



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMBUSTIÓN PARA CUBRIR LOS
REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS Y DE SEGURIDAD EN UN HORNO
ROTATORIO**

TESINA

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

IRVING YOEL HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Juan Mario Morales Cabrera**

VOCAL: **Profesor: Bernardo Carreón Calderón**

SECRETARIO: **Profesor: Daniel Bobadilla Ocampo**

1er. SUPLENTE: **Profesor: José Manuel García Anaya**

2° SUPLENTE: **Profesor: José Arturo Moreno Xochicale**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

I.Q Daniel Bobadilla Ocampo

SUPERVISOR TÉCNICO

I.Q Rogelio Romero Reséndiz

SUSTENTANTE

Irving Yoel Hernández Hernández

Contenido

Resumen.....	I-1
Introducción	I-2
Objetivos	I-4
I. Marco teórico	I-5
1. Combustión	I-5
1.1. Definición.....	I-5
1.2. Elementos de una combustión	I-5
1.2.1. Comburente	I-5
1.2.2. Combustible.	I-7
1.3. Mecanismo de la combustión.....	I-10
1.4. Tipos de combustión	I-13
2. Hornos industriales.....	I-16
2.1. Tipos de hornos industriales	I-17
3. Balance de energía en un horno	I-18
4. Fundamentos de control.....	I-21
4.1. El control en hornos industriales	I-29
4.2. Normatividad	I-31
5. Descripción del proceso	I-36
II. Estado del arte.....	II-38
1. Balance de energía	II-38
2. Diseño del sistema de combustión.....	II-44
3. Planteamiento del sistema lógico de control	II-61
III. Resultados	III-66
Conclusiones y apuntes finales.....	III-74
IV. Apéndices.....	IV-76
Apéndice A. Gráficas y tablas	IV-76
Apéndice B. Criterios de diseño	IV-80
V. Bibliografía:.....	V-82

Resumen

Este proyecto de tesis consiste en una propuesta original técnicamente viable del sistema de combustión y la lógica de control para el funcionamiento de un horno rotatorio. El plan de trabajo consiste en hacer un balance energético. Para saber la cantidad de calor necesaria. Y cumplir con los parámetros del proceso. Sobre la base de la estequiometría de la reacción de combustión del gas natural, se calcularán los requisitos de combustible y aire. Se diseñará un sistema de tuberías para su suministro. Y finalmente, procederemos a la lógica de control necesaria para una operación eficiente y segura. El diseño del sistema de combustión se basa en las regulaciones y recomendaciones de las instituciones nacionales e internacionales para instalaciones de gas natural para el uso de hornos industriales.

Summary

This thesis project consists of a technically viable original proposal of the combustion system and control logic for the operation of a rotary kiln. The work plan consists of making an energy balance. To find out the amount of heat needed. And comply with the parameters of the process. Based on the stoichiometry of the natural gas combustion reaction, the fuel and air requirements will be calculated. A pipe system will be designed for its supply. And finally, we will proceed to the control logic that's necessary for efficient and safe operation. The design of the combustion system is based on the regulations and recommendations of national and international institutions for natural gas installations for the use of industrial furnaces.

Introducción

El control del fuego ha ayudado al desarrollo de la humanidad, mejorando desde mucho tiempo atrás su adaptabilidad y supervivencia, brindando luz y una mejor alimentación al poder cocer los alimentos.

La combustión es una reacción química oxidativa que se da por la mezcla de un combustible (sustancia que se oxida y libera la energía), un comburente (es la sustancia que va a propiciar esta oxidación) y una fuente de ignición (energía de activación). Los productos de la reacción de combustión son sustancias en estado gaseoso conocidos como gases de combustión.

Un sistema de combustión es el conjunto de dispositivos, instrumentación y medios con el cual se va a mantener una combustión estable y segura para un fin determinado. En el ámbito del calentamiento industrial, los sistemas de combustión son comunes por su versatilidad, poco espacio y bajo costo. Con el tiempo es más rentable que el calentamiento por inducción eléctrica, por ejemplo. En el ámbito industrial, se ha adaptado el aprovechamiento de la combustión a los procesos productivos actuales, junto con un incremento a su estudio.

En el ámbito de la ingeniería, los ingenieros de combustión han desarrollado manuales, tópicos y normas con base en su experiencia y por parte de la academia se ha estudiado la reacción química, su cinética y su fenómeno termoquímico. El reto del ingeniero en campo es nutrirse de ambos lados para diseñar sistemas de combustión mucho más eficientes y seguros.

El presente trabajo busca dar una propuesta de diseño para su posterior construcción de un sistema de combustión para proveer la fuente de calor a un horno. Por lo cual se analizará el proceso, por medio de un balance de calor se determinará el flujo necesario de combustible, se diseñará la tubería y se seleccionará su instrumentación para garantizar el flujo hidráulico recomendado y caídas de presión pertinentes, se seleccionarán los instrumentos necesarios para la automatización y operación segura del horno.

Dicha propuesta fue aprobada para su construcción y fue incluida en un proyecto a realizar, delimitado en costo, tiempo y alcances. Durante la puesta en marcha se

realizaron diversas pruebas preoperativas, para garantizar el funcionamiento correcto en todo momento y verificar que el diseño hidráulico y de control fue el correcto. El sistema se puso en marcha de manera exitosa. Los ingenieros en control y automatización determinaron la sintonización de parámetros en campo a prueba y error, basándose en el comportamiento real del sistema.

Este trabajo pone a prueba los conocimientos adquiridos en la formación como ingeniero químico en áreas de ingeniería de calor, ingeniería de fluidos, fenómenos de transportes y dinámica y control de procesos.

Objetivos

- Con base en la temperatura de operación, realizar el balance de energía para determinar el flujo de calor necesario para el proceso.
- Por medio del balance estequiométrico de la reacción química de combustión del combustible seleccionado y de su poder calorífico, calcular los flujos necesarios para generar una combustión completa.
- Diseño hidráulico de la tubería para el suministro de combustible (gas natural) para el correcto funcionamiento del sistema de combustión.
- Selección de la instrumentación y dispositivos necesarios de todo el sistema de combustión con el fin de tener las mejores condiciones de operación.
- Proponer una secuencia de control con su instrumentación, tanto en el arranque como en la operación del sistema de combustión, con el fin de evitar siniestros.

I. Marco teórico

1. Combustión

1.1. Definición

La combustión es una reacción química de oxidación exotérmica, en la que una sustancia reacciona rápidamente con el oxígeno, dando como resultado liberación de calor utilizable y la producción de una llama visible.

1.2. Elementos de una combustión

Los elementos de la combustión son tres: Un combustible, que es el elemento que se oxida, dona sus electrones y actúa como agente reductor. Un comburente que es el que recibe los electrones, se reduce y actúa como agente oxidante. Y una fuente de ignición, que actúa como energía de activación. Es necesario la combinación de estos tres para que se pueda dar un proceso de combustión.

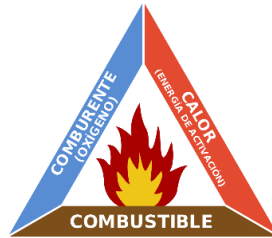


Fig. 1 Triangulo del fuego

combustible + comburente + fuente de ignicion → Flama + energia

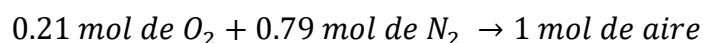
1.2.1. Comburente

El comburente por excelencia es el oxígeno. En la industria se toma este gas por lo general del aire atmosférico. El aire atmosférico es una mezcla gaseosa, transparente, inodora e insípida que está constituida principalmente de nitrógeno, oxígeno, trazas de vapor de agua, anhídrido carbónico y cantidades muy pequeñas y variables de argón, neón, helio, kriptón, xenón y metano.

Componente	Fracción molar	Porcentaje volumétrico (%)
N ₂	0.7809	78.048
O ₂	0.2095	20.946
AR	0.0093	0.934
CO ₂	0.0003	0.033

Tabla 1. Principales componentes que conforman el aire

Si hacemos la relación del aire solamente con el nitrógeno y el oxígeno tenemos que:



Por lo tanto, si se utiliza el aire como comburente, para obtener un mol de oxígeno se tiene que emplear 4.774 mol de aire, de la misma manera por cada metro cubico de O₂ se requieren 4.774 metros cúbicos de aire a nivel del mar. El nitrógeno es inerte en la reacción de combustión.

Efecto de la altitud en la composición del aire

La composición del aire descrita en la tabla 1 es considerada a nivel del mar (1 atm) en lugares más altos es necesario considerar la variación de presión atmosférica y su influencia sobre las propiedades del aire. La presión atmosférica disminuye a medida que crece la altura, esto hace que el volumen de aire aumente afectando a su densidad y a su composición. Al reducir la presión, la densidad disminuye y fracción molar del oxígeno también, debido a que la molécula de oxígeno (32 g/mol) es más pesada que la del aire seco (28.93 g/ mol), y tiende a quedarse en bajas alturas, la fracción molar de nitrógeno incrementa al ser más liviana que el aire (28 g/mol).¹

Altitud sobre el nivel del mar (ft)	0	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
Presión atmosférica (psi)	14.7	14.42	14.19	13.67	13.17	12.7	12.23	11.75
Densidad del aire (lb/ft ³)	0.075	0.0734	0.0724	0.0698	0.0672	0.0648	0.0624	0.0599

Tabla 2. Presión y densidad del aire a diferentes alturas

¹ Carlos Velasco Hurtado (Revista Metalúrgica N°35.2014)

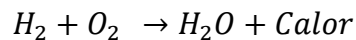
1.2.2. Combustible.

Un combustible es una sustancia, sólida, líquida o gaseosa que puede fácilmente encenderse y quemarse para producir calor, luz u otra forma útil de energía. Los combustibles dan un contenido de calor variable dependiendo de su composición química. Los combustibles más usados a nivel industrial son los hidrocarburos. Los cuales están compuestos básicamente por carbono (C), hidrogeno (H) y pequeñas cantidades de azufre (S). Generalmente se obtienen del petróleo. Estos elementos tienen una alta afinidad con el oxígeno y son fácilmente quemados.

Poder calorífico de los combustibles

El calor total producido por la combustión de determinada cantidad de combustible depende de los porcentajes de carbón e hidrogeno contenidos en el combustible. La relación H/C se refiere a la relación de contenido de hidrogeno a carbón en base al peso en kilogramos, mientras más alta es esta relación, mayor es el calor liberado por la combustión. Por ejemplo, el gas natural (CH₄) que es el componente principal del gas natural, contiene 0.75 kilogramos de carbón y 0.25 kilogramos de hidrogeno su relación H/C es de $\frac{0.25}{0.75} = 0.33$. Tomando los poderes caloríficos para el carbón y el hidrogeno se puede calcular teóricamente que el calor bruto liberado al quemar 1 kg de metano:

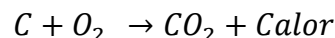
calor proporcionado por el hidrogeno es



al quemarse 1kg de hidrogeno se produce 33944 kcal (64095 BTU/lb)

$$0.25 \times 33944 \text{ kcal} = 8486 \text{ kcal} (16023.75 \text{ BTU/lb})$$

calor proporcionado por el carbón es



al quemarse un kg de carbón se produce 7830 kcal (14093 BTU/lb)

$$0.75 \times 7830 \text{ kcal} = 5873 \text{ kcal} (10569.75 \text{ BTU/lb})$$

por lo tanto, el calor liberado por un kilogramo de metano es

$$8486 \text{ kcal} + 5873 \text{ kcal} = 14359 \text{ kcal} (26593.5 \text{ BTU/lb})$$

Calor específico

El calor específico es una propiedad única de cada sustancia y se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa, generalmente se mide esta propiedad de dos formas distintas, el calor específico a volumen constante C_v y calor específico a presión constante C_p . La unidad de medición en el sistema internacional es el *joule* o la *caloría* ($1 \text{ cal} = 4.1868\text{J}$). La caloría se define como la energía necesaria para elevar en 1°C la temperatura de 1 gramo de agua a 15.5°C y en el sistema ingles la unidad de medición es el *BTU* que se define como la energía necesaria para elevar en 1°F la temperatura de 1 libra de agua a 60°F .

Calor sensible

El calor sensible es aquel que absorbe o libera un cuerpo sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado (cambio de fase). Cuando a un cuerpo se le suministra calor sensible aumenta su temperatura.

Calor latente

Cuando una sustancia cambia de fase a presión constante, no hay ningún cambio en la temperatura; sin embargo, el proceso requiere la transferencia de una cantidad finita de calor a la sustancia, estos efectos caloríficos se conocen como calor latente. El calor latente es el calor que acompañan al cambio de fase de una sustancia. Por ejemplo; cuando un líquido pasa al estado gaseoso, toma calor latente; cuando un gas se condensa y pasa al estado líquido, cede calor latente.

Calor bruto

El calor bruto es el calor liberado en su totalidad por la reacción de combustión sin restarle ninguna perdida; para el caso del gas natural es de 26593.5 BTU por libra.

Calor neto

El calor neto es el calor bruto menos el calor latente de formación del agua que en el caso de la combustión del metano, se crean dos moléculas de agua por cada mol de metano, reduciendo el calor liberado a 1000 BTU por cada libra quemada.

Combustibles comerciales

Existen varios tipos de Hidrocarburos que se comercializan, pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Las propiedades de los combustibles gaseosos y líquidos son peculiares a su tipo; por ejemplo, para los líquidos las propiedades se dan por kg y para los gases en m³.

Los combustibles líquidos contienen una gran cantidad de hidrocarburos y compuestos orgánicos, como el carbono, el hidrógeno y el azufre. Otros constituyentes menores son la ceniza y la humedad. Algunos combustibles líquidos son muy viscosos o contiene ceras, lo que dificulta su flujo por las tuberías o las pequeñas aberturas de los quemadores. Tales combustibles requieren precalentamiento para reducir su viscosidad. Los combustibles líquidos más usados son el fuel-oil y el alquitrán para calentamiento industrial, otros tipos de combustibles como el keroseno y las gasolinas son demasiado caros.

Los combustibles gaseosos contienen como componentes principales: metano (CH₄), propano (C₃H₈) o butano (C₄H₁₀). Los combustibles gaseosos no generan ceniza, son más fáciles de transportar, no requiere precalentamiento y se queman limpiamente. Los gases más utilizados y universalmente disponibles son el gas natural o sus mezclas, Gas LP como el butano o el propano o sus mezclas. En los hidrocarburos gaseosos si el peso molecular incrementa, su gravedad específica también y con ello el calor liberado por pie cubico.

Para el proceso de la combustión los hidrocarburos gaseosos son los que dan mejor rendimiento (Sigüenza, 2000). Además, el precio de los combustibles gaseosos es mucho más económico que los líquidos y no requieren ser atomizados.

En la tabla 3 se enumeran las características de algunos combustibles gaseosos y líquidos.

Propiedades de algunos combustibles gaseosos											
Combustible	Composición, porcentaje en volumen (20°C y una presión de 15.12 kg/cm ³)								Potencia calorífica inferior Kcal/m ³	Potencia calorífica superior Kcal/m ³	Observaciones
	Análisis químico (por vía seca)										
	CO ₂	CO	CH	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	H ₂	O ₂	N ₂			
Gas natural	-	-	87		7.6	-	-	1.9	8837.7	9763.3	-
Gas mezclado	3.46	13.84	28.3	6.92	-	39.6	4.73	3.15	4612.8	5062.3	
Butano comercial	-	-	-	-	-	-	-	-	26495.3	28702.5	
Propano comercial	-	-	-	-	-	-	-	-	21101.9	22890.8	
Propiedades de algunos combustibles líquidos											
Combustible	Composición porcentaje en peso							Potencia calorífica inferior Kcal/Kg	Potencia calorífica superior Kcal/Kg	Observaciones	
	C	H ₂	O ₂	N ₂	s	H ₂ O	CENIZAS				
Alquitrán de hulla	86.7	6	3.1	0.116	0.745	3.2	0.097	8.79	9.07	Composición media	
Fuel-oil 2	86.5	12.6	-	-	0.7	O ₂ + N ₂ + cenizas 0.2		10.21	10.82		
Fuel-oil 6	86.8	10.2	-	-	2	O ₂ + N ₂ + cenizas 1		9.66	10.15		

Tabla 3. Principales características de los hidrocarburos usados en la industria

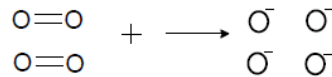
1.3. Mecanismo de la combustión

En la combustión de hidrocarburos, la reacción química no es sencilla, el mecanismo de reacción es una serie de reacciones complejas con elementos intermedios. Los cuales pueden existir solamente una fracción de segundo, millones de ellos se forman y destruyen simultáneamente en el transcurso de la reacción.

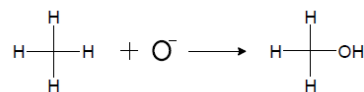
En resumen, la reacción de combustión se divide en tres fases

1. Fase de iniciación: Para la fase de iniciación de la reacción química de combustión es necesario se supere la energía de activación. Se le denomina energía de activación a la energía mínima que se requiere para iniciar una reacción química en los choques usuales aleatorios de las moléculas. Por ejemplo, en la combustión de metano una vez que se vence la energía de activación se rompe los enlaces de las moléculas de metano y de oxígeno. Cuando esto ocurre los átomos de carbono y de hidrogeno forman dos nuevas moléculas con él oxígeno, dióxido de carbono y agua, radiando gran cantidad de energía, alrededor de los 2870°C (5200°F). El calor que se genera se transmite a las otras moléculas aumentando su temperatura y generando una reacción en cadena.
2. Fase de propagación: Se empiezan a producir los primeros elementos intermediarios y se llevan a cabo las reacciones químicas intermedias que reproducen a estos intermediarios. Estas reacciones se llevan a cabo con niveles de energía muy altos y casi instantáneamente, la temperatura molecular interna llega a ser del orden de los 2760°C (IHEA.1998)

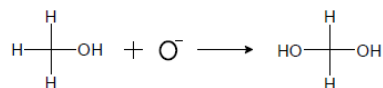
a) Las moléculas de oxígeno se disocian



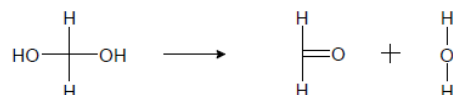
b) La fuerza de colisión entre la molécula de metano con un átomo libre de oxígeno disociado hace que este se quede adherido a un hidrogeno, formando un alcohol y liberando energía.



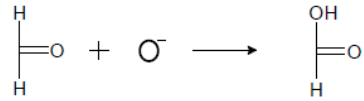
c) El alcohol se une con otro átomo libre de oxígeno para formar un alcohol secundario.



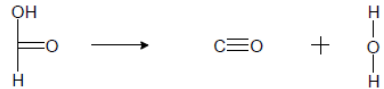
d) Sin embargo, esta molécula del alcohol secundario es muy inestable por lo que inmediatamente se desintegra para formar un formaldehido y vapor de agua.



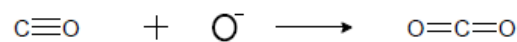
- e) El formaldehído tiene una gran afinidad con el oxígeno por lo que se adhiere a otro átomo libre de oxígeno formando ácido fórmico.



- f) A temperaturas elevadas el ácido fórmico es inestable y se descompone para formar monóxido de carbono y se forma la segunda molécula de agua.

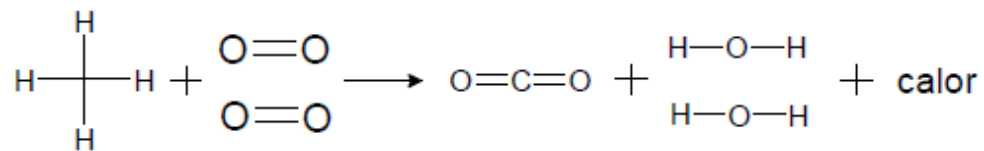


- g) La molécula de monóxido de carbono se combina con la última molécula libre de oxígeno disociado para formar bióxido de carbono y así completar la reacción.



3. Fase de terminación: Se inhibe la formación de elementos intermedios hasta que las reacciones se terminan, los factores que inhiben la formación pueden ser: Superficies frías, producción de productos finales, bajas presiones de componentes o bajas temperaturas.

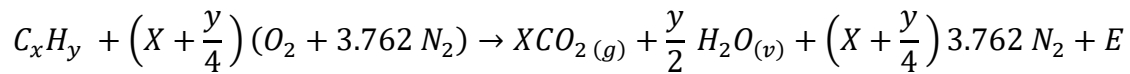
La reacción global es la siguiente:



1.4. Tipos de combustión

Combustión perfecta (completa) o estequiométrica

La reacción química balanceada de un hidrocarburo con el aire (1 mol de aire = 0.8 moles de nitrógeno y 0.2 moles de oxígeno), donde todos los moles reaccionan se representa de la siguiente manera.



Cuando el hidrocarburo y el oxígeno se mezclan en las proporciones que marca la ecuación estequiométrica, se lleva a la temperatura de ignición del combustible y no existe nada que la frene la combustión hasta que se logre la oxidación total, se dice que la combustión ha sido completa. No se producen otros productos no deseados.

Reactivos	Productos
C + O ₂	CO ₂
H ₂ + ½ O ₂	H ₂ O
S+O ₂	SO ₂
SH ₂ + 3/2 O ₂	SO ₂ + H ₂ O
CO + ½ O ₂	CO ₂
N ₂	N ₂

Tabla 4. Principales productos de la combustión

Combustión incompleta.

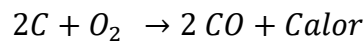
En la combustión incompleta, el combustible no se quema hasta el máximo grado posible de oxidación y aparecen productos de combustión no deseados, como el CO. A estas sustancias se denominan inquemados. Otros inquemados pueden ser H₂, C_xH_y, H₂S y C.

La combustión no puede llegar a completarse por diversos factores, unos de los más representativos, es porque no se logre vencer en su totalidad la energía de activación, otro importante es porque la mezcla de combustible y comburente no sea la dictada por la estequiometria. Si existe un exceso de combustible en la mezcla se le denomina mezcla rica y esto genera una atmosfera reductora, y del

mismo modo, si existe un exceso de aire a la mezcla se le denomina mezcla pobre, dado a la escasez de combustible y generan una atmosfera oxidante.

Atmosfera reductora

Si se usa más combustible en relación con el oxígeno disponible, el oxígeno no alcanzará a oxidar a todos reactivos y por lo tanto la reacción estará incompleta.



En este caso la reacción en vez de producir dióxido de carbono inofensivo producirá monóxido de carbono y menor calor.

En las siguiente grafica se podrá ver los productos de la combustión de una atmosfera reductora

La ecuación que describe la reacción química en estas condiciones es la siguiente:

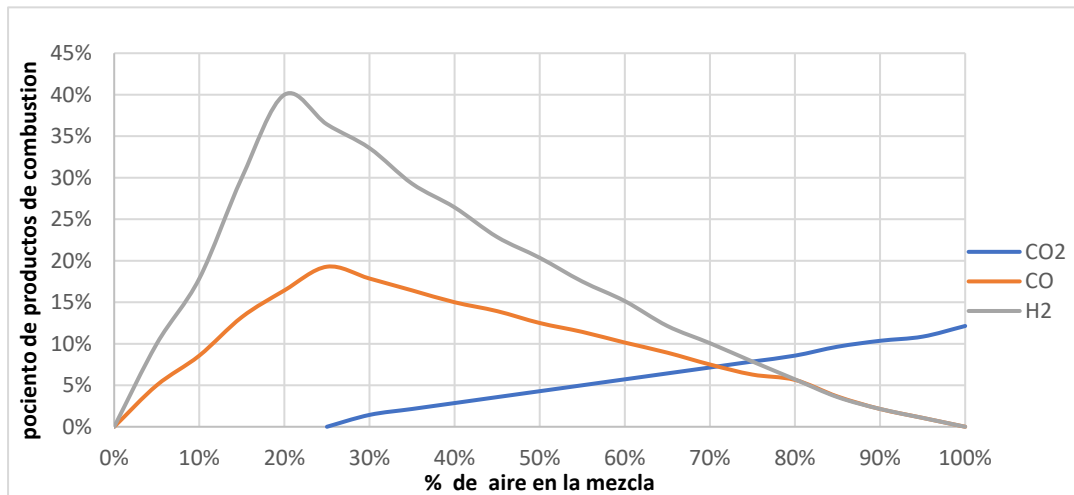
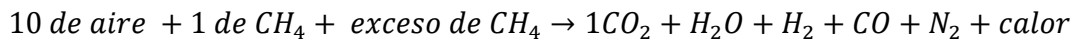


Gráfico 1. Cantidad de productos de combustión a diferentes porcentajes de aire y 100% de combustible

Como se puede ver en el grafico1, cuando hay muy poco porcentaje de aire en la mezcla, los niveles de CO son muy elevados, alcanzando hasta el 20% de los productos, así mismo la cantidad de hidrogeno es muy elevada. Conforme se va llegando al 100% de aire necesario el CO y el H₂ desaparecen casi en su totalidad e incrementa el CO₂.

