



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Reducción del consumo de gas natural en el horno #4 de
la empresa Eurocerámica S.A mediante la regulación de
la relación estequiométrica aire/combustible en
quemadores industriales de alta velocidad.**

Autor

Román Sánchez Monsalve

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería química

Medellín, Colombia

2020



Reducción del consumo de gas natural en el horno #4 de la empresa Eurocerámica S.A mediante la regulación de la relación estequiométrica aire/combustible en quemadores industriales de alta velocidad.

Román Sánchez Monsalve

Informe de práctica
como requisito para optar al título de:
Ingeniero químico.

Asesores.

Juan Esteban Parra Henao – Ing. Mecánico

Juan Miguel Marín Sepúlveda – PhD, MsC, Ing. Químico

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería química
Medellín, Colombia
2020.

ÍNDICE.

Resumen	4
Introducción	5
Objetivos	6
Marco teórico	7
Metodología.....	50
Resultados y análisis.....	62
Conclusiones y recomendaciones	93
Referencias bibliográficas.....	96
Anexos.....	99

Reducción del consumo de gas natural en el horno #4 de la empresa Eurocerámica S.A mediante la regulación de la relación estequiométrica aire/combustible en quemadores industriales de alta velocidad.

Resumen.

Este proyecto se desarrolló con el objetivo de disminuir el consumo de gas natural en el horno #4 de la empresa Eurocerámica S.A, así como la reducción de los niveles en los demás indicadores clave (consumo específico de energía, emisión de gases de combustión). Para lograr esto, se llevaron a cabo 36 experimentaciones en un banco de pruebas para quemadores industriales a gas natural para diferentes combinaciones de cúpulas (60 mm, 500x40 mm, Ray) y quemadores (Modena y TCK), luego, con los datos obtenidos de las variables respuesta (Longitud de llama, consumo de gas, consumo de aire, temperaturas a diferentes distancias de la cúpula, porcentajes de CO₂, O₂, eficiencia de la combustión, exceso de aire, concentración de CO, NO_x, SO₂), se implementó un análisis de diseño de experimentos factorial 2² en Statgraphics® con presión de aire y presión de gas en el quemador como variables de entrada para la obtención de contornos y superficies de respuesta generados, con los cuales, además de curvas características de combustión realizadas en Excel®, se plantearon las condiciones de operación de presión de aire y presión de gas más adecuadas para las combinaciones cúpula-quemador analizadas, algunas de las cuales, se implementaron en el horno #4, que, con los respectivos ajustes, permitieron lograr una disminución en el consumo de gas natural del 1 al 2 %, del 1.1 al 1.9% en el consumo específico de energía y de aproximadamente el 2% en emisiones de CO₂ y 4% de NO_x en los gases de combustión.

Palabras clave: Combustión, horno monoestrato de rodillos, gases de combustión, cocción cerámica, ciclo de cocción, gas natural, quemador industrial de alta velocidad, banco de pruebas para quemadores industriales.

Introducción.

A lo largo de su historia y hasta el día de hoy, la industria cerámica ha sido gran consumidora de energía, por lo cual, siempre se ha buscado optimizar los procesos que se llevan a cabo, haciéndolos más eficientes, haciendo uso de combustibles más versátiles y en busca de reducir su consumo, además, con el auge de la sostenibilidad ambiental, buscando reducir las emisiones de contaminantes y los materiales de desecho que pudiesen surgir. No ajeno a esto, la empresa Eurocerámica S.A ha venido adelantando un proyecto para la reducción de consumo de gas natural en sus hornos, puesto que, para sus operaciones corrientes, se tiene un elevado consumo de gas natural en la cocción de la baldosa, implicando también un alto consumo específico de energía de sus productos y emisión de gases de combustión. La problemática, surge a raíz de la operación de los quemadores que componen el horno, pues algunos de ellos no están funcionando en sus condiciones más óptimas, ya que no se han establecido, para las condiciones de la empresa, cuál sería el rango más adecuado para la operación de cada uno de ellos. Con el planteamiento del programa de uso racional de recursos energéticos en la empresa para la línea de hornos, primero, se ha adelantado la construcción de un banco de pruebas para quemadores industriales a gas natural y la adquisición de un analizador de gases y posteriormente, con este proyecto lo que vendría siendo la puesta en marcha del equipo (banco de pruebas) para la obtención y análisis de datos y el inicio de la implementación en los hornos existentes (y futuros) de las condiciones más adecuadas para la operación de cada uno de los quemadores. Con esto, se busca comparar un antes y un después de los indicadores clave en los hornos (consumo neto de gas natural, consumo específico de energía y niveles de emisión de gases de combustión), y de ser necesario, hacer correcciones y llevar a cabo nuevos acondicionamientos en los quemadores, para alcanzar bajar el nivel de los indicadores anteriormente mencionados.

Con la implementación de las estrategias descritas e implementadas a lo largo de este proyecto, se busca entonces en un futuro reducir, de forma gradual, en un porcentaje apreciable, el nivel de los indicadores actuales de la empresa para cada uno de sus hornos, bajando así los niveles de contaminación y disminuyendo los rubros energéticos por parte de la cocción en hornos en los costos de producción.

Objetivos.

Objetivo general.

Reducir el consumo de gas natural en el horno #4 de la empresa Eurocerámica S.A por medio de la regulación de la relación estequiométrica aire/combustible en cada quemador.

Objetivos específicos.

- Disminuir en el horno #4 el indicador de consumo específico de energía.
- Bajar los niveles de emisiones de NO_x y CO_2 de los gases de combustión.
- Reducir el rubro de energéticos en los costos de producción.

Marco Teórico.

Los fundamentos básicos para este proyecto están basados principalmente en la fenomenología de la combustión del gas natural, así como todos los fenómenos fisicoquímicos que esto involucra como es la transferencia de masa, momentum y calor y la mecánica de fluidos; aparte de estos principios, se hace necesario una descripción de los equipos y elementos físicos que se abordan en todo el proyecto como lo son un horno monoestrato de rodillos y sus partes, un banco de pruebas de quemadores industriales a gas natural y el analizador de gases de combustión. Por otro lado, se describe el control de un horno monoestrato de rodillos y el tratamiento que se le hace a los datos recolectados en el banco de pruebas mediante un diseño de experimentos factorial.

Fabricación de baldosas cerámicas.

Las baldosas cerámicas son materiales de construcción destinados al recubrimiento de suelos y paredes. Se componen de un cuerpo cerámico (soporte) de porosidad variable y, en la mayoría de los casos de una capa superficial de naturaleza vítrea (esmalte) ¹.

El proceso de fabricación de las baldosas cerámicas se desarrolla en fases sucesivas, que involucra la molturación por vía húmeda de las materias primas en molinos rotatorios de bolas, el atomizado de la pasta resultante (barbotina) y la conformación de las piezas mediante un prensado uniaxial, posterior secado y esmaltado del soporte que continúa en la cocción de la pieza y por último la clasificación y empaque del producto terminado. En la *figura 1* se muestra las etapas principales de manera secuencial ¹.

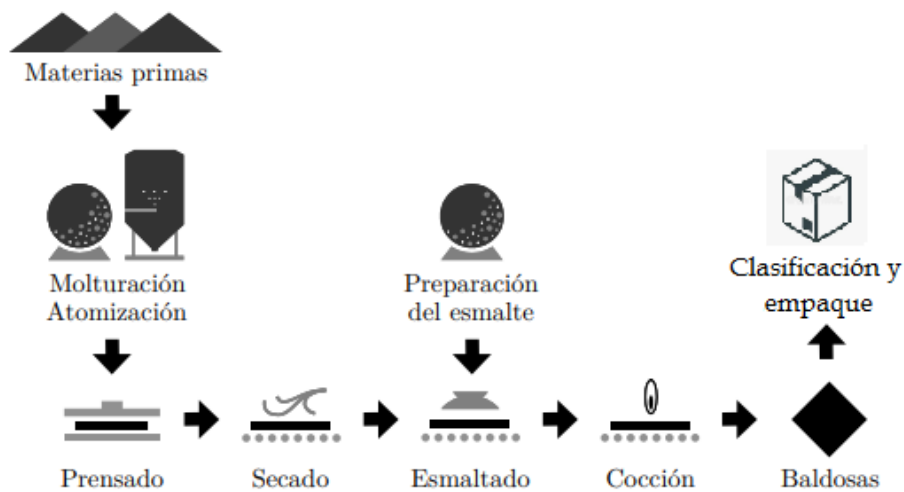


Figura 1. Proceso de fabricación de baldosas cerámicas por monococción (Adaptado de ¹).

El proceso de fabricación de las baldosas comienza con las materias primas que componen el soporte, entre ellas están fundamentalmente las arcillas, caolines, feldspatos, cuarzo, carbonatos, retazos de baldosa averiados y otras de acuerdo a las necesidades requeridas. Para asegurar una homogenización del material se parte de una molturación primaria en trituradora de martillos y la separación de material ferromagnético con el uso de imanes ^{1,2}.

Luego de la homogenización, las materias primas se someten a una molturación por vía húmeda en molinos de bolas, donde se obtiene luego de unas 2.5h una suspensión llamada barbotina. A esta suspensión se le elimina gran parte del agua que contiene mediante el proceso de secado por atomización en el cual la suspensión entra en contacto con una corriente de vapor caliente, obteniéndose un producto granular con un contenido de agua aproximado del 7%p/p ^{1,2}.

Una vez termina el tratamiento que se le hace a las materias primas del soporte, el material pasa a la etapa de conformado, donde por medio de prensas hidráulicas y con una presión programada de 300bar queda formado un bizcocho, el cual posee demasiada fragilidad, por lo que se hace necesario bajar aún más el porcentaje de humedad de la pieza; para esto se sigue a una etapa de secado en secadores verticales rotativos, donde el soporte sale con una humedad aproximada del 2%p/p ^{1,2}.

Luego de bajar el porcentaje de humedad, el soporte recibe las capas de engobe y la de esmaltado por medio de cortinas de las suspensiones de estos materiales, cubriendo en su totalidad lo que va a ser la parte superior de la pieza. De acuerdo a si la pieza adicional a las capas anteriores lleva un decorado, pasan por serigrafía o impresión digital para darles este terminado. Los esmaltes y engobes están compuestos por fritas y material no fritado, los cuales se molturan en molinos de bolas hasta obtener una suspensión acuosa que serán las que formarán las cortinas por donde pasa en continuo el soporte ^{1,2}.

Al terminar la etapa de esmaltado, a la pieza se le realiza un proceso de cocción conjunta del esmalte y el soporte en el proceso de monococción, donde se somete a un ciclo térmico con una serie de transformaciones en la pieza, que provocan cambios en la microestructura y confieren las propiedades finales del producto terminado ^{1,2}.

Para finalizar el proceso, las baldosas son inspeccionadas, clasificadas y empacadas. Primero un operario da una inspección visual con posibles defectos de la baldosa y las clasifica de primera, segunda o tercera calidad,

luego pasan a una máquina que las separa de acuerdo a la calidad y tamaños y por último se empaacan con embalaje de cartón donde está contenido la información correspondiente y se realizan los amarres necesarios para poder ser transportadas ^{1,2}.

Cocción de la baldosa cerámica.

El proceso de cocción de la baldosa cerámica consiste en someter la pieza a un tratamiento térmico controlado mediante una curva de cocción en un horno especial para este uso, aquí ocurren una serie de transformaciones fisicoquímicas irreversibles en el material que modifican la microestructura y le son conferidas las propiedades y características finales de producto terminado (dimensionalidad, planaridad, ortogonalidad, tonalidad, resistencia mecánica, resistencia a la abrasión y resistencia a ataques químicos, baja porosidad y acabados superficiales, entre otros); por lo tanto, en este sentido la etapa de cocción resulta ser la más importante de todo el proceso de fabricación de baldosas cerámicas ¹. En la *tabla 1* se listan en orden creciente de temperatura las transformaciones fisicoquímicas que tienen lugar en el proceso de cocción de las piezas cerámicas.

Tabla 1. Principales transformaciones fisicoquímicas que se dan durante la cocción de las baldosas (Adaptado de ¹).

Temperatura (°C)	Transformaciones implicadas
Ambiente- 150	Eliminación del agua libre
150-250	Eliminación del agua ligada. Descomposición de algunos hidratos de hierro
350-650	Eliminación del agua de constitución
400-600	Oxidación de sustancias orgánicas
573	Transformación polimórfica cuarzo $\alpha \rightarrow$ cuarzo β
700-800	Inicio de la fusión de los álcalis y óxidos de hierro
800-900	Descomposición de los carbonatos. Oxidación del carbón
1000	Inicio de la fusión de composiciones con CaO y FeO con formación de silicatos
1060-1100	Inicio de la fusión de feldespatos y formación de silicatos y aluminosilicatos
1100-1200	Continúa la formación de la fase vítrea con reducción de la porosidad

Puesto que el tratamiento térmico que se le realizan a las piezas se debe hacer de forma gradual, de tal forma que no ocurran aumentos abruptos de temperatura en instantes muy pequeños de tiempo, se lleva la cocción

a cabo en un plan conocido como ciclo o curva de cocción, donde se esquematiza el aumento y disminución de temperatura en el tiempo que demore el ciclo. De forma general un ciclo de cocción tiene las etapas mostradas en la *figura 2*.

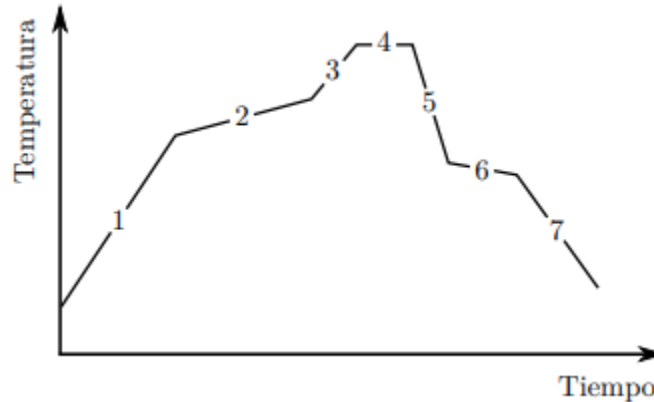


Figura 2. Curva típica de cocción (Tomado de ¹).

