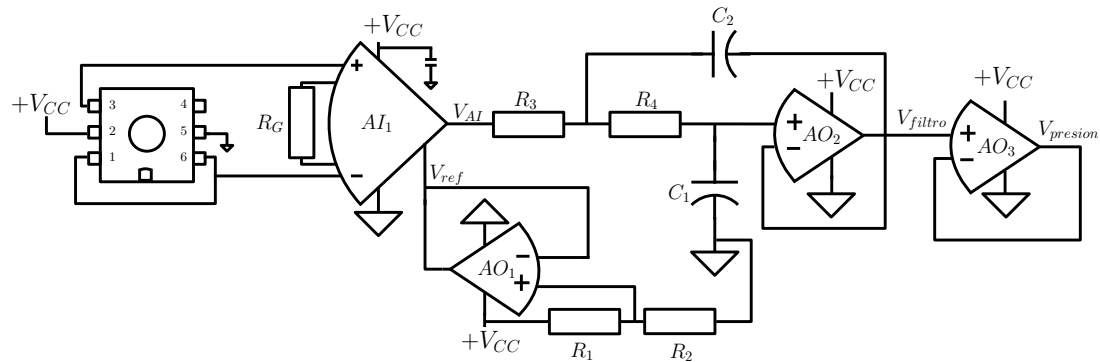


Fig. 3.1: Topología circuito acondicionamiento de presión.

El funcionamiento de esta topología consiste principalmente en obtener la diferencia de tensión generada por el sensor de presión. La que es medida y amplificada por el amplificador operacional de instrumentación (AI_1), la que mediante el uso de la resistencia R_G . Permite ajustar la ganancia de amplificación de la señal medida. El amplificador operacional de instrumentación (AI_1) requiere una señal de referencia V_{ref} , la que es ajustada por el divisor de tensión compuesto por las resistencias R_1 y R_2 . La cual es seguida por el amplificador operacional AO_1 , que se encuentra

en configuración seguidor entre el divisor de tensión y el amplificador operacional de instrumentación.

Esto con fin de establecer un nivel de tensión base, a partir de la cual se medirá la amplificación de la señal de presión obtenido. Esto es muy útil cuando el puente de Wheastone del sensor se encuentre equilibrado o inactivo, de igual manera permitir diferencias de tensión negativas asociadas cuando el sensor de presión opere en sentido inverso, es decir, cuando exista el efecto de succión en lugar de empuje.

Luego la señal de tensión obtenida a la salida del amplificador operacional de instrumentación (V_{AI}) pasa por un filtro pasa bajos de segundo orden compuesto por las resistencias R_3 y R_4 , junto con los capacitores C_2 y C_3 y el amplificador operacional AO_2 , la que tienen como objetivo reducir el ruido electromagnético de alta frecuencia. La función de transferencia asociada al filtro. Es utilizada para el diseño de su operación, la cual queda descrita por la ecuación (3.1)

$$\frac{V_{filtro}}{V_{AI}} = \frac{1}{R_3 R_4 C_2 C_3 s^2 + (R_3 + R_4) C_3 s + 1} \quad (3.1)$$

Al seleccionar igual valor para las resistencias ($R_3 = R_4$) y los capacitores ($C_2 = C_3$), la expresión anterior queda simplificada a la ecuación (3.2).

$$\frac{V_{filtro}}{V_{AI}} = \frac{1}{(R_3 C_2 s + 1)^2} \quad (3.2)$$

Los valores de diseño para este filtro son :

- $R_3 = R_4 = 47000[\Omega]$
- $C_2 = C_3 = 330[nF]$
- $f_c = 10,2 [Hz]$

Finalmente la señal obtenida a la salida del filtro (V_{filtro}) pasa por el amplificador operacional AO_3 , el que se encuentra en configuración seguidor para separar el circuito de la señal que medirá la unidad de control ($V_{presión}$).

Cabe notar que el uso del amplificador operacional de instrumentación (AI_1), es el circuito integrado $AD623$, el que posee una característica de operación con alimentación unipolar como también una dual.

Luego para los amplificadores operacionales se utilizan los circuitos integrados $LM324$ y $LM358$, los que poseen la misma característica de alimentación.

3.1.2. Calibración

Para obtener una caracterización de la señal de tensión obtenida por el sensor, se implementa un banco de pruebas. El que se puede notar en la figura (3.2)

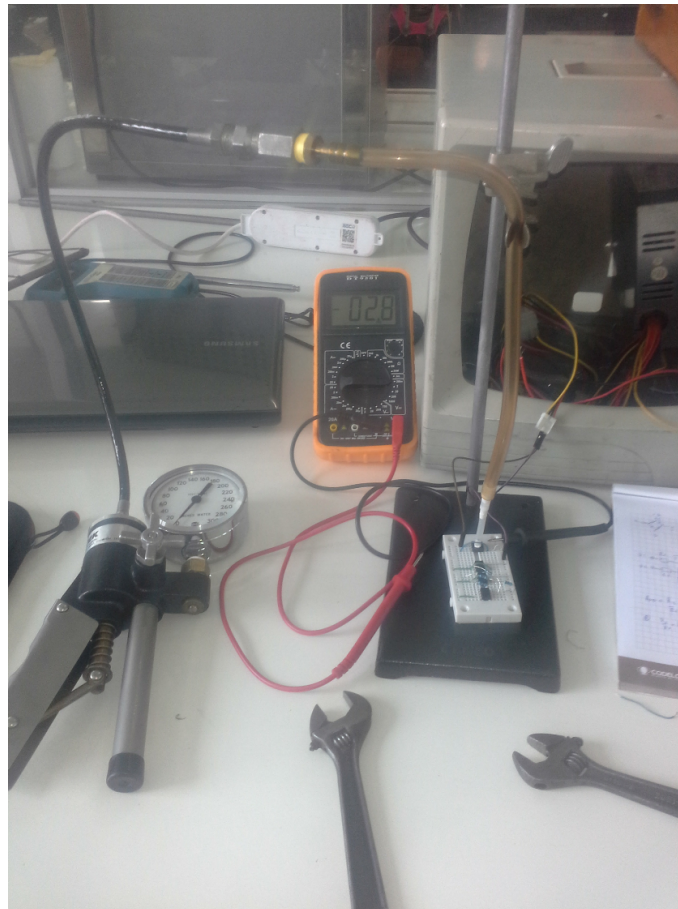


Fig. 3.2: Banco de pruebas, calibración sensor de presión.

El procedimiento consiste en establecer diferentes niveles de presión conocidos mediante el uso de un manómetro y registrar la tensión obtenida por el circuito de la topología descrita.

El rango de operación del manómetro es de $0 \dots 300$ [$inH2O$], mientras que el rango de operación del sensor es de 10 [KPa], equivalente a $40,1865$ [$inH2O$].

En el gráfico de la figura (3.3). Se puede notar el registro temporal del ensayo realizado junto con los niveles de tensión de obtenidos.

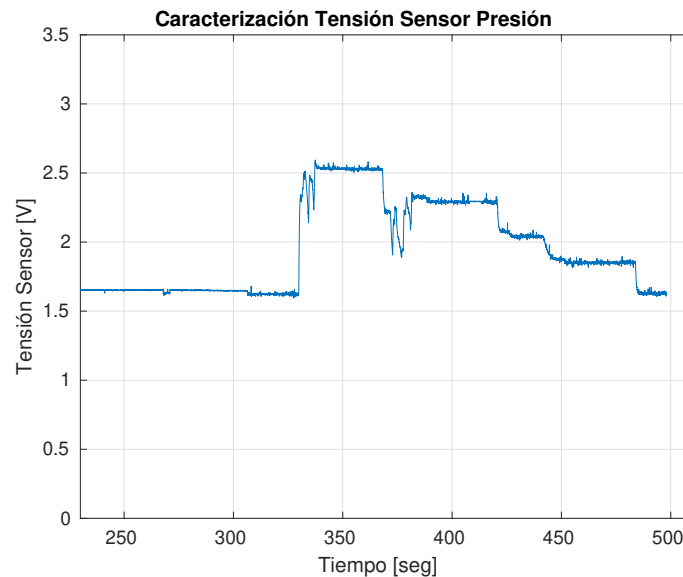


Fig. 3.3: Banco de pruebas, calibración sensor de presión.

Mientras que en la tabla (3.1) se registran los diferentes niveles de tensión obtenidos.

Presión [KPa]	Presión [$inH2O$]	$V_{presión}$ [V]
0	0	1.640
2.48	10	1.842
4.97	20	2.049
7.46	30	2.287
9.95	40	2.530

Tab. 3.1: Caracterización sensor de presión

Con estos datos se establece una relación entre tensión y presión mediante una regresión lineal, la que puede ser notada en la figura (3.4). y su expresión a fin queda dada por la ecuación (3.3). Esta expresión es implementada en la unidad de control para conocer el valor de presión a partir de la tensión medida por el circuito acondicionador del sensor de presión.

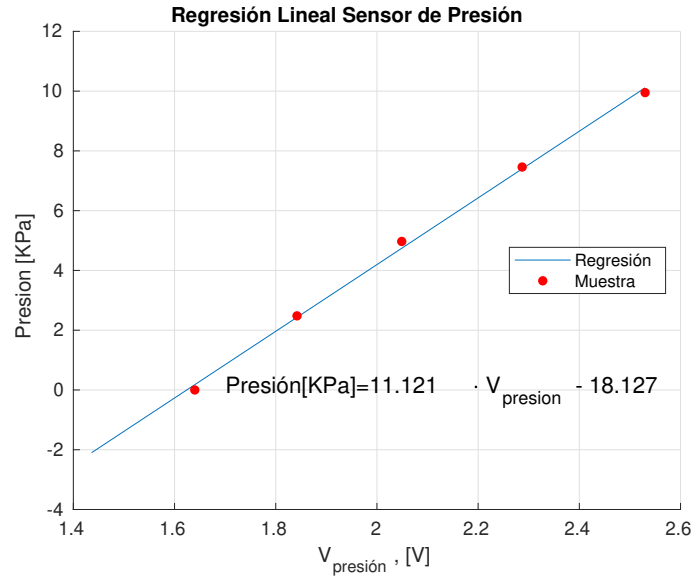


Fig. 3.4: Regresión lineal, caracterización sensor de presión.

$$Presión [KPa] = 11,121 \cdot V_{presión} - 18,127 \quad (3.3)$$

3.2. Presostato.

El dispositivo posee un interruptor mecánico, el que es activado cuando el nivel de presión supera el umbral de detección ajustado en el presostato.

La topología de la figura (3.5), se muestra el acondicionamiento electrónico que permitirá obtener una señal digital de medición ($V_{presostato}$) para la unidad de control.