Atmosfera oxidante

Cuando se agrega más oxígeno del necesario, los productos de la combustión se convierten en oxidantes debido a que se encuentra mucho contenido de oxígeno libre entre ellos.



La temperatura de la flama baja y el calor disponible es menor, todo se debe a que el oxígeno en exceso que no reacciona absorbe todo el calor provocando una combustión incompleta.

En el grafico 2 se podrá ver el porcentaje de productos de la combustión de una atmosfera reductora. Y en el grafico 3 se podrá ver la relación del exceso de aire con la temperatura de los productos

La ecuación que describe la reacción química en estas condiciones es la siguiente:

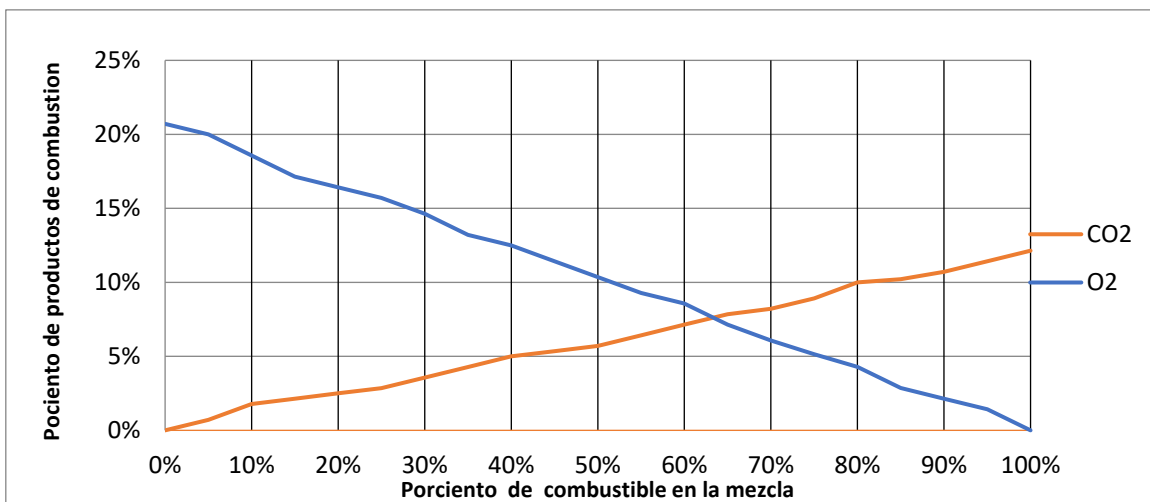
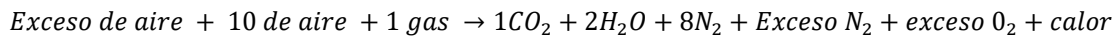


Gráfico 2. Cantidad de productos de combustión a diferentes porcentajes de combustible y 100% de aire

Como se puede ver en el grafico 2 a falta de combustible, la cantidad de CO₂ es menor a la que debería y con presencia de oxígeno en los productos, indica que la combustión no se llevó de la manera correcta. Provocando la presencia de inquemados y un menor rendimiento.

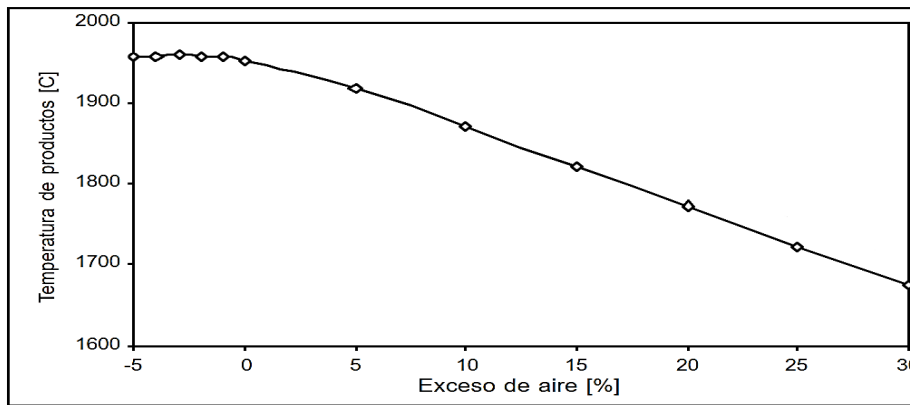


Gráfico 3. Relación de exceso de aire % vs temperatura de los productos °C en la combustión de metano

Como puede verse en el gráfico 3, con respecto al aumento del porcentaje del exceso de aire el rendimiento de la combustión disminuye provocando un claro descenso en la temperatura de los productos de manera muy pronunciada.

2. Hornos industriales

Definición

Los hornos industriales son equipos utilizados en la industria para diferentes procesos de fines diversos, en los que se les añade calor a elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente, ya sea de forma directa o de forma indirecta. La transferencia de calor puede realizarse por llamas (lecho fluidizado), convección (hornos con recirculación de los humos) y radiación (de resistencias, tubos radianes, de llamas o de paredes refractarias)

La energía calorífica requerida para el calentamiento puede proceder de

- Gases calientes producidos por la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Por contacto directo o indirecto
- Energía eléctrica en diversas formas.

2.1. Tipos de hornos industriales

Existen muchos tipos de hornos. El diseño varía dependiendo si es continuo o por lotes, dependiendo del tipo y del tamaño del material calentar, el propósito, la fuente de energía y la forma de transferencia de calor.

Horno rotatorio

Los hornos rotatorios están formados por una envoltura cilíndrica de acero, de eje sensiblemente horizontal, que termina con dos estructuras, una en cada extremo. En uno de los extremos está la cámara de combustión donde se encuentra situado el quemador que provee el flujo calorífico necesario al cilindro, generalmente por medio de los gases de combustión. En el otro extremo se encuentra la salida de los gases quemados o chimenea. Este tipo de horno es continuo y la envoltura cilíndrica se encarga de transportar el material a lo largo ella, por un movimiento circular ya sea en zigzag con ayuda de paletas o hélices. La inclinación ayuda también al transporte del material deseado.

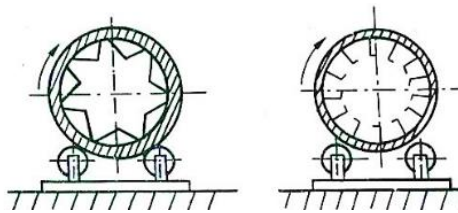


Fig. 2 Medios de transporte en los hornos rotatorios

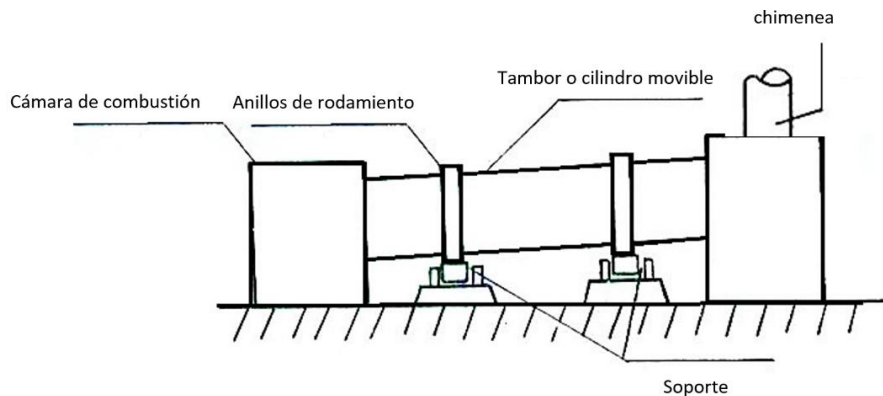


Fig. 3 Partes generales de un horno

3. Balance de energía en un horno

El balance de energía en un horno obedece la ley de la conservación de la energía. Y corresponde a la siguiente ecuación:

$$\text{Calor total} = \text{calor útil} + \text{perdidas} \quad (\text{ecuación 1.3})$$

Donde:

El calor total = al calor neto dado por la fuente de calor, ya sea combustión o corriente eléctrica.

El calor útil = al calor que recibe el material a calentar.

Las pérdidas = El calor que no recibe el material a calentar.

Las pérdidas pueden darse por las siguientes razones

1. Pérdidas por los gases de combustión

- Por el calor sensible de los gases de combustión (Pérdida seca)
- Calor latente del vapor de agua presente en los gases de combustión (pérdida húmeda)
- Calor perdido por una combustión químicamente incompleta

2. Calor perdido a través de las paredes, techo y ambiente exterior

- Calor perdido por la conducción de calor de las paredes, techo y elementos estructurales hacia el exterior

3. Calor perdido a través de radiación

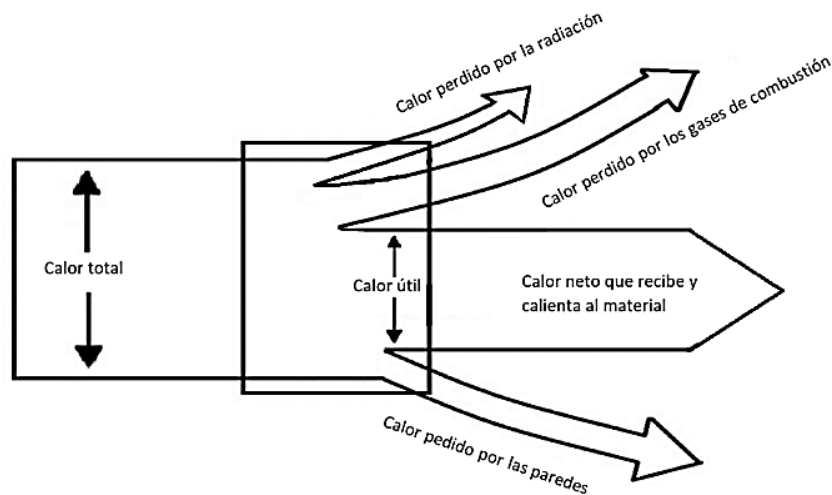


Fig. 4 Diagrama de sanke del balance de energía dentro de un horno

Perdidas de calor por las paredes de un horno

El calor perdido a través de las paredes es una cantidad importante en el balance de calor. Las paredes del horno al tener una cara caliente y una cara fría, se genera un gradiente de temperatura y como consecuencia, una transferencia de energía por conducción. Para mitigar este tipo de pérdida es necesario colocar materiales que limiten y generen resistencia al flujo de energía. A este tipo de materiales se les conoce como aislantes térmicos. Este tipo de materiales tienen una conductividad muy baja, esto quiere decir que generan una resistencia a la transferencia de calor, impidiendo que este se escape y se disipe al exterior. Este calor lo almacenan e incluso lo irradian de nuevo hacia el interior del horno.

Por lo tanto, los materiales aislantes generan mayor eficiencia energética en el calentamiento industrial, ya que reducen costos al reducir las pérdidas de calor, además de la reducción en emisiones de CO₂. Disminuyen y genera una mayor resistencia mecánica a la tensión y al choque térmico en los equipos y tuberías. Dependiendo de la eficiencia en la resistencia de transferencia de calor y del proceso, se selecciona el tipo de aislante y su espesor, ya que existen muchos tipos de aislantes de características físicas y conductividades distintas.

Perdidas de calor por radiación

La radiación es básicamente un mecanismo electromagnético que permite el transporte de energía a través de regiones del espacio desprovistas de materia. Esta energía es emitida principalmente cuando los átomos o moléculas que se encuentran en estados excitados tienden a regresar a sus estados de energía más bajos. La radiación es el principal medio de transferencia de calor en un horno que funciona a base de la combustión, debido a que la fuente de calor no está en contacto directo con el producto.

La propiedad que indica la eficacia con que una superficie emite radiación térmica se llama emisividad (ϵ). La flama de la combustión tiene una emisividad muy alta. En el ámbito teórico y como fuente de referencia, se tiene un concepto que se denomina cuerpo negro, que es aquel que emite y recibe radiación de la manera ideal y uniforme en todas direcciones. El factor de emisividad es una relación entre

los cuerpos comunes y la emisividad del cuerpo negro, va de 0 a 1; siendo 1 el valor del cuerpo negro.

La eficiencia de la emisividad depende de factores como la temperatura, el ángulo de emisión, la geometría, la textura superficial, el material y la longitud de onda. Una suposición usada comúnmente en ingeniería asume que la emisividad de la superficie y la absorptividad no dependen de la longitud de onda, siendo, por lo tanto, ambos constantes $\epsilon \neq (\lambda)$. Esta suposición se conoce como cuerpo gris.

El aspecto geométrico juega un papel muy importante para la emisividad. En ausencia de campos electromagnéticos fuertes, los haces de radiación viajan en trayectorias rectas; Por lo que para recibir la máxima radiación es necesario tener una superficie que reciba la radiación de frente, de lo contrario la eficiencia dependerá del ángulo. La radiación que reciben el producto y las paredes es directamente proporcional al ángulo que dicha superficie tiene con respecto a la fuente.

Cuando la radiación choca con una superficie, parte de ella es absorbida, otra es reflejada y la restante, si la hay, es transmitida. El aspecto geométrico será determinante en el área superficial efectiva y la cantidad y dirección de la radiación reflejada.

Flama

Una flama es un fenómeno luminoso que se produce por la incandescencia de los gases durante la combustión. La flama por lo general presenta forma cónica y esto es debido a que, al iniciarse la combustión, las reacciones en cadena se generan del centro hacia afuera, provocando que las moléculas en la periferia inicien a quemarse una fracción de segundo después.

Temperatura de flama adiabática

Se refiere a la temperatura de llama teórica más alta que pueden alcanzar los productos de la combustión asumiendo que no hay pérdidas de calor en la combustión y que todo el poder calorífico del combustible es emitido por la llama. La temperatura adiabática es máxima cuando el aire en exceso es nulo, es decir,

cuando la cantidad de aire es la necesaria y suficiente para su combinación con todo el combustible.

Perdidas de calor por los gases de combustión

Dentro del horno el calor es transmitido por radiación hacia el producto, el aire a temperaturas y presiones comunes se aproxima mucho al vacío, debido a que sus moléculas diatómicas como el N_2 y el O_2 son transparentes a la radiación. En el caso de los gases de combustión estos están conformados en su mayoría por moléculas asimétricas como el H_2O , CO_2 , CO , SO_2 e hidrocarburos, este tipo de moléculas son muy susceptibles a participar en el proceso de radiación por absorción a temperaturas moderadas y por absorción y emisión a temperaturas elevadas.

4. Fundamentos de control

Proceso dinámico

En general, cualquier proceso en algún momento recibe perturbaciones o cambios en las entradas por algún motivo. Un proceso dinámico es aquel en donde sus variables cambian con el tiempo. Por ejemplo, el operador puede definir o modificar las entradas al sistema en cualquier momento, en tanto que las salidas están determinadas por las respuestas que el sistema da. La dinámica del proceso es el desarrollo de modelos matemáticos que describan el comportamiento del fenómeno desde que inicia hasta que termina. Al conocer la dinámica del proceso podremos predecir cómo va a responder el sistema por los cambios en las variables de entrada a lo largo del tiempo.

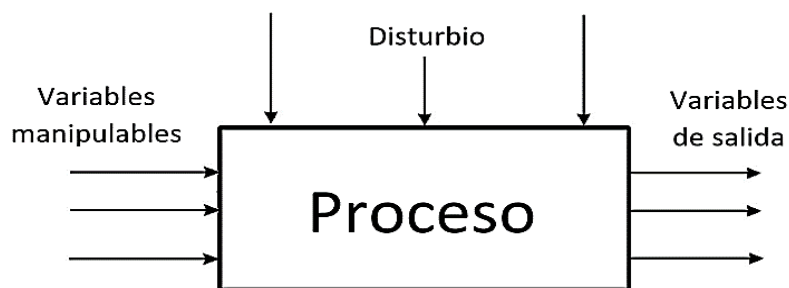


Fig. 5 esquema de un sistema dinámico

Sistema de control

Un sistema de control es el conjunto de la acción humana más los instrumentos que permitan medir, tomar decisiones y actuar sobre variables manipulables que permitan mantener en un punto fijo (set point) y una o más variables críticas de un proceso dinámico. Cuando se diseña el sistema de control debe asegurarse que las acciones que se emprendan tengan efecto en la variable controlada, es decir, que la acción emprendida repercuta en el valor que se mide.

Elementos del control

- Sensores (elemento primario)
- Transmisores (elemento secundario)
- Controladores (es el cerebro del sistema de control)
- Elemento final de control (válvula de control, bombas de velocidad variable, transportadores o motores eléctricos etc.)

Pasos del sistema de control

La secuencia de pasos de un sistema de control es: Medir, decidir y actuar.

1. Medición

El primer paso del control es medir las variables que tengan efecto con la variable a controlar, mediante la combinación de sensores y transmisores.

Sensores y transmisores

Los sensores y transmisores nos ayudan a saber sobre la marcha del proceso en el tiempo. El dispositivo crea una interacción con el objeto de la medición a base de un intercambio de masa o energía, sin modificar el objeto medido, para posteriormente generar una señal conocida como señal primaria, esta señal es transformada a una señal secundaria inmediatamente, la cual se puede ser enviada a distancia (transmisión).

Señales de transmisión

Actualmente se usan tres tipos principales de señales para la comunicación entre los instrumentos de un sistema de control. La primera es la señal neumática o de presión de aire (3 a 15 psi), la segunda es la señal eléctrica o electrónica (4 a 20 mA o de 0 a 10 V) y el tercer tipo de señal es la señal digital o discreta.

Algunos tipos de sensores

Sensores de presión (manómetros)

Un manómetro consiste en un tubo metálico curvo, en forma de herradura, uno de sus extremos está sellado y libre, el otro extremo está fijo y conectado al fluido cuya presión se desea conocer. Cuando se aplica presión en el extremo fijo el tubo trata de volver a su forma recta, produciéndose un desplazamiento en el extremo libre. Este desplazamiento puede ser asociado a una aguja con un dial calibrado y tenemos un manómetro común. Si conectamos el extremo móvil al extremo de una bobina podemos generar una señal eléctrica entre 4 a 20 mA.

Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura son instrumentos que transforman los cambios de temperatura en señales que pueden ser procesados por un equipo eléctrico o electrónico

Termopar

Los termopares consisten en dos hilos metálicos de diferentes materiales, unidos en un extremo. Esta unión constituye el punto de medición (junta caliente). El otro extremo se llama junta fría. El calentamiento de la junta de medición provoca una diferencia de temperatura entre ellos, lo que causa una diferencia de potencial en el punto de contacto, lo que origina una fuerza electromotriz (FEM). La fuerza electromotriz generada por el termopar está en función de la diferencia de temperatura entre la unión fría y caliente, y el sentido del flujo va desde el área de mayor temperatura hacia la de menor temperatura y está en el orden de algunos micro volts por grados centígrados.

Termopar RTD (resistance temperature detector)

Es un sensor de temperatura cuyo principio de funcionamiento se basan en la dependencia de la resistencia eléctrica de un material con la temperatura, es decir aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que, ante un aumento de temperatura, haya un aumento de la resistencia eléctrica. Son fabricados de metales como: platino, cobre, níquel y molibdeno.



Fig. 6 esquema de un sistema dinámico

2. Decisión

Al recibir la información por parte del sensor, el control ejecuta un diagnóstico y con base a ello decidirá qué hacer para mantener la variable en el valor deseado. Esta es la parte más importante del sistema de control, ya que es aquí donde sucede la automatización.

Circuitos o lazos de control

El circuito o lazo de control se refiere al orden en la cual se conecta el controlador al proceso. También nos dice en qué momento el controlador compara el set point (la referencia) con la variable controlada y determina la acción correctiva.

Lazo de control cerrado con retroalimentación

El término retroalimentación proviene del hecho de que se mide la variable controlada y dicha medición es “alimentada hacia atrás” para reajustar la variable manipulada a la entrada al proceso, por lo tanto, las señales de control se mueven alrededor de un circuito cerrado. Con esta estructura, el proceso debe primero registrar el efecto de cualquier perturbación en su salida antes de que se pueda tomar una acción de control correctiva.

Pasos del control de lazo cerrado con retroalimentación:

1. Medir (en caso de la temperatura, se mide T para producir T_m) usando un dispositivo de medición (por ejemplo, un termopar) y determinar la desviación.

$$y_m = T_{medido} - T_{set\ point}$$

2. Comparar el valor medido y_m con el valor deseado y_d y obtener la desviación como una señal de error (e)

$$e = y_d - y_m$$

3. Suministrar una señal de corrección u para implementar en el proceso con base en la señal de error e (con ayuda de una señal eléctrica, neumática o digital)

4. Implementar u (el comando para implementar el valor calculado de u en el proceso se emite a un elemento de control final)

5. Medir de nuevo, y repetir todo el procedimiento.

A lo largo del circuito de control la información fluye de un elemento a otro en forma de lazo o circuito. El diagrama de bloques es muy útil para representar este tipo de lazo de control donde cada bloque es un elemento del control.

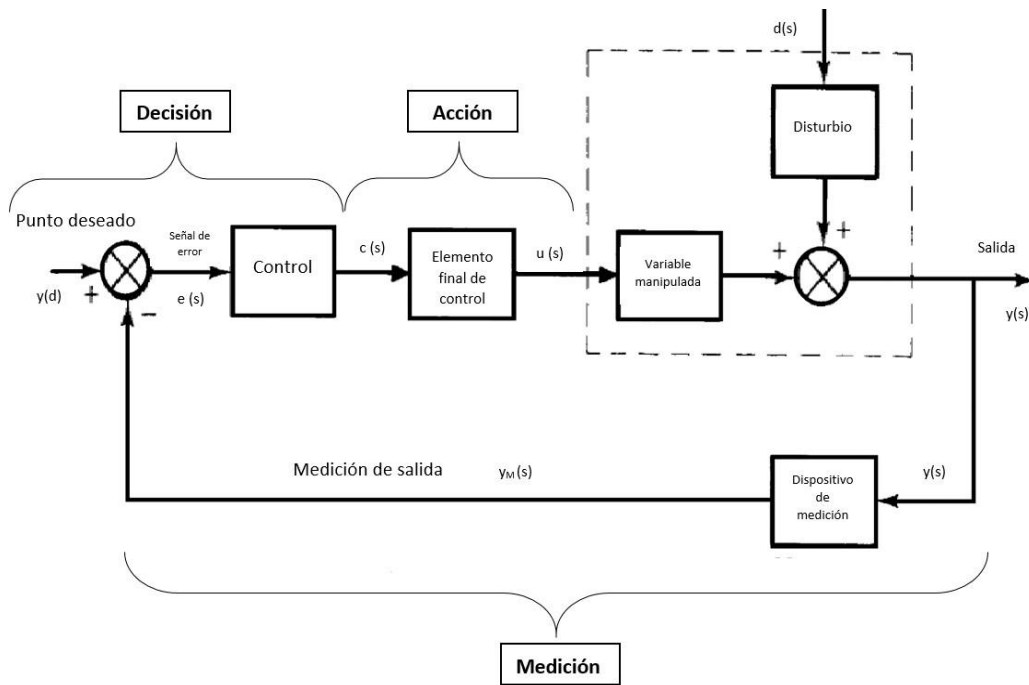


Fig. 7 Secuencia del lazo de control cerrado por retroalimentación

Control proporcional integral derivativo (PID)

El control PID combina las acciones de tres tipos de controladores, control proporcional, control integral y control derivativo.

Control proporcional (P)

El controlador proporcional es el tipo más simple de control, la señal de comando de este controlador está programada para ser directamente proporcional al error observado, de ahí su nombre.

Sea $p(t)$ la señal real de salida del controlador (una señal de presión en el caso de un controlador neumático; una señal eléctrica en el caso de un controlador electrónico), y sea p_s su valor (constante) cuando $e(t)$ es cero. Entonces el controlador de retroalimentación proporcional opera de acuerdo a:

$$p(t) = K_c e(t) + p_s$$

La desviación de p de su valor de "error cero" p_s es la señal de comando de control

$$c(t) = p(t) - p_s = K_c e(t)$$

Si hacemos la transformación de Laplace de la ecuación anterior inmediatamente nos lleva a:

$$c(s) = K_c e(s)$$

identificando la función de transferencia para el controlador proporcional como:

$$g_c(s) = K_c$$

El parámetro característico de este controlador K_C , se denomina ganancia proporcional. Los controladores proporcionales tienen solo un parámetro de ajuste K_C , sin embargo, operan con una desviación, un error permanente o un *offset*, debido a que el error no puede ser cero.