Etapa 1: Es la etapa inicial de calentamiento. Aquí un factor que puede limitar la velocidad de calentamiento es la humedad residual en las piezas, donde un valor excesivo ocasionaría la explosión de las mismas y una velocidad de calentamiento muy elevada causaría rotura ¹.

Etapa 2: De oxidación y descomposición. Se produce la oxidación de compuestos de carbono y formas reducidas de óxido de hierro, así como la descomposición de carbonatos de calcio y de magnesio, todas estas reacciones deben haber culminado antes de producirse la fusión del esmalte, por ello es reducida la velocidad de calentamiento ¹.

Etapa 3: Finalización del calentamiento. Una vez se completan las reacciones químicas en los intervalos apropiados, se incrementa nuevamente la velocidad de calentamiento, permitiendo que se comience a fusionar el esmalte de la pieza ¹.

Etapa 4: Cocción con sostenimiento de temperatura. Se lleva a cabo a una temperatura entre 1100 y 1200 °C, la cual varía en función del producto. Aquí es donde en gran medida se alcanzan las especificaciones finales de la pieza terminada ¹.

Etapa 5: Enfriamiento rápido. Puesto que el material antes de llegar de nuevo a los 573 °C (transformación polimórfica del cuarzo) tiene una elevada resistencia al choque térmico, se realiza esta etapa con un descenso rápido de la temperatura ¹.

Etapa 6: Enfriamiento lento. A una temperatura cercana a los 573 °C la resistencia al choque térmico del material disminuye en gran medida por la transformación polimórfica del cuarzo β en cuarzo α , lo que limita la velocidad de enfriamiento entre el intervalo que contiene la temperatura señalada ¹.

Etapa 7: Enfriamiento final. Una vez superado el punto crítico de la transformación polimórfica del cuarzo, las piezas nuevamente se enfrían lo más rápido posible ¹.

La fabricación de baldosa cerámica implica elevados consumos energéticos, entre los cuales el que lleva la mayor parte es el consumo de energía térmica aprovechada de la combustión de combustibles fósiles, y en un menor porcentaje está el uso de energía eléctrica que es consumida principalmente en las etapas de molienda y prensado. Del consumo de energía térmica, una gran parte de esta estará destinada solo a la cocción del material cerámico, por lo cual, proyectos dirigidos a bajar niveles de este consumo son de gran importancia en este sector industrial. En la *figura 3* se pueden observar gráficamente las distribuciones de consumo de energía en una planta de producción de baldosa cerámica.

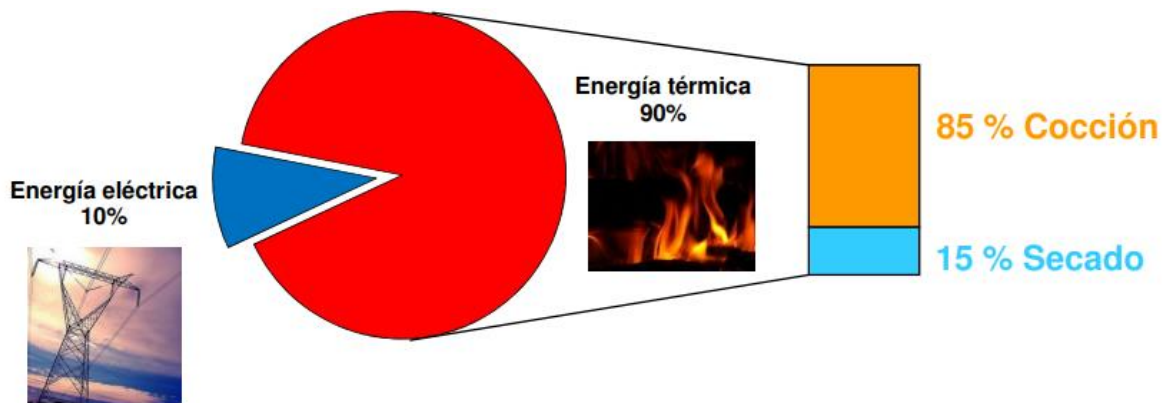


Figura 3. Distribución de consumo energético en una empresa de fabricación de baldosas cerámicas (Tomado de ³).

Combustión.

La combustión se trata de una reacción química de oxidación exotérmica, en la cual están involucradas la sustancia que se oxidará denominada combustible con otra sustancia que favorece la combustión denominada comburente, para el caso específico de este proyecto se usa gas natural como combustible y del oxígeno presente en el aire como comburente ⁴.

Para que ocurra la combustión se hace necesario que existan 5 condiciones fundamentales: presencia del combustible y del comburente, una fuente de energía para la ignición que puede ser calor o una chispa, que la concentración de combustible esté entre el intervalo de los límites de inflamabilidad (5 a 15 %v/v para el caso del gas natural) y un espacio con los elementos adecuados para que ocurra la combustión ⁵.

La combustión tiene lugar en tres fases, primero la pre-reacción donde se descompone el combustible y da lugar a la formación de radicales libres muy activos; segundo la oxidación, donde los radicales se combinan con el oxígeno de modo exotérmico y la llama es propagada; y como tercero y último está la fase de terminación donde se forman los compuestos estables finales o gases de combustión ⁶.

En el proceso de combustión pueden ser utilizados una gran cantidad de comburentes, pero por temas de economía y disponibilidad se usa en mayor medida el aire, siendo aprovechado la cantidad significativa de oxígeno que este posee. De igual forma, hay una amplia gama de combustibles que pueden ser usados en la combustión, tanto en fase sólida, líquida como gaseosa, siendo escogido alguno dependiendo de su uso en particular, el poder calorífico entregado por el mismo y la economía que implica, aunque en los últimos años se ha venido cambiando de algunos combustibles de uso tradicional por otros más limpios por temas medioambientales, ya que estos últimos generan menores emisiones contaminantes.

Tipos de combustión.

La combustión se puede clasificar en función del grado de oxidación que se logra con el combustible y la cantidad de aire que es suministrado, entre las que cabe destacar los siguientes tipos: la combustión completa, la combustión incompleta, la teórica o estequiométrica, la combustión con exceso de aire y la combustión con defecto de aire ^{4,7}.

Combustión completa.

Las sustancias combustibles se oxidan hasta el grado máximo posible, en consecuencia, no se obtienen inquemados y sustancias combustibles en los humos. Como productos de esta combustión han de esperarse el N₂, CO₂, H₂O y SO₂ ⁴.

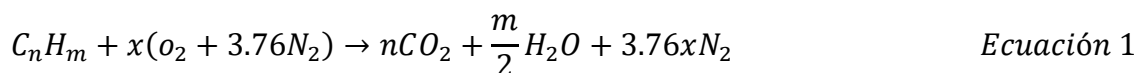
Combustión incompleta.

En este tipo de combustión, el combustible no se alcanza a oxidar por completo, formándose sustancias que todavía podrían seguir oxidándose

denominadas inquemados como el caso del CO. Otros inquemados que pueden surgir son el H₂, parte de hidrocarburos C_nH_m, H₂S y C. Por lo general estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera junto con los demás gases de combustión ⁴.

Combustión estequiométrica.

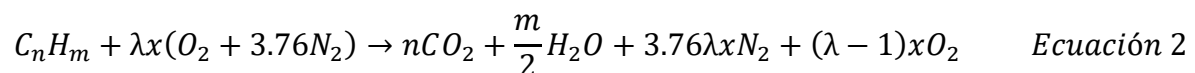
Es la reacción que se lleva a cabo con la cantidad de aire estrictamente necesaria para producir la oxidación completa del combustible sin producir inquemados, por lo tanto, en los humos no se encuentran estos ni oxígeno libre, pues todo se consume en la reacción. En la práctica no se logra alcanzar esta condición, puesto que, aunque sea en pequeñas proporciones se producen inquemados ⁴. En la ecuación 1 se ejemplifica la reacción que se lleva a cabo en este caso para un hidrocarburo de fórmula molecular C_nH_m ⁸:



Con $x = n + \frac{m}{4}$

Combustión con exceso de aire.

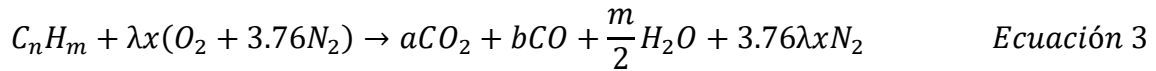
Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica, tiende a no producir inquemados, pero hay presencia de O₂ en los humos como consecuencia del aire adicional. Aunque esta combustión previene de cierto modo la combustión incompleta, el aire que no participa en la reacción se lleva parte del calor de la combustión, reduciendo la temperatura, la eficiencia y la longitud de la llama ⁴. En la ecuación 2 se ejemplifica este caso para un hidrocarburo de fórmula molecular C_nH_m ⁸:



Con $x = n + \frac{m}{4}$ y siendo λ la relación equivalente aire-combustible, en este caso mayor a 1.

Combustión con defecto de aire.

Para esta combustión el aire disponible es menor a la cantidad necesaria para la oxidación completa del combustible, por lo que se producen inquemados, no hay presencia de O₂ en los humos, pero si hay presencia de combustible que no se oxidó ⁴. En la ecuación 3 se ejemplifica este caso para un hidrocarburo de fórmula molecular C_nH_m ⁸:



Con $x = n + \frac{m}{4}$, $a = n(2\lambda - 1) + \frac{m}{2}(\lambda - 1)$, $b = 2n + \frac{m}{2} - \lambda(2n + \frac{m}{2})$, $a + b = n$ y siendo λ la relación equivalente aire-combustible, en este caso menor a 1.

Combustibles.

Como se expuso anteriormente, los combustibles pueden encontrarse en fase sólida, líquida y gaseosa, empleándose generalmente combustibles de origen orgánico como los hidrocarburos y el carbón.

Combustibles sólidos.

Con una forma y volumen definido, estos combustibles pueden tener procedencia natural u obtenerse artificialmente mediante técnicas de descomposición térmica o como residuos de otros procesos; este tipo de combustible precisa un área de almacenamiento en la instalación y se caracterizan por tener gran emisión de contaminantes locales (cenizas). A este grupo de combustibles pertenece el carbón, que se ha venido utilizando tradicionalmente en una amplia gama de industrias y es un combustible de gran disponibilidad ⁶.

Combustibles líquidos.

Mantienen un volumen definido, pero su forma varía con el espacio que lo contiene. Al igual que los combustibles sólidos, precisan de una zona de almacenamiento en la instalación. A este grupo de combustibles pertenecen las gasolinas, los gasóleos y los fuelóleos, todos ellos siendo importantes emisores de óxidos de azufre y nitrógeno ⁶.

Combustibles gaseosos.

Con forma y volumen variables, este tipo de combustibles no requiere necesariamente de depósitos de almacenamiento, y respecto a los combustibles líquidos posee una distribución y disponibilidad más estable. A este grupo pertenecen el metano, el propano, el butano, el gas natural, entre muchos otros ⁶.

Propiedades de los combustibles.

A nivel industrial existen varias propiedades en los combustibles que son de importancia y son estudiadas, puesto que de ellas se puede obtener información valiosa del combustible que se está utilizando o uno que se utilizará, a continuación, se mencionarán grosso modo algunas de ellas:

Poder calorífico.

Es la cantidad de energía desprendida por unidad de combustible en su combustión completa a presión atmosférica. Dependiendo de cómo aparece el agua en los humos se puede distinguir entre dos tipos de poder calorífico, el primero, el poder calorífico inferior (PCI) es el obtenido cuando el agua en los productos de combustión se encuentra en fase vapor, lo que implica que no todo el calor generado se aprovecha, sino que cierta parte fue destinado a la evaporación del agua; en términos prácticos y de uso común, este es el más utilizado. En otra parte se tiene al segundo, el poder calorífico superior (PCS), que es el calor generado cuando en los productos de combustión el agua se encuentra en forma líquida, osea que se aprovecha todo el calor y no se destina una parte a la evaporación del agua ⁶.

Relación aire-combustible estequiométrica (rac_{est}).

Es la relación entre la cantidad (másica, volumétrica, molar) de aire y la de combustible utilizado en una reacción de combustión estequiométrica. Esta relación es de gran importancia, ya que a partir de este punto se puede definir el aire necesario con el que se quiere llevar a cabo una combustión. En la *tabla 2* se muestran algunos de estos valores para combustibles líquidos y gaseosos de uso común:

Tabla 2. Relación aire-combustible estequiométrica para algunos combustibles de uso común (Adaptado de ^{9,10}).

Combustible	rac_{est} másica	rac_{est} volumétrica
Gasolina	14.7 : 1	----
Gas natural	17.2 : 1	9.7 : 1
Propano	15.67 : 1	23.9 : 1
Etanol	9.0 : 1	----
Metanol	6.47 : 1	----
n-Butanol	11.2 : 1	----
Hidrógeno	34.3 : 1	2.39 : 1
Diésel	14.5 : 1	----
Metano	17.19 : 1	9.52 : 1
Acetileno	13.26 : 1	11.92 : 1
Etano	16.07 : 1	16.68 : 1
Butano	15.44 : 1	30.98 : 1
Pentano	15.31 : 1	38.13 : 1

Relación equivalente aire-combustible (λ).

Es la relación entre la relación aire-combustible real que se está usando en la combustión y la relación aire-combustible estequiométrica de la misma ¹⁰.

$$\lambda = \frac{rac_{real}}{rac_{est}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Esta relación es de gran utilidad para definir la cantidad de aire en exceso con que se quiere llevar a cabo una combustión.