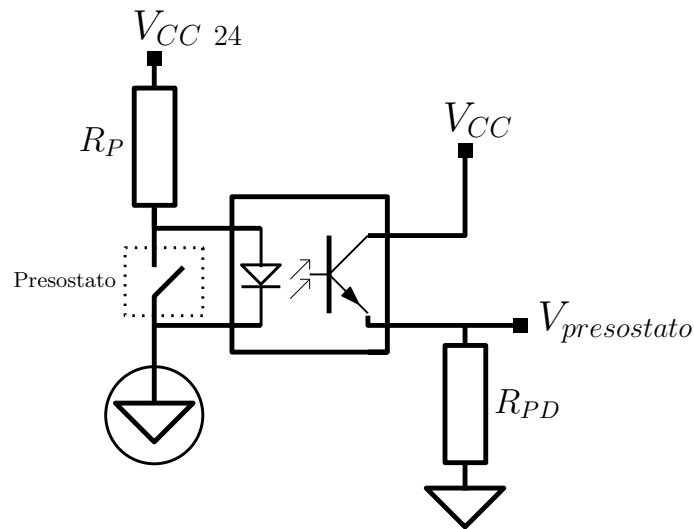


Fig. 3.5: Topología acondicionamiento presostato.

Con el uso de un opto-acoplador es posible generar una señal de medición ante la dinámica de operación del presostato. Junto con lograr una separación eléctrica del dispositivo y la unidad de control.

Cuando la presión se encuentra bajo el umbral de detección, opera el diodo presente en el opto-acoplador. Activando la base del transistor generando un nivel lógico alto en la señal de medición ($V_{presostato} \approx V_{CC}$).

La presión al superar el umbral de detección, el presostato activara su interruptor. Cortando el suministro de corriente al diodo del opto-acoplador y desactivando la base del transistor generando un nivel lógico bajo en la señal de medición ($V_{presostato} = 0$).

Se utiliza una resistencia $R_p \approx 2400 \Omega$ para limitar la corriente máxima que circula en el dispositivo (10 mA, según datasheet fabricante).

Para la generación de la señal de medición ($V_{presostato}$), se utiliza el transistor de opto-acoplador junto con la resistencia R_{PD} , En configuración “Pull Down”.

3.3. Ionización de Flama.

Utilizando el fenómeno de ionización producido por la flama al estar presente, es posible diseñar un circuito electrónico que permita su detección.

Su diseño ha sido planteado modularmente, los que se detallan como sigue:

- Generador de tensión Dual.
- Oscilador senoidal puente de Wiev.
- Conexión sonda de ionización.
- Detección de flama y salida digital.

La interconexión general se puede notar en el circuito de la figura (3.6).

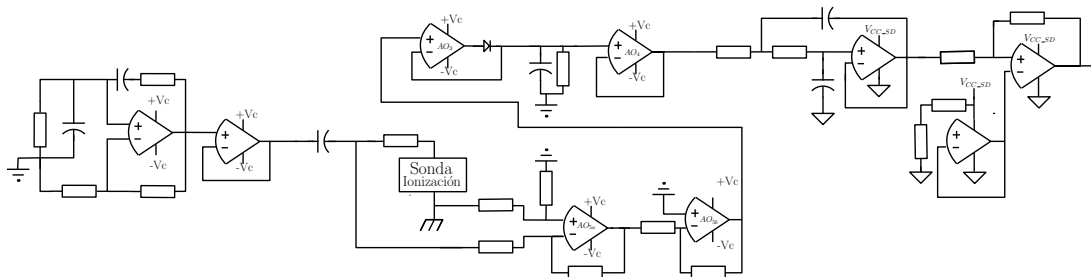


Fig. 3.6: Interconexión general de módulos.

A continuación se describen las características de diseño e implementación de cada módulo.

3.3.1. Generador de tensión Dual.

La topología del circuito detector de flama, requiere polarizar de manera dual en ciertos módulos, tales como el oscilador senoidal puente de Wiev y el circuito de conexión de sonda de ionización.

Para conseguir una fuente de tensión simétrica a partir de una alimentación unipolar, se emplea la topología de la figura (3.7).

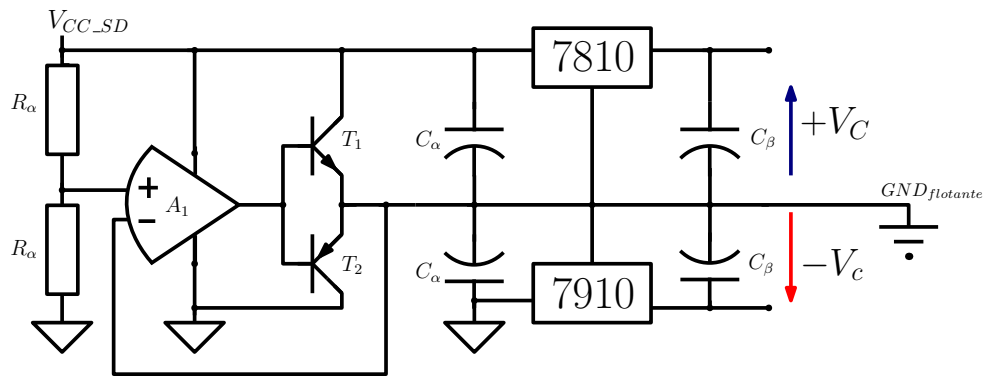


Fig. 3.7: Circuito: Generador de Tensión Dual.

En este las resistencias R_{α} , establecen un divisor de tensión a la mitad de la alimentación unipolar (V_{CC_SD}) y así establecer el nivel de tierra flotante ($GND_{flotante}$). Gracias a la realimentación del amplificador operacional A_1 .

Los transistores T_1 y T_2 , se encargan de rectificar y suministrar mayor corriente a la salida del amplificador operacional.

Los capacitores C_{alpha} , se encargan de mantener los niveles de tensión dual referidos al punto de tierra flotante, para luego pasar a los rectificadores de tensión lineales 7810 y 7910 tanto para la tensión positiva y negativa, referidos al punto de tierra flotante. Las salidas de estos rectificadores se encuentran con los capacitores C_{β} , los que filtran la salida de tensión estableciendo los niveles de tensión $\pm V_c$, siempre referidos al punto de tierra flotante $GND_{flotante}$.

3.3.2. Oscilador senoidal puente de Wiew.

Para la generación de una onda alterna senoidal de frecuencia fija, se utiliza la topología del oscilador puente de Wien, la cual puede ser notada en la figura (3.8).

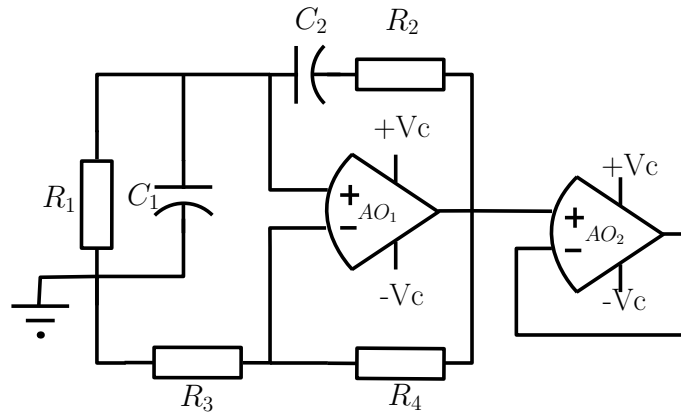


Fig. 3.8: Circuito: Oscilador senoidal puente de Wien.

Esta topología proporciona a la salida una tensión descrita por la ecuación (3.4)

$$V_{oscilador} = A \sin(2\pi ft) \quad (3.4)$$

En donde la frecuencia es ajustada según la expresión de la ecuación (3.5)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.5)$$

Para su diseño se seleccionan los mismos valores para las resistencias $R_1 = R_2 = R$ y de la misma manera para los capacitores $C_1 = C_2 = C$, en donde la frecuencia de oscilación queda determinada por la ecuación (3.6)

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.6)$$

Seleccionando iguales valores para las resistencias $R_3 = R_4$, el valor de la amplitud oscila entre las tensiones de polarización del amplificador operacional AO_1 , es decir $\pm V_c$.

Los valores de los componentes son:

- $R = 6800[\Omega]$
- $C = 100[nF]$

- $R_3 = R_4 = 4700[\Omega]$

Los que permiten generar una onda senoidal de frecuencia $f = 235 [Hz]$.

A la salida del oscilador es conectado un amplificador operacional (AO_2) en topología de seguidor no inversor, el cual permite una separación entre el oscilador y el siguiente módulo del circuito.

3.3.3. Conexión Sonda de Ionización.

La sonda de ionización al ser expuesta a la flama es posible notar la dinámica de rectificación sobre la señal de tensión medida debido al fenómeno de Ionización.

En esta se puede notar que la corriente en el sentido negativo circula con mayor facilidad que en el sentido positivo. Como se puede ver en la figura (3.9), en esta se puede notar que la amplitud de la onda en el semi-ciclo positivo se ve atenuado mucho más que el semi-ciclo negativo.

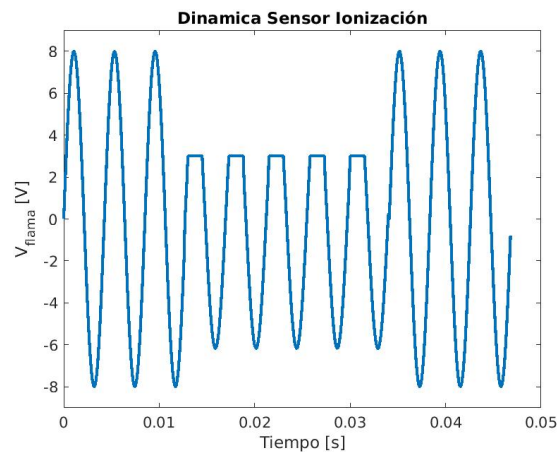


Fig. 3.9: Dinámica Sensor Ionización.

Utilizando esta característica se ha diseñado un circuito para su detección, cuya topología es mostrada en la figura (3.10).

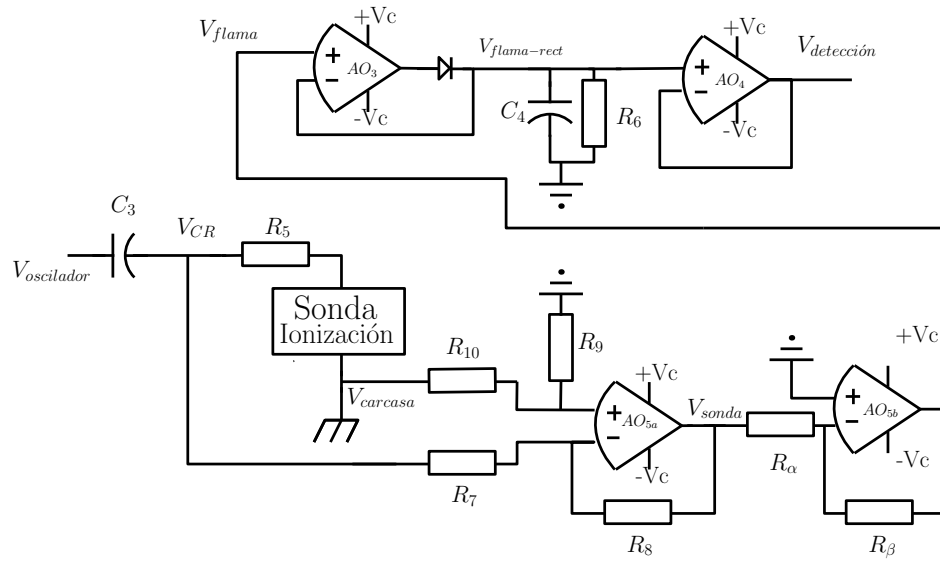


Fig. 3.10: Circuito: Conexión sonda de Ionización.