Control proporcional integral PI

La parte integral le añade inteligencia al control proporcional, esta nueva inteligencia se conoce como reajuste (*reset*). En este caso, $p(t)$ viene dado por:

$$p(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{t_I} \int_0^{\infty} e(t) dt \right] + p_s$$

que contiene una parte proporcional, así como una integral del error en el tiempo. Al tomar la transformada de Laplace, obtenemos:

$$c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{t_I s} \right) e(s)$$

de modo que la función de transferencia para el controlador PI es:

$$g_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{t_I s} \right)$$

El parámetro adicional t_I se denomina tiempo integral o tiempo de restablecimiento, se mide en $\frac{\text{minutos}}{\text{repetición}}$ y su recíproco $\frac{1}{t_I}$ se refiere a la rapidez del reajuste o *reset*. Lo que hace la parte integral es reajustar los valores para hacer el error asociado a la parte integral cada vez más pequeña, con base en prueba y error. El controlador PI tiene dos parámetros, K_c , y t_I , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio.

Control proporcional integral derivativo (PID)

La parte derivativa, también conocida como rapidez de derivación o pre-actuación; tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, es decir, “poder ver hacia adelante”, mediante el cálculo de la derivada del error. La cantidad de “anticipación” se decide mediante el valor del parámetro de ajuste t_D . La rapidez derivativa se da siempre en minutos.

El controlador PID tiene tres parámetros, K_c , t_I y t_D , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio.

La ecuación que modela este control es

$$p(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{t_I} \int_0^{\infty} e(t) dt + T_D \frac{de}{dt} \right] + p_s$$

Llevando la ecuación a transformación de Laplace da:

$$c(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{t_I s} + T_D s \right) e(s)$$

La función de transferencia para el controlador PID está dada por:

$$g_c(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{t_I s} + T_D s \right)$$

El control PID elimina el offset del controlador proporcional a través de su acción integral y suprime las oscilaciones con su parte derivativa, cuando se ajusta correctamente el PID regula de manera eficaz y suave la respuesta de cualquier proceso.

3. Acción

Con el fin de que tenga un impacto en la variable a controlar como resultado de la decisión tomada por el controlador, se efectúa una acción en el sistema. Generalmente ésta es realizada por el elemento final de control. El elemento final del control tiene la tarea de implementar la corrección en la variable manipulada que el controlador haya decidido, con base en la desviación de la variable controlada con el set point (error). Transforma la señal neumática, eléctrica o digital del controlador a una señal ejecutable ya sea mecánica o eléctrica, que haga que un instrumento genere un cambio en el sistema. Los elementos finales de control manipulan accionadores para válvulas de control, por medio de cajas de engranes, transmisión hidráulica, neumática, relés de conmutación o la frecuencia de salida de un motor eléctrico, velocidad de rotación por medio de flujo de vapor en una turbina, flujo de aire/combustible en un motor de combustión interna, etc. Por ejemplo: un control de temperatura con base en al error encontrado por las mediciones de un termopar manda una señal eléctrica a un solenoide para que esta abra o cierre una válvula y la temperatura pueda regresar al valor deseado.

4.1. El control en hornos industriales

El sistema de control en los hornos industriales generara principalmente dos ventajas: obtener una mayor eficiencia en la producción y generar un proceso mucho más seguro.

Control en la automatización de la producción

En caso de que la producción se salga del rango de operación, el operario o los operarios ya no tendrán que ir a monitorear y ajustar, el proceso automáticamente se reajustara solo. Evitando que exista la desviación. En el caso de los hornos, por ejemplo, el control automático podrá regular las entradas en la cámara de combustión ante cualquier perturbación y no salirse del rango de temperatura ni de la relación aire/combustible establecido.

Control en seguridad

Uno de los objetivos más importantes para tener un circuito de control es de garantizar la seguridad. Un circuito de control debe de tener la capacidad de actuar automáticamente, cuando las condiciones de operación se desvíen de los rangos de diseño y pongan en peligro el equipo o el personal.

El circuito de control según la NFPA 85 debe garantizar lo siguiente:

1. Proteger al personal de lesiones
2. Proteger el equipo contra daños.
3. Proteger la operación al limitar las acciones a una secuencia de operación prescrita o al iniciar el accionamiento de dispositivos cuando se aproxima a una condición de operación fuera de rango o inestable.

Acciones que el sistema de control debe realizar

- (a) La sincronización de prueba para el encendido y el control de la llama.
- (b) Proporcionar la entrada de combustible en cualquier combinación con el flujo de aire, para mantener la proporción de aire/combustible dentro de los límites de diseño en todo el rango operativo del quemador.

(c) Limitar la demanda de combustible al ser menor que el flujo de aire medido o limitar la demanda de aire al ser mayor que el flujo de combustible medido.

(d) Purgar la línea de gas.

(e) Generar paradas de seguridad obligatorias.

(f) Generar alarmas para indicar el mal funcionamiento del equipo o si se encuentra en condiciones peligrosas.

(g) Proporcionar una ignición controlada por secuencia

Peligros relacionados al uso de hornos industriales

El diseño y la operación de hornos industriales implican mucho riesgo. Según Factory mutual, un estudio de 45 explosiones en hornos de proceso que se produjo entre 1980 y 1989, mostró que 39 de esos hornos usaban gas, de las cuales el 62% ocurrió durante el período de encendido, el 33% durante la operación y el 5% durante el reencendido (Process Furnaces FM global, april 2012). Las explosiones se debieron a un mantenimiento deficiente del equipo y relaciones de aire/combustible mal ajustadas. Las relaciones mal ajustadas causan la formación de una mezcla explosiva de monóxido de carbono e hidrógeno-aire, que genera explosiones. Incluidas las "bocanadas", las explosiones son el resultado de procedimientos de operación inadecuados por parte del personal, mal diseño o mal funcionamiento de los equipos o sistemas de control. (Factory Mutual)

Las condiciones de peligro explosivo más comunes para que ocurra una explosión de combustible según la NFPA 85 son:

1. Una interrupción del suministro de combustible, aire o de la energía de ignición suficiente para provocar una pérdida momentánea de las llamas.
2. Fuga de combustible en una cámara de combustión inactiva.
3. Intentos repetidos de apagar sin purgar adecuadamente el horno.
4. El encendido de la acumulación de una mezcla explosiva de combustible y aire como resultado de la pérdida momentánea de la llama o un arranque sin purgar.

La implosión es el resultado de la generación de una presión de gas excesivamente baja. A continuación, se presentan dos condiciones que han provocado graves incidentes de implosión según la NFPA 85:

1. Una mala operación del equipo que regula el flujo de gas, aire y la eliminación de gases de combustión. Lo que da como resultado la exposición de una capacidad excesiva del ventilador de tiro inducido o a rápida disminución de la temperatura y de presión del gas como resultado de una reducción abrupta en la entrada de combustible.

4.2. Normatividad

Dado la cantidad de riesgos que conlleva la operación de los hornos industriales es importante seguir normatividad o recomendaciones. Para el caso de México la secretaria de energía (SENER) tiene la norma NOM-002-SECRE-2010, "Instalaciones de aprovechamiento de gas natural" que establece criterios para las instalaciones de gas en diseño y construcción para calentamiento industrial, sin embargo, la norma establece criterios y especificaciones básicas.

Existen organizaciones no gubernamentales que se han encargado de recabar información de la industria de la combustión y de dar recomendaciones. Para el caso de este trabajo se tomarán en cuenta la normativa dictada por dos organizaciones:

Factory Mutual (FM)

Factory mutual es una compañía de Estados Unidos, líder en materia de prevención de pérdidas para grandes corporaciones dentro del mercado de propiedades en alto riesgo de protección (HPR) en el mundo. Esta compañía tiene una sección dedicada a los riesgos de empresas que usan calentamiento industrial por combustión. FM Global tiene su campo de investigación y desarrollo en West Glocester, R.I., hode Island, E.E.U.U. Donde realizan pruebas de fuego y riesgos especiales, protección tecnológica de desastres naturales y de riesgos eléctricos.

Se emplearán recomendaciones de varios de sus artículos para el diseño del sistema de combustión y control.

La Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA por sus siglas en inglés)

La NFPA es una organización global sin fines de lucro establecida en 1896 dedicada a eliminar muertes, lesiones, daños materiales y económicos debido a incendios, electricidad y peligros relacionados. La NFPA entrega información y conocimiento a través de más de 300 códigos y normas de consenso, investigación, capacitación, educación, divulgación y defensa.

Recomendaciones de normatividad en los criterios de diseño del sistema de combustión.

Recomendaciones para el diseño del sistema de control

En primer lugar, para que un sistema de combustión sea seguro, las señales al control deben ser generadas por dispositivos de detección individuales conectados a tomas de proceso separadas. The standard for Ovens and Furnaces (NFPA 86) menciona que al menos por cada quemador se debe de incluir una válvula de cierre automático en la línea principal de gas y en la línea de piloto, controlada por el circuito de control, para que en el caso de una anomalía en el horno el sistema de control de protección tenga un medio de como interrumpir de manera inmediata el suministro de combustible. Otro instrumento primordial en el sistema de seguridad son los presostatos o interruptores de presión para mandar una señal eléctrica al control cuando el sistema se encuentre en una condición peligrosa de presión. Se deben colocar dos en el sistema, uno para presión en la línea excesivamente alta y otro para presión excesivamente baja. En el caso de la cámara de combustión también debe de haber instrumentación para poder garantizar una combustión segura y eficiente. Con base en la norma debe de haber un detector que pueda informar al control la presencia de la flama en todo momento y evitar que se escape combustible sin ser quemado. Al momento de no detectar flama tiene que mandar a cerrar el suministro del combustible y generar una señal eléctrica a algún dispositivo de alerta visual o auditivo. Esto ayuda a prevenir acumulaciones

Recomendaciones para el diseño del sistema de tubería

Para la selección de la instrumentación la norma NFPA 86, da las siguientes recomendaciones:

- La válvula de cierre manual (Te) que se muestra en la figura 8, debe ser ubicada en forma remota que permita que el combustible se deje de suministrar al sistema de combustión y se pueda aislar para cuestiones de mantenimiento o de alguna situación de emergencia. Generalmente se recomienda que sean válvulas de un cuarto de vuelta
- Después de la válvula Te se recomienda colocar trampa de sedimentos (N) para eliminar las contaminantes aguas abajo de la válvula Te y aguas arriba de todos los demás componentes del sistema de gas combustible. La trampa de sedimentos se ejemplifica en la Figura 9.
- Enseguida es recomendable colocar un filtro de gas (H).
- Es importante que el sistema cuente con un regulador de gas después de los filtros (J). Estos deben ser ventilados hacia el exterior en caso de una ruptura del diafragma (T).
- Si la capacidad del sistema de combustión supera los 400,000 BTU / hr. (117 kW), debe de haber al menos una válvula de cierre de seguridad automática por quemador. Los criterios de la *Data Sheet 6-4, Oil- and Gas-Fired Single-Burner Boilers* de Factory mutual nos proporciona la siguiente tabla.

400 000 Btuh- 5MM Btuh (117-1465 kW)	5-12.5 MMBtuh (1465-3662 kW)	12.5MMBtuh (>3662 kW)
2 SSOVs o una SSOV con prueba de cierre	Dos SSOVs, al menos una con prueba de cierre	Dos SSOVs con prueba de cierre

Tabla 5. Cantidad de válvulas de corte automático recomendadas por *Gas-Fired Single-Burner Boilers* sección 2.2.2.3

- Al igual que la NFPA la *Data Sheet 6-10, Process Furnaces*. Nos dice que Los quemadores principales de los hornos de gas y de aceite deben tener pilotos, con capacidades suficientemente para asegurar la ignición de los quemadores principales. El conjunto de montaje del piloto debe tener un diseño robusto para que no pueda moverse fuera de su posición y poder

proporcionar un encendido confiable para el quemador en todo momento. En cuestión de instrumentación debe tener una válvula de corte manual (Te), un regulador de presión (J), válvulas automáticas de seguridad (A) y una válvula de corte a la entrada del quemador (T). Debe de ubicarse aguas debajo del filtro para gas de la línea principal.

- Al ultimo debe ubicarse otra válvula manual de cierre de seguridad para suministro de gas al quemador tanto en la línea de gas principal como la de piloto (T)

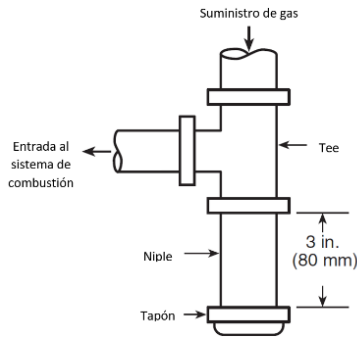


Fig. 9 Trampa de sedimentos recomendada por la NFPA

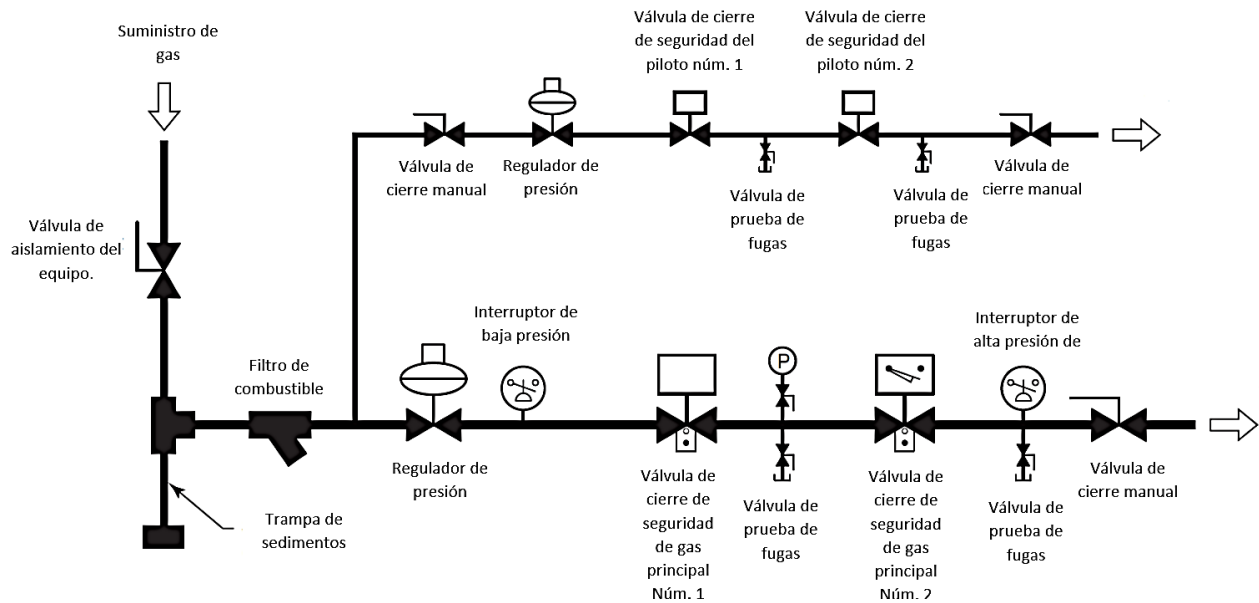


Fig. 10 Instrumentación para gas recomendada por la NFPA

5. Descripción del proceso

El proceso para el cual va diseñado el sistema de combustión es para el horneado de gravilla mineral. Esta gravilla es parte de la elaboración de impermeabilizantes prefabricados. Los impermeabilizantes vienen con una base de polietileno, y una doble capa de polipropileno atáctico, estireno-butadieno-estireno, o poliefinas termoplásticas, reforzadas con poliéster o fibra de vidrio, y como acabado consta de una capa superior de gravilla, la cual le da la presentación, protección y un acabado final reflectivo.

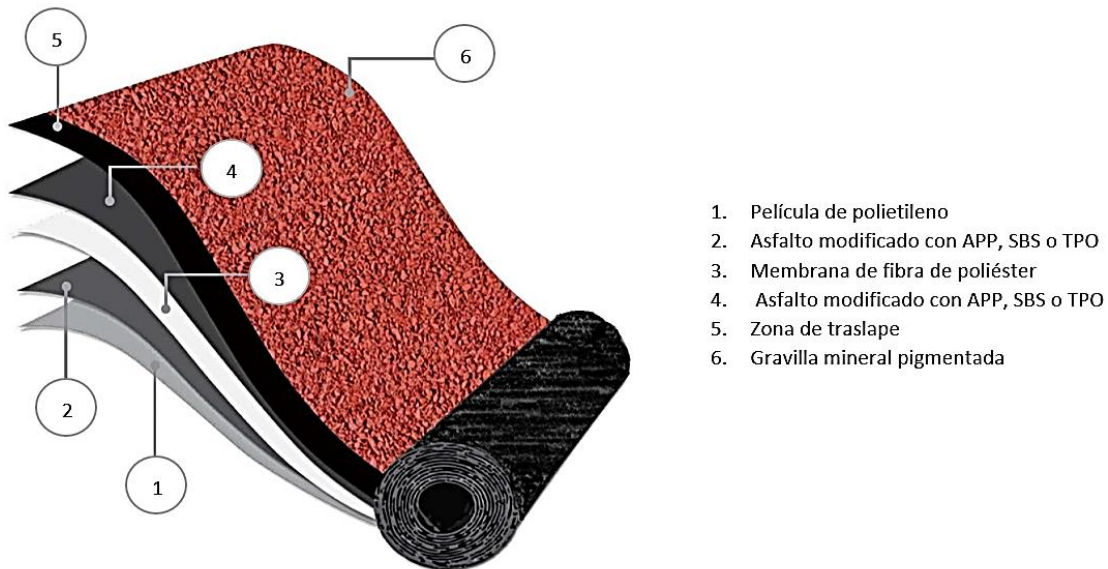


Fig. 11 Principales capas de los impermeabilizantes prefabricados comerciales

El sistema de combustión proveerá el calor para el horneado. La gravilla viene de la adición de pigmentos cerámicos inorgánicos resistentes al intemperismo. Lo que se busca con el horneado es que los pigmentos se adhieran a la roca de manera permanente con la ayuda de la adición de calor. En este caso se estima que la temperatura de 200°C es la viable para lograr esta termo adherencia de los pigmentos cerámicos a la piedra caliza. El horno debe de tener una capacidad de producción continua 2000 kilogramos por hora, a una temperatura de 200 °C.

La instalación donde se encuentra el equipo lo constituye una tolva en un extremo del tambor giratorio el cual se encarga de mezclar la gravilla con el pigmento orgánico para después, ser introducido al tambor para su horneado. La gravilla recorre todo el cuerpo del tambor y en esta parte es cuando entra en contacto con

los gases de combustión. Al salir del tambor la gravilla esta lista para venderse como gravilla decorativa o utilizarse para el acabado para los impermeabilizantes prefabricados. En la figura 12 se encuentra un esquema en el cual el diagrama de flujo del proceso con todos los elementos presentes

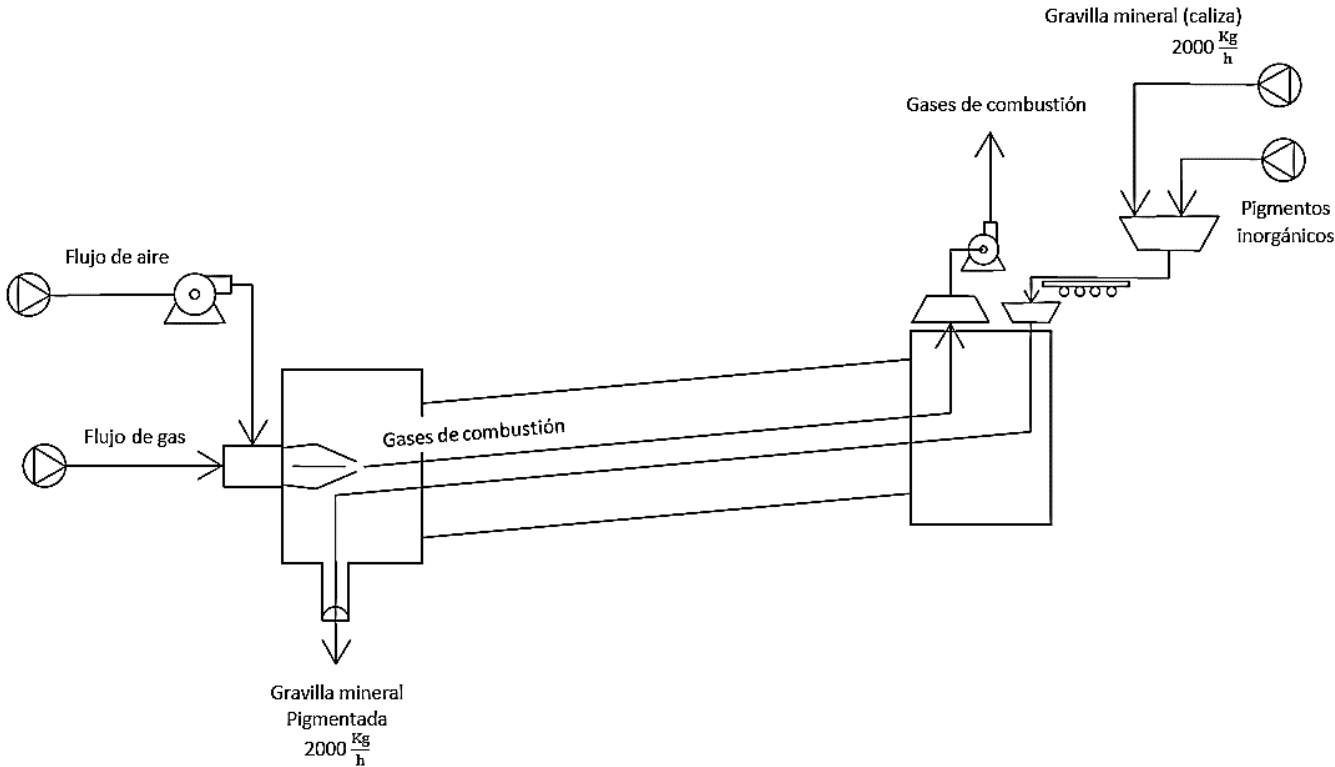


Fig. 12 Diagrama flujo del proceso

II. Estado del arte

1. Balance de energía

El objetivo es calentar la gravilla a 200 °C. Para conocer la cantidad de calor total que debe de proveer el sistema de combustión, es necesario realizar un balance de energía en el horno. Utilizando la ecuación (1.3)

$$\text{Calor total} = \text{calor útil} + \text{perdidas}$$

El calor útil es el flujo de calor para el horneado de la gravilla. Se tienen que garantizar dos parámetros: una producción de 2000 kg de gravilla por hora y una temperatura de 200°C de horneado. La gravilla es introducida al horno a temperatura de 20°C. La fórmula para conocer el calor útil está dada por la siguiente ecuación:

$$Q = mCP\Delta T \text{ (ecuación 2.1)}$$

Esta gravilla en su mayoría es caliza. Su calor específico es de $0.92 \frac{Kj}{Kg \text{ } ^\circ C}$
 $\left(0.22 \frac{Kcal}{Kg \text{ } ^\circ C}\right)^2$

Al sustituir en la ecuación 2.1:

$$Q = 2000 \frac{Kg}{hr} \times 0.22 \frac{Kcal}{Kg \text{ } ^\circ C} \times (200 \text{ } ^\circ C - 20 \text{ } ^\circ C) \times 3.966 \frac{BTU}{1cal} = 314107.2 \frac{BTU}{hr}$$

Por lo tanto, el calor útil requerido es de $314107.2 \frac{BTU}{hr}$

Perdidas

Las pérdidas que se dan dentro de la cámara de combustión son debido a la transferencia por radiación y convección de los gases de combustión y la pérdida de calor por las paredes por conducción.