Energía de activación.

Es la energía necesaria para que se inicie la reacción de la combustión, ya que por si solos la mezcla de combustible y comburente no producen la reacción ⁶. En la *figura 4* se puede observar el desarrollo de una reacción de combustión del gas natural (compuesto principalmente por metano), donde se observa una energía de activación asociada a la temperatura de ignición.

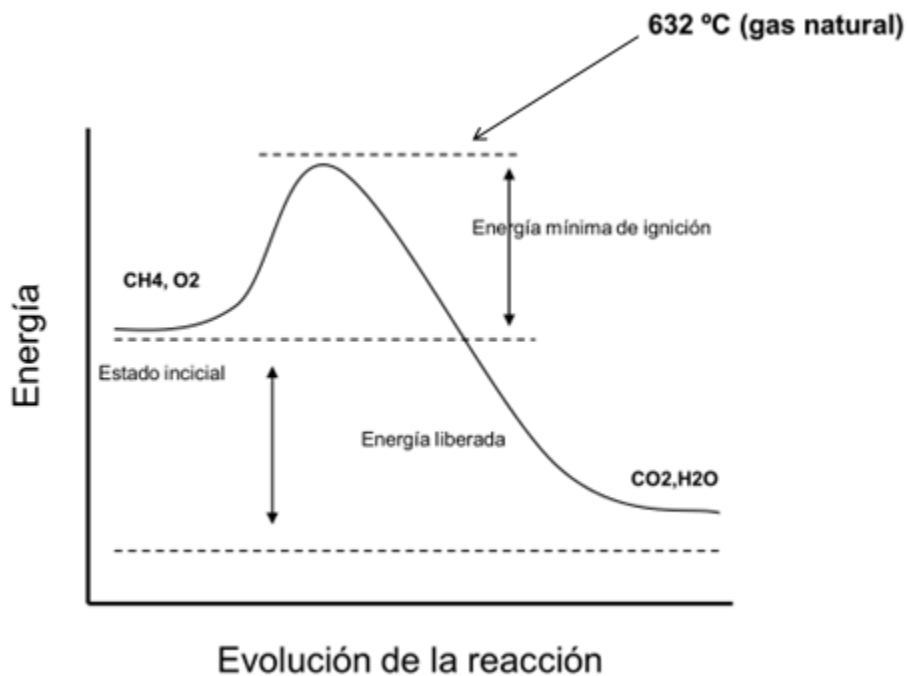


Figura 4. Desarrollo de una reacción de combustión y energías asociadas (Tomado de ¹¹).

Temperatura de ignición.

Es la temperatura mínima que la mezcla de aire y combustible debe alcanzar para que se produzca la combustión, una vez esta comienza, el calor producido mantendrá la temperatura por encima de la de ignición y

la reacción continuará hasta que se agote el combustible o el comburente⁴.

Composición.

La composición es fundamental para determinar parámetros estequiométricos de la combustión, además, puede ayudar a establecer si un combustible es apto o no para cierto uso, en función de la presencia de componentes que puedan ser nocivos o contaminantes. Para un combustible los componentes más habituales son: hidrocarburos (C_nH_m), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2), dióxido de azufre (SO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua (H_2O)⁴.

Viscosidad.

Es una propiedad intensiva de especial importancia en los combustibles líquidos, pues ayuda a determinar la forma y velocidad de aspersion de las partículas para realizarse la combustión⁴.

Densidad.

Es otra propiedad intensiva con la cual se puede determinar gran cantidad de condiciones para que se pueda llevar a cabo la combustión, al igual que la viscosidad, su valor puede tener una gran dependencia de la temperatura en donde se encuentre el combustible. Para todo tipo de combustible se usa la densidad absoluta [kg/m^3], pero para combustibles líquidos y gaseosos se puede usar la densidad relativa que es adimensional, teniendo como referencia el agua y el aire respectivamente⁴.

Límite de inflamabilidad.

Es una propiedad usada en combustibles gaseosos y establece una proporción de gas y aire necesaria para que se pueda producir la combustión en un rango delimitado por un límite inferior y uno superior⁴.

Índice de Wobbe.

Matemáticamente es la relación entre el poder calorífico (superior o inferior) de un gas por unidad de volumen y la raíz cuadrada de su densidad relativa con respecto al aire, bajo las mismas condiciones de referencia¹².

Es un parámetro que representa la energía de un combustible gaseoso que es inyectado a un quemador. Es una de las condiciones de mayor relevancia a la hora de revisar la intercambiabilidad de un gas, que a su vez es la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro en un equipo

de combustión, de manera que, sin realizarle ningún ajuste, no presente diferencias desde el punto de vista de seguridad operacional, eficiencia, desempeño o principales características de emisiones al medio ambiente ¹².

Temperatura teórica de combustión.

Es aquella temperatura que alcanzarían los productos de la combustión si todo el calor máximo de la reacción fuese empleado para su calentamiento, puesto que siempre existen pérdidas de calor, esta temperatura en la práctica no se consigue ¹³. Las principales pérdidas de calor que no permiten alcanzar esta temperatura son con elementos físicos que componen el quemador, la cámara de combustión y otros elementos presentes en el medio, así como la transferencia de calor que ocurre con el ambiente debido a un aislamiento ineficiente, también, al ingresar aire en exceso, todo el aire de más que no está siendo ya utilizado para la reacción de combustión, está siendo calentado, lo que no permite alcanzar a los productos de combustión la temperatura máxima teórica posible. En la *figura 5*, se puede ver esta temperatura en función del exceso de aire para el gas natural.

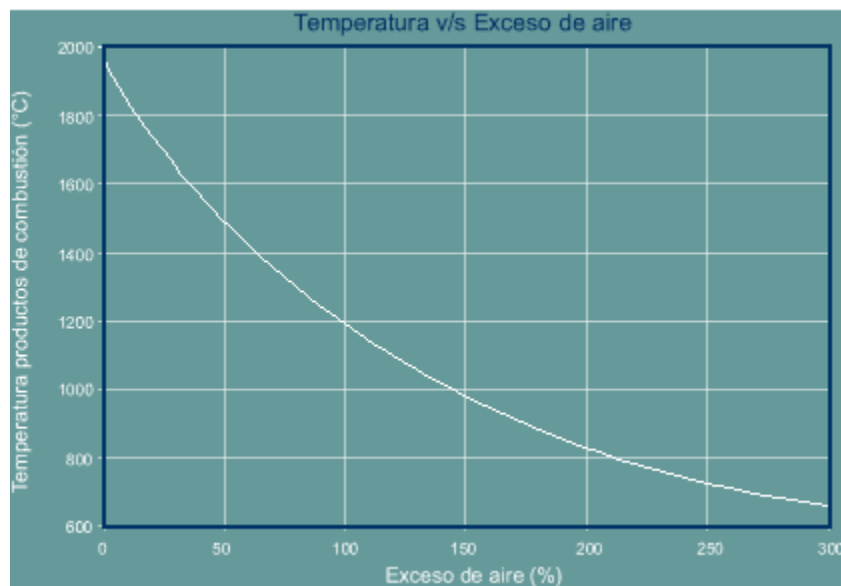


Figura 5. Temperatura vs exceso de aire para el gas natural (Tomado de ⁵).

Del grupo de combustibles gaseosos se destaca el gas natural como un combustible de amplio uso en diversos sectores, y como principal y único constituyente combustible de este proyecto, por lo tanto, se ahonda un poco el tema sobre el mismo.

Gas natural.

Es una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, compuesta principalmente por metano, etano, propano y butano, con impurezas de dióxido de carbono y nitrógeno. Este gas es extraído del subsuelo y comercialmente le es agregado mercaptano como odorizante, para facilitar la detección de fugas, luego es transportado por gasoductos de acero y de polietileno para su consumo en hogares, comercios e industrias ¹⁴.

Este combustible es considerado como el tipo de energía más amigable con el ambiente, ya que no contiene en su composición contaminantes en proporciones significativas a si se le compara con otros combustibles, además su emisión de CO₂ por unidad de energía entregada es mucho menor ¹⁴.

En Colombia, las principales fuentes de gas natural se encuentran en la Guajira y los llanos orientales. El gas de la Guajira es un gas con gran cantidad de metano en su composición, al cual hay que realizarle solamente un proceso de deshidratación para la remoción del vapor de agua, por el contrario, el gas de los llanos tiene una importante composición en etano, así como CO₂ y N₂, por lo que hay que realizarle aparte de la deshidratación, procesos de endulzamiento para la captura de CO₂ y H₂S ¹². A pesar de que hay diferencias notables en la composición del gas natural que se usa en el país, no se presenta con ninguno problemas de intercambiabilidad al sustituir por ejemplo un gas de la Guajira por uno de los llanos, ya que la variación de sus índices de Wobbe cumplen dentro de normas internacionales y la operación de los equipos no sufre gran variación por este cambio ^{12,15}.

Los principales usos del gas natural están en el consumo doméstico y comercial como fuente energética para calentamiento; en el sector industrial es usado también como una fuente primaria de combustible en hornos, secadores y calderas, así como materia prima por su elevada composición en metano para la producción de metanol, ácido acético, anhídrido acético, entre muchos otros ¹⁴.

La eficiencia de la combustión es la relación entre el calor útil o teórico que puede ser entregado por el combustible y el calor real que es entregado por el mismo, puesto que estos valores difieren, se puede asociar las pérdidas principalmente al calor contenido en los gases de escape en los equipos que se realiza la combustión y también una parte al aire en exceso que se haya suministrado a la combustión, así como pérdidas de calor con los

alrededores y elementos del equipo en cuestión. Dicho lo anterior, como existe una relación directa entre estos factores descritos, se puede encontrar gráficamente una relación como se muestra en la *figura 6*, para el caso de eficiencia en hornos y calderas que hacen uso de gas natural como combustible.

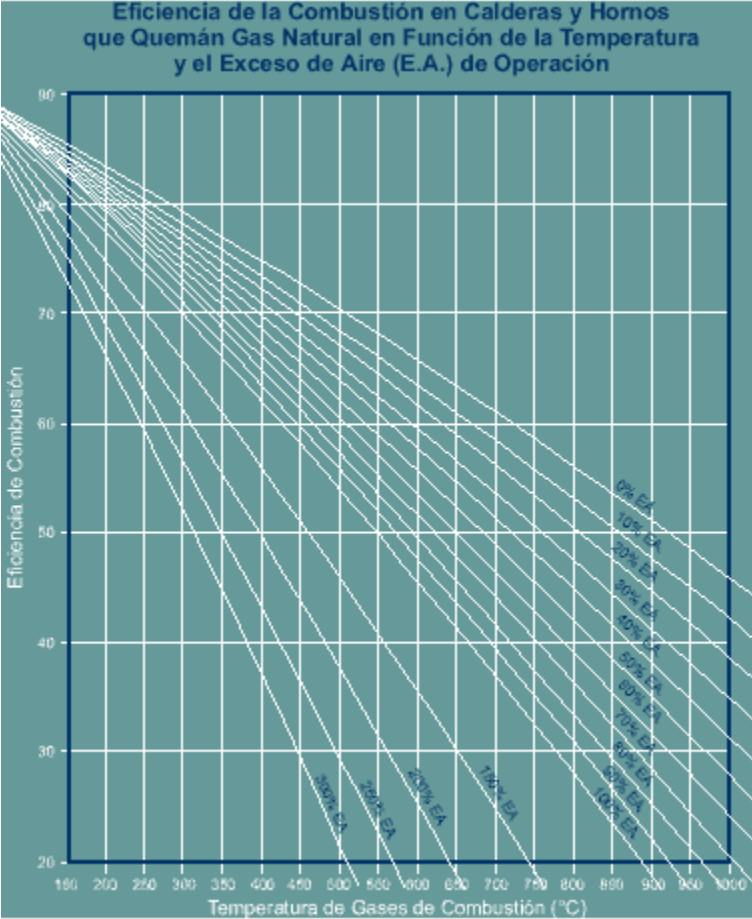


Figura 6. Eficiencia de la combustión en calderas y hornos que usan gas natural (tomado de 5).

En el caso del gas natural colombiano, en la *tabla 3* se puede observar la composición de los gases de la Guajira y los llanos orientales (Cusiana), además de algunas propiedades del gas.

Tabla 3. Composiciones y propiedades del gas natural colombiano (Adaptado de ^{12,16}).

Compuesto	Composición (%mol)	
	Guajira	Cusiana
Metano	97.76	82.19
Etano	0.38	10.43
Propano	0.2	3.59
i-Butano	0	0.48
n-Butano	0	0.54
i-Pentano	0	0.07
n-Pentano	0	0.05
Hexano	0	0.02
Nitrógeno	1.29	0.65
Dióxido de Carbono	0.37	1.97
Propiedad	Valor	
Densidad relativa	0.5644	0.6797
PCI (MJ/m ³)	33.443	38.620
PCS (MJ/m ³)	37.138	42.673
Índice de Wobbe (MJ/m ³)	49.436	51.76
Temperatura de punto de rocío de hidrocarburos (°C)	7.2	-6.7

Así, se define que el gas natural posee múltiples ventajas respecto a otros combustibles, entre las que se encuentran ¹⁴:

-No tiene requerimiento de gran infraestructura para usarlo, como son tanques de almacenaje, bombas, intercambiadores de calor, entre otros.

-No requiere previo o posterior procesamiento para poder ser usado de forma segura y eficiente.

-Es seguro en caso de fugas, ya que al tener una densidad relativa menor a la del aire se dispersa fácilmente disminuyendo riesgos de explosión por concentración del gas.

-Es un combustible amigable con el medio ambiente.