En este circuito, la onda senoidal obtenida por el oscilador ($V_{oscilador}$) ingresa por el capacitor C_3 , el cual se encuentra conectado en serie con la resistencia R_5 y el terminal de la sonda.

La sonda cierra el circuito a través de la flama y la carcasa del quemador, la cual se encuentra puesta a tierra de seguridad.

Esto impone un problema debido a que esta tierra de seguridad es externa y diferente al nivel de referencia de 0 V ($GND_{flotante}$) utilizado por el circuito para su funcionamiento libre de interferencias. Para hacer frente a esta configuración en donde la sonda se encuentra adherida a la carcasa, se utiliza el amplificador operacional AO_{5a} en configuración diferencial [5].

La tensión a la salida de este amplificador diferencial (V_{sonda}) queda dada por la ecuación (3.7)

$$V_{sonda} = -\left(\frac{R_8}{R_7}\right)V_{CR} + \left(1 + \frac{R_8}{R_7}\right)\left(\frac{\frac{R_{11}}{R_{10}}}{1 + \frac{R_{11}}{R_{10}}}\right)V_{carcasa} \quad (3.7)$$

Luego al tomar la razón

$$\frac{R_8}{R_7} = \frac{R_{11}}{R_{10}}$$

la ecuación (3.7) queda como la ecuación (3.8)

$$V_{sonda} = -\frac{R_8}{R_7}(V_{CR} - V_{carcasa}) \quad (3.8)$$

En donde se mide la tensión presente entre el capacitor C_3 y la resistencia R_5 (V_{CR}).

Luego esta señal ingresa al amplificador operacional A_{5b} el que se encuentra en configuración amplificador inversor y la ecuación que describe su topología queda dada por la ecuación (3.9)

$$V_{flama} = -\frac{R_\beta}{R_\alpha}V_{sonda} \quad (3.9)$$

A partir de la dinámica de la sonda de Ionización presente en la señal, se utiliza la atenuación obtenida en el semi-ciclo positivo, puesto que posee una mejor característica de atenuación que la presente en el semi-ciclo negativo. Para esto la señal medida V_{flama} es rectificadora mediante el uso del amplificador operacional AO_3 y el diodo D_1 , de esta manera solo se obtiene la tensión presente en el semi-ciclo positivo, la señal obtenida ($V_{flama-rect}$) se puede notar en la figura (3.11).

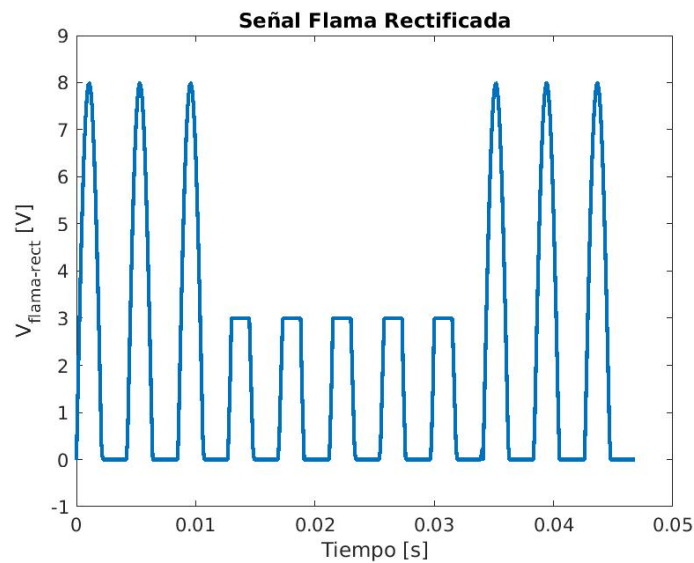


Fig. 3.11: Señal V_{flama} Rectificada.

Esta señal avanza hacia una carga RC , cuya característica de carga y descarga la hace operar como un detector de peak's. Basándose en el principio de demodulación AM, de esta manera se genera una señal analógica que permite la detección de flama ($V_{detección}$). La cual se puede notar en la figura 3.12).

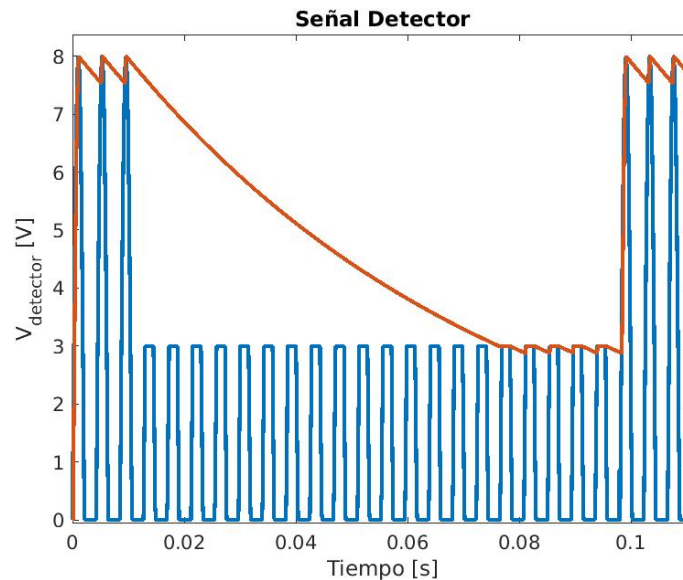


Fig. 3.12: Señal $V_{detección}$ (rojo), Señal V_{flama} rectificada (azul).

Los valores diseñados para los componentes del detector de peak's son:

- $C_4 = 10[\mu F]$
- $R_6 = 6800[\Omega]$

Los que permiten establecer un bajo nivel de riza-miento y un tiempo de carga y descarga adecuado para la detección de flama.

Finalmente esta señal pasa por el amplificador operacional AO_4 en configuración seguidor figura(3.10), para separar esta señal de la siguiente etapa.

3.3.4. Detector de Flama y salida Digital.

La señal de tensión obtenida ($V_{detección}$) es de naturaleza continua y la señal requerida por la unidad de control, requiere ser de característica digital.

La topología que permite acondicionar adecuadamente la señal, se puede notar en el circuito de la figura(3.13).

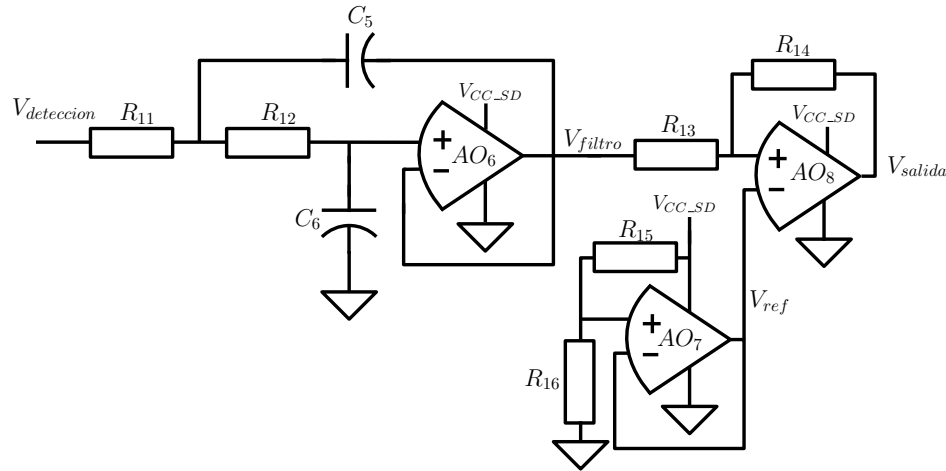


Fig. 3.13: Circuito: Detector de Flama y salida Digital.

En este circuito se puede notar que los amplificadores operacionales se encuentran con polarización unipolar, con un nivel de tensión requerido por la unidad de control. Para el caso del PLC este es $V_{CC_SD} = 24 [V]$ mientras que para un μC es de $V_{CC_SD} = 3,3 [V]$.

La señal $V_{detección}$ ingresa a un filtro activo pasa bajos de segundo orden para reducir el efecto del rizado de la señal. Este filtro se encuentra compuesto por el amplificador operacional AO_6 , las resistencias R_{11} y R_{12} y los capacitores C_5 y C_6 . Su función de transferencia es utilizada para el diseño, la cual queda descrita por la expresión de la ecuación (3.10)

$$\frac{V_{filtro}}{V_{detección}} = \frac{1}{R_{11}R_{12}C_5C_6s^2 + (R_{11} + R_{12})C_6s + 1} \quad (3.10)$$

Al seleccionar igual valor para las resistencias ($R_{11} = R_{12}$) y los capacitores ($C_5 = C_6$), la expresión anterior queda simplificada a la ecuación (3.11).

$$\frac{V_{filtro}}{V_{detección}} = \frac{1}{(R_{11}C_5s + 1)^2} \quad (3.11)$$

Los valores diseños para el filtro pasa bajos son:

- $C_5 = 330[nF]$
- $R_{11} = 47000[\Omega]$

La señal filtrada V_{filtro} ingresa a un circuito comparador no inversor con histéresis. Su topología esta compuesta por las resistencias R_{13} , R_{14} , R_{15} y R_{16} junto con los amplificadores operacionales AO_7 y AO_8 .

Las expresiones que describen su funcionamiento quedan dados por las ecuaciones (3.12) y (3.13)

$$\Delta V = V_{CC.SD} \frac{R_{13}}{R_{14}} \quad (3.12)$$

$$V_{ref} = V_{CC.SD} \frac{R_{16}}{R_{15} + R_{16}} \quad (3.13)$$

La región de histéresis queda definida por ΔV la que se encuentra centrada en V_{ref} , como se puede notar en la figura (3.14)

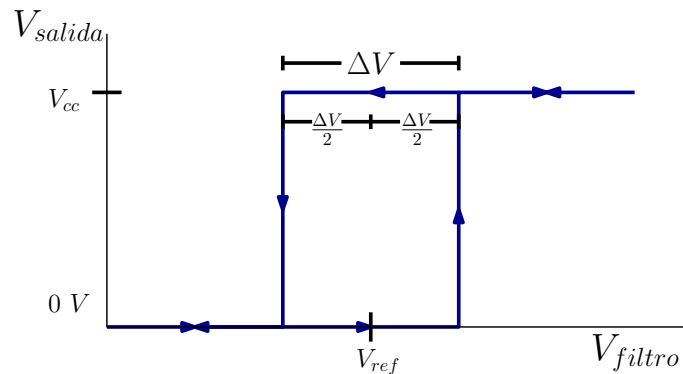


Fig. 3.14: Dinámica comparador no inversor con histéresis.