² <http://www.escardo.eu/spiraxsarco/Documents/HojasTecnicas/InformacionesUtiles/calorypeso.pdf>

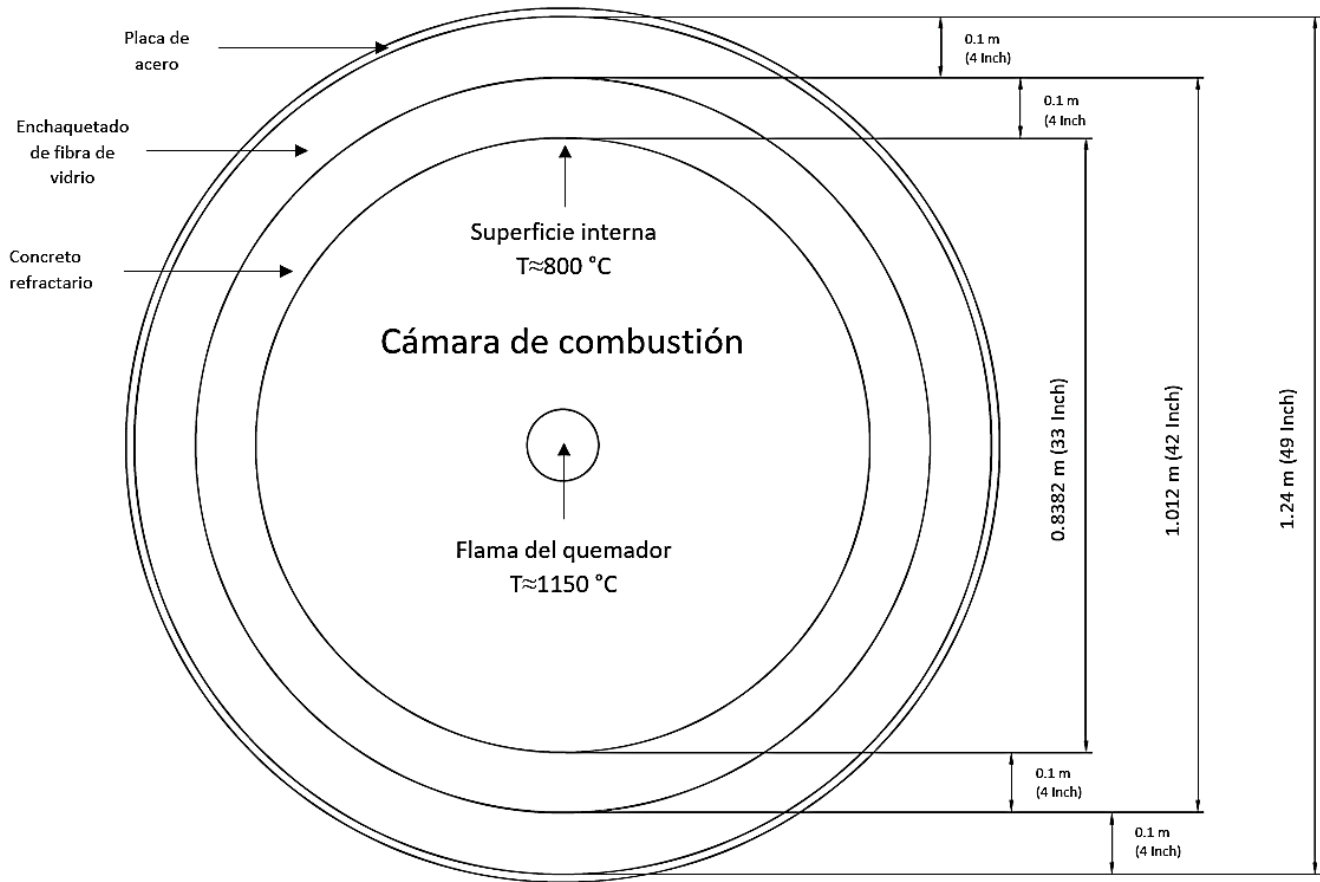


Fig. 13 Esquema de la distribución de temperaturas y dimensiones dentro de la cámara de combustión, así como la indicación de cada recubrimiento con su respectivo espesor en estructura.

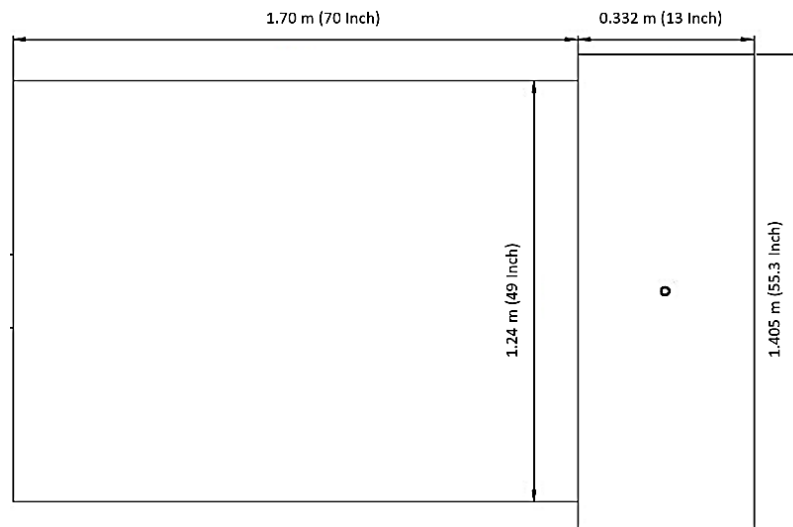


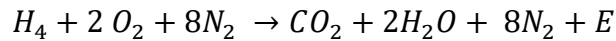
Fig. 14 Dimensiones externas de la cámara de combustión.

Perdidas por los gases de combustión

La pérdida provocada por los gases de combustión principalmente por el vapor de agua y el dióxido de carbono se debe principalmente a su capacidad de absorber el calor radiado por la flama.

Calculo de la emisividad de los gases de combustión

Combustión del metano



Moles de los humos

$$1CO_2 + 2H_2O + 8N_2 = 11 \text{ moles}$$

Fracción molar de cada uno de los elementos

$$X_{CO_2} = \frac{1}{11} = 0.09$$

$$X_{N_2} = \frac{8}{11} = 0.73$$

$$X_{H_2O} = \frac{2}{11} = 0.18$$

La ciudad de Toluca se encuentra a una presión atmosférica promedio de 0.73 atm (558.5 mm Hg)³

Las fracciones molares X_i de los componentes son equivalentes a las fracciones de presión para una mezcla de gases ideales. Por lo tanto, las presiones parciales del CO_2 y el H_2O son:

$$P_{CO_2} = X_{CO_2}P = 0.09(0.73 \text{ atm}) = 0.065 \text{ atm}$$

$$P_{H_2O} = X_{H_2O}P = 0.18(0.73 \text{ atm}) = 0.13 \text{ atm}$$

³ [https://www.ecured.cu/Toluca_\(M%C3%A9xico\)](https://www.ecured.cu/Toluca_(M%C3%A9xico))

En base a la tabla 13-4 del libro transferencia de calor y masa de Yunus A. Çengel, la longitud media del haz para un cilindro, en la cual D es el diámetro de la cámara de combustión es:

$$L = 0.60D = 0.60(0.8382 \text{ m}) = 0.50292 \text{ m} (1.65 \text{ ft})$$

Entonces,

$$P_{CO_2}L = (0.065 \text{ atm}) (0.50292 \text{ m}) = 0.033 \text{ m atm} (0.10 \text{ ft atm})$$

$$P_{H_2O}L = (0.13 \text{ atm}) (0.50292 \text{ m}) = 0.066 \text{ m atm} (0.21 \text{ ft atm})$$

Las emisividades de CO_2 y H_2O a una temperatura de $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ($2102 \text{ }^\circ\text{F}$) (1473.15 K y a 1 atm) En base a la figura 13-36 del libro transferencia de calor y masa de Yunus A. Çengel son:

$$E_{CO_2} = 0.065 \quad E_{H_2O} = 0.1$$

Tanto el CO_2 como el H_2O están presentes en la misma mezcla y es necesario corregir por el traslape de las bandas de emisión. El factor de corrección de la emisividad a $T = 1273.15 \text{ K}$ en base a la figura 13-37 del libro transferencia de calor y masa de Yunus A. Çengel es: $\Delta e = 0.008$

Emisividad efectiva de los gases de combustión se calcula de la siguiente manera

$$E_g = (E_{CO_2}) + (E_{H_2O}) - \Delta e = (0.065) + (0.105) - 0.008 = 0.162$$

Para determinar la razón de transferencia a las paredes del horno se calculará la emisividad de los gases a 800°C (1273 K , 1472°F)

$$P_{CO_2}L \frac{T_s}{T_g} = (0.065 \text{ atm}) (0.50292 \text{ m}) \left(\frac{1073 \text{ K}}{1273 \text{ K}} \right) = 0.024 \text{ m atm} (0.081 \text{ ft atm})$$

$$P_{H_2O}L \frac{T_s}{T_g} = (0.13 \text{ atm}) (0.50292 \text{ m}) \left(\frac{1073 \text{ K}}{1273 \text{ K}} \right) = 0.049 \text{ m atm} (0.16 \text{ ft atm})$$

El cálculo de sus emisividades a la nueva temperatura

$$E_{CO_2} = 0.082 \quad E_{H_2O} = 0.1$$

Se procede a calcular la absorptividad

$$\alpha_{CO_2} = C_{CO_2} \left(\frac{T_s}{T_g} \right)^{0.65} E_{CO_2} = (1.1) \left(\frac{1073 K}{1273 K} \right)^{0.65} (0.082) = 0.081$$

$$\alpha_{H_2O} = C_{H_2O} \left(\frac{T_s}{T_g} \right)^{0.45} E_{CO_2} = (1.4) \left(\frac{1073 K}{1273 K} \right)^{0.45} (0.1) = 0.13$$

$$A_g = (\alpha_{CO_2}) + (\alpha_{H_2O}) - \Delta \alpha = (0.081) + (0.13) - 0.004 = 0.207$$

Para el cálculo del calor emitido por los gases dentro de la superficie de la cámara de combustión se pondrá en la fórmula el área de la superficie interna del horno

$$S_{\text{Cámara}} = \pi DL = \pi (0.8382 \text{ m}) (1.70 \text{ m}) = 4.47 \text{ m}^2 (48.11 \text{ ft}^2)$$

La razón neta de la transferencia de calor por radiación de los gases de combustión hacia las paredes del horno queda

$$Q = S_C \sigma (E_g T_g^4 - A_g T_g^4) =$$

$$(4.47 \text{ m}^2) (5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}) (0.162 (1423 \text{ K}^4) - 0.207 (1073 \text{ K}^4)) = 115561.0828 \text{ W}$$

$$= 394310.782 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

Perdida de energía por el calor absorbido por las paredes

Para este caso los gases de combustión emiten la energía calorífica hacia las paredes y el material absorberá y almacenará parte de ese calor en base a su conductividad. El material del horno es de concreto refractario de 4" y en base la razón de la pérdida de calor, proporcionado por la empresa fabricante del horno es

$$\text{de } 675.60 \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^2}$$

La fórmula usada para calcular el calor perdido por la conducción es

(valor de la pérdida de calor) (área) = flujo de calor almacenado

$$\therefore = \left(675.60 \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^2} \right) (48.12 \text{ ft}^2) = 32510.781 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

También se analizará el calor absorbido por el recubrimiento de colcha termo aislante de fibra mineral alrededor del concreto refractario que es igual de 4" que, en base al proveedor, la razón de pérdida de calor es:

$$\left(185.10 \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^2}\right) (59.77 \text{ft}^2) = 11063.427 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Y la pérdida de calor absorbida por el material de la parte rotatoria, que en base a los datos proporcionados por el constructor del horno

Las dimensiones de la parte rotatoria son las siguientes

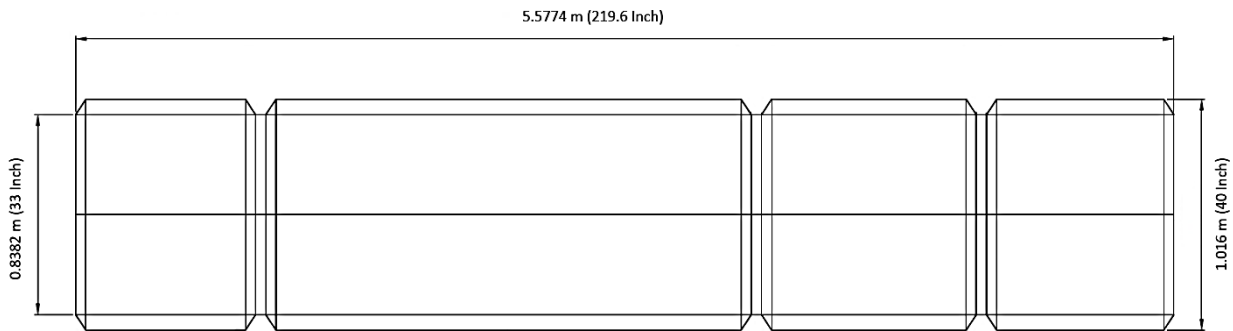


Fig. 15 Dimensiones de la parte rotatoria.

$$\left(139.1 \frac{\text{BTU}}{\text{h ft}^2}\right) (158.1 \text{ft}^2) = 21833.61 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Al utilizar la ecuación 1.3

$$Q_{\text{Total}} = 314107.2 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} + 394310.782 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} + 32510.781 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} + 11063.427 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} + 21833.61 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} = 967975.8 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

Este es el calor necesario, sin embargo, por principio termodinámico en las maquinas no hay eficiencia térmica al 100 %. ECLIPSE COMBUSTION DIVISION data sheet "application of burner equipment to furnaces" proporciona una gráfica (temperatura del horno vs eficiencia), con lo que a los 200 °C corresponde una eficiencia de 0.90 (figura 3 anexo A.)

Por lo cual el calor requerido es

$$Q = \frac{967975.8}{0.90} = 1075528.667 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

Otro factor que es necesario considerar es la eficiencia de la reacción de combustión, ya que el contenido energético de la reacción fue calculado a 1 atmósfera de presión, donde el aire contiene más oxígeno, en este caso la combustión se dará a una altura de 2,600 metros sobre el nivel del mar⁴ y la densidad del aire cambia, la cantidad de oxígeno disminuye dando menos rendimiento energético. La combustion Engineering Guide de ECLIPSE INCORPORATION proporciona una gráfica (Altura vs eficiencia de combustión). A 2600 metros de altura la eficiencia es de 0.72. (figura 4 anexo A)

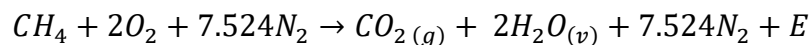
Por lo cual al considerarla el calor real requerido es

$$= \frac{1075528.667}{0.72} = 1491717.984 \frac{BTU}{hr} \approx 1600000 \frac{BTU}{hr}$$

2. Diseño del sistema de combustión

El siguiente paso en el diseño es conocer los flujos de combustible y de aire a emplear para poder lograr cumplir el requerimiento energético requerido.

La reacción de combustión del metano es la siguiente



En base a la reacción química, por cada mol de metano necesitamos 2 moles de O_2 . Para obtener mol de oxígeno necesitamos 4.76 moles de aire, por lo que para la oxidación completa del metano se requieren $9.524 \approx 10$ moles de aire.

La capacidad calorífica del metano es de $37.30 \frac{Mj}{m^3} \left(1000 \frac{BTU}{ft^3} \right)^5$ (por cada pie cúbico de metano quemado nos da una cantidad de energía de 1000 BTU). Para cubrir el requerimiento energético, el flujo de metano requerido es el siguiente.

$$\text{Flujo de metano requerido} = \frac{1600000 \frac{BTU}{hr}}{1000 \frac{BTU}{ft^3}} = 1600 \frac{ft^3}{hr} \text{ de gas}$$

Para el cálculo de aire necesario solo se usa la relación aire/combustible descrita anteriormente

⁴ <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15106a.html>

⁵ NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010

$$1600 \frac{ft^3}{hr} \times 10 = 16000 \frac{ft^3}{hr} \text{ de aire necesario}$$

Dimensionamiento de tubería de gas

Para el dimensionamiento de tubería es necesario partir de la velocidad recomendada para el flujo de gas natural. The Engineering Guide HONEYWELL THERMAL SOLUTIONS, recomienda una presión de velocidad de 0.3 a 0.5" w.c para el flujo de gas natural en tuberías cortas (menos de 50 ft). Con la ayuda de la gráfica que viene en la sección "selección simplificada de tamaño de tuberías de aire, gas y mezcla", disponible en el anexo I grafica 1. Se estimó que para un flujo de gas natural de $1600 \frac{ft^3}{hr}$ a una presión velocidad de 0.3 w.c, el tamaño del diámetro recomendado sería de 1 ¼", sin embargo, el diámetro inmediato siguiente es más comercial y da un rango de sobre diseño; por lo que el tamaño de diámetro seleccionado es de 1 ½".

The National Fuel Gas Code (NFPA 54) en el capítulo 6 "dimensionamiento de tubería" para una caída de presión de 0.3" de columna de agua en un tramo de tubería menor a los 10 pies, para una tubería cedula 40 de diámetro de 1 ½ inch la capacidad de flujo en pies cúbicos por hora es de 1580, una cantidad muy cercana a los $1600 \frac{ft^3}{hr}$. Tabla disponible en el anexo A figura 2

Dimensionamiento de tubería de aire

Para el dimensionamiento de la tubería se va a utilizar la siguiente formula que viene en The Engineering Guide de HONEYWELL THERMAL SOLUTIONS.

$$Q_{aire\ Max} = (Diametro\ nominal)^2 \times 1000$$

Siendo Q = como el flujo de aire máximo en $\frac{ft^3}{hr}$.

Al despejar el diámetro nominal:

$$Diametro\ nominal = \sqrt{\frac{Q_{aire}}{1000}}$$

El flujo de aire para este proceso es de $16000 \frac{ft^3}{hr}$, al sustituir

$$Diametro\ nominal = \sqrt{\frac{16000 \frac{ft^3}{hr}}{1000}} = 4$$

Por lo que el diámetro recomendado para el flujo de aire es de 4”.

Selección del quemador

El quemador es donde se genera la combustión y es un equipo de muy alta tecnología. Los quemadores industriales actuales manejan una amplia variedad de condiciones de proceso, como flujo de calor, geometría de flama y la quema de diferentes combustibles, según se requiera la industria.

Los requerimientos que tiene que cumplir el quemador seleccionado para este proceso son:

- Que sea para gas natural
- Tamaño pequeño y con fácil montaje
- Garantice un flujo de calor de $1600000 \frac{BTU}{hr}$
- Que reciba presiones de gas bajas
- Que sea compatible con ventiladores externos
- Que incluya una válvula dosificadora de gas y aire interna para controlar la relación gas/aire en todo el rango de operación
- Que genere una combustión limpia
- Que tenga un rango de cobertura amplio y una llama estable en variedad de condiciones de operación.
- Que tenga una contrapresión atmosférica y no afecte a las condiciones de operación
- Que tenga entrada de línea piloto y entrada para varilla de ignición y detector de flama

Maxon corp. propiedad de Honeywell International Inc. Ofrece variedad de quemadores en distintas formas y tamaños. La serie OVENPAK® son quemadores pequeños, requieren una baja presión de combustible y estéticamente su forma

cilíndrica queda bien con la forma de la cámara de combustión. Estos quemadores cuentan con un cono de mezcla conectado a una boquilla. El gas fluye a través de la boquilla, luego a lo largo del interior del cono del quemador donde el aire de combustión se mezcla progresiva y tangencialmente con el gas. Aquí es donde se genera la llama, esta boquilla se encuentra cerca del piloto del quemador, que también lo incluye, para una ignición rápida. También cuentan con una válvula mariposa antes del cono de mezcla que controla la relación aire/gas. Hay una versión para uso de ventilador externo. El diseño del cuerpo del quemador con bridas en todos los conjuntos de quemadores OVENPAK® simplifica el montaje y la instalación en su aplicación.

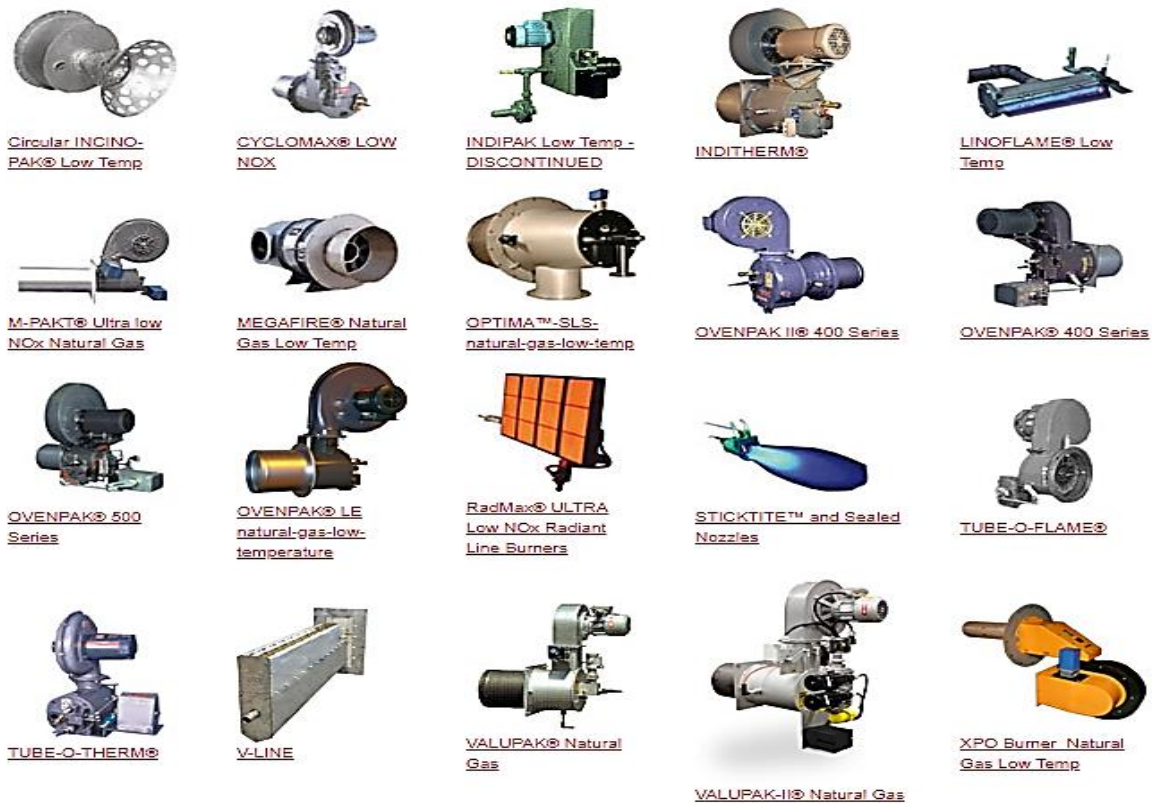


Fig. 16 diversidad de quemadores ofertados en la página de internet de Maxcon corp.
<https://www.maxoncorp.com/product-natural-gas-burners-low-temp/>

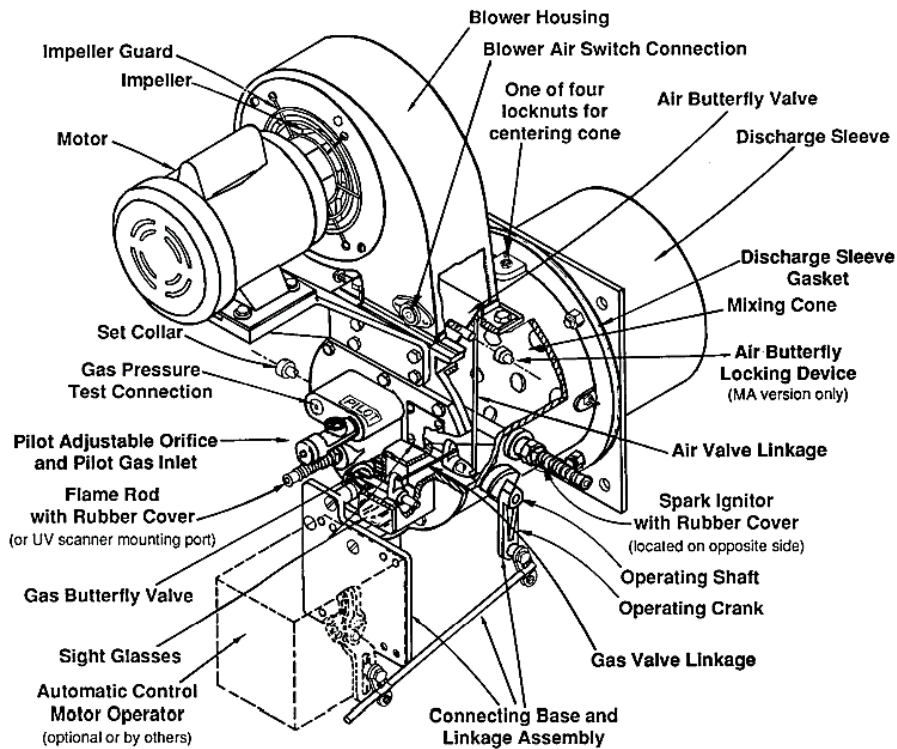


Fig. 17 Esquema de las partes del quemador oven pack®. Disponible en la página de internet de maxon corp. https://www.maxoncorp.com/clientuploads/pdf/English/E-OVENPAK_400/32M-01002-01.pdf

El modelo OVENPAK® (soplador externo) EB-2 se seleccionaron, debido a que cuenta con una capacidad calorífica nominal de $160000 \frac{BTU}{hr}$.