-La frecuencia de mantenimiento de los equipos que lo usan como combustible es menor a comparación de los que usan otro tipo de energéticos.

La llama.

Por consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama, la cual es una masa gaseosa incandescente donde el combustible y el comburente se encuentran mezclados y en reacción, que se caracteriza por la emisión de luz y calor, siendo este último un medio energético altamente aprovechado en la industria ⁴.

La llama puede acoger diferentes formas y colores, que dependen principalmente de la temperatura de la llama, la relación aire-combustible y el tipo de combustible, así como el tipo de quemador utilizado. Para el caso del gas natural una llama amarilla ocurre en el caso de una deficiencia de aire en la combustión, donde hay una incandescencia por parte de las partículas de hollín que se producen por la incorrecta combustión de los hidrocarburos que componen el gas combustible; así, un color azul ocurre cuando se está cerca de la relación estequiométrica entre el combustible y el comburente, y el color azul se irá haciendo más claro y pálido a medida que aumenta el aire suministrado, esto como indicativo que la reacción de combustión es más completa y no hay producción de hollín e inquemados ¹³.

La llama está compuesta de 3 zonas, en donde cada una maneja un rango de temperaturas diferente y ocurren allí diversos fenómenos. En la *figura 7* se pueden visualizar las diferentes zonas. La primera, la zona interna es la más fría, allí se da la presencia de los gases que no son de la combustión, y es donde la reacción aún no ha tenido lugar. La segunda zona, la de reducción, es donde ocurre la reacción del combustible de forma incompleta y se da la reducción de óxidos metálicos. Por último, la zona de oxidación es donde hay más O₂ disponible y se puede dar la combustión completa, además que es la zona donde se alcanza la mayor temperatura en la llama ¹¹.



Figura 7. Zonas características de la llama (Tomado de ¹¹).

La llama tiene clasificaciones de acuerdo al tipo de movimiento de los fluidos que intervienen (llamas laminares y turbulentas), también de acuerdo a si los reactantes aguas arriba del quemador están mezclados o no (llamas de difusión y llamas premezcladas) ⁴:

Llama laminar.

Se caracteriza por tener números de Reynolds bajos, inferiores a 2300 en canales circulares y se presentan en quemadores físicamente pequeños (orificios de gas).

Llama turbulenta.

Se caracteriza por tener Reynolds altos, superiores a 4000 en canales circulares y se presenta en quemadores de mayor tamaño, donde los gases de salida tienen movimientos en torbellino y turbulentos.

Llamas de premezcla.

Ocurre cuando la mezcla de combustible y comburente se realiza antes de la boquilla del quemador, la cantidad de aire usualmente es menor a la cantidad estequiométrica y el aire faltante proviene del ambiente que rodea la llama o bien, desde una inyección de aire externo en la cámara de combustión, llamado aire secundario.

Llama de difusión.

Ocurre cuando la mezcla del aire y el combustible se realiza luego de la boquilla del quemador, el combustible sale por la boquilla y se mezcla en la cámara de combustión con el aire ambiente que proviene del aire circundante o una inyección de aire en la cámara.

Gases de combustión.

Los gases de combustión son los productos de la reacción, aunque idealmente se tendría el nitrógeno del aire, el CO_2 y el agua como productos, esto no se cumple en la realidad, pues factores como la relación aire-combustible, la temperatura, composición del combustible, entre otros, favorecen la formación de algunos subproductos de la reacción que son altamente contaminantes y por lo tanto su emisión debe ser controlada. Entre los gases de combustión, los que se mencionarán a continuación son los que resultan con mayor frecuencia, generándose cada uno a condiciones particulares.

Material particulado (MP): Es una mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas, entre estas se encuentran el hollín, el cual es generado como parte de los inquemados al realizarse la combustión con un defecto de aire y no alcanzarse una temperatura adecuada ¹⁷.

Óxidos de azufre (SO_3 , SO_2 y SO): Son provenientes de la composición del combustible cuando tienen cantidades significativas de compuestos azufrados, principalmente los derivados del petróleo y el carbón. Es un gas contaminante que cuando entra en contacto con la humedad del aire forma ácido sulfuroso y ácido sulfúrico, que dan como resultado las lluvias ácidas ¹⁷.

Óxidos de nitrógeno (NO_x): Es la denominación que se le hace a los óxidos formados en la combustión por nitrógeno en la composición del combustible o bien, el nitrógeno del aire usado como comburente. A altas temperaturas este nitrógeno deja de actuar como inerte y tiende a formar principalmente NO y en pequeña medida NO_2 , que una vez en el ambiente son altamente reactivos y ayudan a la formación de ozono, además de la formación de ácido nítrico que contribuye en las lluvias ácidas ¹⁷.

Monóxido de carbono (CO): Es un gas tóxico que se forma cuando la reacción se produce en una deficiencia de aire, lo cual no permite que el combustible se oxide por completo y deje inquemados ¹⁷.

Hidrocarburos (COT): Son la parte del combustible que vuelve a salir por los humos al no haber reaccionado en la combustión, esto se da en deficiencia de aire al no haber suficiente oxígeno disponible que permita la oxidación,

aunque también se incluye los compuestos intermedios formados en reacciones secundarias. Todos ellos son conocidos también como Compuestos Orgánicos Totales, lo cual acoge a los compuestos carbonados de origen orgánico, los COT también pueden ser referidos como Hidrocarburos Totales (HCT o HC). Algunos de los COT que son emitidos a la atmósfera tienen una reactividad fotoquímica muy baja o inexistente, mientras que, existe un grupo de estos que si lo son, los cuales se denominan Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), así, por definición, los COV vendrían siendo un subconjunto de los COT que son fotoquímicamente reactivos, muchos de los cuales pueden participar en la formación de ozono. Algunos de los compuestos de este subgrupo incluyen aldehídos como el formaldehído y el acetaldehído, o bien, compuestos aromáticos como el benceno ¹⁷.

Dióxido de carbono (CO₂): Es el producto de la oxidación completa de los combustibles carbonados y se forma aún con defecto de aire, pero logra su composición máxima al irse acercando a la combustión estequiométrica. Se le considera un gas no tóxico ni contaminante, aunque hace parte de los gases de efecto invernadero ⁷.

Vapor de agua (H₂O_(v)): Es el producto formado al reaccionar el hidrógeno contenido por el combustible con el oxígeno, si al salir en humos la temperatura es elevada estará en la fase gaseosa como vapor, mientras que si la temperatura no es suficiente se presentará como un condensado ⁷.

Nitrógeno (N₂): Es el nitrógeno sea de la composición del combustible o que entró con el aire que no ha reaccionado en la formación de óxidos de nitrógeno, es en general el gas de mayor composición volumétrica en los humos ⁷.

Oxígeno (O₂): Es el oxígeno que no reaccionó con el combustible en la combustión, se debe principalmente a los excesos de aire suministrados y su presencia en los humos puede dar indicios de la eficiencia de combustión alcanzada ⁷.

Sabiendo que la formación de contaminantes se favorece principalmente con algunas condiciones de temperatura y exceso de aire, el monóxido de carbono por ejemplo, se reduce su formación al tener una temperatura de combustión por encima de los 700 °C y teniendo además un exceso de aire adecuado. Por otra parte, se tiene que para los NO_x se logra una considerable reducción al operar con temperaturas por debajo de los 900

°C, combinado con una disponibilidad de oxígeno limitada para evitar su formación, pero teniendo en cuenta la limitación de temperatura del CO, pues se podría incrementar las emisiones de este ¹⁸. Tomando como ejemplo el gas natural, al tener una llama con tonalidades rojizas, naranjas o amarillas, esto es un indicativo de una combustión incompleta, por lo cual resulta necesario ajustar el exceso de aire, que al regularse la entrada a un valor superior al 20-30% se evita la formación de monóxido de carbono generado por inquemados y también la formación de óxidos de nitrógeno generados por las altas temperaturas de llama ¹³. En cuanto a los óxidos de azufre, se tiene que al operar a temperaturas mayores a 700 °C la concentración de SO₂ es superior a la de SO₃, mientras que por debajo de los 500 °C predomina la formación de SO₃ frente a la de SO₂. La formación de estos se debe a la presencia de azufre en el combustible, el cual puede ser eliminado en un principio con un tratamiento, en el caso del gas natural con el endulzamiento del gas ¹⁸.

Con los compuestos orgánicos está que a bajas temperaturas se ve favorecida la formación de especies oxigenadas como alcoholes, aldehídos y ácidos, mientras que, con los compuestos aromáticos, las emisiones se pueden reducir al facilitar la ruptura del anillo, fragmentación de la cadena resultante y su posterior oxidación, esto con la homogenización de la mezcla aire-combustible, uso de altas temperaturas (sobre 700 °C) y un adecuado exceso de aire. Finalmente se tiene al hollín, que consiste en un sólido carbonoso cuando las condiciones permiten reacciones de condensación en la fase gaseosa, se puede reducir su emisión al operar con altas temperaturas y también oxidándolo con OH cuando la relación combustible-aire es alta y con OH y O₂ cuando la relación es baja ¹⁸.

Habiendo ya definido los principales contaminantes que se pueden generar en el proceso de combustión, se establece que sus emisiones son reguladas por el ministerio de ambiente, para el caso de este proyecto, la resolución 909 del 5 de junio de 2008 en su capítulo X, artículo 30, que dictamina los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para las industrias existentes de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla, cuyos datos se pueden visualizar en la *tabla 4*.

Tabla 4. Estándares de emisión de contaminantes al aire para industrias existentes de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla, a condiciones de referencia (25 °C, 760mmHg) y con oxígeno de referencia del 18% (Tomado de ²⁴).

Combustible	Estándares de emisión admisibles (mg/m ³)		
	MP	SO ₂	NO _x
Sólido	250	550	550
Líquido	250	550	550
Gaseoso	No Aplica	No Aplica	550

Existen varias formas de monitorizar las emisiones contaminantes, entre ellas están los diagramas de combustión, que permiten para un determinado combustible, calcular el exceso de aire, la composición de los humos y las proporciones de CO₂ y O₂ necesarios, entre los más conocidos están el diagrama de Ostwald, que determina el exceso de aire mediante el porcentaje de gases que intervienen en la combustión, además de poderse leer las cantidades producidas de CO; también, está para combustiones incompletas el diagrama de Keller y de Kissel que pueden mostrar cantidades producidas de inquemados, mientras que con el diagrama de Bunte, por ejemplo, nos podemos guiar en procesos de combustión completa ⁶.

Aunque los diagramas de combustión pueden ser útiles, en general, para la industria, son usados los analizadores de gases, que aparte de mostrar en tiempo real de la combustión índices de composición en humos, puede mostrar valores de otros parámetros significativos que resultan de gran utilidad.

Analizador de gases de combustión.

Los analizadores de gases son equipos integrados con celdas de medición de compuestos y su composición en un gas, además de poseer otras características como la capacidad de medir otras variables claves ¹⁹. En el caso de los gases de combustión, pueden ser medidos la composición de monóxido de carbono, la temperatura, la composición de oxígeno y de monóxido de nitrógeno, de azufre, entre otros, además, con esto puede ser calculado la eficiencia de la combustión, el dióxido de carbono y el nivel de óxidos de nitrógeno, además del exceso de aire y el punto de rocío para la mezcla ²⁰.

En el caso de este proyecto, se hará uso del analizador de gases PCA400® de Bacharach® (ver figura 8), el cual es un analizador de gases de grado industrial para la medición de emisiones de combustión, el cual mide porcentaje (%) volumétrico de oxígeno libre, dióxido de carbono, exceso de aire, eficiencia de combustión, temperatura de los gases y partes por millón (ppm) de monóxido de carbono, óxido y dióxido de nitrógeno, NO_x y dióxido de azufre ²¹. Para realizar estas mediciones el equipo consta de una sonda que es introducida por la chimenea del equipo de pruebas (ver figura 12), cuyos lineamientos son descritos en un apartado posterior sobre medición de gases de combustión en fuentes fijas.

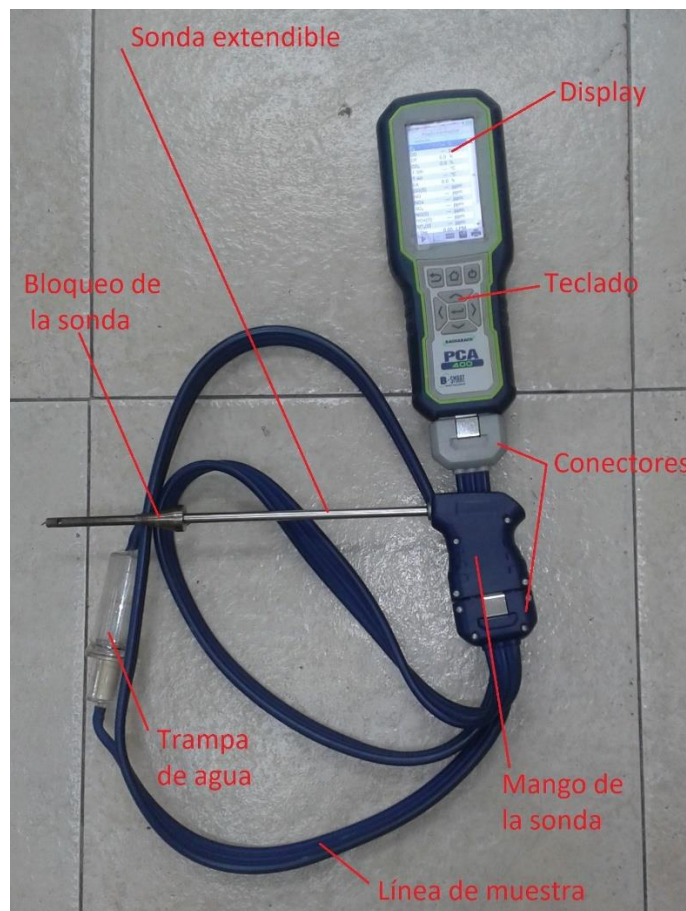


Figura 8. Analizador de gases de combustión PCA400® de Bacharach® (Realización propia).