Con este comparador se obtiene la señal $V_{comparador}$, la cual posee una dinámica digital, en donde se establece su nivel lógico alto cuando no hay presencia de flama y un nivel lógico bajo cuando hay flama.

Finalmente esta señal pasa por el amplificador operacional AO_8 en configuración de seguidor.

3.4. Temperatura.

3.4.1. Topología

Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de tensión muy pequeña (del orden de los $[mV]$) y que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto de medida y el otro llamado referencia.

La topología que permite acondicionar esta señal para ser utilizada por la unidad de control, se puede notar en la figura (3.15)

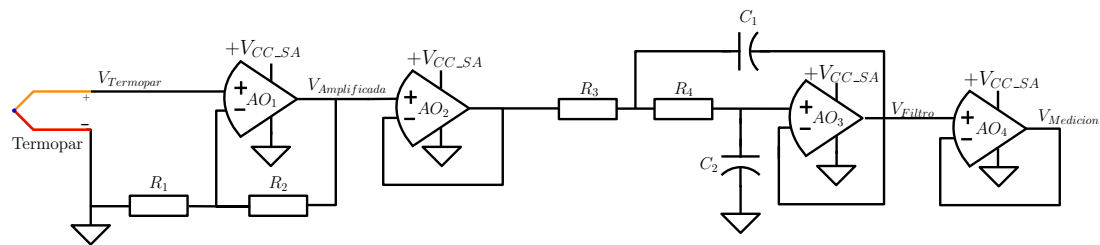


Fig. 3.15: Topología circuito acondicionamiento de temperatura.

La operación de este circuito se basa en medir la señal de tensión producida en el termopar ($V_{termopar}$), para luego ser amplificada por el amplificador operacional AO_1 en configuración amplificador no inversor. El cual ajusta la ganancia de la señal de salida mediante las resistencias R_1 y R_2 . La función de transferencia que describe su comportamiento queda descrita en la ecuación (3.14).

$$\frac{V_{amplificada}}{V_{termopar}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3.14)$$

La señal amplificada continúa por el amplificador operacional AO_2 , en configuración seguidor para separar esta señal de la etapa de filtrado.

Compuesto por amplificador operacional AO_3 , las resistencias R_3 , R_4 y los capaci-

tores C_1 y C_2 . La función de transferencia que describe la operación del filtro pasa bajos. Al considerar que $R_3 = R_4$ y $C_1 = C_2$, queda descrita en la ecuación (3.15).

$$\frac{V_{filtro}}{V_{amplificada}} = \frac{1}{(R_3 C_1 s + 1)^2} \quad (3.15)$$

Con esta se puede sintonizar el filtro mediante la elección de sus componentes, obteniendo los siguientes valores:

- $R_1 = R_2 = 47000[\Omega]$
- $C_1 = C_2 = 330[nF]$

Finalmente la señal obtenida pasa por el amplificador operacional AO_4 en configuración seguidor para separar esta señal de la etapa de medición de la unidad de control. Cabe notar que los amplificadores operacionales corresponden a los integrados $LM324$ y $LM358$, los que pueden operar con una alimentación unipolar. Donde la alimentación $V_{CC SA}$ corresponde al nivel máximo de tensión permitida por el ADC de la unidad de control. Para el caso del PLC, este corresponde a $10[V]$. Mientras que para un μC es de $3,3[V]$.

3.4.2. Calibración

Una de las características de los termopares es su linealidad de la tensión generada y la temperatura que la produce. Esto se puede notar en el gráfico de la figura (3.17)

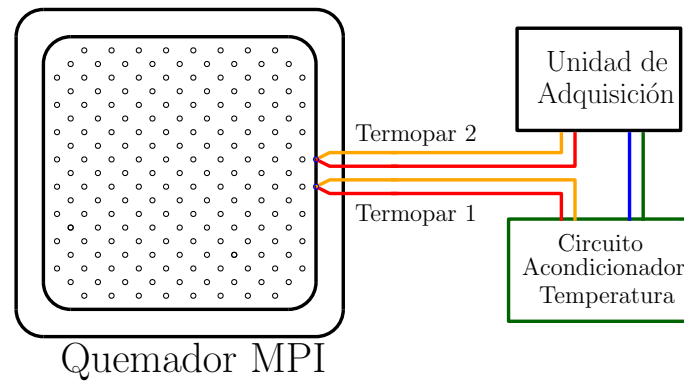


Fig. 3.16: Diagrama disposición termopares en MPI y conexión de ensayo.

Para caracterizar y calibrar el circuito que acondiciona la señal de temperatura. En el cabezar del MPI se han dispuesto dos termopares tipo K. Idénticos uno al lado del otro como se puede apreciar en el diagrama de la figura (3.16).

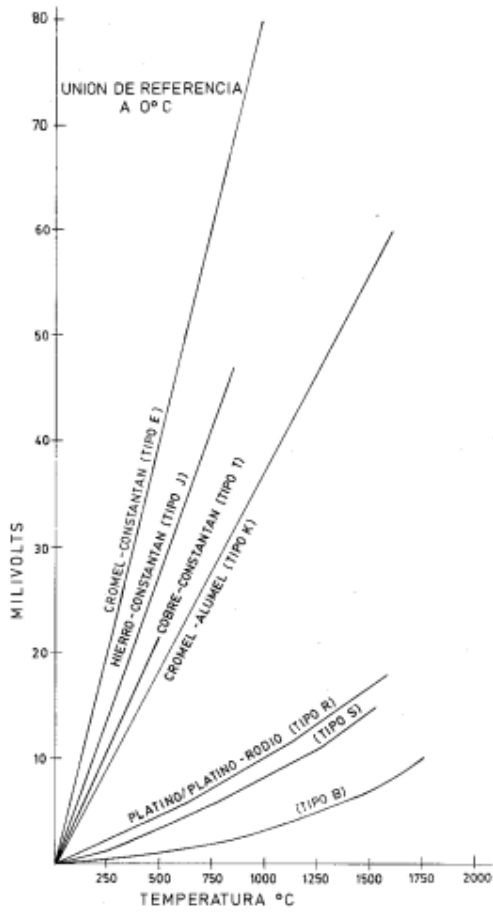


Fig. 3.17: Característica tensión / temperatura de los termopares.

Uno de los termopares es conectado a la entrada del circuito de la topología propuesta, mientras que la salida es conectada a la unidad de adquisición. El que puede registrar la diferencia de tensión obtenida $V_{medición}$.

El segundo termopar es conectado directamente a la unidad de adquisición, el que también puede registrar la medición de temperatura asociado a este termopar. En el gráfico de la figura (3.18), se puede notar el registro temporal de temperatura y tensión del circuito acondicionador en el cabezal del MPI durante el ensayo realizado.

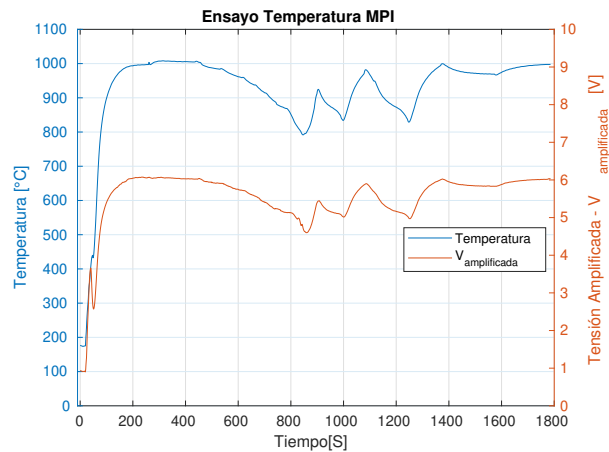


Fig. 3.18: Registro temporal temperatura y tensión en el MPI.

Con ambos registros se puede establecer una regresión lineal que defina el comportamiento de la temperatura en función de la tensión medida. Esto se puede notar en el gráfico de la figura (3.19).

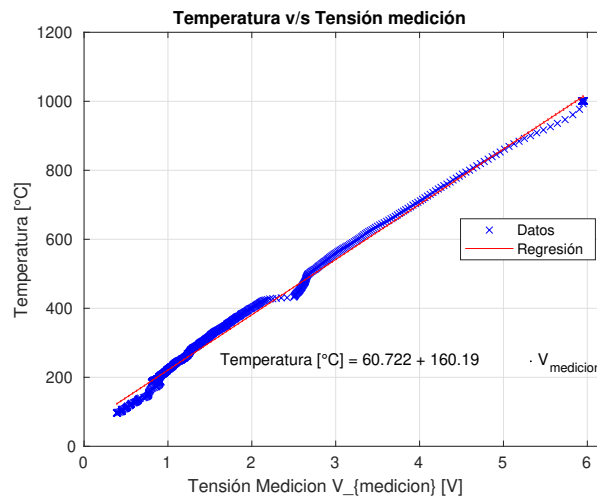


Fig. 3.19: Regresión lineal, caracterización sensor de temperatura.

Desde este análisis se puede extraer su relación a fin que existe entre la temperatura y la tensión acondicionada, la cual queda expresada en la ecuación (3.16)

$$Temperatura [C] = 160,19 \cdot V_{amplificada} + 60,722 \quad (3.16)$$

3.5. Caudal Aire.

El soplador instalado permite la regulación de la velocidad de giro del rodete mediante el ajuste del ciclo de trabajo de una señal PWM, esta debe estar acondicionada a un nivel de 24 V y poseer una frecuencia entre los 4 – 10 KHz.

La generación de esta señal PWM se realiza mediante el uso de un microcontrolador (ATtiny85), la que permite obtener esta señal a un nivel de 3,3 V.

En la topología de la figura (3.20), se puede notar el circuito electrónico recomendado por el fabricante del motor para la modulación de la velocidad de giro del rodete del soplador.

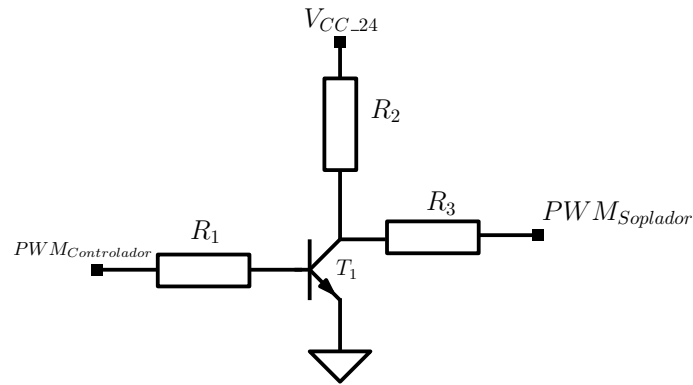


Fig. 3.20: Topología circuito acondicionador generador PWM soplador.

Este circuito permite convertir la señal PWM de entrada con un nivel de 3,3 V a una señal de salida con nivel de 24 V.

El soplador posee un par de imanes en el rodete dispuestos de manera diametral sobre la base de giro. Junto con disponer de un detector de efecto hall que permite la detección de los imanes a medida que gira el rodete del soplador, para de esta manera obtener una señal que permite sensar la velocidad de giro.