EB-2 OVENPAK® Burner	Combustion and Cooling Air Required	Differential air pressure ("wc)	3	4	5	6	8	9	10	11	
		Volume (SCFM)	220	250	280	310	355	375	395	415	
	Heat Releases (1000's Btu/hr)	Maximum Capacity	750	980	1200	1330	1450	1500	1550	1600	
		Minimum & pilot	60	60	60	60	70	70	75	80	
		Pilot only	25	25	25	25	30	30	35	35	
	Natural Gas Differential pressures ("w.c.)	At burner inlet	3	5.2	7.8	9.5	11.3	12.1	12.9	13.8	
		At burner test connection	2.5	4.2	6.3	7.7	9.2	9.8	10.5	11.2	
	Flame length	in still air	12" to 30" beyond end of discharge sleeve								

Fig. 18 características de operación del quemador oven pack® EB-2. Disponible en la página de internet de Maxon Inc.

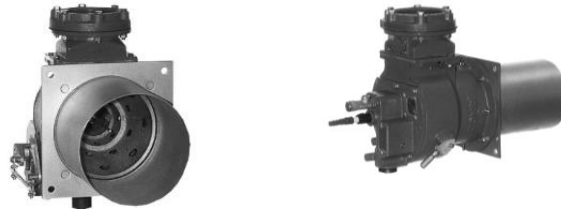


Fig. 19 apariencia del quemador oven pack ® EB-2.

Selección del material de la tubería.

The National Fuel Gas Code (NFPA 54) recomienda el acero al carbón Cedula 40 para tuberías de gas, ya que no es reaccionante con el gas natural (metano).

El lugar donde será instalada la tubería es un área cercana al horno rotatorio, de espacio es alrededor de 1 metro de largo entre la toma de gas y la entrada al horno. El trazo de la tubería se adaptó con el fin de que haya espacio suficiente para toda la instrumentación.

Calculo de las caídas de presión

Para el cálculo de las caídas de presión es necesario primero definir la instrumentación que se instalará. El fin es que llegue el flujo del gas al quemador con las especificaciones que requiere, e instalar toda la instrumentación y accesorios necesarios.

Las condiciones de entrada al quemador

- Presión de entrada de gas al quemador 11.2 Inch w.c. (0.4042 psi).
- Presión de entrada del aire 11 Inch w.c. (0.3970 psi)
- Flujo de calor para el piloto $35000 \frac{BTU}{hr}$
- Presión de entrada de piloto 11.2 Inch w.c.

La presión de entrada de la línea de gas en la planta es de 2 Kg/cm² (28.4467 psi)

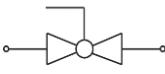




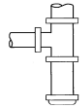
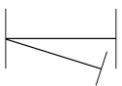
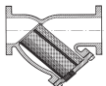

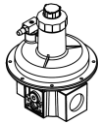
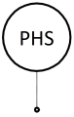

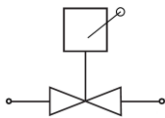
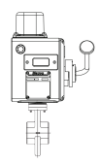
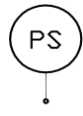

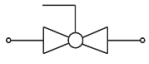

Símbolo	Aspecto real	Orden
		El primer accesorio en la línea será una válvula globo manual para cortar el suministro de gas en dado caso de alguna emergencia.
		Posteriormente sobre la línea habrá una Tee para conectar un manómetro, para conocer la presión del gas a la entrada del sistema de combustión.
		Después se pondrá la trampa de sedimentos como lo recomienda la NFPA, para evitar que algún sólido entre al sistema de combustión.
		El siguiente elemento será un filtro en Y para remover todos los sólidos pequeños que no se hayan quedado en la trampa de sedimentos.
		Una vez que el gas esté libre de impurezas, se introducirá al regulador de presión, para disminuir la presión en la línea y llegue con la idónea al quemador.
		Después del regulador, se pondrá por medio de una Tee un manómetro y un interruptor de presión. El manómetro servirá para verificar algún problema en el regulador y en el caso de que la presión sea mayor, el presostato mandará inmediatamente una señal de alerta.
		El siguiente elemento es la válvula de corte automático. Debido a que el flujo calorífico es pequeño solo se colocara una válvula automática. La válvula será con prueba de cierre. Esta válvula por cuestiones de presupuesto será de restablecimiento manual.
		Posteriormente y casi al final de la línea habrá otro interruptor de baja presión, para que alerte en caso de alguna deficiencia de presión en la entrada al quemador
		Y por último se colocará otra válvula globo para el suministro de gas al quemador.

Tabla 5. instrumentación que se instalara, orden y su criterio en la línea de gas principal

Línea piloto

Para el caso de la línea de piloto se contará casi con la misma instrumentación y bajo el mismo criterio, exceptuando los interruptores de presión.

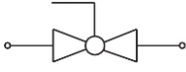
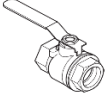




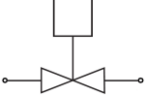
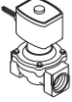
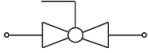
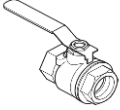
		Primero una válvula globo manual a la entrada del ramal de la línea piloto.
		Después habrá un regulador, para disminuir la presión de la línea piloto a la presión de entrada.
		Después del regulador habrá un manómetro para verificar la presión en la salida del regulador.
		Asimismo, se colocará una válvula de corte automático, para para cortar el suministro de manera remota en caso de alguna irregularidad.
		Y por último una válvula globo de corte para suministro de combustible al piloto del quemador.

Tabla 6. instrumentación que se instalara, orden y su criterio en la línea de piloto

Memoria de calculo

La memoria de cálculo será principalmente para poder seleccionar el regulador más adecuado para los requerimientos de presión de esta de tubería de gas. Para saber la ΔP que el regulador tendrá que reducir, el cálculo se hará en dos partes. Primero de la entrada del quemador a la salida del regulador y la segunda de la toma de gas a la entrada al regulador. La misma secuencia de cálculo se hará tanto en la línea principal de gas, como en la línea del piloto.

La fórmula para calcular las caídas de presión es la siguiente;

$$Q = 114.2 \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{(f)(L)(T)(P_{esp})}} \times D^5 \quad (\text{ecuación 2.2})$$

Donde

Q = al flujo de gas natural en ft³/hr

P_1 = presión de entrada en psi

P_2 = presión de salida en psi

f = al factor de Darcy

L = longitud total en millas

T = temperatura del sistema en Rankine

D = diámetro interior de la tubería en pulgadas

P_{esp} = peso específico del gas

Para realizar la primera secuencia de cálculo, se despejará la presión de entrada de la ecuación 2.2 ya que ya sabemos la presión de salida.

$$P_1^2 = P_2^2 + \left(\frac{(f)(L)(T)(P_{esp})(Q)^2}{(114.2)^2(D)^5} \right)$$

Salida del gas hacia el quemador

Presión de salida de gas 11.2 Inch w.c. (0.4042 psi).

Entrada de la línea de gas al sistema

La presión de entrada 2 Kg/cm² (28.4467 psi)

Flujo de gas 1600 $\frac{ft^3}{hr}$

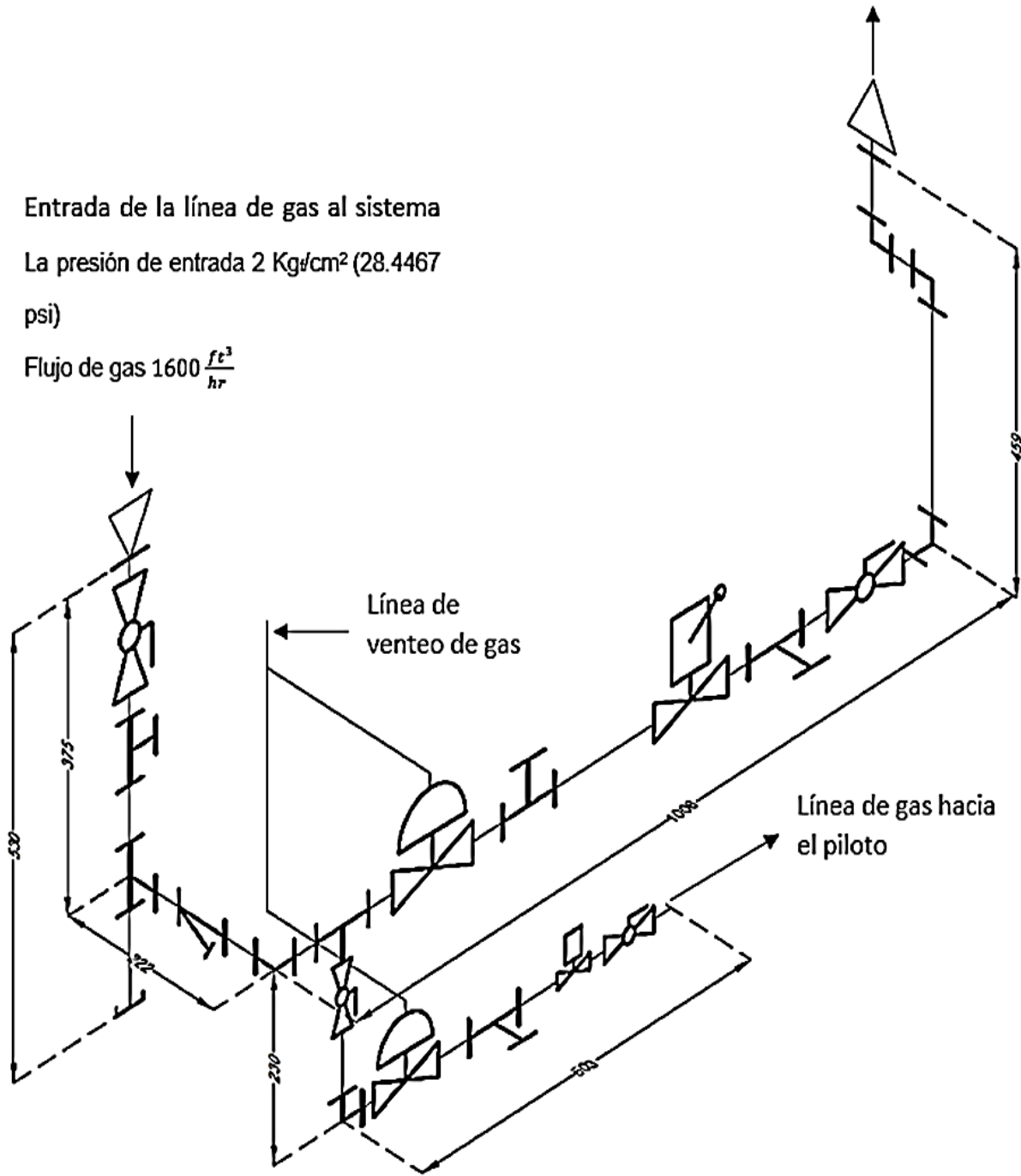


Fig. 20 isométrico de la propuesta de diseño de la tubería

Datos:

En base a la tabla B-14 del libro flujo de fluidos escrito por la división de ingeniería de CRANE y publicado por MCGRAW-HILL, el diámetro interno en pulgadas para tubería de acero al carbón cedula estándar (40) es de 1.6010 in de diámetro

$$D = 1.6010 \text{ in}$$

La temperatura promedio dentro de la fábrica es de 21°C (70°F)

$$T = 70 + 460 = 530 \text{ R}$$

El peso específico tomado de la literatura es de 0.61 ⁽⁶⁾

Calculo del factor de Darcy

Para calcular el factor de Darcy es necesario primero el cálculo del Reynolds, para esto se utilizó una aproximación del libro flujo de fluidos de Crane

$$R_e = \frac{(0.482)(Q)(P_{esp})}{(D)(\mu)} \quad (\text{ecuación 2.3})$$

La viscosidad μ es estimada por la tabla A-4a (viscosidad de gases y vapores de hidrocarburos) del libro de Crane es = 0.011

Al sustituir en la ecuación 2.3

$$R_e = \frac{(0.482)\left(\frac{16000 \text{ ft}^3}{\text{hr}}\right)(0.61)}{(1.610 \text{ in})(0.011 \text{ cp})} = 2.6 \times 10^4$$

Con ayuda de la tabla A-23b (factores de fricción para tuberías comerciales de acero) del libro flujo de fluidos de Crane, se interpolo el número de Reynolds con el diámetro de tubería resultando un factor de fricción de 0.027

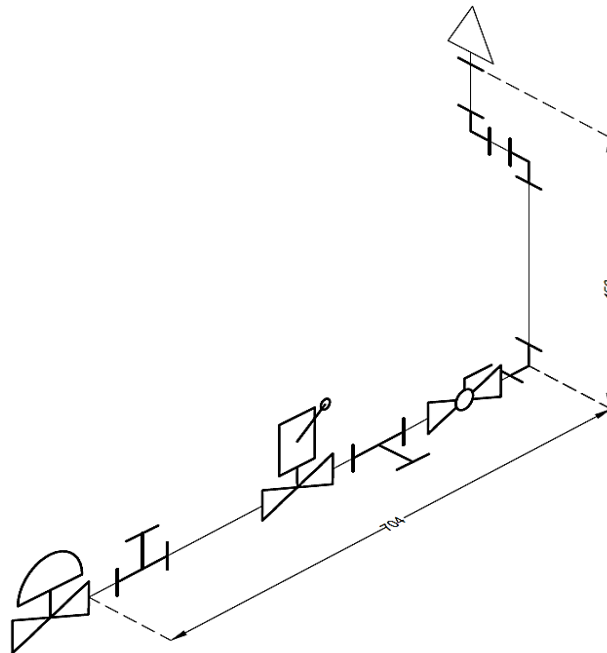
Para el cálculo de longitud total tenemos la siguiente formula

$$\text{Longitud Total} = \text{Longitud Equivalente} + \text{Longitud de Tuberia} \quad (\text{ecuación 2.4})$$

⁶ http://www.gas.pemex.com.mx/NR/rdonlyres/1D3E1128-E8A5-4CD1-B04C-DBC7CEFC0592/0/msdsgasnatural_02.pdf

La longitud equivalente total es la suma de todas las longitudes equivalentes de cada accesorio.

cantidad	Componentes	LE	
3	codo de 90°	=0.26 X 3	=0.78 ft
2	Te	= 0.17 ft X 2	= 0.34 ft +
1	válvula globo	=0.026 ft X 1	= 0.026 ft
		<hr/>	
		= 1.146 ft	



Longitud equivalente total = 1.146 ft

Longitud de la tubería en esa sección =1163 mm (3.82 ft)

Al sumar las longitudes

$$3.82 \text{ ft} + 1.146 \text{ ft} = 4.97 \text{ ft} = 9.3 \times 10^{-4} \text{ millas}$$

Al sustituir en la ecuación 2.1 tenemos que

$$P_1^2 = (0.4042 \text{ psi})^2 + \left(\frac{(0.027)(9.3 \times 10^{-4} \text{ millas})(530 R)(0.61) \left(\frac{16000 \text{ ft}^3}{\text{hr}} \right)^2}{(114.2)^2 (1.610 \text{ in})^5} \right) = 0.5574 \text{ psi}$$

Un accesorio que no se conto fue la válvula de seguridad, esta válvula, solo opera bajo condición de emergencia, la caída de presión viene en las especificaciones descritas por su proveedor, el cual es 0.0127 psi

La suma de todas las presiones nos da la caída de presión siguiente

$$0.5574 \text{ psi} + 0.0127 \text{ psi} = 0.5701 \text{ psi}$$

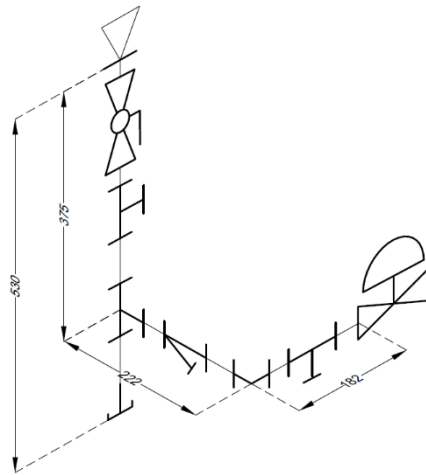
Para la segunda sección de cálculo, de la toma de gas a la entrada del regulador es necesario ahora despejar la presión de salida de la ecuación 2.1:

$$P_2^2 = P_1^2 - \left(\frac{(f)(L)(T)(P_{esp})(Q)^2}{(114.2)^2 (D)^5} \right)$$

La presión distribuida por la línea de gas principal es de 2 Kg/cm² (28.44 psi)

Haciendo el cálculo de la longitud total

cantidad	Componentes	LE	
1	Codo de 90°	= 0.26 ft x 1	= 0.26 ft +
2	Tee (paso directo)	= 0.17 ft x 2	= 0.34 ft
1	Tee (paso desviado 90°)	= 0.52 ft x 1	= 0.52 ft
1	Filtro Y para gas	= 0.48 ft x 1	= 0.48 ft
1	Válvula globo	= 0.026 ft X 1	= 0.026 ft
		<hr/>	
		= 1.626 ft	



La longitud de la tubería en esta sección es de 779 mm 2.56 ft

Al sumar todas las longitudes de tubería

$$1.626 \text{ ft} + 2.56 \text{ ft} = 4.186 \text{ ft} = 7.93 \times 10^{-4} \text{ millas}$$

Al sustituir en la formula tenemos que

$$P_1^2 = (28.44 \text{ psi})^2 - \left(\frac{(0.027)(7.93 \times 10^{-4} \text{ millas})(530 R)(0.61) \left(\frac{16000 \text{ ft}^3}{\text{hr}} \right)^2}{(114.2)^2 (1.610 \text{ in})^5} \right) = 28.437 \text{ psi}$$

Por lo que el regulador tiene reducir la presión en la línea de 28.437 psi a 0.5701 psi ($\Delta P = 27.86 \text{ psi}$.)

Para este caso, el regulador a emplear será de la línea Fisher de Emerson ®. Este tipo de reguladores hace pasar el fluido por un orificio más pequeño que la línea principal para reducir la presión, el trabajo mecánico para lograr la reducción de presión lo absorbe un resorte.

En el boletín del modelo CS400 de Fisher de Emerson ® disponible en la página de internet de Emerson ® y en el anexo A, vienen tablas para poder seleccionar el regulador con las características adecuadas para el proceso.

- Tiene que tener un rango de salida de 18 Inch w.c. a 1 psig,
- Que soporte una presión de entrada de 28.437 psi \approx 30 psi y
- Que garantice un flujo de $1600 \frac{\text{ft}^3}{\text{hr}}$.

En base en la opción seleccionada en la figura 5 anexo A. A la hora de cotizar el regulador Fisher las características a buscar tienen que ser las siguientes: resorte naranja y tamaño de orificio de ¼ de pulgada.

calculo en la línea piloto

El trazo de la tubería por cuestiones de espacio será el siguiente: la línea piloto va a bajar de la línea principal 23 cm y después va a seguir paralela a la línea principal cerca de 50 cm para llegar al quemador.

El criterio para el dimensionamiento de la línea del piloto es en base a los requerimientos de presión y flujo que especifica el quemador. La línea piloto debe proveer un flujo de calor de 35000 BTU/hr, la cantidad de metano requerido

$$= \frac{35000 \frac{BTU}{hr}}{1000 \frac{BTU}{ft^3}} = 35 \frac{ft^3}{hr} \text{ de gas metano}$$

Al ser un flujo tan pequeño y en una longitud tan corta se seleccionó el diámetro de tubería comercial más pequeño que existiese instrumentación disponible, el diámetro de tubería de ½ de pulgada es más que suficiente para transportar esta cantidad de gas.

Cálculo de las caídas de presión

Calculo del factor de Darcy

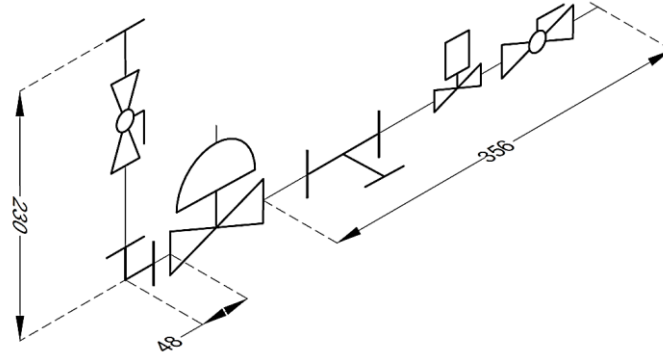
Para calcular el factor de Darcy es necesario primero el cálculo del Reynolds utilizando la ecuación 2.3

$$R_e = \frac{(0.482)(Q)(P_{esp})}{(D)(\mu)}$$

Se utilizo los mismos datos del cálculo de la línea principal excepto el diámetro de la tubería

$$R_e = \frac{(0.482) \left(\frac{16000 \text{ ft}^3}{hr} \right) (0.61)}{(0.622 \text{ in})(0.011 \text{ cp})} = 6.9 \times 10^4$$

En base a la tabla A-23b, (factores de fricción para tuberías comerciales de acero) de Crane el factor de fricción de 0.029



La primera parte se calculará de la entrada del piloto a la salida del regulador.

La longitud en la tubería en el tramo recto es de 356 mm (1.17 ft)

Cálculo de las longitudes equivalentes

cantidad	Componentes	LE	
1	Te (paso recto)	= 0.08 X 1	= 0.08 ft
1	Válvula globo	= 0.012 ft X 1	= 0.012 ft +
			—————
			= 0.092 ft

Al sumar las longitudes = 1.17 ft + 0.092 ft= 1.262 ft = 2.4×10^{-4} millas

Al sustituir en la formula tenemos que

$$P_1^2 = (0.4042 \text{ psi})^2 + \left(\frac{(0.029)(2.4 \times 10^{-4} \text{ millas})(530 R)(0.61) \left(\frac{35 \text{ ft}^3}{\text{hr}} \right)^2}{(114.2)^2 (0.622 \text{ in})^5} \right) = 0.4069 \text{ psi}$$

A esta presión se le va a sumar la caída de presión de la válvula electromecánica, que por datos del proveedor es de 1 Inch w.c. (0.036 psi)

Por lo que la presión a la que debe reducir el regulador es de

$$0.4069 \text{ psi} + 0.036 \text{ psi} = 0.4429 \text{ psi}$$

Ya conocemos la salida del regulador, ahora es necesario conocer la presión de la entrada, con la ecuación 2.1

$$P_2^2 = P_1^2 - \left(\frac{(f)(L)(T)(P_{esp})(Q)^2}{(114.2)^2(D)^5} \right)$$

Longitud total

cantidad	Componentes	LE
1	Válvula globo	= 0.012 ft X 1 = 0.012 ft
1	Codo 90°	= 0.12 ft X 1 = 1.12 ft +
		<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/> = 0.132 ft

La longitud de la tubería en este tramo es de 278 mm (0.91 ft)

Al sumar toda la longitud es igual a 0.132 ft + 0.91 ft = 1.042 ft = 1.97×10^{-4} millas

Al sustituir en la formula tenemos que

$$P_1^2 = (28.44 \text{ psi})^2 - \left(\frac{(0.029)(1.97 \times 10^{-4} \text{ millas})(530 \text{ R})(0.61) \left(\frac{35 \text{ ft}^3}{\text{hr}} \right)^2}{(114.2)^2(0.622 \text{ in})^5} \right) = 28.439 \text{ psi}$$

En este caso el regulador de la línea piloto va a tener una presión de entrada de 28.439 psi y una presión de salida de 0.4429 psi, con un ΔP de 28 psi

Para el caso de seleccionar el regulador se va a emplear el mismo criterio que el de la línea principal. Para este caso se seleccionó el regulador Fisher Emerson ® modelo R622-2 cuenta con un rango de salida de 5-7" w.c. con un orificio de 1/8" y soporta una presión de entrada de 30 psi

Líneas de venteo

Es importante que los reguladores tengan una línea de venteo. Es recomendado por normatividad. Para en caso de que el regulador no soporte la presión o se dañe el diafragma pueda expulsar el gas sobrante hacia el exterior y no irse al horno y generar una atmosfera peligrosa.