Mecánica de fluidos.

Puesto que los gases estarán en diferentes condiciones y además se tiene un régimen turbulento en la mayoría de zonas, se hace necesario la utilización de algunas correcciones importantes respecto a lo que es la medición de caudales y de los gases de combustión, aparte de la

normalización de los caudales gaseosos por las posibles expansiones y compresiones que pueda este sufrir ²².

Medición de caudales.

El flujo es el movimiento de un fluido por un conducto, sin embargo, el caudal es la cantidad de material ya sea volumétrica o másica que fluye por unidad de tiempo, lo cual resulta imprescindible medir en gran cantidad de procesos que conlleve la utilización de un fluido ²³; para el caso particular del proyecto, medir el consumo ya sea de gas o de aire que está implícito para ciertas condiciones específicas de la combustión.

En su mayoría, los caudalímetros basan su medición en principios indirectos, ya sea diferenciales de presión o velocidad del flujo, frecuencias, entre otros. Para los contadores ubicados en el banco de pruebas y hornos, se cuenta con medidores de turbina, en el cual, el gas que fluye a través de él hace mover unas paletas a una velocidad determinada, la que es proporcional al volumen de gas que fluye, y al estar calibrada puede transmitir directamente a un contador mecánico que muestra los m³ que han pasado para un tiempo determinado de medición ²³.

Medición de gases de combustión.

Para la medición de los gases de combustión se debe seguir lineamientos y normas que permitan la recolección de datos con una buena confiabilidad. Entre estas normativas están el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas de octubre de 2010 expedido por el ministerio de ambiente, junto con el muestreo y localización de puntos de medición que sea aplicable.

La medición directa de los gases se puede realizar mediante la recolecta de una muestra para su posterior análisis o haciendo uso de analizadores instrumentales en tiempo real, para realizar la medición se debe asegurar que haya pasado como mínimo 30 minutos de haber empezado la operación y además realizarse bajo condiciones de operación iguales o superiores al 90% de su operación normal ²⁵.

Se considera que la sección del ducto más adecuada para ubicar y realizarse la medición es aquella con una distancia equivalente a ocho diámetros corriente abajo después de una perturbación y dos diámetros corriente arriba antes de la siguiente, pues en este punto se puede alcanzar condiciones cercanas a la laminaridad. Cuando esto no alcanza a cumplirse, como mínimo se debe tener el punto de medición a dos diámetros de chimenea corriente abajo después de una perturbación y

medio diámetro corriente arriba antes de una perturbación, con el propósito de aumentar los puntos de muestreo en la sección transversal de la chimenea y obtener un muestreo más representativo. Para casos donde el diámetro de la chimenea sea menos a 0.3m (chimenea del banco de pruebas es de 0.16m), el sitio se debe ubicar a ocho diámetros corriente abajo después de una perturbación y diez diámetros corriente arriba antes de la siguiente. Cuando lo anterior no puede cumplirse, se debe localizar el punto de muestreo a dos diámetros de chimenea corriente abajo después de una perturbación y por lo menos dos diámetros y medio corriente arriba antes de la siguiente perturbación, para así aumentar el número de puntos de muestreo y tener un muestreo más representativo ²⁶.

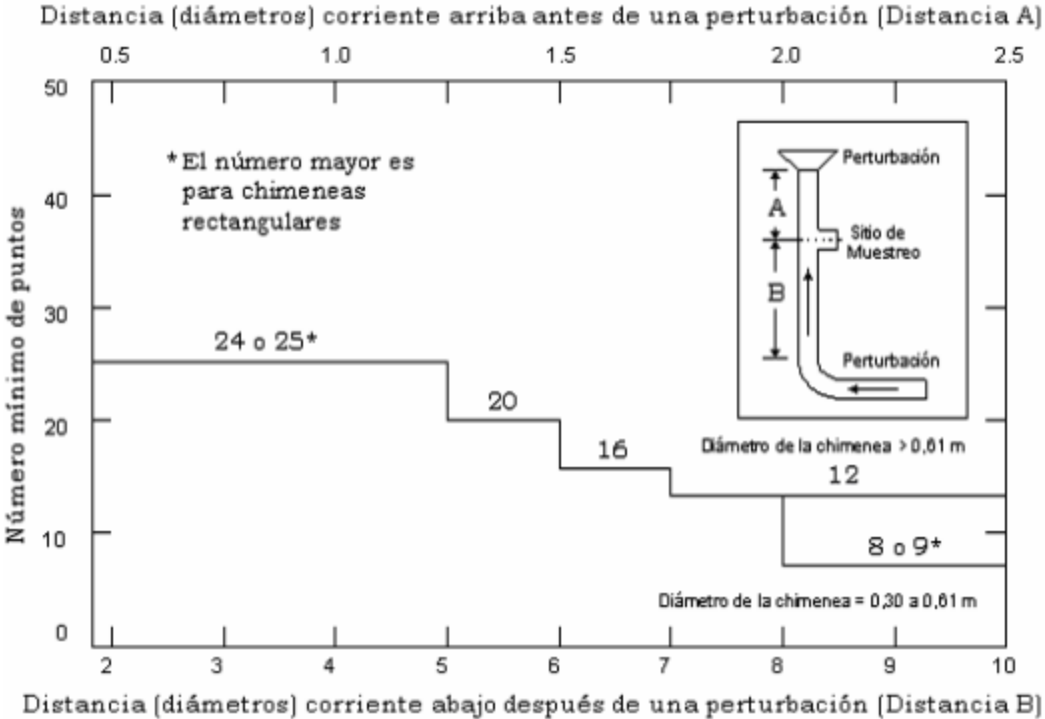


Figura 9. Número mínimo de puntos de muestreo (Tomado de ²⁶).

Tabla 5. Ubicación de la sonda en % del diámetro en función del número de puntos de muestreo (Tomado de ²⁶).

Numeración del punto de muestreo	Número de puntos de muestreo en un diámetro					
	2	4	6	8	10	12
1	14.6	6.7	4.4	3.2	2.6	2.1
2	85.4	25.0	14.6	10.5	8.2	6.7
3		75.0	29.6	19.4	14.6	11.8
4		93.3	70.4	32.3	22.6	17.7
5			85.4	67.7	34.2	25.0
6			95.6	80.6	65.8	35.6
7				89.5	77.4	64.4
8				96.8	85.4	75.0
9					91.8	82.3
10					97.4	88.2
11						93.3
12						97.9

Una vez definido el número de puntos de muestreo que se van a tener, se puede hacer marcas en la sonda de modo que quede graduado hasta el punto que ingresa la misma, tal como se ejemplifica con 6 puntos de muestreo en la *figura 10*. Lo anterior se realiza de modo que los puntos de muestreo no estén localizados a una distancia inferior a 1.3cm de la pared de la chimenea para diámetros menores o iguales a 0.61m y una distancia de 2.5cm para chimeneas con diámetros mayores a 0.61m, por lo que hay que ajustar según sea el caso el primero y el último punto ²⁶.

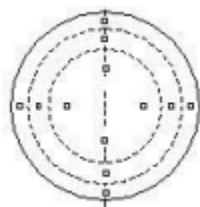


Figura 10. Localización para el caso de 6 puntos de muestreo (Tomado de ²⁶).

Normalización de volúmenes y caudales gaseosos.

Puesto que las condiciones volumétricas de un gas como el aire y el gas natural cambian en base a factores como presión, temperatura,

composición, se hace necesario corregir variaciones debidas a estos, pues implican errores en las lecturas realizadas en equipos como los medidores de caudal. Para realizar esta corrección se lleva el gas a condiciones normales (0 °C y 1atm), para que los datos recolectados tengan la misma base así cambien las condiciones en que sean medidos. Esto se realiza multiplicando el volumen o el caudal volumétrico por un factor adimensional k que es calculado según la ecuación 5 ²⁷.

$$k = \left[\frac{P_{gas} + P_b}{P_{bref}} \right] * \left[\frac{T_a}{T_{gas} + T_a} \right] \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde P_{gas} es la presión manométrica del gas que se le mide el caudal (aire o gas natural), P_b es la presión barométrica de la zona (en Guarne es 8027.81 mm.c.a ²⁸), P_{bref} es la presión barométrica de referencia (10332.3mm.c.a), T_a es la temperatura absoluta de referencia (0 °C) y T_{gas} es la temperatura del gas que se le mide el caudal.

Transferencia de calor.

Es un fenómeno de transporte de alta relevancia para los procesos de combustión y calentamiento que ocurren en un horno, en el cual, debido a las altas temperaturas presentes y a la configuración del equipo, se presentan con mayor trascendencia los mecanismos de transferencia por convección y por radiación, sin embargo, el mecanismo de transferencia de calor por conducción toma relevancia al hablar en el espesor de la pieza cerámica, además de la transferencia que ocurre entre baldosas y rodillos, así como a través de las paredes del horno. A continuación, se expone un poco más en detalle los mecanismos y se resalta su importancia en el proceso de cocción cerámica.

Conducción.

En las paredes se da este mecanismo de transferencia de calor, las cuales, se consideran láminas de extensión infinita y espesor finito, y así, la ley de Fourier de la conducción toma la forma de la ecuación 6 ¹.

$$\dot{Q} = -A\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde \dot{Q} es la tasa de transferencia de calor, T es la temperatura en cualquier sección de la pared, λ es la conductividad térmica del sólido y x es la dirección en la que se produce la transmisión de calor y A es el área de la superficie de contacto.

En el caso de idealizar al sistema a un estado estacionario, y que además λ no dependa de la temperatura, el perfil de temperaturas resulta ser lineal y la ecuación 6 toma la siguiente forma 1:

$$\dot{Q} = A\lambda \frac{(T_i - T_o)}{l} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde T_i y T_o son las temperaturas en la superficie interior y exterior de la pared respectivamente, y l el espesor de la misma.

Otro caso donde se presenta la conducción es en el interior de las piezas cerámicas, en donde, la temperatura evoluciona durante la cocción a lo largo del horno, por lo cual no se puede establecer un estado estacionario. Finalmente, otro caso relevante donde la conducción toma importancia es la transferencia por contacto entre los rodillos y las piezas, pues, los rodillos al estar encargados de la sustentación y transporte de las baldosas, tiene un contacto físico con estas, y además, como en el horno, ambos elementos son muy susceptibles a encontrarse a temperaturas muy distintas, está entonces presente el mecanismo de transferencia por conducción 1.

Convección.

En los hornos, la convección tiene lugar como consecuencia del contacto entre los gases y las superficies del horno, este mecanismo se desarrolla mediante la circulación de los gases (el gas caliente asciende y el más frío desciende), además de que, con el uso de ventiladores de aspiración, hay circulación de gases en contracorriente con la dirección de desplazamiento de las baldosas, y también, en zonas de enfriamiento, este mecanismo tiene alta relevancia. Se distingue entre convección natural y convección forzada; en el caso de la convección natural, el flujo se debe a variaciones de densidad que resultan por diferencias de temperatura, como el caso de las pérdidas de calor en las superficies externas del horno y sus alrededores, mientras que, la convección forzada se debe a la acción de una fuerza externa (diferencia de presión) que pone en movimiento al fluido, esto se genera como se mencionó por el caso de equipos externos como lo son los ventiladores, además también se da por el uso de quemadores de alta velocidad que generan una alta turbulencia. El flujo de calor por este mecanismo que alcanza una superficie está dado por la ley de enfriamiento de Newton, la cual está dada según la forma de la ecuación 8 ^{29,1}:

$$\dot{Q} = A_s h \Delta T \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde A_s es la superficie expuesta a los gases, ΔT es la diferencia de temperaturas entre la superficie del cuerpo que pasa por el horno y el gas envolvente, y h es el coeficiente de convección.

Radiación.

La transmisión de calor por radiación se produce sin que haya necesariamente la presencia de un medio material que transporte la energía, como si debe ocurrir en el caso de la conducción y la convección, por este motivo, las superficies pueden intercambiar energía por este mecanismo sin que exista necesariamente un contacto físico entre ellas, además, que sustancias presentes en el ambiente interno del horno como el CO_2 y el vapor de agua, pueden absorber y emitir radiación térmica. El flujo de calor por radiación depende de la diferencia de temperaturas absolutas elevadas a la cuarta potencia, tal como se muestra en la ecuación 9 ^{29,1}:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A_R (T_2^4 - T_1^4) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde ε es una propiedad radiativa de la superficie llamada emisividad, la cual se encuentra entre valores de 0 a 1 y depende del material, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), A_R es el área de transferencia de la radiación y T_2 y T_1 las temperaturas del cuerpo caliente y del medio envolvente respectivamente.

Las elevadas temperaturas del horno, hacen que la radiación sea el principal mecanismo de transferencia de energía entre superficies y gases en la zona de calentamiento y quema, mientras que en zonas más frías (temperaturas inferiores a $400 \text{ }^\circ\text{C}$) y en las zonas de enfriamiento (Velocidades de gases muy elevadas), la transferencia de calor entre las superficies y el aire o gases envolvente se produce básicamente por convección ¹.

A medida que un cuerpo es calentado su temperatura aumenta, transfiriéndose calor por convección o radiación con el medio envolvente. La convección es predominante a bajas temperaturas (menores a $200 \text{ }^\circ\text{C}$), pero arriba de los $400 \text{ }^\circ\text{C}$, predomina la radiación térmica. A una temperatura de $550 \text{ }^\circ\text{C}$, un cuerpo emite suficiente radiación dentro del espectro visible, adquiriendo un brillo rojo opaco. Con el incremento de la temperatura, el color cambia, presentándose tonalidades entre rojo opaco ($700 \text{ }^\circ\text{C}$), rojo escarlata ($900 \text{ }^\circ\text{C}$), naranja ($1100 \text{ }^\circ\text{C}$) y blanco ($1400 \text{ }^\circ\text{C}$) ¹³.