Esta es una señal cuadra con un nivel de tensión de 24 V y el microcontrolador que comanda el soplador requiere que el nivel de tensión sea de 3,3 V.

Para conseguir el ajuste de la señal, se implementa la topología de la figura (3.21).

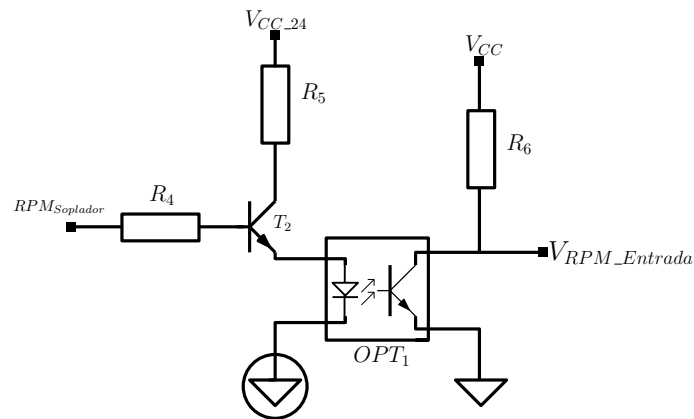


Fig. 3.21: Topología circuito acondicionador de medición RPM soplador.

En esta se puede notar el uso de un opto-acoplador, el que permite desacoplar eléctricamente las señales del lado del soplador como las del lado del microcontrolador.

3.6. Caudal Gas.

3.6.1. Medidor de pulsos.

El transmisor de pulsos de baja frecuencia, posee una dinámica de conmutación cada vez que se detecta el paso del imán presente en el medidor de gas indicando el paso de $0,1 m^3$. La topología que permite adquirir este principio se puede notar en la figura (3.22)

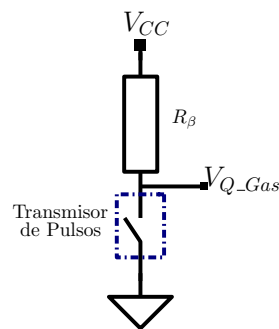


Fig. 3.22: Topología circuito Medidor de pulsos Flujo Gas.

Los terminales del transmisor de pulsos se conectan en serie a una resistencia R_β ($\approx 20 K\Omega$) y se alimenta con un nivel de tensión V_{CC} .

Esta se encuentra en configuración Pull-Up generando la señal V_{Q_Gas} soportado por el μC , el cual realizará el cálculo del caudal según la ecuación (2.5).

3.6.2. Flujómetro.

Este instrumento posee la capacidad de sensor y de actuación para medir y establecer el caudal de gas.

Sensor.

El instrumento genera una señal de tensión directamente proporcional al flujo medido, cuyo rango de medición de $0 - 30L/min$ generando una tensión $V_{Flujometro}$ de $0 - 5 V$. La topología que permite acondicionar esta señal para la unidad de control queda representada en la figura (3.23).

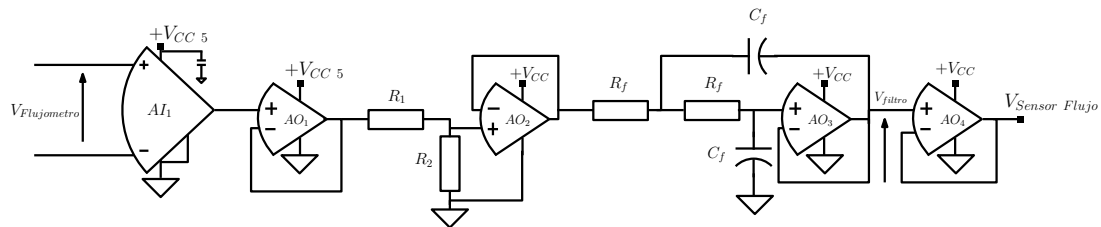


Fig. 3.23: Topología circuito acondicionador Sensor de Flujo Gas.

Mediante el uso del amplificador de instrumentación AI_1 , se mide la diferencia de tensión del instrumento $V_{Flujometro}$, la cual pasa por el amplificador operacional AO_1 en configuración seguidor, para luego ingresar al divisor de tensión entre las resistencias R_1 y R_2 . Cuya finalidad es limitar el nivel de tensión soportado por la unidad de control, la que suele ser de $3,3 V$. Luego la tensión medida en la resistencia R_2 ingresa al amplificador operacional AO_2 en configuración seguidor desde la cual ingresa al filtro pasa bajos de segundo orden compuesto por las resistencias R_f , los capacitores C_f y el amplificador operacional AO_3 obteniendo la señal V_{filtro} , la que reduce el

ruido de alta frecuencia.

Finalmente esta señal ingresa al amplificador operacional AO_4 en configuración seguidor obteniendo la señal de medición del sensor de flujo $V_{Sensor\ Flujo}$ medida por la unidad de control.

Actuador

El instrumento requiere una señal de tensión en el rango de $0 - 5\text{ V}$ para establecer el nivel de caudal de gas requerido.

La unidad de control debe generar una señal de tensión en este rango, para esto se implementa la topología de la figura (3.24).

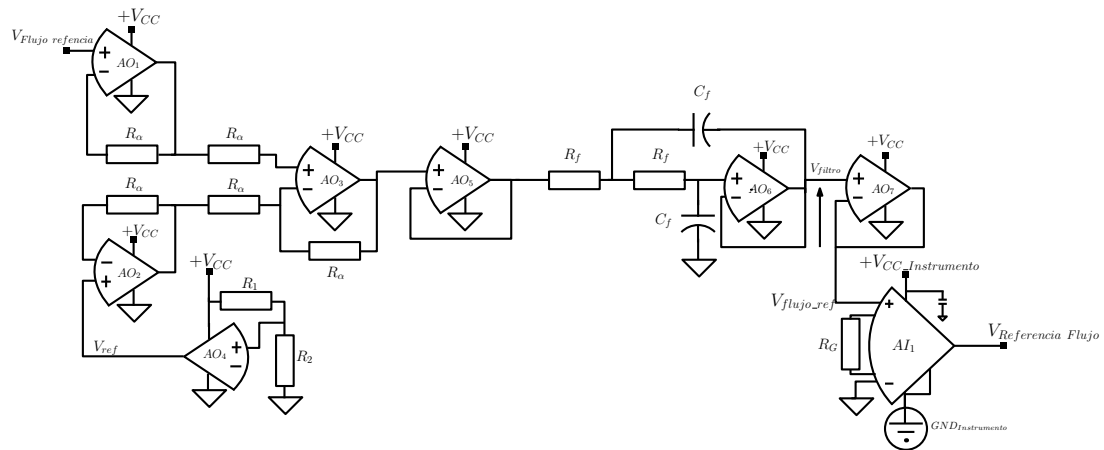


Fig. 3.24: Topología circuito acondicionador referencia de Flujo Gas.

Con la implementación de los amplificadores operacionales AO_1 , AO_2 y AO_3 , junto a las resistencias R_α , se implementa una configuración de instrumentación diferencial, para obtener la diferencia entre la salida analógica de la unidad control y el nivel de referencia (V_{ref}). Debido a que el μC genera una salida de tensión cuyo rango es de $0,55 - 2,75\text{ V}$. Se establece el nivel de $V_{ref} = 0,5\text{ V}$, la que es configurada mediante el amplificador operacional AO_4 y el divisor de tensión entre R_1 y R_2 .

Con esto se obtiene una señal de tensión $V_{flujo.ref}$ en el rango de $0 - 2,2\text{ V}$, la que ingresa al amplificador operacional AO_5 en configuración seguidor.

Esta señal ingresa al filtro pasa bajos compuesto por las resistencias R_f , los capacitores C_f y el amplificador operacional AO_6 . Para luego ingresar al amplificador operacional AO_7 .

Cabe señalar que los amplificadores operacionales AO_1 al AO_7 , corresponden a los integrados LM324 y LM358, los que se encuentran alimentados con polarización unipolar V_{CC} . Finalmente la señal obtenida a la salida del AO_7 , ingresa al terminal positivo del amplificador operacional de instrumentación AI_1 , y en el terminal negativo se conecta el nivel de tierra de la unidad de control.

El AI_1 posee una resistencia R_G para ajustar la ganancia K , de esta manera convertir el rango de la señal según la ecuación (3.17)

$$V_{Referencia\ Flujo} = K \cdot V_{flujo.ref} \quad (3.17)$$

Al establecer una ganancia de $K = 2,27$, se requiere una $R_G = 78,740\ K\Omega$. De esta manera se consigue una señal de tensión en el rango de $0 - 5\ V$ requeridos por el instrumento para establecer el nivel de caudal requerido.

4. CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN.

4.1. Máquina de Estados.

El funcionamiento de un quemador MPI queda determinada por la secuencia de operación descrita en la sección (2.3). Esta puede ser modelada mediante el uso de máquina de estado de Moore, representada en la figura(4.1).

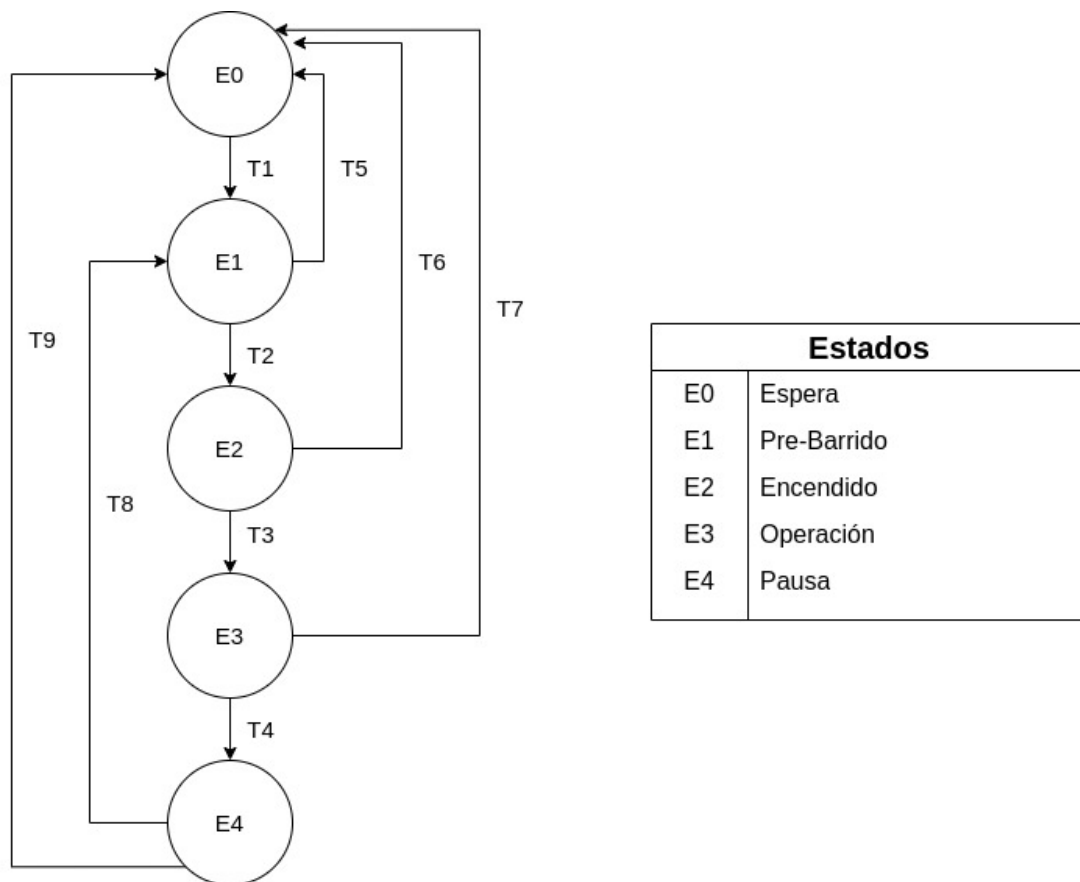


Fig. 4.1: Máquina de estados quemador

4.2. Implementación en PLC.

Mediante el uso del Gráfico de Función Secuencial, SFC en sus siglas en inglés “Sequential Function Chart”[7]. Designan la forma gráfica de programar la secuencia de actividades de control de procesos susceptibles de ser implementadas mediante Automatas Programables (PLC). Este método permite visualizar el desarrollo del proceso, siendo también muy fácil de entender. Este método no difiere del GRAFCET más que su estandarización que responde a la norma IEC-61131.