Para el caso del venteo en la línea principal se conectará tubería de 1" para su venteo, y para el venteo de la línea piloto saldrá un tubo de $\frac{3}{4}$ " las cuales se unirán y tendrá salida hacia el exterior.

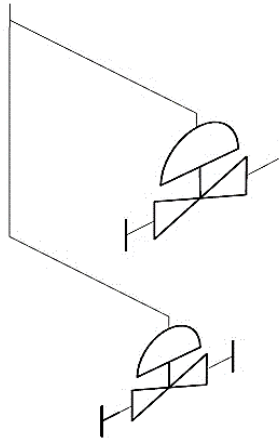


Fig. 21. Líneas de venteo de los reguladores

3. Planteamiento del sistema lógico de control

El control será una pieza fundamental para cumplir los requerimientos de calidad y seguridad que dicta la norma y poder ofertar un diseño de altos estándares. Con base en la operación, características del equipo y normatividad. Se van a automatizar cuatro operaciones en este proceso.

1. Encendido del horno
2. Control de temperatura
3. Límite de temperatura
4. Límite de presión

Encendido del horno

Como lo mencione en el capítulo de peligros relacionados en los hornos industriales, el encendido ocupa un alto porcentaje de explosiones debido a los riesgos descritos en aquel capitulo, lo que se buscara es plantear una secuencia de arranque segura que minimice riesgos de explosión.

Variable controlada:

La correcta combustión y existencia de flama

Identificación de variables medibles relacionadas:

Se censará la radiación de la flama.

Variables manipuladas:

En este caso las variables manipuladas serán los flujos de aire, gas y corriente eléctrica.

Secuencias

Secuencia azul: es la primera secuencia el cual se encargará de la purga, el cual mandara a encender el motor del ventilador y un temporizador le indicará al control cuando la purga ya se haya finalizado

Secuencia roja: es la segunda secuencia en donde el control manda a energizar la válvula solenoide del piloto, el amplificador de corriente y el sensor de flama, una vez que detecto flama el interbloqueo le dice al control que puede continuar con la secuencia.

Secuencia verde: es la tercera secuencia y es donde manda a energizar la válvula solenoide de la línea principal para que se genere la flama.

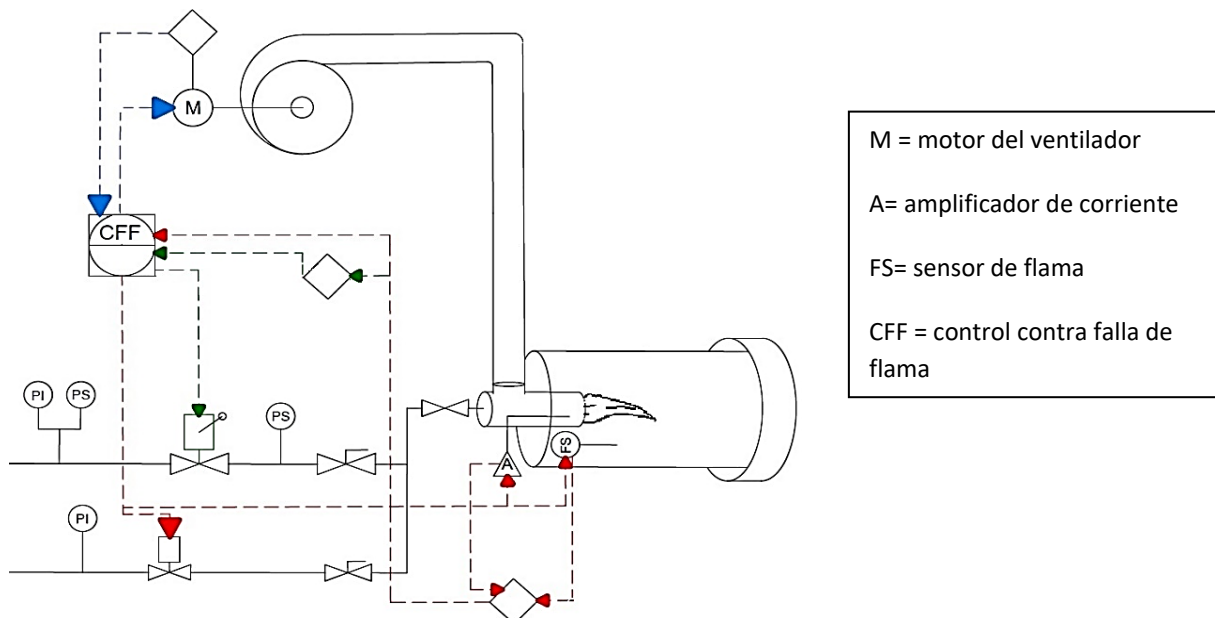


Fig. 22 Diagrama del control en el arranque del horno en base a simbología de instrumentación y control ISA

Control de temperatura

El control de temperatura en un horno industrial es importante, debido a que te brinda una mayor versatilidad y utilidad del horno a diversos procesos, el producto tiene más valor añadido y podrá satisfacer mejores estándares de calidad.

Variables de Controlada:

Flujo de calor que proporciona el horno

Identificación de variables medibles relacionadas:

La temperatura

Variables manipuladas:

En este caso como la temperatura la dicta la eficiencia de la combustión, las variables controladas serán los flujos de combustible y de aire.

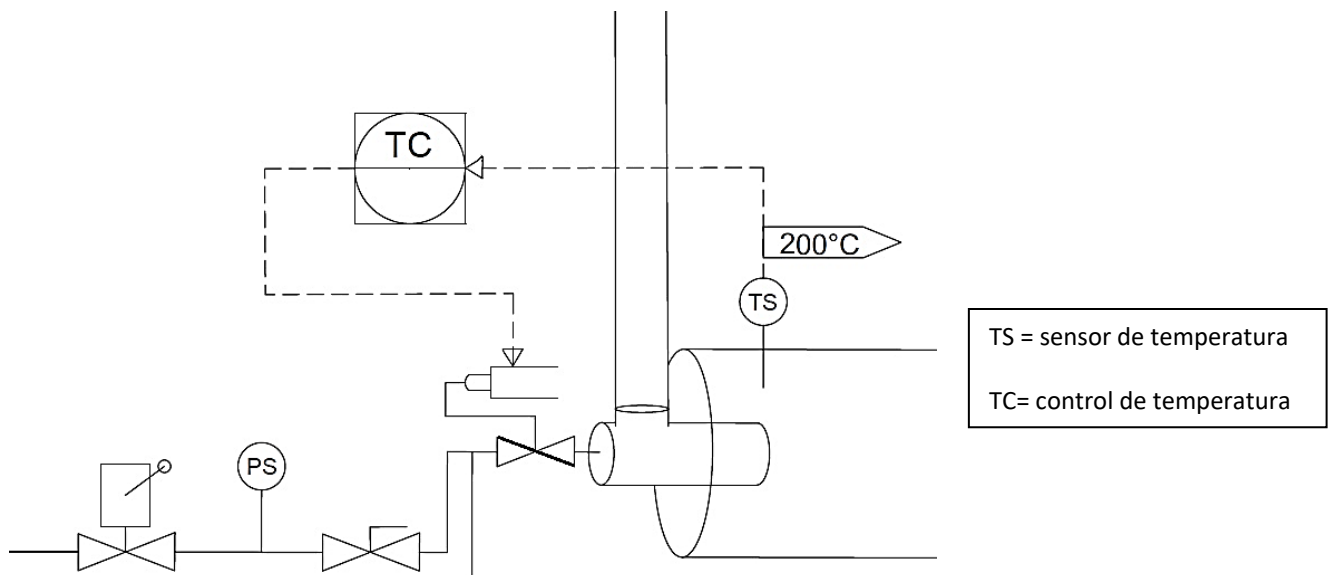


Fig. 23 Diagrama del control en temperatura horno en base a simbología de instrumentación y control ISA

Límite de temperatura

Se pondrá un controlador de límite de temperatura para evitar que la temperatura sobrepase los 200°C y se queme el producto. Este control es primordial para la calidad de este proceso. En caso de que la temperatura sobrepase los 200°C el control mandara a cerrar las válvulas automáticas de cierre de combustible y mandara una señal de alerta al tablero de control indicando paro del equipo por emergencia.

Variables de Controlada:

Impedir que se proporcione al producto exceso de calor

Identificación de variables medibles relacionadas:

La temperatura

Variables manipuladas:

En caso de que la temperatura sea mayor se manda a cortar corriente de gas

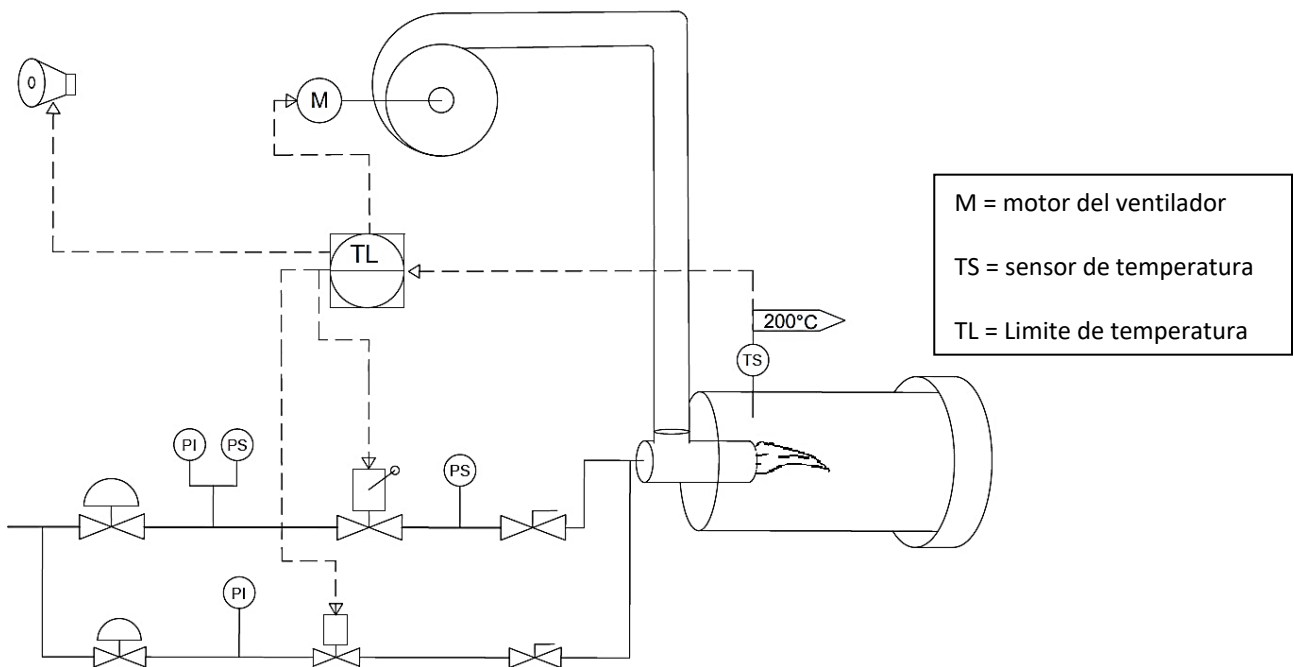


Fig. 24 Diagrama del control en límite de temperatura horno en base a simbología de instrumentación y control ISA

Límite de presión

El sistema también contara con un interbloqueo en la variable de presión, para evitar que el equipo opere con un exceso de presión o con muy baja presión. cualquiera de estas dos condiciones puede generar una probabilidad de explosión

Variables de Controlada:

Evitar combustión no estequiométrica peligrosa

Identificación de variables medibles relacionadas:

Las presiones van relacionadas al flujo de los reactivos para la combustión

Variables manipuladas:

Corte de flujos de aire y combustible

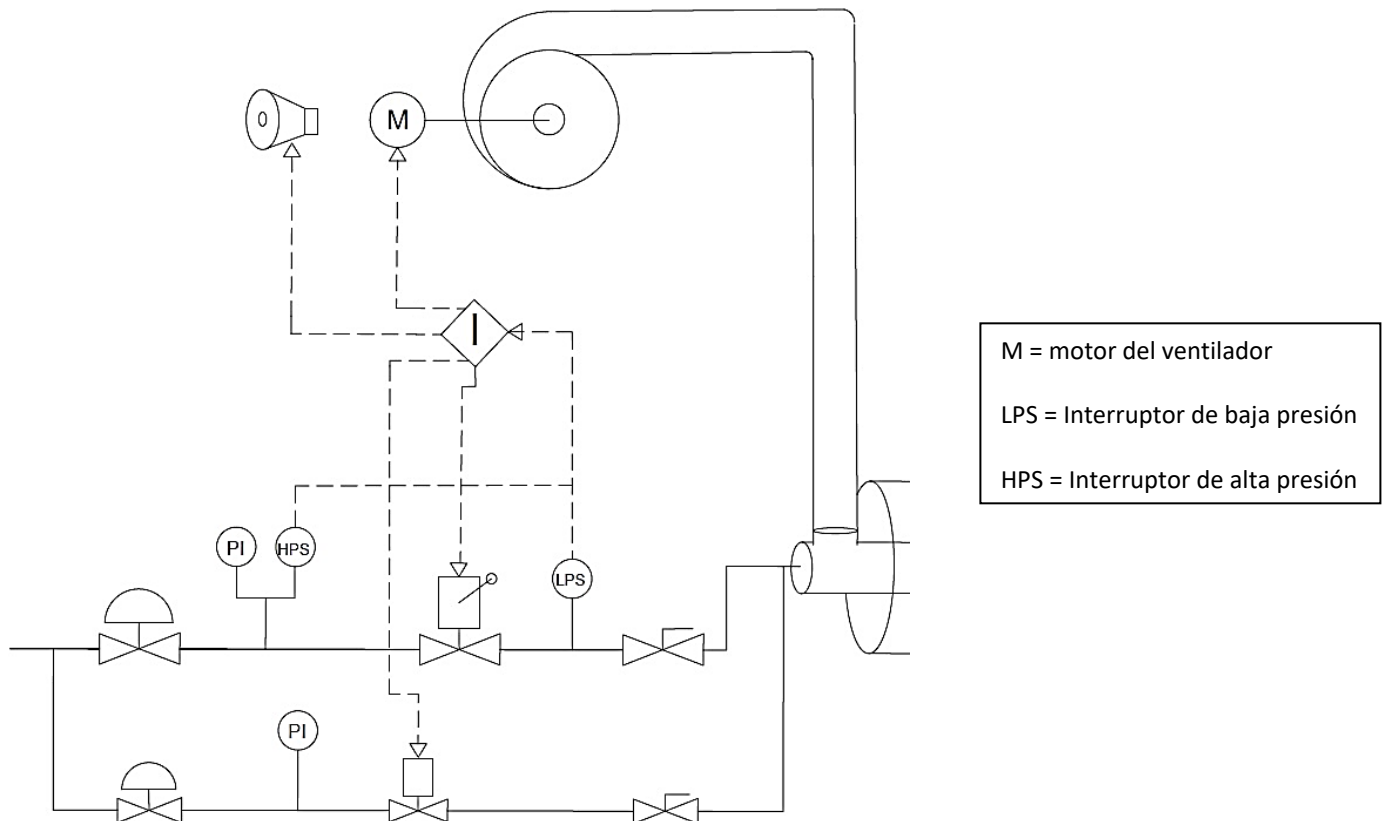


Fig. 25 Diagrama del control en límite de presión horno en base a simbología de instrumentación y control ISA

III. Resultados

- La temperatura de operación es de 200 °C y en base al balance de energía el flujo de calor para cumplir todos los requerimientos energéticos es de $1600000 \frac{BTU}{h}$
- En base a la estequiometría de la reacción de combustión del gas natural, que en su mayoría contiene gas metano, la relación es de 1 a 10. Una unidad de gas por 10 unidades de aire.

En base al poder calorífico del gas metano que es de $1000 \frac{BTU}{ft^3}$ los flujos volumétricos para proveer el calor necesario son los siguiente:

Flujo de $1600 \frac{BTU}{ft^3}$ de gas natural.

Flujo de $16000 \frac{ft^3}{hr}$ de aire.

- El diseño de la tubería quedo de la siguiente manera. El diámetro optimo nominal para soportar todas las condiciones de operación es de 1 ½ pulgadas para la línea principal de gas y de ½ pulgada para la línea de piloto y de ½ pulgada para la línea de venteo.

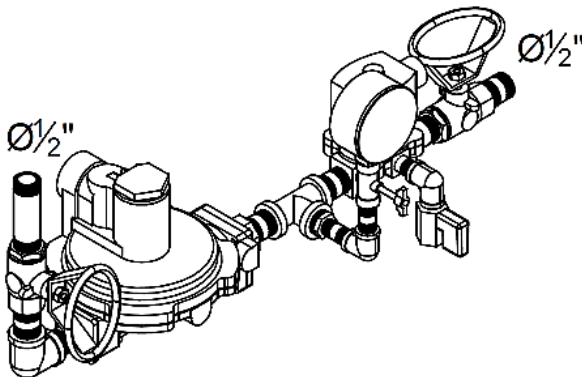


Fig. 26 tal Diámetro de la línea piloto del sistema de combustión

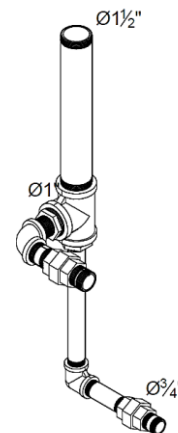


Fig. 27 Diámetro de la línea de venteo de los dos reguladores de presión, tanto de la línea piloto como de la línea principal

Las dimensiones del sistema de combustión quedaron de la siguiente manera. Las unidades están en milímetros

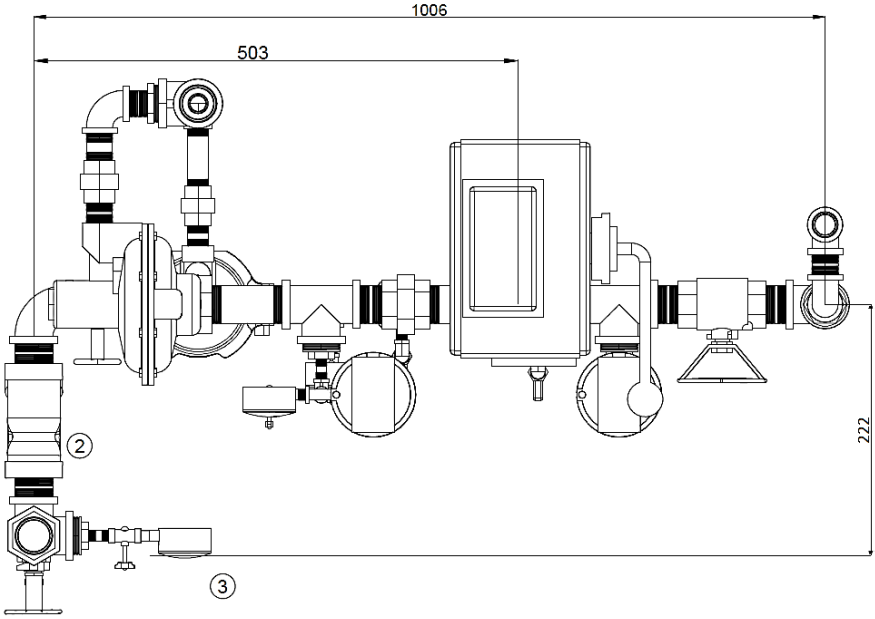


Fig. 28 Dimensiones vistas desde la parte superior

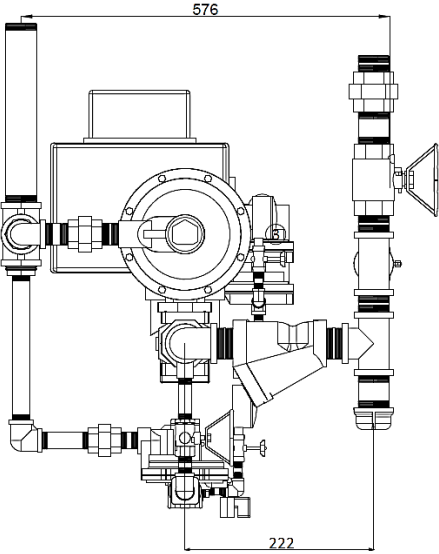


Fig. 29 Dimensiones laterales

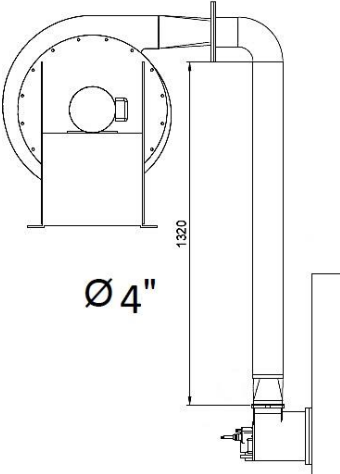


Fig. 30 Dimensiones de la tubería de aire

La instrumentación seleccionada en el sistema de tubería es la siguiente

ITEM	CANT	DESCRIPCIÓN
1	2	VÁLVULA DE CORTE
2	1	FILTRO
3	1	MANÓMETRO CON VÁLVULA DE AGUJA
4	1	REGULADOR PRINCIPAL
5	1	MANÓMETRO CON VÁLVULA DE AGUJA
6	1	INTERRUPTOR DE BAJA PRESION DE GAS
7	1	VÁLVULA DE SEGURIDAD
8	1	INTERRUPTOR DE ALTA PRESION DE GAS
9	2	VÁLVULA DE CORTE
10	1	REGULADOR PARA PILOTO
11	1	MANÓMETRO CON VÁLVULA DE AGUJA
12	1	VÁLVULA SOLENOIDE PARA PILOTO

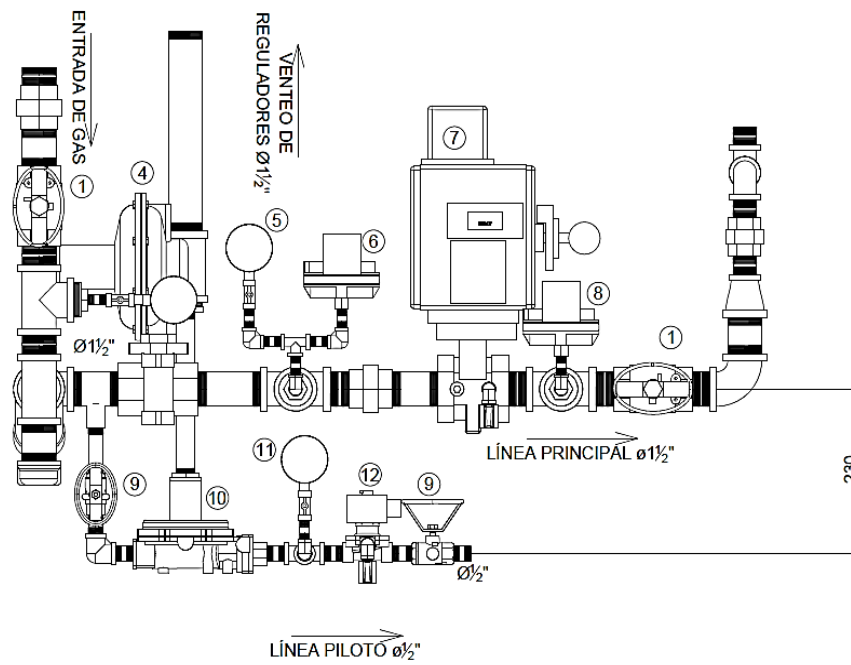


Fig. 31 Dimensiones vistas desde la parte frontal

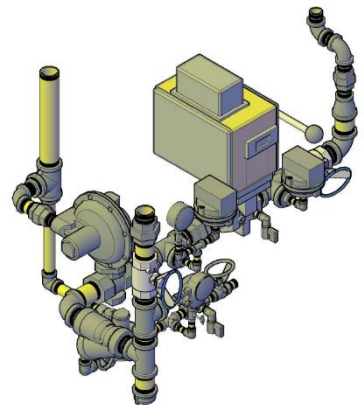


Fig. 32 Vista lateral del modelo 3D del sistema de combustión

Secuencia lógica de los planteamientos de los sistemas lógicos de control descritos en el capítulo anterior