Banco de pruebas para quemadores industriales a gas natural.

Un banco de pruebas para quemadores es un equipo adaptado de tal forma que en él puedan ser probados y estudiados uno o distintos quemadores para la medición de parámetros claves en la combustión como lo son longitudes y color de llama, así como temperaturas, también, se pueden medir en él concentraciones de gases de combustión, con lo cual se puede lograr un análisis más detallado de las condiciones más adecuadas con las que llevar a cabo un proceso de combustión en función de los resultados que se quieren obtener.

Para todo lo anterior, se busca que el equipo cumpla ciertas condiciones para ser operado en forma correcta, algunas de las cuales son ³⁰:

- Soportar un quemador a gas natural con una potencia máxima de diseño.
- Funcionar adecuadamente para un amplio rango de presiones de entrada de gas y aire.
- Adecuación para las mediciones de productos de combustión y contaminantes según la normatividad aplicable.
- Control de la llama mediante un módulo programable, detectores de llama, electroválvulas y presostatos.
- Ser móvil y desmontable, de forma que permita ensayar los diferentes tipos de quemadores en diferentes arreglos.
- Operar de manera segura y de la forma más automatizada posible.

En las *figuras 11 y 12* se puede observar el banco de pruebas utilizado para la parte experimental de este proyecto.

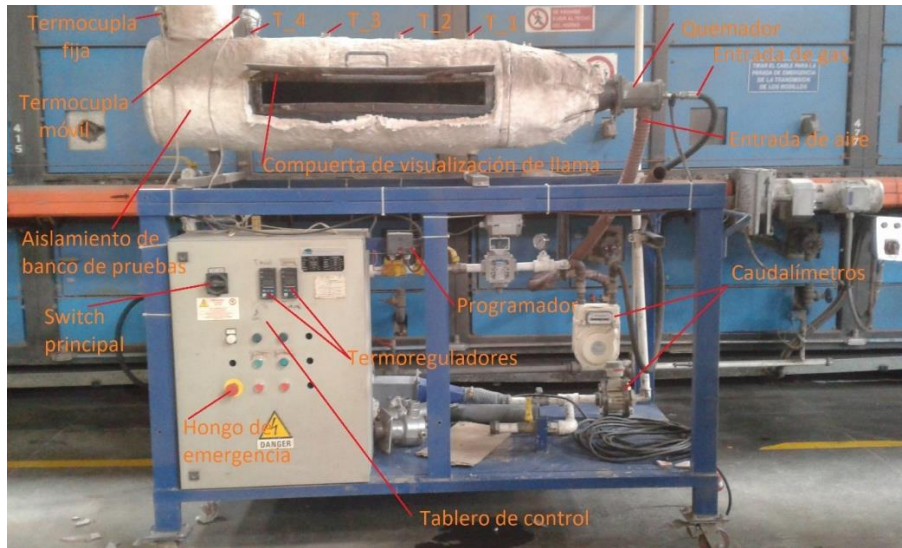


Figura 11. Banco de pruebas para quemadores industriales a gas natural (Realización propia).



Figura 12. Chimenea de banco de pruebas para quemadores industriales a gas natural (realización propia).

Hornos de la industria cerámica.

El horno es el equipo principal que hace posible la cocción de la baldosa, consiste en una estructura fija y diseñada para dirigir y contener el calor producto de la combustión; en él ocurren todos los cambios fisicoquímicos al material cerámico, obteniéndose un producto terminado con las propiedades y características deseadas.

Los hornos usados en la industria cerámica se pueden clasificar en función de la forma de calentamiento, que pueden ser eléctricos o de combustión, estos últimos también se pueden subdividir en función del tipo de combustible utilizado (sólido, líquido o gaseoso). También, otra clasificación de los hornos es por el tipo de proceso, si es intermitente o continuo; finalmente, se tiene otra clasificación por las disposiciones del material con respecto a los productos de combustión, en el cual están los de llama libre y los muflados cuando los productos cerámicos no soportan el contacto directo con los gases de combustión ³¹.

El consumo energético en los hornos es muy grande en relación al consumo eléctrico usado por los mecanismos que se necesitan para su operación, de manera que tiene gran importancia saber el cálculo del mismo, el cual se puede ver en la ecuación 10 ³.

$$\text{Consumo energético} = \frac{Q_{comb} * PCI_{comb}}{Pcc} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde Q_{comb} y PCI_{comb} son el caudal volumétrico y el poder calorífico inferior del combustible respectivamente, y Pcc es la producción, la cual es el producto entre la masa de una baldosa cerámica antes de realizarle la cocción y el número de piezas por unidad de tiempo que entran al horno. Las unidades finales del consumo energético serán kJ/kg de baldosa cocida.

El horno analizado en este proyecto resulta ser un horno monoestrato de rodillos, el cual es continuo, usa gas natural como combustible y es de llama libre, pues los gases de combustión entran en contacto directo con las baldosas.

Horno monoestrato de rodillos.

La cocción rápida, caracterizada por la posibilidad de poner en contacto directo los gases de combustión con el producto sin comprometer la calidad del mismo, fue promovida por el uso de combustibles gaseosos exentos de azufre como el gas natural, este tipo de cocción se efectúa en hornos monoestrato de rodillos, donde el material es alimentado al horno en una

única capa, que es sustentada por un banco de rodillos cuya rotación realiza la movimentación de las piezas. Los rodillos atraviesan transversalmente el horno, dividiéndolo en dos canales (superior e inferior), consiguiendo así una gran exposición del material con los gases ¹.

La implementación de este tipo de hornos en forma generalizada para procesos de cocción de baldosas cerámicas, se debe a una serie de ventajas que tiene respecto a los hornos tradicionales como han sido los hornos túnel de vagonetas o los procesos de bicocción. Entre estas ventajas está la obtención de ciclos de cocción más cortos, que rebajan en procesos de bicocción que incluían cocción del soporte cerámico por 30-40h seguido de una cocción del soporte esmaltado por 10-15h, a procesos que ahora transcurren en 45-60min, donde tanto el soporte y el esmalte son cocidos en el mismo ciclo. Otra ventaja importante es el control más estricto de la operación, ya que se presenta una mayor uniformidad de temperatura en las secciones transversales del horno, mejorando así el control de la curva de cocción. Este tipo de horno también presenta ventajas de eficiencia energética, ya que tiene una mayor razón de carga útil/carga total respecto a los hornos tradicionales, así como poseer una menor inercia térmica, puesto que tiene un aislamiento ligero y contiene bajo peso de material durante la cocción, confiriéndole flexibilidad que permite interrumpir y reanudar operación sin grandes dificultades, y también permite modificar con rapidez la curva de cocción ¹.

El ancho típico de estos hornos, junto con las temperaturas de trabajo, hace que sea inviable el uso de rodillos metálicos, pues estos sufrirían una gran deformación fácilmente, en su lugar, se implementa el uso de rodillos cerámicos, los cuales soportan altas temperaturas, pero tienen menor resistencia al choque térmico, lo cual es importante tener en cuenta a la hora de realizarles limpieza y sustituirlos. Aunque el uso de rodillos cerámicos repercute en muchas ventajas para la movimentación de las piezas, también estos interfieren en la transmisión de calor por el plano inferior de las baldosas, lo cual influye en la planaridad de las mismas ¹.

Los hornos monoestrato de rodillos están basados en una estructura metálica como soporte de la mampostería aislante, está compuesto por módulos consecuentes, los cuales tienen una longitud típica de unos 2m y un ancho útil para el paso de las baldosas entre 1.5 y 3m, los hornos de producción baja constan de alrededor de 30 módulos, pero con frecuencia se tienen 50 o más ¹.

El horno monoestrato de rodillos en general, puede dividirse en dos partes diferenciadas, que son la zona de calentamiento y la zona de enfriamiento,

sin embargo, de forma más particularizada, teniendo en cuenta los cambios fisicoquímicos que sufre la pieza en diferentes zonas del recorrido en el horno y las temperaturas de trabajo según la curva de cocción, el horno en orden de recorrido de las piezas se divide en prehorno, precalentamiento, calentamiento, cocción, enfriamiento rápido, enfriamiento lento o controlado y enfriamiento final ¹¹. En la *figura 13* se puede ver el esbozo de un horno monoestrato de rodillos con sus zonas características.

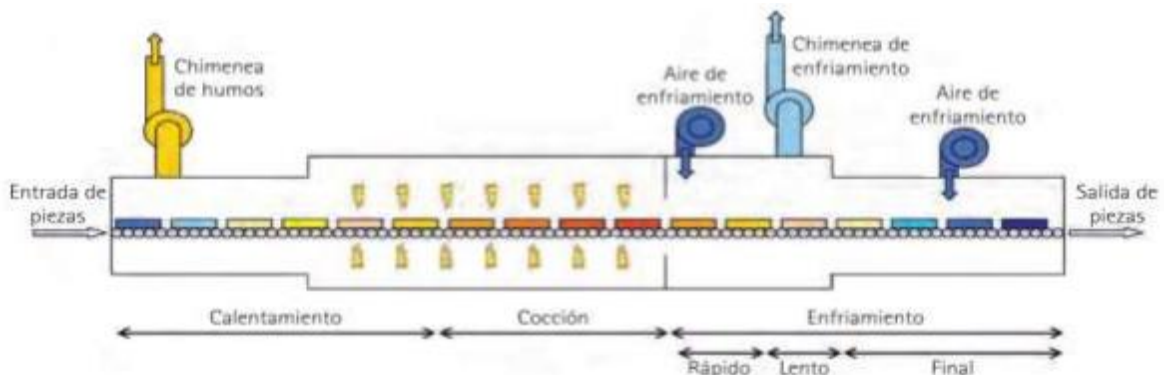


Figura 13. Esquema horno monoestrato de rodillos (Tomado de ³²).

A continuación, se describe con un poco más de detalle cada zona mencionada, con algunas de las características que allí están comprendidas.

Zonas del horno monoestrato de rodillos.

Cada zona del horno tiene una relación estrecha y directa con la curva de cocción, pues al manejar diferentes temperaturas, en cada zona particular se dan diferentes cambios fisicoquímicos a la pieza cerámica, esto con el fin de conferirle las propiedades y características del producto terminado. En general el horno consta de 7 zonas, primero, la zona de prehorno constituye un 10% de la longitud total del horno, seguido de la zona de precalentamiento y calentamiento que es el 31% de la longitud total, siguiendo longitudinalmente se ubica la zona de cocción que ocupa un 19%, luego la zona de enfriamiento rápido con un 6%, la de enfriamiento lento con 20% y finalmente la zona de enfriamiento final que consta de un 14% aproximadamente de la longitud del horno ²⁹.

-Prehorno: Es la parte inicial del horno, que comprende desde la entrada de la baldosa hasta empezar la zona de precalentamiento, tiene una temperatura de trabajo entre 200 °C y 350 °C, la función de esta zona es eliminar la humedad higroscópica residual que trae consigo las piezas desde las fases de esmaltado y almacenamiento, la cual no debe sobrepasar el

2%p/p en la entrada, pues provocaría explosión de las piezas, roturas o problemas superficiales en el esmalte. También, en esta zona se da inicio a la eliminación del agua zeolítica de las arcillas. En esta zona se realiza el calentamiento del material gracias a los gases de combustión de zonas de calentamiento y cocción, que son aspirados por el ventilador de la chimenea de humos que se ubica encima de esta zona ²⁹.

-Precalentamiento: En esta zona es donde se desgasifica y se oxida el material orgánico contenido en las piezas cerámicas, para que esto no repercuta luego en la zona de cocción en hinchamientos, burbujas, agujeros, porosidades en el esmalte o pérdida de tonalidades. La temperatura de trabajo de esta zona se comprende hasta los 550 °C ²⁹.

-Calentamiento: Esta zona tiene una temperatura de trabajo entre los 550 °C y los 900 °C, es una zona importante en la cocción del material cerámico, ya que aquí tiene lugar la transformación alotrópica del cuarzo α a cuarzo β a los 573 °C dando lugar a una expansión volumétrica de la pieza, también se presenta el complemento de la combustión de material orgánico, la liberación del agua de constitución y la descomposición de los carbonatos. Continúa una zona de prequema hasta los 1000 °C donde se busca mantener la planaridad en la pieza para el ingreso a la zona de quema ²⁹.

-Cocción o quema: Es la zona comprendida entre los 1000 °C y los 1250 °C. Aquí es donde se le confieren las características y propiedades finales al producto como resistencia mecánica, tamaño, tonalidad, planaridad, entre otros, por lo cual es de sumo cuidado mantener un control estricto de la temperatura ²⁹.

-Enfriamiento rápido: Esta zona comprende temperaturas de trabajo entre el final de la quema y los 650 °C aproximadamente, aquí, el material es enfriado rápidamente a través de tubos tipo flauta que proyectan aire sobre la superficie superior e inferior de la pieza. Es importante que en esta zona no se produzca la inversión del cuarzo, porque de ser así, al ocurrir de manera abrupta, ocasionaría la rotura de las piezas ²⁹.

-Enfriamiento lento o controlado: Esta zona cubre temperaturas de trabajo entre los 650 °C y los 420 °C, en esta zona ocurre la transformación alotrópica del cuarzo β a cuarzo α a los 573 °C, provocando una contracción volumétrica del cuerpo cerámico, la cual debe ser gradual y lenta, para evitar roturas o acumulación de tensiones, para esto la zona se enfría mediante intercambiadores de calor que consisten en tubos de acero inoxidable que atraviesan transversalmente y a través de estos circula aire frío a una tasa regulada según la temperatura de la zona ²⁹.