A partir de la máquina de estados propuesta se extraen distintas matrices que permitirán el diseño del SFC.

4.2.1. Matriz de Incidencia y Transición.

La máquina de estados descrita en la figura (4.1) ilustra una base de reglas condicionales que definen su comportamiento. Estas son del tipo:

IF (T1) ENTONCES desactivar E0, activar E1.

Mediante la matriz de incidencias es posible la descripción completa del controlador lógico. Así se tiene que tal matriz contiene la información necesaria y suficiente para habilitar las transiciones, activar y desactivar estados de un sistema de control. Esta queda representada en la tabla (4.1). Donde se puede ver la relación que existe entre las transiciones de la máquina y la activación/desactivación (S/R) de los estados.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
E0	R				S	S	S		S
E1	S	R			R			S	
E2		S	R			R			
E3			S	R			R		
E4				S				R	R

Tab. 4.1: Matriz incidencia.

A partir de la cual se obtiene su matriz de transición.(tabla 4.2). La que permite establecer las condiciones lógicas para la dinámica de funcionamiento descrita por máquina de estado.

Condición			Set	Reset
E0	T1		E1	E0
E1	T2	!T5	E2	E1
E2	T3	!T6	E3	E2
E3	T4	!T7	E4	E3
E1	T5	!T2	E0	E1
E2	T6	!T3	E0	E2
E3	T7	!T4	E0	E3
E4	T8	!T9	E1	E4
E4	T9	!T8	E0	E4

Tab. 4.2: Matriz de transición

4.2.2. Matriz de habilitación de transiciones y dinámica de actividades.

La secuencia descrita en la máquina de estado puede ser representada por medio de un juego de matrices:

- Matriz de habilitaciones de transición.
- Matriz de la dinámica de actividades.

El resultado de ambas matrices es la matriz de incidencias.

La matriz de habilitación de transiciones es directamente obtenida a partir del rastreo de la máquina de estados, al activarse un estado, esta habilita las transiciones asociados al estado de la máquina. Esta se puede notar en la tabla (4.3)

Esto es particularmente útil para la unidad de control, puesto que en cada ciclo monitoriza el valor de las transiciones implicadas en lugar de todas. Por ejemplo, el estado *E2* monitoriza el valor de las transiciones 3 (*HT3*) y 6 (*HT6*).

	HT1	HT2	HT3	HT4	HT5	HT6	HT7	HT8	HT9
E0	X								
E1		X			X				
E2			X			X			
E3				X			X		
E4								X	X

Tab. 4.3: Matriz de habilitación de transiciones

La activación de la correspondiente etapa depende del cumplimiento de la función *AND* entre la habilitación de la transición y la propia transición activando la etapa inmediatamente posterior y desactivando la etapa inmediatamente anterior. Esta información queda representada en la matriz de la dinámica de actuación y se puede notar en la tabla (4.4).

	HT1.T1	HT2.T2	HT3.T3	HT4.T4	HT5.T5	HT6.T6	HT7.T7	HT8.T8	HT9.T9
S	E1	E2	E3	E4	E0	E0	E0	E1	E0
R	E0	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E4	E4

Tab. 4.4: Matriz de la dinámica de actuación

4.2.3. Cálculo de Transiciones.

Las transiciones quedan determinadas por el monitoreo de los diferentes sensores y temporizadores involucrados en el proceso y descritos en el manual de la Unidad de Mando y Control elaborado por QUEMPIN [8].

Las expresiones lógicas obtenidas para cada transición quedan descritas en las ecuaciones (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) y (4.9)

$$T1 : (Pulsador ON) \& (\overline{Pulsador OFF}) \& (T_{cabezal}^{\circ} < T_{seguridad\ min}^{\circ}) \& (\overline{Fuego}) \& \dots \\ \dots \& (Gas) \& (\overline{Aire\ Soplador}) \quad (4.1)$$

$$T2 : (\overline{Pulsador OFF}) \& (Tiempo\ pre\ ventilación) \& (\overline{Fuego}) \& (Gas) \& \dots \\ \dots \& (Aire\ Soplador) \quad (4.2)$$

$$T3 : (Gas) \& (Fuego) \& (Tiempo\ Seguridad) \& (Tiempo\ Estabilización) \& \dots \\ \dots \& (Aire\ Soplador) \quad (4.3)$$

$$T4 : (\overline{Pulsador OFF}) \& (T_{control}^{\circ} > T_{control\ max}^{\circ}) \& (Fuego) \& (Aire\ Soplador) \quad (4.4)$$

$$T5 : (Pulsador OFF) \parallel (Fuego) \parallel [(Tiempo preventilación) \& (\overline{Aire Soplador})] \parallel \dots \\ \dots \parallel [(Tiempo Aire) \& (\overline{Aire Soplador})] \quad (4.5)$$

$$T6 : (\overline{Aire Soplador}) \parallel [(\overline{Fuego}) \& (Tiempo seguridad) \& (\overline{Tiempo estabilización})] \parallel \dots \\ \dots \parallel (\overline{Gas}) \parallel [(Fuego) \& (\overline{Tiempo preventilación})] \parallel (Pulsador OFF) \quad (4.6)$$

$$T7 : (Pulsador OFF) \parallel (\overline{Fuego}) \parallel (\overline{Aire Soplador}) \parallel (\overline{Gas}) \quad (4.7)$$

$$T8 : (\overline{Pulsador OFF}) \& (T_{control}^{\circ} < T_{control\ min}^{\circ}) \& (T_{cabezal}^{\circ} < T_{seguridad\ min}^{\circ}) \& \dots \\ \dots \& (Gas) \quad (4.8)$$

$$T9 : (Pulsador OFF) \parallel (\overline{Gas}) \quad (4.9)$$

4.3. Realización SFC mediante Ladder

La implementación del Diagrama de programación de Escalera "Ladder" de la máquina de estados a partir de las matrices descritas previamente, conlleva el rastreo del programa de forma secuencial y cíclicamente. Su representación utiliza como referencia los símbolos de la tabla (4.5).

Símbolo	Tipo	Descripción
I0.1	Entrada	Pulsador On
I0.2	Entrada	Pulsador Off
I0.3	Entrada	Detector Flama
I0.4	Entrada	Detector Gas
I0.5	Entrada	Aire Soplador
$TP_{cabezal}$	Entrada	Termopar Cabezal
TP_{camara}	Entrada	Termopar Camara
$TP_{control}$	Entrada	Termopar Control
TMR_1	Entrada	Temporizador Tiempo Detección Aire (T_{DA})
TMR_2	Entrada	Temporizador Tiempo Preventilacion (T_{PV})
TMR_3	Entrada	Temporizador Tiempo Pre-Encendido (T_{PEn})
TMR_4	Entrada	Temporizador Tiempo Post-Encendido (T_{PSE})
TMR_5	Entrada	Temporizador Tiempo Seguridad (T_{SEG})
TMR_6	Entrada	Temporizador Tiempo Entre Aperturas Válvulas (T_{VAL})
TMR_7	Entrada	Temporizador Tiempo Encendido Exitoso (T_{EE})
TMR_8	Entrada	Temporizador Tiempo Estabilizacion Cabezal (T_{EST})
CN_1	Comparación	$T^{\circ}\text{Control} > T^{\circ}\text{Control Max}$
CN_2	Comparación	$T^{\circ}\text{Cabezal} < T^{\circ}\text{Seguridad min}$
CN_3	Comparación	$T^{\circ}\text{Control} < T^{\circ}\text{Control min}$
CN_4	Comparación	$T^{\circ}\text{Camara} > T^{\circ}\text{Camara Máx}$
O0.1	Salida	Electro Válvula Gas Flama Piloto
O0.2	Salida	Electro Válvula Gas Monoblock
O0.3	Salida	Activación Soplador
O0.4	Salida	Activador Chispero
O1.1	Salida	Luz Indicadora 1
O1.2	Salida	Luz Indicadora 2

Tab. 4.5: Tabla Símbolos Entrada - Salida.

Cuando la planta es energizada, la unidad de control es inicializada en el estado de Espera (*E0*), su implementación Ladder se puede notar en la figura (4.2).



Fig. 4.2: Diagrama Ladder secuencia de inicialización

En La figura (4.3) se puede notar la implementación Ladder de la matriz de habilitación de transiciones.

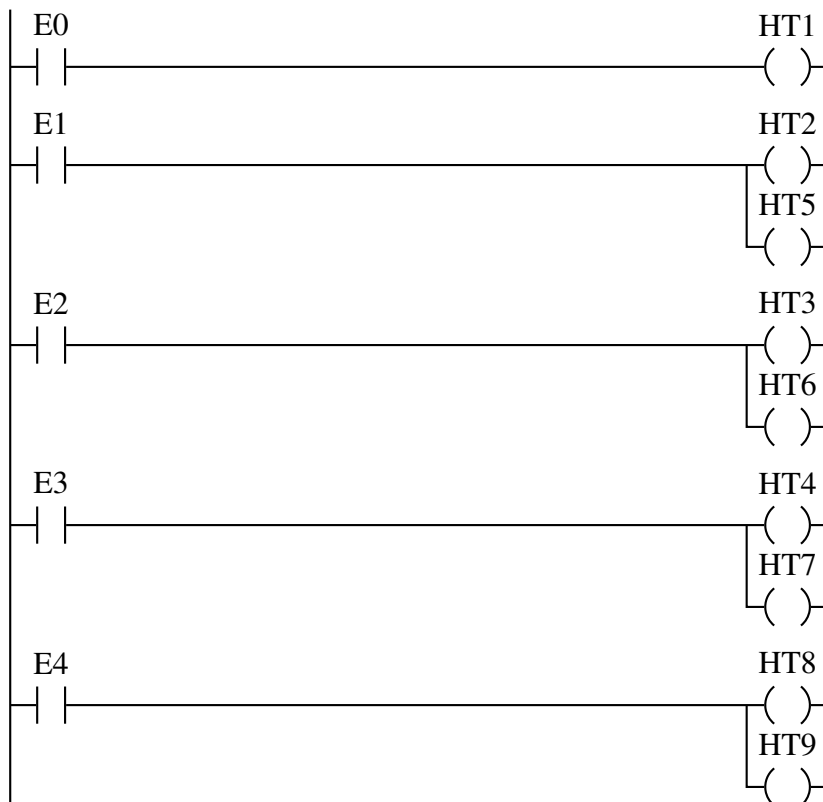


Fig. 4.3: Diagrama Ladder de la matriz de habilitación de transiciones.