Diagrama lógico de control 7.1 de arranque del quemador

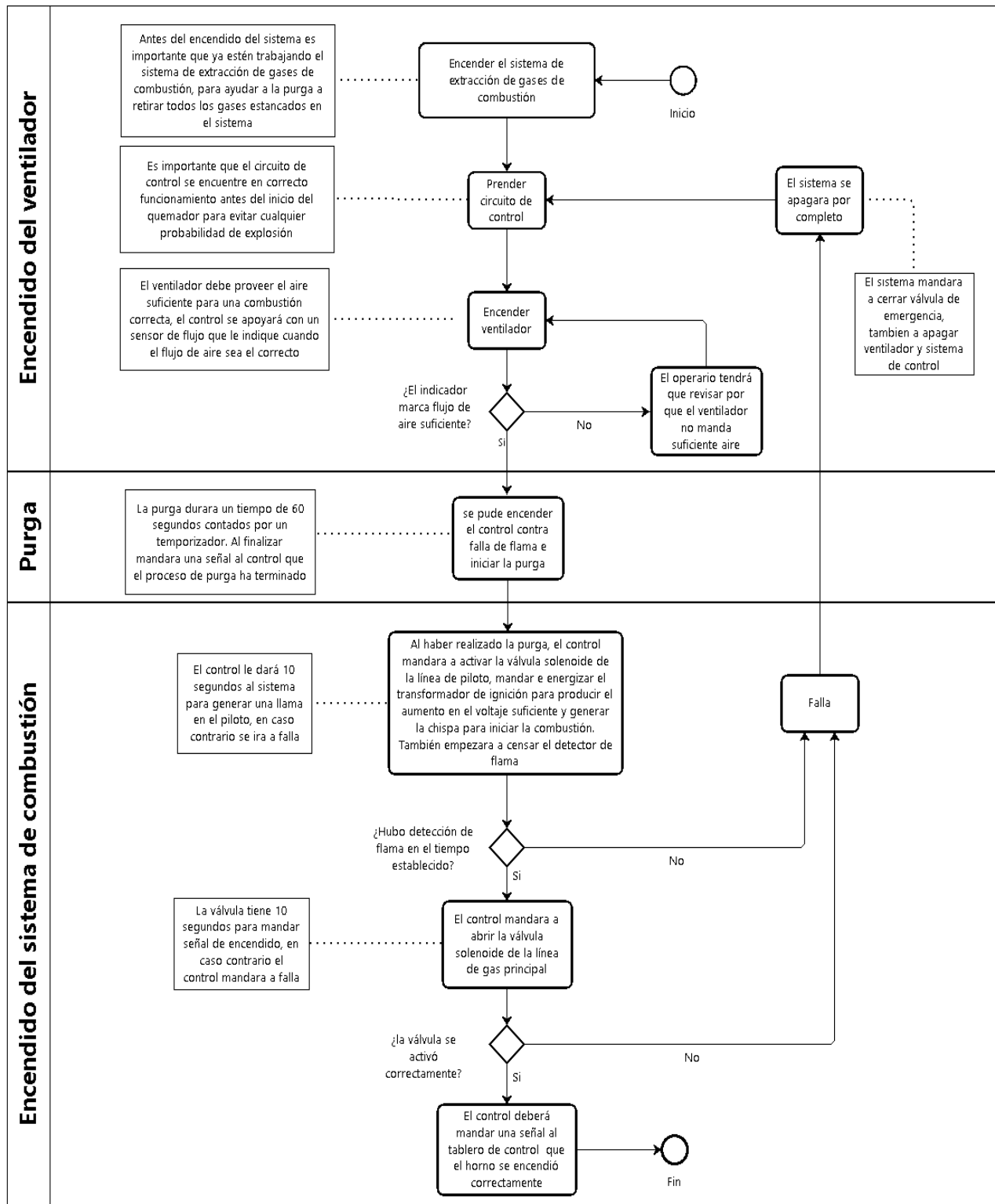


Diagrama lógico de control 7.2

Secuencia del control de temperatura

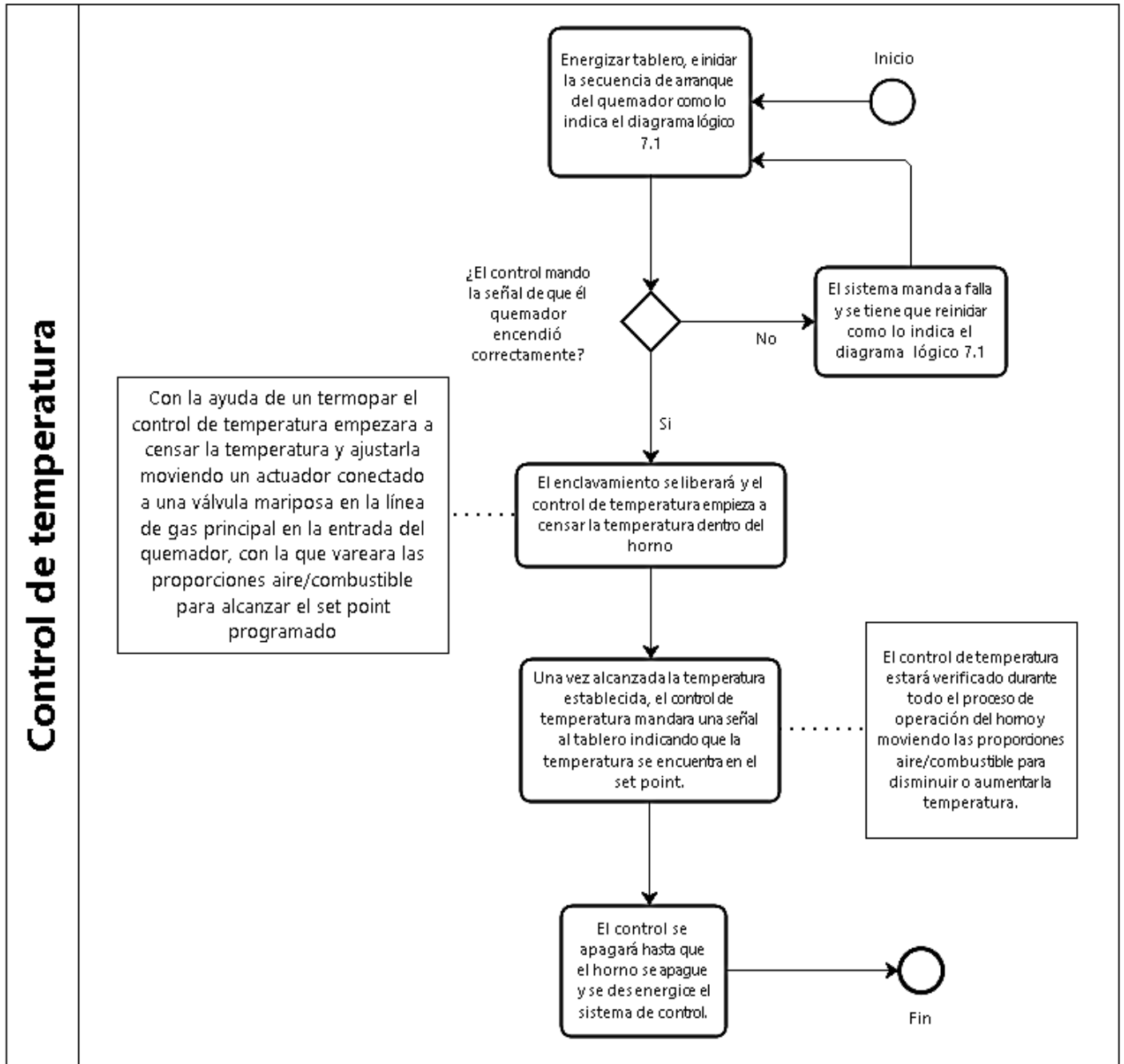


Diagrama lógico de control 7.3

Secuencia del límite de temperatura

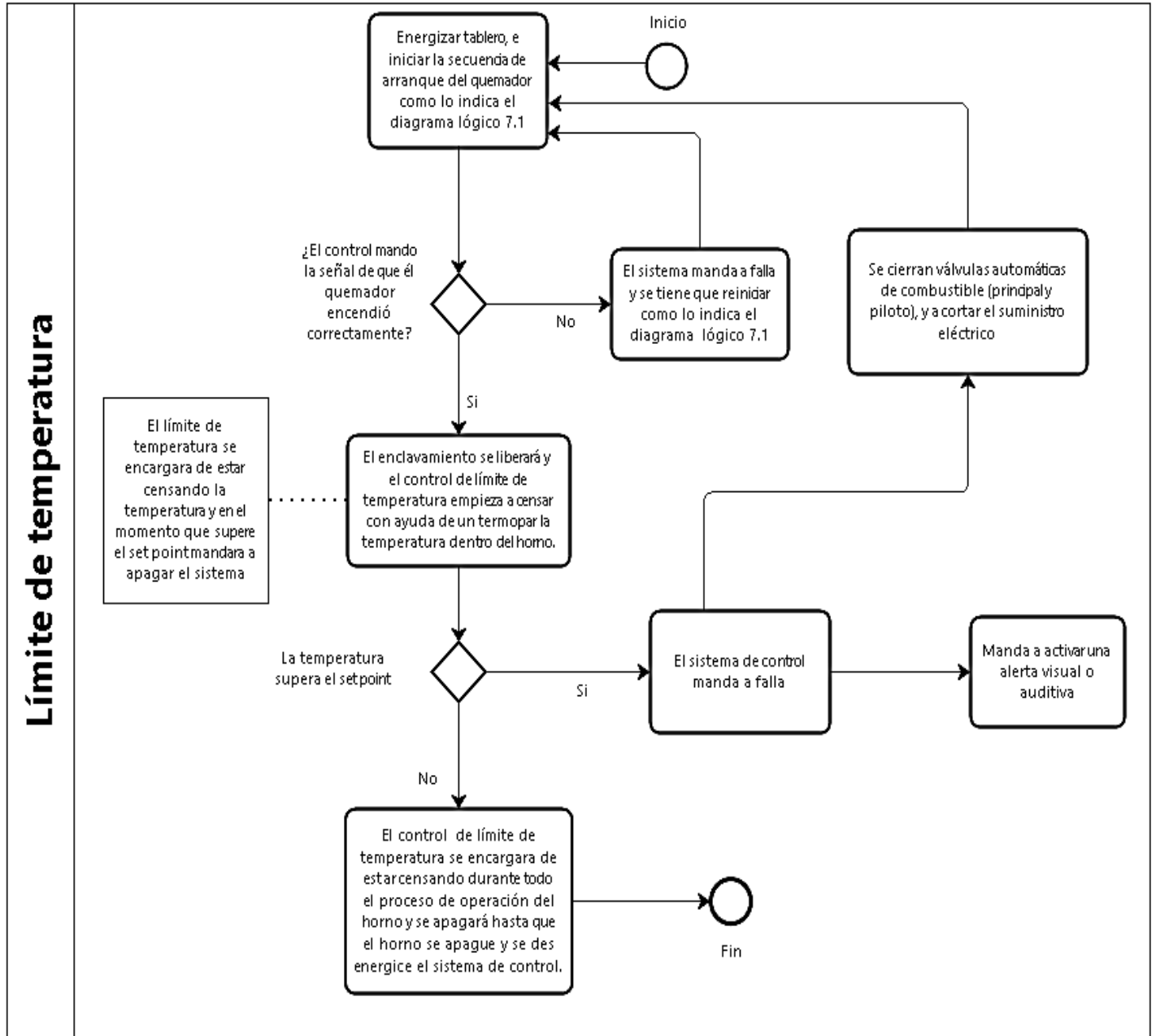
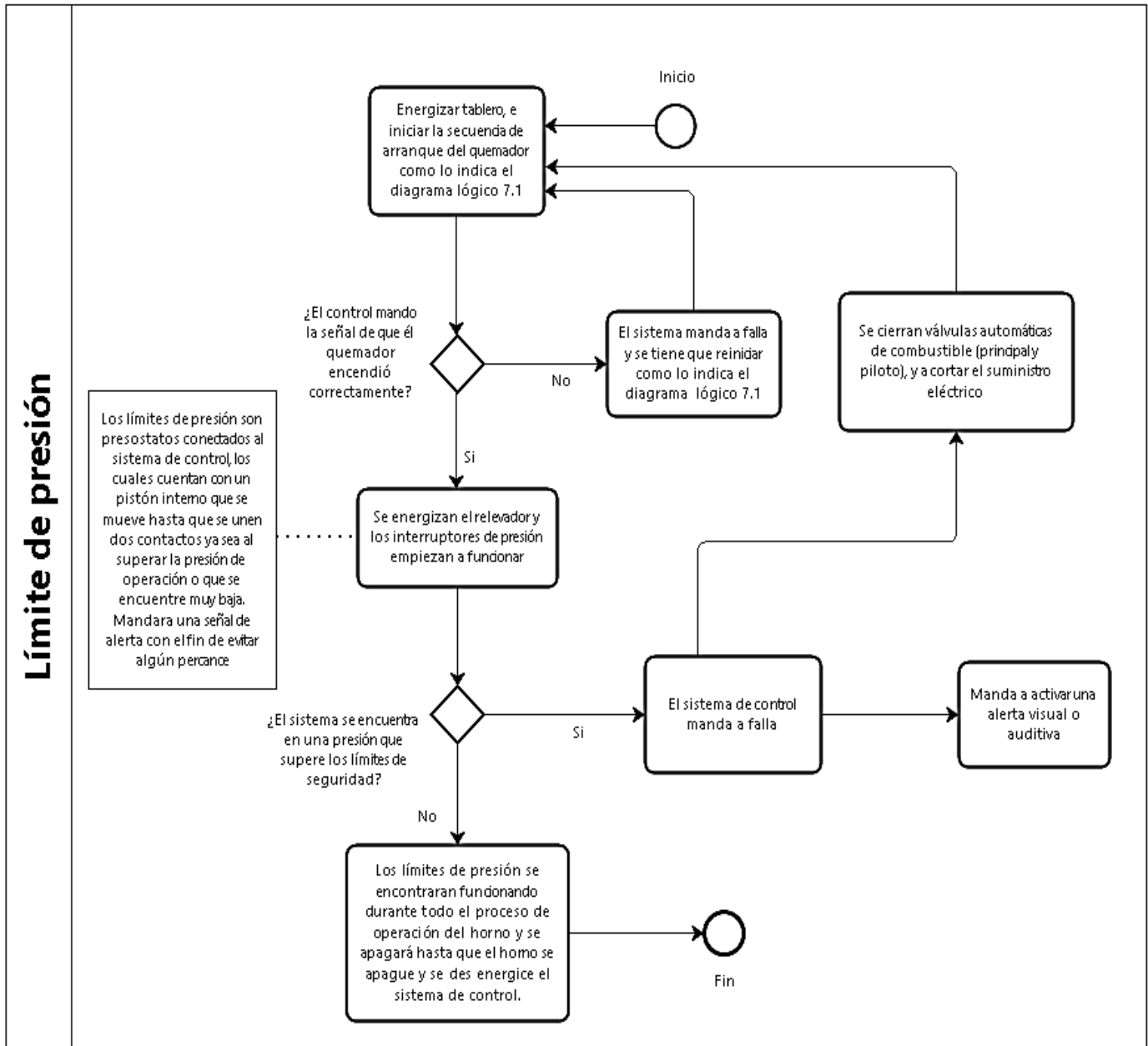


Diagrama lógico de control 7.4

Secuencia de límite de presión



Imágenes de la instalación del sistema de combustión diseñado en el horno rotatorio



Fig. 33 Quemador instalado en la cámara de combustión



Fig. 34 Sistema de combustión vista de manera Frontal



Fig. 35 Quemador vista de manera lateral



Fig. 36 Vista de frente del tablero de control, con las pantallas de los tres controles instalados

Conclusiones y apuntes finales

El sistema de combustión diseñado en este trabajo fue aprobado para su construcción y puesta en marcha y fue incluida en un proyecto a realizar, delimitado en costo, tiempo y alcances. Es importante aclarar lo siguiente.

La empresa donde se instaló el sistema ya tenía un ventilador, por esa misma razón se buscó un quemador con entrada de ventilador externo. En base a la ficha técnica del ventilador se determinó el número de rpm y bhp al tenía que estar el ventilador para que diera como resultado el flujo que requiere el quemador EB-2 en sus especificaciones de entrada de aire. Así mismo la cantidad de HP a suministrar al motor para tener estas especificaciones. Se ajusto para que cumpliera 415 SCFM y una presión diferencial de aire de 11 Inch w.c. De igual manera con estos datos el ingeniero en automatización calibro el motor del ventilador con el sistema de control. Con respecto a la tubería de gas es importante mencionar que el quemador no trabaja todo el tiempo en la condición estequiométrica. Una vez que se abren las válvulas de gas el sistema opera con un exceso de aire para prevenir cualquier condición peligrosa. El quemador ofrece un rango de turndown de 40:1 es decir, podrá generar una flama estable hasta 40 veces menos del flujo de calor al que fue diseñado. Al iniciar el quemador trabaja con un flujo de $40000 \frac{BTU}{hr}$ y exceso de aire a fuego bajo. Conforme la temperatura va aumentando las válvulas que se encuentran a la entrada del quemador van cerrando el flujo del aire y van abriendo más la del gas, hasta que los flujos guarden una relación 1:10 que es como lo dicta la condición estequiométrica y se tengan los flujos necesarios para 200°C. Todo esto debe de ser respaldado por un analizador de gases en la salida del horno para tener certeza que la combustión se lleva de manera estequiométrica.

Tanto la tubería de gas como la de aire fueron diseñadas a flujo máximo, he incluso se les aplico un sobre diseño, por lo que el sistema soportaría condiciones inusuales de flujo. Si supera un 20% más, los interruptores de presión mandan a apagar todo el sistema.

La flama tiene una longitud de 12 a 30 pulgadas de largo, la cual se encuentra bien aislada para evitar el enfriamiento de flama y perdida de temperatura por disociación, que provoque que los últimos elementos del mecanismo de combustión

del metano se vean interrumpidos y se generen aldehídos y alcoholes. Otro factor importante es que el sistema garantiza una presión de salida que cumple la velocidad de propagación de flama del gas natural que es de 18.3 m/min. Se diseñó en base a las condiciones de presión velocidad recomendadas por la NFPA por lo cual, no habrá un retroceso de flama que provoque una implosión de la tubería.

En cuestión al control y a la automatización. La sintonización de todos los parámetros de los controles PID se ajustaron en campo, en decir el parámetro, ganancia proporcional (K_C) el tiempo de restablecimiento (t_I) y la parte predictiva (t_D) del control PID se determinaron y ajustaron el día que el sistema se puso en marcha. El efecto del controlador debe manifestarse de forma suave, sobre la variable a controlar, sin sobrepasos excesivos, en el menor tiempo posible y con un mínimo uso de la variable controlante. Por lo que se buscó la sintonización de parámetros de la secuencia de inicio y control de temperatura fueran los más apropiados a la dinámica del proceso en la cuestión y cumplir lo requerimientos de calidad y de seguridad en la operación.

En la parte de la secuencia del arranque del quemador se trabajó junto con el ingeniero en automatización, para asegurarnos de que cuando el control mande la señal para energizar el amplificador de corriente y generar el arco eléctrico, genere la energía suficiente para que se alcance en su totalidad la energía de ignición de la reacción del metano y se pueda llevar una combustión correcta.

La calibración de los presostatos o interruptores de presión se ajustaron a una sobre presión de 20 % el de alta y a una deficiencia de presión de 20% al de baja, en ambos casos el límite cortará el suministro de gas cuando se detecte que se alcanzó esta condición y mandaran una señal de alerta al control.

Este trabajo denota la versatilidad de la ingeniería química en todas sus áreas de conocimiento para generar proyectos ingenieriles a la industria productiva del país. Este trabajo pone a prueba los conocimientos adquiridos en la formación como ingeniero químico en áreas de ingeniería de calor, ingeniería de fluidos, fenómenos de trasportes, dinámica y control de procesos y química general. Así mismo se trabajó con ingenieros mecánicos, eléctricos y en automatización promoviendo la multidisciplinariedad de todas las especializaciones de la ingeniería.

IV. Apéndices

Apéndice A. Gráficas y tablas

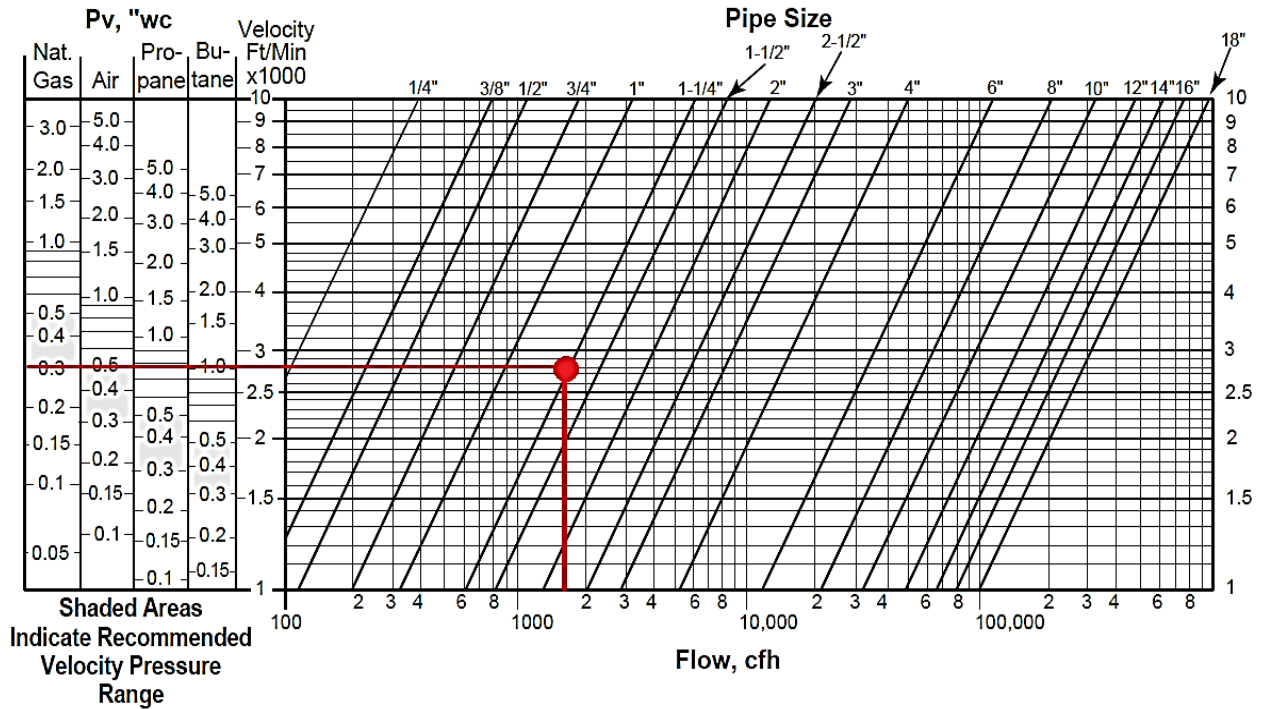


Fig. 1 Grafica de presión velocidad vs Flujo. The Engineering Guide de HONEYWELL THERMAL SOLUTIONS

Table 6.2(a) Schedule 40 Metallic Pipe

														Gas: Natural	
														Inlet Pressure: Less than 2 psi	
														Pressure Drop: 0.3 in. w.c.	
														Specific Gravity: 0.60	
														Pipe Size (in.)	
Nominal:	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6	8	10	12	
Actual ID:	0.622	0.824	1.049	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	4.026	5.047	6.065	7.981	10.020	11.938	
Length (ft)	Capacity in Cubic Feet of Gas per Hour														
10	131	273	514	1,060	1,580	3,050	4,860	8,580	17,500	31,700	51,300	105,000	191,000	303,000	
20	90	188	353	726	1,090	2,090	3,340	5,900	12,000	21,800	35,300	72,400	132,000	208,000	
30	72	151	284	583	873	1,680	2,680	4,740	9,660	17,500	28,300	58,200	106,000	167,000	
40	62	129	243	499	747	1,440	2,290	4,050	8,270	15,000	24,200	49,800	90,400	143,000	
50	55	114	215	442	662	1,280	2,030	3,590	7,330	13,300	21,500	44,100	80,100	127,000	
60	50	104	195	400	600	1,160	1,840	3,260	6,640	12,000	19,500	40,000	72,600	115,000	
70	46	95	179	368	552	1,060	1,690	3,000	6,110	11,100	17,900	36,800	66,800	106,000	
80	42	89	167	343	514	989	1,580	2,790	5,680	10,300	16,700	34,200	62,100	98,400	
90	40	83	157	322	482	928	1,480	2,610	5,330	9,650	15,600	32,100	58,900	92,300	
100	38	79	148	304	455	877	1,400	2,470	5,040	9,110	14,800	30,300	55,100	87,200	