-Enfriamiento final: Esta zona cubre temperaturas de trabajo inferiores a 400 °C, donde se enfría la pieza para que pueda ser manipulada con mayor facilidad a la salida del horno por máquinas o dispositivos instalados para ello. El enfriamiento aquí es similar al realizado en la zona de enfriamiento rápido, pues se inyecta aire a través de tubos tipo flauta que direccionan el aire frío sobre la superficie superior e inferior de la baldosa, y este aire es extraído mediante ventiladores ²⁹.

Partes del horno monoestrato de rodillos.

El horno monoestrato de rodillos está compuesto por varias partes y equipos auxiliares que en conjunto permiten un funcionamiento eficaz y controlado del mismo, permitiendo así la cocción del material cerámico, entre estas están la estructura del horno (paredes, bóveda y solera), rodillos cerámicos y su mecanismo de movimentación, ventiladores (aspiración de humos, soplado de aire de combustión, soplado de aire de enfriamiento, aspiración de aire de enfriamiento controlado, aspiración aire caliente enfriamiento final, soplado aire enfriamiento final), quemadores y cúpulas y el sistema de control del horno.

Para permitir la retención del calor, los hornos deben construirse con materiales que sean refractarios, de modo que no se produzca la fusión, agrietamiento o reblandecimiento del material con el que están constituidos, y además, que sea suficientemente aislante para reducir al mínimo las pérdidas de calor. En general, se suele usar ladrillos refractarios y fibra cerámica aislante ³³. En la *figura 14* se puede observar con más detalle la construcción interna del horno.

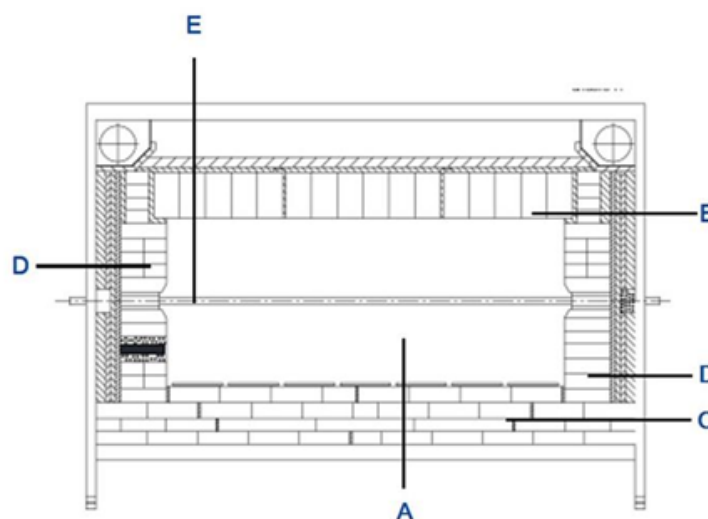


Figura14. Estructura interna del horno monoestrato de rodillos (Tomado de ¹¹).

De la *figura* anterior, las partes que corresponden son:

A: canal de cocción bajo y sobre el plano de rodillos.

B: Techo del horno.

C: Piso del horno.

D: Paredes del horno.

E: Plano de rodillos.

El piso y el techo del horno generalmente están constituidos por ladrillos refractarios y termoaislantes, además de mortero especial de mampostería para altas temperaturas. Al igual que estos, las paredes están construidas con estos materiales y capas de fibra cerámica, evitando así pérdidas de calor hacia el exterior y además teniendo resistencia al choque directo con los gases de combustión y la llama; todo esto, está sostenido mediante perfiles y ganchos metálicos que sostienen la estructura.

La movimentación de los rodillos en el horno es accionado por motorreductores con inversión y transmisión de movimiento mediante pares de engranajes cilíndricos de dientes helicoidales con lubricación de baño de aceite, o también mediante transmisión de engranajes y cadena accionados por motores de velocidad variable. Cada engranaje, está acoplado mediante un perno a una copa especial que está anclada al rodillo, asegurando el centrado del mismo y su arrastre ³¹.

En conjunto, el sistema de ventiladores del horno permiten calentar zonas como el prehorno (ventilador aspiración de humos), y enfriar el material cerámico en las zonas de enfriamiento (ventilador enfriamiento rápido, ventilador enfriamiento controlado, ventilador enfriamiento final), así como succionar y llevar fuera de la atmósfera del horno gases de combustión y aire caliente, además de proporcionar a los quemadores el aire necesario para realizarse la combustión (ventilador de aire de combustión) ¹¹.

Los quemadores, son una parte del horno fundamental para este proyecto, por lo cual se profundizará un poco sobre ellos.

Quemadores.

Son dispositivos cuya función es la de preparar la mezcla aire-combustible en proporciones adecuadas para realizar la combustión, además de posicionar la llama donde esté dirigido el requerimiento del calor y mantener encendida y estable la llama. Los quemadores se clasifican según sea la zona donde se mezcla el combustible y el comburente, por lo tanto hay

quemadores de premezcla, donde el mezclado se realiza antes de llegar a la boquilla del quemador, los quemadores de mezcla en boquilla, que realizan el mezclado una vez el combustible sale por la boquilla y también están los quemadores de mezclado mixto, donde hay una premezcla con una cantidad del aire necesario para la combustión, pero luego, hay una inyección de aire secundario o con el aire existente en la cámara de combustión, se acaba de completar el aire necesario para realizar la combustión adecuada. Los quemadores de mezcla en boquilla tienen ventajas de tener un amplio rango de estabilidad, tienen un fácil control de mezclado de los componentes y de la forma de la llama que se quiere alcanzar, además de tener facilidad con la calibración y el mantenimiento de los mismos ¹¹.

Con una alimentación apropiada de aire y combustible, se pueden obtener velocidades de los gases superiores a los 90 m/s, lo que constituye los quemadores de alta velocidad, donde existe una alta turbulencia y la velocidad es tal, que la capa límite sobre la superficie de las piezas es desprendida y así, se ve favorecida la transferencia de calor desde los gases de combustión hacia toda la superficie de la baldosa. Este tipo de quemadores tiene grandes ventajas y aplicaciones industriales, como lo es su uso en aplicaciones hasta 1500 °C, altas velocidades y estabilidad de llama y una mayor uniformidad de la temperatura en toda la sección transversal del horno. La fuerte carga térmica que incide sobre las cámaras de combustión es soportada por materiales apropiados, en especial el carburo de silicio (SiC) es utilizado puesto que tiene buena resistencia a los choques térmicos ^{29,34}. En las *figuras 15* y *16* se puede observar los dos tipos de quemadores de alta velocidad usados a lo largo de este proyecto y sus partes.



Figura 15. Quemador de alta velocidad TCK® (Realización propia).

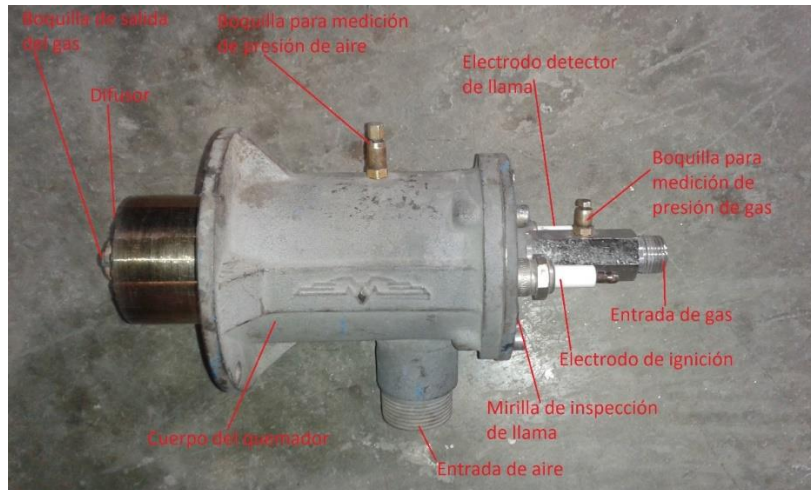


Figura 16. Quemador de alta velocidad Modena® (Realización propia).

Los quemadores están comprendidos de varias partes, cada una con una función específica. Entre las partes se encuentra el cuerpo del quemador, el cual le da el soporte y sobre el cual están dispuestas las demás partes que lo comprenden, también está el difusor, que ayuda con el mezclado del aire y el combustible, creando una mezcla homogénea y generando la turbulencia necesaria. También se puede encontrar las boquillas de medición de presión, tanto de aire como de combustible, esta presión se puede medir como en este proyecto, con el uso de una columna de agua, la cual está graduada de 0-1000 mm.c.a. Otras partes importantes en el quemador son los electrodos, uno generador de una chispa que es la que inicia la combustión, por medio de un alto voltaje generado, el cual funciona y es similar a una bujía; también está el electrodo detector de llama, que consiste en un sensor piezoeléctrico, que es sensible térmicamente o también por emisión de radiación de la llama, que una vez comienza la misma, es detectada por el sensor y así se permite que continúe la combustión, sin cerrar la válvula de suministro de combustible ^{34,35}.

Industrialmente, existe un rango de operación ideal para los quemadores, esto es, con un poco de exceso de aire, donde se encuentra la máxima eficiencia en el diagrama de combustión. En la *figura 17* se puede visualizar este rango para las curvas típicas de combustión.

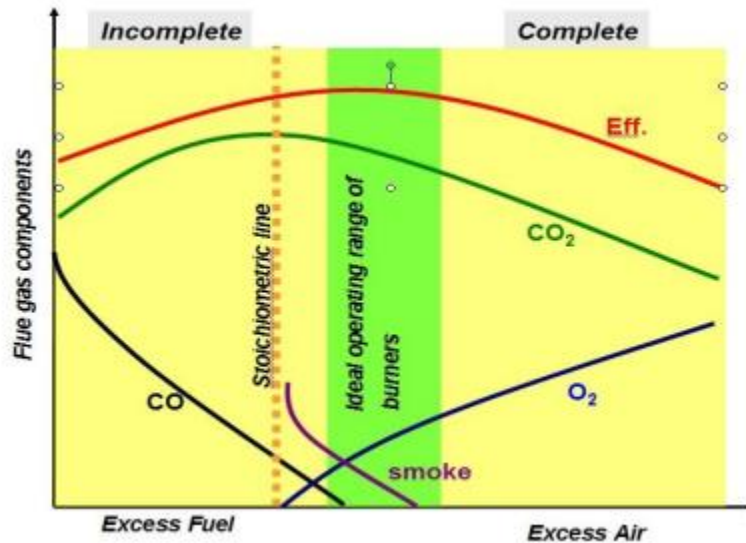


Figura 17. Rango ideal de operación para quemadores (Tomado de ²⁰).

Finalmente, una parte importante de los quemadores es la cámara de combustión o también llamada cúpula, la cual es una pieza abierta en los extremos y donde se desarrolla la mezcla de aire y combustible y se da inicio a la combustión, En función de su tamaño se puede alcanzar una mayor velocidad en los gases de combustión, esto a diámetros de salida más pequeños. También, según su forma y diseño, cada tipo se usa para calentar zonas específicas del horno, para este proyecto se usan cúpulas de 60mm, de 500x40mm y cúpulas Ray. En el horno que se implementa el proyecto se trabaja con baldosa de formato 50x50cm, con un total de 5 piezas dispuestas en la sección transversal, por lo cual, se describirán las cúpulas en función a los requerimientos específicos de este horno (ver figura 18).

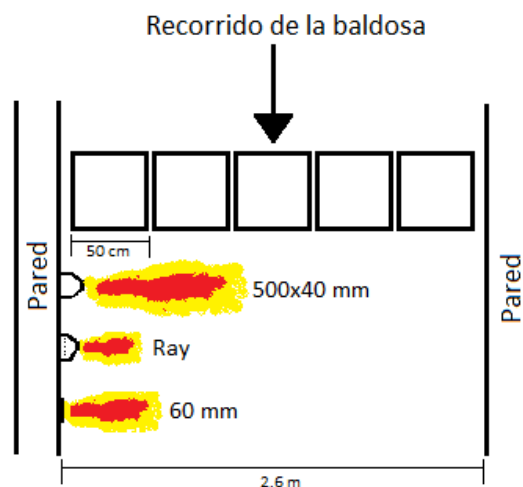


Figura 18. Longitud de llama requeridas para cada cúpula usada en el horno (Realización propia).

Cúpula de 60mm.

Consta de 37 cm de longitud y un diámetro de salida de 60 mm, está fabricada de carburo de silicio y se usa para calentar el horno por el área de la segunda baldosa, así que es necesario una longitud de llama con esta cúpula de unos 50 cm, pues la longitud de la cúpula es muy similar al espesor de las paredes del horno ².



Figura 19. Cúpula de 60 mm (Realización propia).

Cúpula de 500x40mm.

Consta de 50 cm de longitud y un diámetro de salida de 40 mm, está fabricada de carburo de silicio y se usa para calentar la zona intermedia del horno, así que es necesario una longitud de llama con esta cúpula de unos 80 cm, pues luego de la pared interna del horno, la cúpula aún sobresale unos 12 cm ².



Figura 20. Cúpula de 500x40 mm (Realización propia).

Cúpula Ray.

Consta de 47 cm de longitud y un diámetro de salida de 30 mm con 5 orificios laterales de 15 mm de diámetro, está fabricada de carburo de silicio y se usa para calentar las paredes del horno, por el área de la primera baldosa, evitando que la llama llegue a afectar la segunda baldosa; para esto, se necesita una longitud de llama menor a los 40 cm, pues la cúpula sobresale de la pared interna del horno unos 10 cm ².



Figura 21. Cúpula Ray (Realización propia).

Control en un horno monoestrato de rodillos.

El control de la combustión en el horno por medio de los quemadores puede ser de tipo modulación de aire fija y gas modulado o tipo de modulación de aire modulado y gas modulado ²⁹, en el caso del horno de este proyecto, se tiene el primer tipo como sistema de control.