Se puede observar que la transferencia de información es estructurada y exenta de ambigüedades.

Asimismo, mediante la aplicación de la metodología de transferencia de información desde la matriz al diagrama ladder, la función lógica *AND* implementada como una combinación de la habilitación y la propia condición de transición tiene como consecuentes la generación de flancos de activación y desactivación de los estados de la máquina, esta se puede notar en la figuras (4.4) y (4.5).

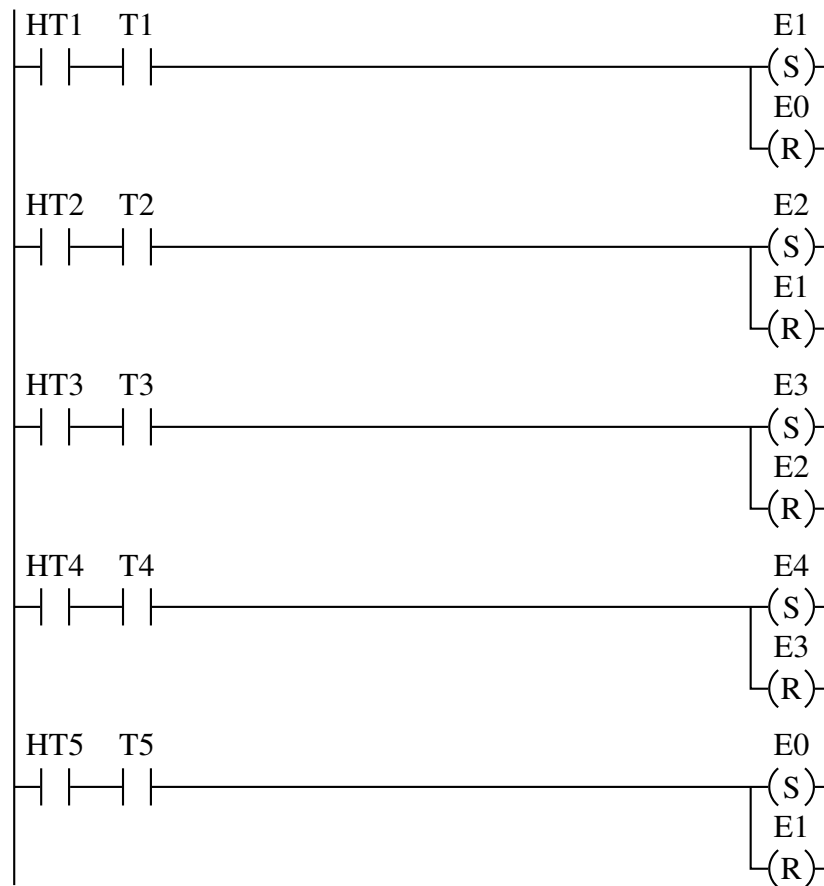


Fig. 4.4: Diagrama Ladder de la matriz dinámica de actuación.

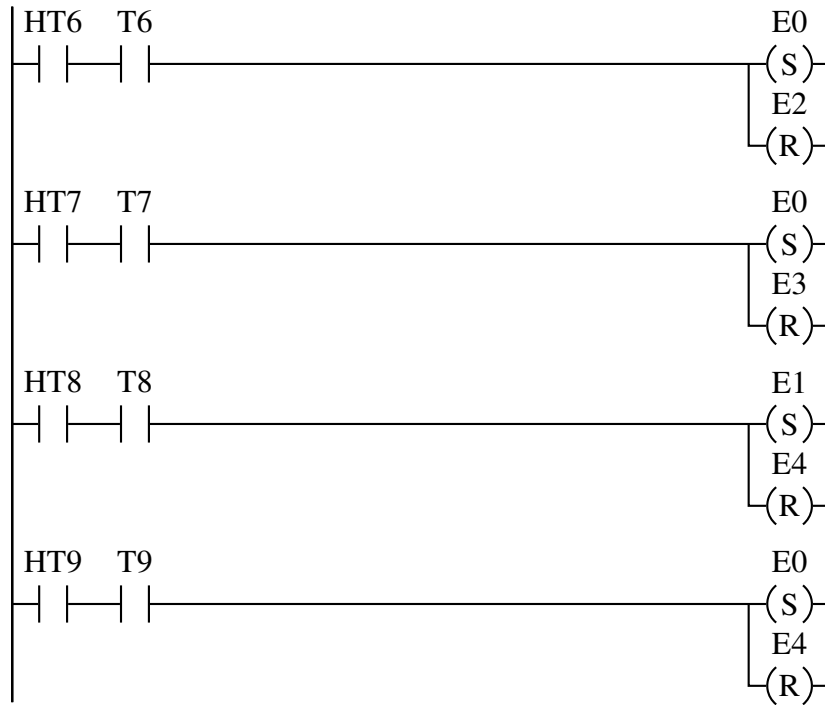


Fig. 4.5: Diagrama Ladder de la matriz dinámica de actuación. Continuación.

La implementación ladder del cálculo de transiciones descritas por las ecuaciones (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) y (4.9) se puede notar en las figuras (4.6) y (4.7).

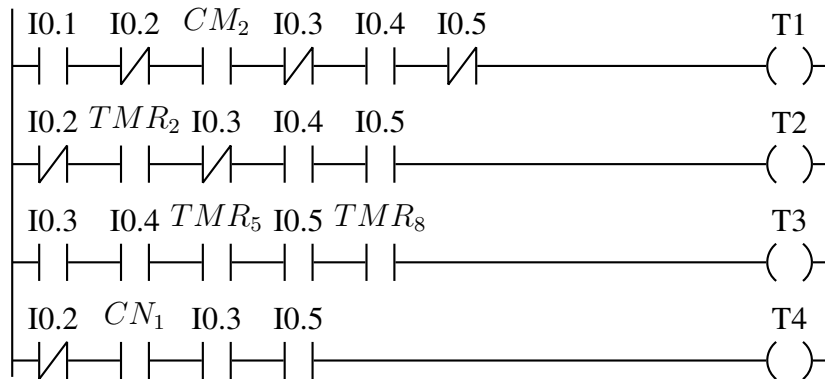


Fig. 4.6: Diagrama Ladder: Cálculo de transiciones .

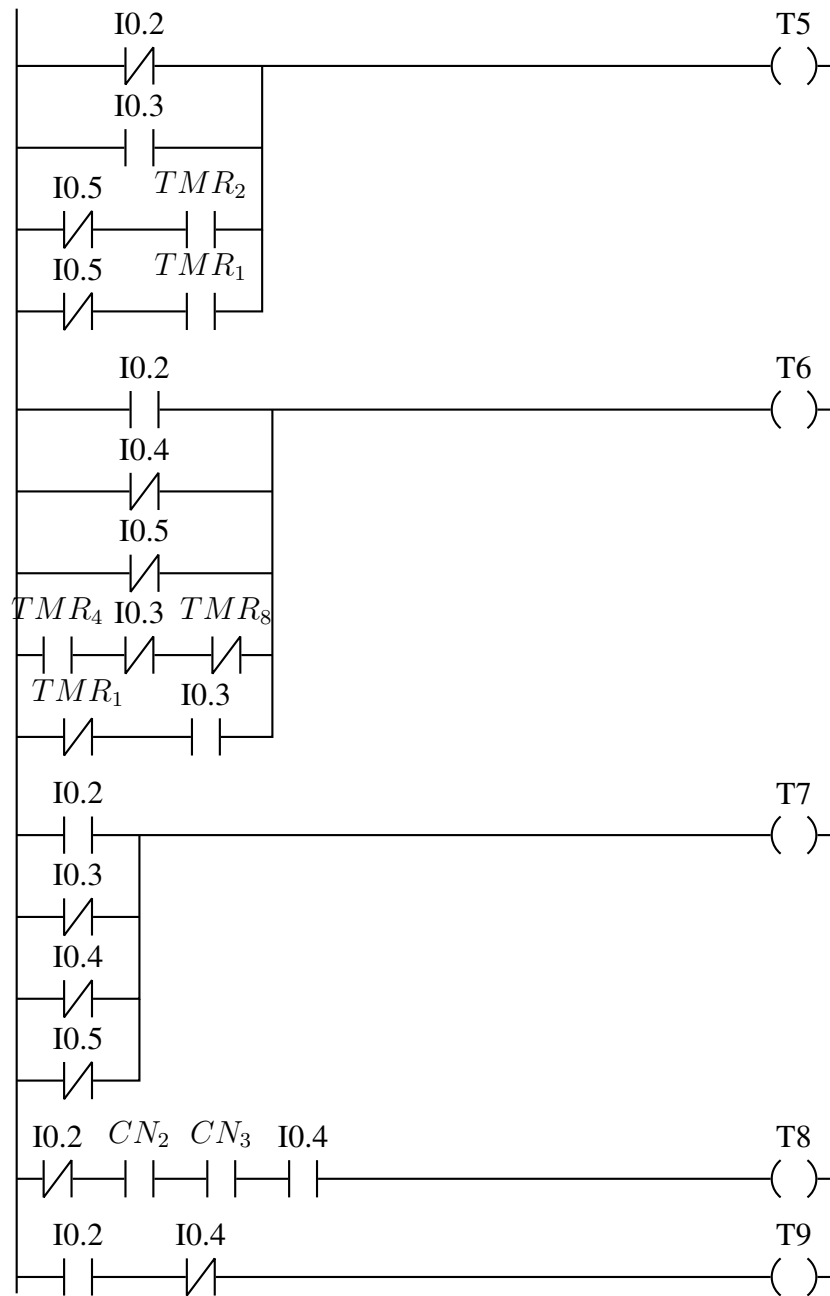


Fig. 4.7: Diagrama Ladder: Cálculo de transiciones. Continuación.

En la figura (4.8), se pueden notar la implementación ladder de los temporizadores descritos en el diagrama de la figura (2.3), de la secuencia de operación.