Fig. 2 Tabla de distintos tamaños de tubería con respecto y sus respectivos flujos a una caída de presión de 3 In. w.c. de la NFPA 54 The National Fuel Gas Code

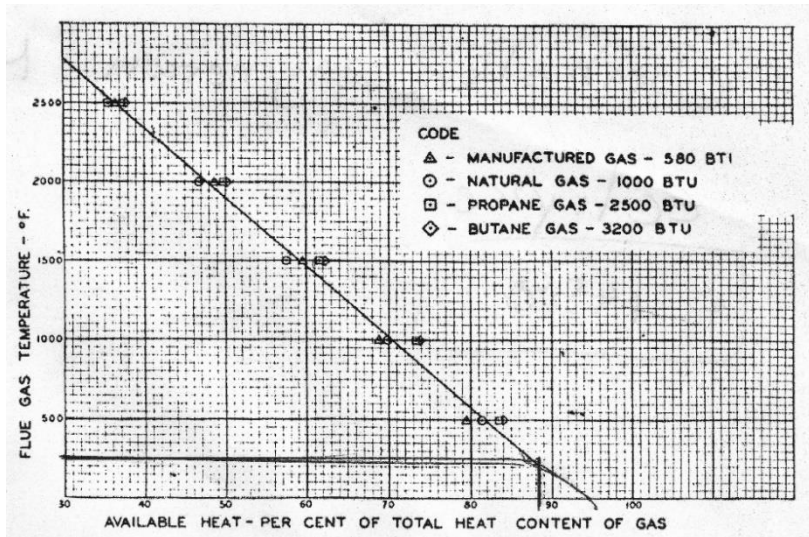


Fig. 3 Calor porcentual disponible del contenido total de calor gas contra temperatura. The Engineering Guide de ECLIPSE INCORPORATION

CIUDAD	ALTITUD		FACTOR	OTROS DATOS UTILES			
	Metros	Pies		Pres. Atmosf. Abs. (psi.)	Temp. Media Annual °C.	Temp. Media Annual °F.	Velocidad (Ciclaje)
Acámbaro, Gto.	1810.0	6035.0	0.82	11.7	17.10	60.0	110/110.0
Acapulco, Gro.	3.0	9.85	0.997	11.7	26.50	60.8	120/121.0
Agua Calientes, Ago.	1814.0	6179.5	0.7985	11.6	22.25	71.6	108/120.0
Apam, Hgo.	2190.0	8167.0	0.7350	10.7	19.13	66.2	116/123.0
Campeche, Camp.	25.0	82.0	0.9779	11.7	21.80	77.0	120/123.0
Col. Carmen, Camp.	3.0	9.85	0.997	11.7	27.0	80.6	120/127.0
Colima, Gto.	1754.0	5851.5	0.8081	11.85	21.30	69.8	110/110.0
Col. Juárez, Chih.	1337.0	4389.4	0.8711	12.75	17.80	61.1	120/121.0
Col. Victoria, Tamps.	536.0	1758.0	0.9300	13.75	25.30	77.3	120/110.0
Colima, Col.	486.0	1594.0	0.9368	13.80	21.10	75.7	120/125.0
Córdoba, Ver.	917.0	3007.0	0.8971	13.10	20.60	68.3	116/125.0
Culiacán, Sinal.	40.0	131.0	0.9600	11.7	21.50	75.8	120/120.0
Cuernavaca, Mor.	1538.0	5044.0	0.8258	12.2	20.10	68.2	120/110.0
Chilpancingo, Chih.	1112.0	3631.4	0.8396	12.35	19.10	66.7	110/110.0
Chilpancingo, Gro.	1193.0	3913.0	0.8676	12.68	18.70	66.0	120/127.0
Chilpancingo, Gro.	1961.0	6411.9	0.7930	11.15	19.00	66.2	110/110.0
Chilpancingo, Gro.	2100.0	6898.0	0.7793	11.35	17.30	62.8	108/120.0
Chilpancingo, Gro.	13.0	42.6	0.9887	11.7	15.80	60.0	110/120.0
Chilpancingo, Gro.	2219.0	7278.3	0.7620	13.1	17.30	62.8	120/110.0
Chilpancingo, Gro.	1599.0	5211.9	0.8235	11.2	18.70	66.0	120/125.0
Chilpancingo, Gro.	2014.0	6701.3	0.7810	11.15	17.70	63.8	160/110.0
Chilpancingo, Gro.	4.0	13.1	0.996	11.7	25.20	77.1	120/127.0
Chilpancingo, Gro.	216.0	708.48	0.950	11.2	23.70	73.7	120/127.0
Hermosillo, Son.	1785.0	5851.8	0.800	11.85	20.60	68.3	110/110.0
Isapunto, Gto.	1399.0	4589.7	0.8390	12.30	17.50	63.0	120/127.0
Jalapa, Ver.	18.0	59.0	0.988	11.7	21.60	75.9	120/127.0
La Paz, B. C.	8.0	26.2	0.995	11.7	26.90	80.0	120/110.0
Manzanillo, Col.	8.0	26.2	0.995	11.7	23.50	73.5	108/120.0
Merida, Yuc.	8.0	26.2	0.995	11.3	15.10	59.3	116/125.0
México, D. F.	2277.0	7501.5	0.722	13.1	22.30	71.8	120/115.0
Monterrey, N. L.	705.0	2312.1	0.7930	11.10	17.50	63.0	120/110.0
Morelia, Mich.	1950.0	6396.0	0.9360	13.80	23.20	71.6	115/110.0
Nueva Rosita, Coah.	130.0	410.1	0.9360	13.80	23.20	71.6	115/110.0
Oaxaca, Oax.	1516.0	5007.8	0.8298	12.25	20.30	69.6	120/117.0
Oaxaca, Oax.	1261.0	4145.9	0.8590	12.60	18.10	61.8	116/126.0
Orizaba, Ver.	2150.0	8036.0	0.7373	10.8	13.60	56.1	120/110.0
Pachuca, Hgo.	2172.0	7121.1	0.7606	11.25	16.10	60.9	116/125.0
Pachuca, Hgo.	1890.0	6166.4	0.7993	11.6	18.50	65.0	120/110.0
Pachuca, Hgo.	1890.0	6166.4	0.7196	10.15	11.50	58.3	120/110.0
Querétaro, Gro.	2721.0	8931.7	0.8290	12.20	17.60	63.3	108/120.0
Real del Monte, Hgo.	1585.0	5198.8	0.7813	11.50	16.20	61.0	120/110.0
Saltillo, Coah.	1978.0	6487.1	0.7990	11.7	13.10	61.8	110/110.0
San Juan del Río, Gro.	1890.0	6199.2	0.7800	11.7	17.80	61.0	110/110.0
San Luis Potosí, S.L.P.	1951.0	6399.20	0.7800	11.55	17.80	61.0	110/110.0
San Miguel Allende, Gto.	168.0	551.0	0.9200	11.5	25.60	77.7	120/115.0
Tampamolón, Gto.	952.0	3122.5	0.8871	13.5	20.50	69.2	120/110.0
Tehuacan, Hgo.	18.0	59.01	0.9880	11.7	21.20	75.6	120/120.0
Tehuacan, Hgo.	2252.0	7386.5	0.771	11.15	16.20	61.0	116/122.0
Tehuacan, Hgo.	2625.0	8610.0	0.721	10.70	13.20	55.8	120/110.0
Tehuacan, Hgo.	1140.0	3729.2	0.8710	12.75	20.60	69.1	108/120.0
Tehuacan, Hgo.	2089.0	6851.9	0.7880	11.1	17.50	63.1	120/110.0
Tehuacan, Hgo.	2161.0	7097.9	0.7691	11.5	11.50	58.2	120/110.0
Toluca, Gro.	316.0	1036.9	0.9368	13.6	23.70	71.1	120/117.0
Toluca, Gro.	11.0	36.0	0.996	12.1	25.10	77.1	116/125.0
Toluca, Gro.	11.0	36.0	0.7410	10.75	16.70	62.2	108/120.0

Fig. 4 eficiencia de la combustión a diferentes alturas, en cuadro rojo la ciudad de Toluca. The Engineering Guide de ECLIPSE INCORPORATION

Bulletin 71.1:CS400

Table 14. Type CS400 Internal Registration Flow Capacities for 1 psig / 69 mbar Setpoint at 1% ABS Accuracy

SETPOINT	ACCURACY		SET RANGE	PART NUMBER / COLOR
	+ / - 1% ABS			
1 psig	-0.16 psi	0.16 psi	18-inches w.c. to 1 psig	GE30225X012 / Orange
69 mbar	-11 mbar	11 mbar	45 to 69 mbar	

CAPACITIES IN SCFH / Nm ³ /h OF 0.6 SPECIFIC GRAVITY NATURAL GAS															
Inlet Pressure		Orifice Size, Inches / mm													
		3/16	4.8	1/4	6.4	5/16	7.9	3/8	9.5	1/2	13	5/8	16	3/4	19
psig	bar	SCFH	Nm ³ /h	SCFH	Nm ³ /h	SCFH	Nm ³ /h	SCFH	Nm ³ /h	SCFH	Nm ³ /h	SCFH	Nm ³ /h	SCFH	Nm ³ /h
Body Size: NPS 1-1/2															
2	0.14	270	7.2	490	13.1	740	19.8	960	25.7	1,100	29.5	1,200	32.2	1,500	40.2
3	0.21	370	9.9	680	18.2	950	25.5	1,000	26.8	1,500	40.2	1,900	51.0	2,300	61.7
5	0.34	540	14.4	930	24.9	1,100	29.5	1,600	42.9	2,400	64.4	3,300	88.5	4,200	113
10	0.69	820	22.0	1,300	34.8	1,800	48.3	2,700	72.4	4,400	118	5,600	150	6,000	161
15	1.0	1,000	26.8	1,800	48.3	2,500	67.1	3,700	99.3	5,500	148	5,600	150	6,000	161
20	1.4	1,100	29.5	2,100	56.3	3,300	88.5	4,600	123	5,500	148	5,600	150	6,000	161
30	2.1	1,500	40.2	2,800	75.1	4,700	126	5,500	148	5,500	148	5,600	150		
40	2.8	1,800	48.3	3,300	88.5	5,500	148	5,500	148						
50	3.5	2,200	59.0	3,900	105	5,500	148	5,500	148						
60	4.1	2,600	69.7	4,400	118	5,500	148	5,500	148						
80	5.5	3,300	88.5	4,400	118	5,500	148								
100	6.9	4,000	107	4,400	118	5,500	148								
125	8.6	4,000	107	4,400	118										

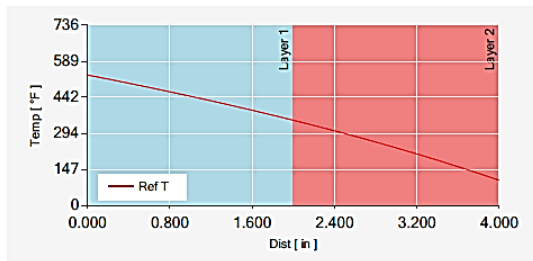
Fig. 5 Ficha técnica del regulador de presión CS400 de Fisher Emerson la cual se encuentran en su página de internet

Item ID = 1
 Item Description = Chamber Combustion 800°C ()
 System Application = Tank Shell - Horizontal
 Dimensional Standard = ASTM C 585 Rigid
 Calculation Type = Heat Loss Per Hour Report
 Process Temperature = 1500
 Ambient Temperature = 75.0
 Wind Speed = 0.0
 Bare Metal = Steel
 Bare Surface Emittance = 0.8
 Insulation Layer 1 = Concreto aislante Legrit 135
 Outer Jacket Material = Aluminum, new, bright
 Outer Surface Emittance = 0.04

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°F)	Heat Loss (BTU/hr/ft ²)	Efficiency (%)
Bare	1475.8	20910.00	
Layer 1 (4.0)	575.7	675.60	96.77

DISCLAIMER OF WARRANTY - NO WARRANTIES. THIS SOFTWARE PRODUCT IS PROVIDED AS IS WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND. Refer to the full disclaimer of warranty under the "help" menu in the toolbar at top of the program for details.

Fig. 6 flujo de calor del recubrimiento refractario de la cámara de combustión

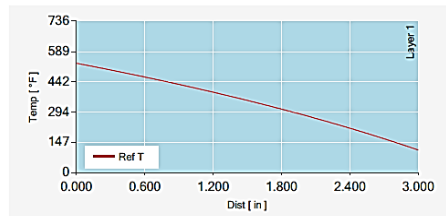


Refractory Heat Loss Analysis

Unit: English
 Num of Layers: 2
 Gas Type: Air
 Wall Type: Horizontal Cylinder
 Hot Temp: 536 °F
 Cold Temp: 80 °F
 Surface Type: Curved
 Radius: N/A
 Convection Type: Natural
 Air Velocity: N/A

L #	Thickness	Refractory Name	Max Lim	Hot Temp	Cold Temp	Avg Temp	H Loss
1	2.000 in	Maxwool HPS (2300) 8#	2150 °F	533.1 °F	348.6 °F	445.1 °F	127.5 *
2	2.000 in	Maxwool HPS (2300) 8#	2150 °F	348.6 °F	103.4 °F	233.2 °F	57.6 *
Total							185.1 ! btu/hr/ft²

Fig. 7 flujo de calor del aislante de lana mineral de la cámara de combustión



Refractory Heat Loss Analysis

Unit: English
 Num of Layers: 1
 Gas Type: Air
 Wall Type: Horizontal Cylinder
 Hot Temp: 536 °F
 Cold Temp: 80 °F
 Surface Type: Curved
 Radius: N/A
 Convection Type: Natural
 Air Velocity: N/A

L #	Thickness	Refractory Name	Max Lim	Hot Temp	Cold Temp	Avg Temp	H Loss
1	3.000 in	Maxwool HPS (2300) 8#	2150 °F	532.3 °F	110.0 °F	342.2 °F	139.1 *
Total							139.1 * ! btu/hr/ft²

Fig. 8 flujo de calor del aislante de lana mineral en la sección rotatoria

Apéndice B. Criterios de diseño

El diseño del sistema de combustión se basó en normas de la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) y de Factory Mutual (FM).

Para el diseño del sistema de tubería para el suministro de gas se utilizó los siguientes criterios:

Que hubiera en la tubería de suministro de gas principal una válvula de un cuarto de vuelta, tanto en la entrada del gas al sistema, como al quemador, una trampa de sedimentos, filtro de gas, un regulador de presión y al menos una válvula de cierre automática. De igual manera en la línea piloto.

Para el trazo inicial de la tubería, se realizó el isométrico en AutoCAD ®. para el cálculo de las caídas de presión se utilizó la fórmula de caídas de presión en tuberías para flujos compresibles simplificada del libro CRANE de flujo de fluidos y publicado por MCGRAW-HILL. Para los cálculos se utilizó Excel. Para el cálculo del diámetro de tubería se utilizó graficas proporcionadas por The Engineering Guide de HONEYWELL THERMAL SOLUTIONS. Una vez que ya se tenía la instrumentación seleccionada, el diámetro de la tubería idóneo, así como el trazo y la longitud de todo el sistema, se dibujó en 3D en AutoCAD ® para tener una visualización más realista del sistema antes de su construcción.

Para el sistema de control se siguieron igual recomendaciones de las normas entre las que incluían las siguientes recomendaciones:

Las señales al control deben ser generadas por dispositivos de detección individuales conectados a tomas de proceso separadas. Al menos por cada quemador se debe de incluir una válvula de cierre automático en la línea principal de gas y en la línea de piloto controlada por el circuito de control. El sistema debe de tener presostatos que manden una señal de alerta al control cuando el sistema se encuentre en una condición peligrosa de presión. En la cámara de combustión debe haber instrumentación para garantizar una combustión segura. Debe de haber un detector que pueda informar al control la presencia de la flama en todo momento y al momento de no detectar flama tiene que mandar a cerrar el suministro del

combustible y generar una señal eléctrica a algún dispositivo de alerta visual o auditivo. El inicio de la combustión tiene que ser por la emisión de una chispa generada inmediatamente de la abertura del combustible. El circuito de control debe garantizar una sintonía en el encendido. La instrumentación recomendada es una varilla de ignición y un transformador de voltaje que genere un incremento en el voltaje suficiente para llegar a la temperatura de ignición del gas.

En los procesos el sistema de control debe garantizar

La sincronización para el encendido, el control de la llama y la purga de gas.

Proporcionar entrada de combustible y de aire, y su relación aire/combustible dentro de los límites de diseño en todo el rango operativo del quemador.

Generar alarmas para indicar el mal funcionamiento del equipo o si se encuentra en condiciones peligrosas.

En este caso se planteó un ascendido con todas las recomendaciones de seguridad antes descritas, además de que se planteó un sistema de alerta para condiciones peligrosas de presión de gas y de temperatura. Para este proceso en específico se puso un control de temperatura.

Para hacer los dibujos conceptuales se utilizó la simbología de la normatividad ISA y de igual manera en AutoCAD ® se realizó el diagrama para entregárselo a los ingenieros en control y automatización para hacer el diagrama eléctrico. Para el planteamiento de las secuencias de los diagramas lógicos de control se utilizó Bizagi Modeler ® que es un software para creación de mapas lógicos y de mapeo de operaciones.

V. Bibliografía:

Raymond Chang. (2010). Química. México: Mc Graw-Hill Interamericana Editores.

Çengel, Y. (2007). Transferencia de Calor y masa. Un Enfoque Práctico. México: Mc Graw-Hill Interamericana Editores.

Donald q. Kern. (1965). Procesos de transferencia de calor. México: Compañía Editorial Continental.

Trinks, W & Mawhinney, M. (1971). Hornos industriales volumen 1. España: Ediciones URMO.

Trinks, W & Mawhinney, M. (1971). Hornos industriales volumen 2. España: Ediciones URMO.

Deshukh, Y. (2005). Industrial Heating: Principles, techniques, applications and design. United States of America: CRC press. Taylor & Francis Group.

Mullinger, P & Jenkins, B. (2014). Industrial and Process Furnaces: principles, design and operation. United States of America: Elsevier.

Industrial Heating Equipment Association. (1988). The combustion division of the Combustion Technology Manual. United States of America: The combustion division of the Industrial Heating Equipment Association.

Sigüenza G. (2000). Manual del curso básico de Combustión Industrial. México: Especialización en combustión S.A.

Warnatz, U. Mass, R. Dibble, W. (2006). Combustion, physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, Experiment, pollutant formation. Germany: Springer.

Engineering Division Crane. (1965) Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe. United States of America: Crane Corporation.

Bird, R. B. Warren E. S & Lightfoot, E. (2006). Fenómenos de Transporte. México: Limusa Wiley.

Stephanopoulos, G. (1984). Chemical process Control. An introduction to theory and practice. United States of America: Prentice Hall.

Babatunde A. W. & Harmon R. (1994). Process Dynamics, Modeling and control. United States of America: Oxford University Press.

Coughanowr, D. (1991). Process Systems Analysis and Control. Singapore: McGraw-Hill International.

Michael L. Luyben L. (1997). Essentials of Process Control. Singapore: McGraw-Hill International.

Smith, C & Corripio, A. (1991). Control Automático de procesos. Teoría y Práctica. México: Editorial Limusa.

Hernández, M. (1984) Selección y diseño de un quemador elevado. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico industrial. Instituto politécnico nacional, Escuela superior de Ingeniería química e industrias extractivas, Ciudad de México, México.

Quinatoa A. (2015). Automatización del compresor witteman #1 en la planta de CO2 de la empresa linde ecuador S.A. Tesis para obtener el título de ingeniero en electrónica y control. Escuela politécnica nacional, Facultad de ingeniería eléctrica y electrónica, Quito, Ecuador.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010. Especificaciones del gas natural

Norma Oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010. Instalaciones de aprovechamiento de gas natural

Factory Mutual Insurance Company. (October 1989). Data Sheet 6-0, Elements of Industrial Heating Equipment. Octubre 2018, de FM Global Sitio web:

<https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>

Factory Mutual Insurance Company. (July 2014). Data Sheet 6-4, Oil- and Gas-Fired Single-Burner Boilers. Octubre 2018, de FM Global Sitio web:

<https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>

Factory Mutual Insurance Company. (July 2014). Data Sheet 6-9, Industrial Ovens and Dryers. Octubre 2018, de FM Global Sitio web:

<https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>

Factory Mutual Insurance Company. (April 2012). Data Sheet 6-10, Process Furnaces .de FM Global Sitio web: <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>

Factory Mutual Insurance Company. (April 2012). Data Sheet 6-17, Rotary Kilns and Dryers .de FM Global Sitio web: <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>

Factory Mutual Insurance Company. (October 1998). Data Sheet 7-45, Instrumentation and Control in Safety Applications. .de FM Global Sitio web: <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>

Factory Mutual Insurance Company. (June 2009). Data Sheet 7-54, Natural Gas and Gas Piping. .de FM Global Sitio web: <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>

NFPA 54. (2005). The National Fuel Gas Code 2006. United States of America: The national Fire Protection Association and the American Gas Association.

NFPA 85. (2014). Boiler and Combustion Systems Hazards Code 2015. United States of America: The national Fire Protection Association.

NFPA 86. (2006). Standard for Ovens and Furnaces 2007. United States of America: The national Fire Protection Association.

Norma ISA ANSI/ISA-S5.1 The International Society of Automation www.isa.org

Serrano, J. Carranza. (diciembre 2005). Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural. Scientia Et Technica, XI, pp. 139-143.

Carlos Velasco Hurtado. (2014). Efectos de la altitud sobre la combustión. Revista metalúrgica, 35, pp. 20-29

Alexandri, R. Rodríguez F. Higuera, A. García, E. Ramírez, T. (2017). Prospectiva de gas natural 2017-2031. De Secretaría de Energía. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. Sitio web:

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284343/Prospectiva de Gas Natural 2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284343/Prospectiva_de_Gas_Natural_2017.pdf)

Ricardo García San José. (noviembre 2001). Combustión y Combustibles. Noviembre 2018, de coursehero Sitio web:

<https://www.coursehero.com/file/29730408/Combustion-y-combustiblespdf/>

Departamento de Ingeniería Mecánica Programa Vespertino de Prosecución de Estudios Ingeniería de Ejecución en Mecánica. Asignatura Contaminación ambiental y desarrollo sustentable fenómeno de la combustión. Noviembre 2018, de Universidad de Santiago de Chile. facultad de ingeniería Sitio web:

<https://www.fing.usach.cl/>

Victoria M. (junio 2, 2010). El hombre antes y después del fuego de Prometeo: entre antropología y mitología. Octubre 2018, de Universidad de Alicante.

Departamento de Prehistoria, Arqueología, Historia Antigua, Filología Griega y Filología Latina Sitio web: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/14125>

Aguilar F. (2017). La evolución del diseño de quemadores para hornos cementeros en el siglo XX. Noviembre 2018, de DOCPLAYER Sitio web:

<https://docplayer.es/22945120-La-evolucion-del-diseno-de-quemadores-para-hornos-cementeros-en-el-siglo-xx.html>

Folliot A. (octubre de 1957). Transmisión del calor en el horno rotatorio para cemento. Materiales de Construcción, 7, pp. 0-12. Sitio web:

<http://materconstrucc.revistas.csic.es>

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:PmU2YfCRnZ8J:materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/download/2074/2583+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx>

Eclipse, Inc. (1986). Engineering Guide: Eclipse combustion. Noviembre 2018, de mathscinotes Sitio web: <http://mathscinotes.com/wp-content/uploads/2014/12/Eclipse-Engineering-Guide.pdf>

Dirección General de Gas Natural y Petroquímicos. (Julio 2018). Prontuario estadístico Julio 2018. Noviembre 2018, de Unidad de Políticas de Transformación Industrial Subsecretaría de Hidrocarburos Secretaria de energía. Sitio web: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/347189/Prontuario Julio 2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/347189/Prontuario_Julio_2018.pdf)

PEMEX. (Julio 2000). Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas. Gas natural PEMEX, Gas y petroquímica básica. Noviembre 2018, de PEMEX GAS Sitio web: http://www.gas.pemex.com.mx/NR/rdonlyres/1D3E1128-E8A5-4CD1-B04C-DBC7CEFC0592/0/msdsgasnatural_02.pdf