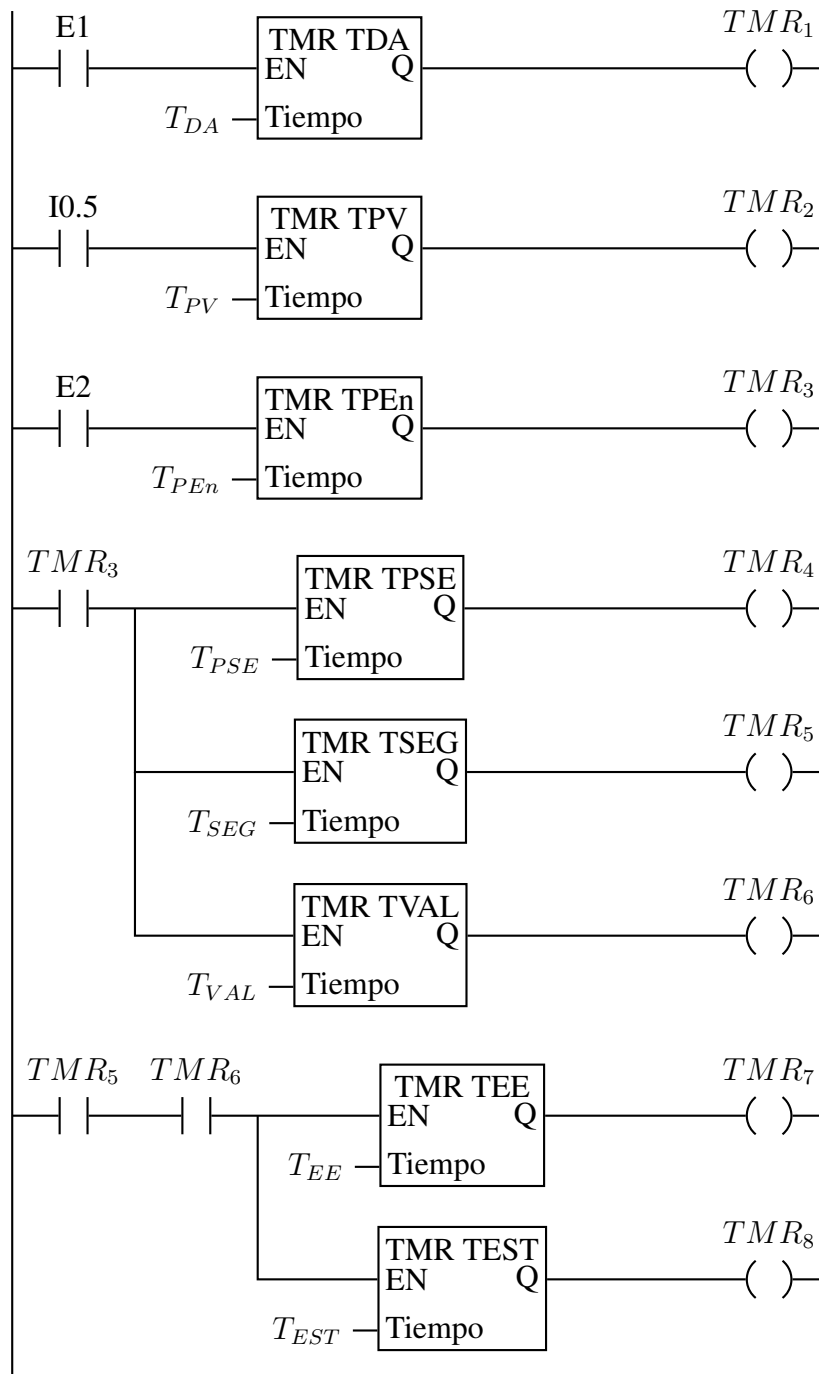


Fig. 4.8: Diagrama Ladder. Temporizadores

En la figura (4.9), se puede notar la implementación ladder de la monitorización de las diferentes temperaturas mediante la comparación lógica de las mediciones con los niveles de temperatura definidos en la configuración presente en la tabla de símbolos descrita(4.5).

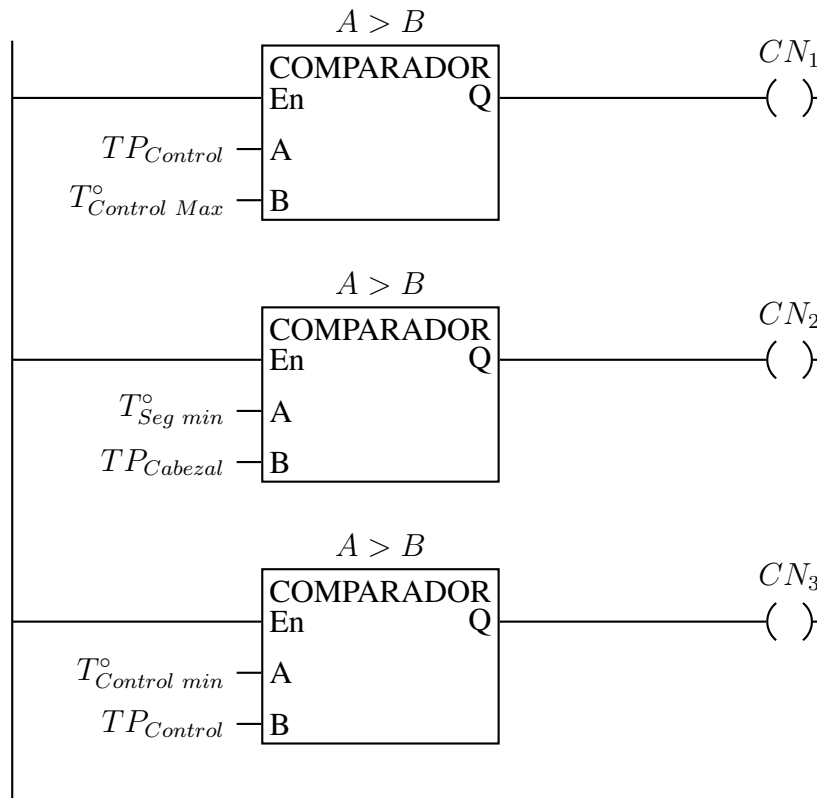


Fig. 4.9: Diagrama Ladder. Monitorización de Temperaturas.

Finalmente en el diagrama Ladder de la de figura (4.10), se puede notar la implementación que describe el accionamiento de los diferentes actuadores de la planta.

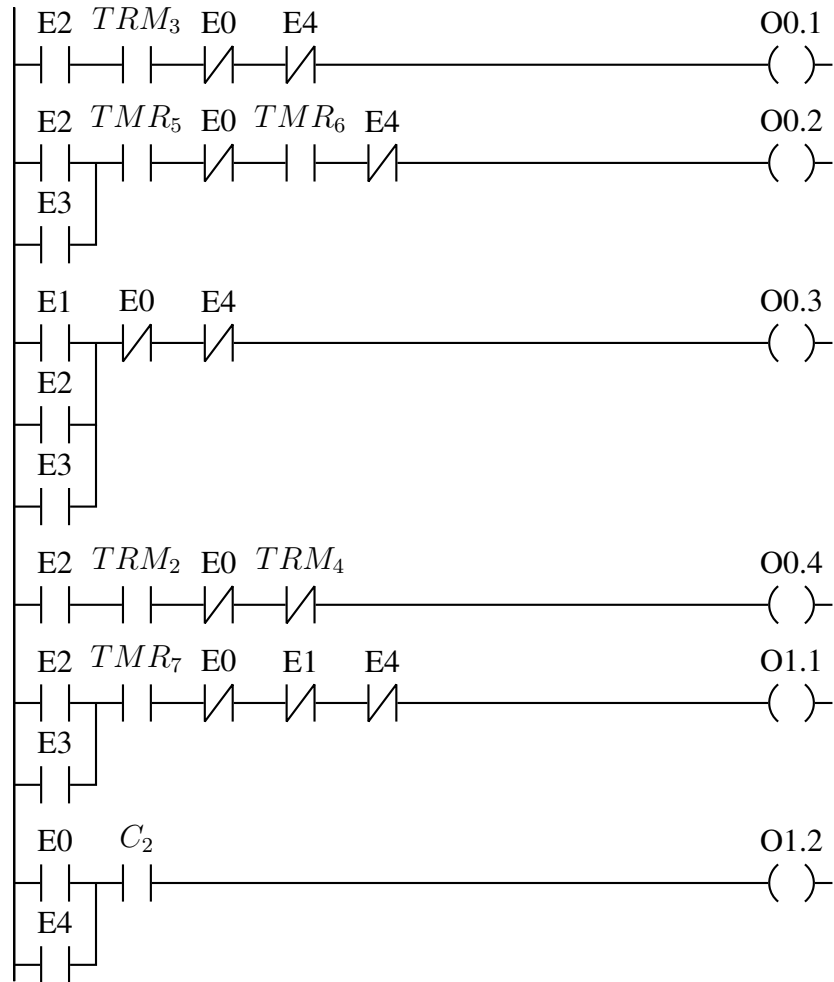


Fig. 4.10: Diagrama Ladder. Actuaciones de Salida

5. CONCLUSIONES.

En el desarrollo de este trabajo de memoria, se ha implementado una instrumentación basada en los principios físicos presentes en la operación de los quemadores MPI. Caracterizando la dinámica eléctrica de las diferentes topologías de los circuitos propuestos para relacionarlos con las diferentes variables físicas correspondientes y así obtener una calibración de estos.

La implementación de esta instrumentación no solo permite una mejor comprensión de la dinámica de los quemadores MPI, sino que también es una herramienta clave para la reducción de emisiones contaminantes. La instrumentación puede utilizarse para monitorear y controlar los parámetros de combustión, lo que puede reducir las emisiones de gases nocivos al ambiente.

Con la instrumentación implementada, se elabora una estrategia de automatización para el control de la planta que componen los quemadores de MPI mediante la programación de la unidad de control. Esta estrategia de control no solo permite una mejor eficiencia de la combustión, sino que también puede ser utilizada para reducir las emisiones de gases contaminantes.

Respecto a la dinámica de operación tanto de la instrumentación como la de control, se ajustan a lo que establece la norma NCh3111 y las indicaciones de fabricación que la empresa QUEMPIN SpA ha desarrollado para la manufactura de sus quemadores de MPI.

Bibliografía

- [1] Babkin, V.S. Korzhavin A.A. and Bunev V.A, Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media, Combustion and Flame 87 (1991) 182-190.
- [2] LANGLEBERT, J. Curso Elemental de Estudios Científicos Física, 9^a ed, París, Librería de la V^{da} de Ch. Bouret, 1898, 151 p.
- [3] LANGLEBERT, J. Curso Elemental de Estudios Científicos Física, 9^a ed, París, Librería de la V^{da} de Ch. Bouret, 1898, 587 - 589 p.
- [4] CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación industrial, 6^a ed, Alfaomega, 1997, 339 - 341 p.
- [5] WILSON, PETER. The circuit designer's companion, 3^a ed, Elseiver, 2012, 11-14 p.
- [6] CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación industrial, 6^a ed, Alfaomega, 1997, 237 - 240 p.
- [7] FERREIRO GARCÍA, R. Nociones Sobre Aplicación de PLC's al Control de Procesos Industriales, Universidad Da Coruña, 77 - 106 p.
- [8] QUEMPIN SpA. Unidad de Mando y Control, manual de usuario.