Para este tipo, el sistema de control se hace en lazo cerrado, así, una vez se regula la cantidad de aire en el quemador, se mantiene constante, y de acuerdo a las necesidades de temperatura en la zona que esté ubicado, el gas se modula con un porcentaje de apertura en una válvula como elemento final de control ².

Una vez ajustada la cantidad de aire, se tiene por módulos una termocupla tipo "S" (0-1600 °C) o tipo "K" (0-1200 °C) de acuerdo a la zona del horno, esta termocupla, gracias al efecto Seebeck, envía una señal eléctrica por medio de un cable de extensión hasta el termorregulador que consiste en un controlador PID, el cual, de acuerdo a la comparación con el valor del Set Point en la curva de cocción para ese módulo, envía una señal correctiva al modutrol, que abre proporcionalmente, el porcentaje de

apertura de una válvula, permitiendo el paso de la cantidad de gas requerida hacia el quemador ubicado en el módulo, hasta alcanzar la temperatura fijada en el Set Point ². En la *figura 22* se puede ver el esquema del control descrito.

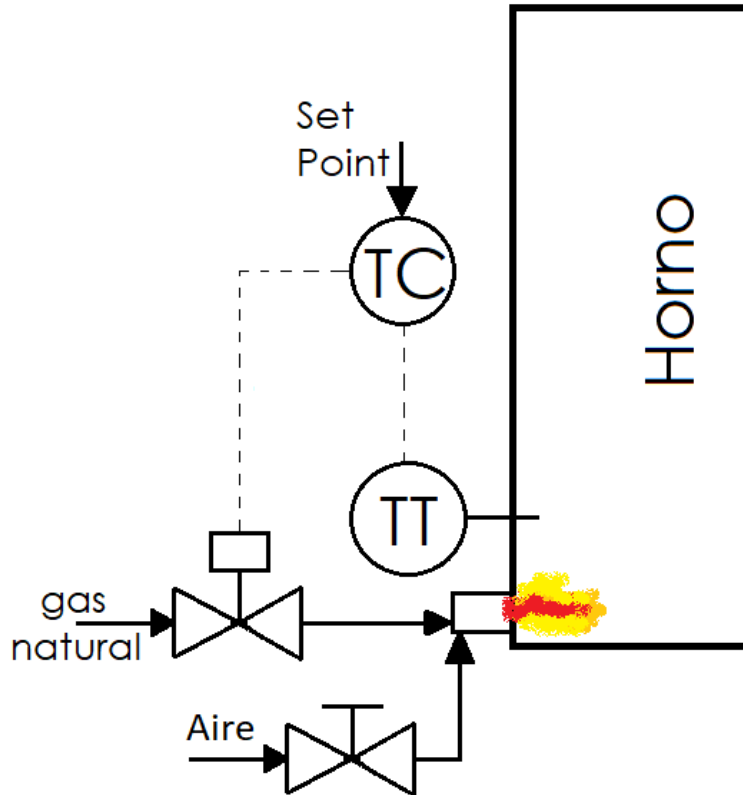


Figura 22. Sistema de control con aire fijo y gas modulado (realización propia).

Para el sistema de control en los ventiladores, se tiene un transmisor de presión que envía la señal de presión a un transductor, el cual envía una señal eléctrica al controlador y allí se compara de acuerdo al Set Point que se tenga para enviar una señal eléctrica correctiva al variador de frecuencia del motor del ventilador ².

Diseño de experimentos.

Ya que se posee gran cantidad de datos mensurables en el banco de pruebas con las diferentes combinaciones posibles que se pueden realizar para el quemador y cúpulas y presiones de trabajo, se plantea un diseño de experimentos como la opción más eficiente para el análisis de estos, dando así como resultados la influencia de los factores analizados en las variables respuesta. Esta herramienta es de gran utilidad, pues permite analizar los

diferentes experimentos en función de los niveles que se tengan para los factores a analizar.

Según los pasos a seguir para realizar de manera adecuada un diseño de experimentos está ³⁶:

- Planteamiento del problema.
- Selección de las variables respuesta.
- Elección de factores y niveles.
- Elección del diseño experimental o tipo de experimento.
- Desarrollo del experimento.
- Análisis estadístico de los datos.
- Conclusiones y recomendaciones.

En muchos experimentos, intervienen dos o más factores, por lo cual se hace necesario el uso de diseños factoriales, que son en general, los diseños más eficientes para este tipo de experimentos, pues para cada ensayo o réplica realizada se estudian en su totalidad las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Por ejemplo, si se tienen dos factores A y B con a y b niveles respectivamente, el diseño consta de todas las $a*b$ combinaciones posibles ³⁶.

El diseño factorial 2^2 se puede trabajar desde una cantidad limitada de experimentos para una gran cantidad de variables respuesta, debido a esto, es de gran utilidad en la industria, ya que requiere unos menores costes y hay un ahorro de tiempo al poderse analizar todas las variables respuesta con un número pequeño de datos ³⁷. Este diseño consta de dos factores y dos niveles (alto y bajo), estos niveles pueden ser cuantitativos como valores de temperatura, presión, nivel, tiempo, entre otros, o bien, pueden ser cualitativos como dos máquinas, dos operadores, que pueden tener de niveles la ausencia o presencia de uno de los factores ³⁶. Para la realización más rápida y minimizando también así errores, hoy día se implementa mucho el uso de ordenadores o bien, programas estadísticos que permiten hacer análisis de diseños de experimentos con un amplio rango de opciones útiles que hacen más eficiente la implementación de diseños experimentales, entre estos está Statgraphics®, el cual es utilizado para este proyecto.

Metodología.

En la realización de este proyecto existieron 6 etapas clave que permitieron llevar a cabo los pasos necesarios para acoger todas las actividades necesarias para la identificación del problema, la obtención de resultados, el análisis y la comprobación de los mismos.

En un orden cronológico, se tuvo como primera etapa la identificación del problema, luego, como segunda etapa, la selección de los principales parámetros manipulables involucrados y los niveles que poseen, siguiendo con la tercera etapa que fue realizar los experimentos seleccionados según el diseño experimental en el banco de pruebas y recolección de datos respuesta, se continuó con la cuarta etapa que consistió en un análisis del diseño de experimentos para obtener las gráficas que permitieron realizar un estudio más detallado de las respuestas y así seleccionar los valores más adecuados para los parámetros manipulables según los requerimientos de cada combinación cúpula-quemador. Una vez se tuvieron los valores del análisis, como quinta etapa se llevaron algunos de estos valores y cambios de configuración que se pudiesen implementar en el momento al horno de estudio y se verificaron indicadores de consumo de gas, consumo específico de energía y medición de los niveles de gases de combustión por zonas donde fue aplicado el cambio. Una vez verificados los indicadores clave, si no se lograron los objetivos de reducción de consumos y bajar los niveles de contaminantes sin haber afectado la calidad del producto, como sexta etapa se replantearon algunos cambios con otros valores u otras configuraciones que permitieron lograr finalmente los objetivos. En la *figura 23* se puede observar un diagrama de flujo que indica las etapas seguidas a lo largo del proyecto.

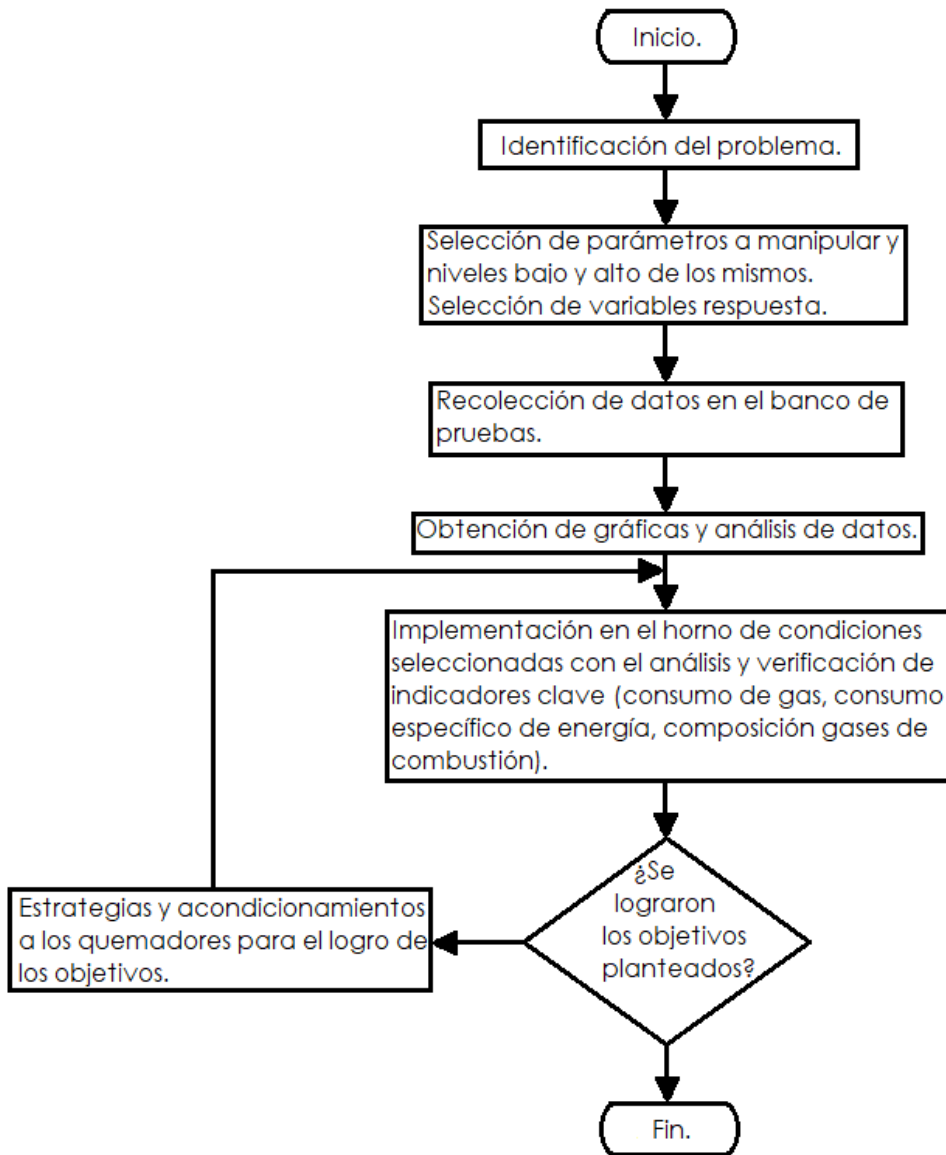


Figura 23. Diagrama de flujo de las etapas desarrolladas en la metodología (Realización propia).

A continuación, se explica con más detalle cada una de las etapas de la metodología anteriormente mencionadas.

Primera etapa: En esta etapa se identificó el problema del proyecto, el cual se asoció principalmente al alto consumo de gas natural en el horno, lo que podría estar relacionado a problemas en la combustión y configuración de los parámetros manipulables establecidos para los quemadores, pues en la empresa hasta hace poco tiempo, no se había adelantado un estudio a detalle para profundizar el estado de cada zona del horno, y así, como problemas derivados de las configuraciones actuales, se identificó un alto

consumo específico de energía y que los niveles de gases de combustión como un ítem adicional, se podrían disminuir.

Segunda etapa: Puesto que en el horno, para llevar a cabo el proceso de combustión son regulados los parámetros de presión de aire y presión de gas, y en el banco de pruebas ocurre de la misma manera, estos dos fueron los propuestos como factores de entrada en el diseño experimental y además, se hicieron pruebas iniciales para identificar los niveles máximo y mínimo de estos parámetros que se podían obtener en el banco de pruebas para llevar a cabo los experimentos, dando como resultado que con el quemador Modena se tenía un rango en la presión de gas que iba desde 30 mm.c.a hasta 140 mm.c.a y en presión de aire un rango desde 10 mm.c.a hasta 120 mm.c.a. Para el quemador TCK se obtuvo un rango de presión de gas entre 30 mm.c.a hasta 200 mm.c.a y en presión de aire un rango entre 10 mm.c.a y 100 mm.c.a. Así que, con dos factores y cada uno con nivel máximo y mínimo, se puede aplicar apropiadamente un diseño factorial 2^2 , el cual en Statgraphics XVI.I® se ingresan los dos factores y los niveles de los mismos, se aleatorizan los experimentos y se selecciona un punto central con repetición para evaluar la dispersión de los datos, con lo que se obtuvo 6 corridas por cada experimento de cada combinación cúpula-quemador que hubo que realizar. Como se evaluaron dos quemadores y tres tipos de cúpulas que componen la totalidad de combinaciones existentes en el horno, se tuvo un total de 6 combinaciones posibles y cada una de ellas con 6 corridas a diferentes niveles y punto central, dando una totalidad de 36 corridas diferentes que se realizaron para la medición de las variables respuesta.

Una vez definidos los factores de entrada, sus niveles y las corridas que se debían realizar, se continuó con la selección de variables respuesta, las cuales debían ser significativas para realizar un análisis del proceso ocuriente y además debían ser mensurables fácilmente en el banco de pruebas de manera directa o con el uso de instrumentación disponible. Para cada corrida, se decidió una vez estabilizado el equipo en las condiciones establecidas por el experimento, importante medir el caudal consumido de aire y de gas durante la misma, también la longitud de la llama alcanzada y el color de la misma, como también la medición de temperatura a diferentes distancias del final de la cúpula (T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , $T_{Control}$ en *figura 11*), así como la medición con el uso del analizador de gases, de los niveles emitidos en la chimenea, midiéndose así el porcentaje de CO_2 , O_2 , eficiencia de combustión (EFF.) y exceso de aire (E.A), como también las partes por millón (ppm) de CO , NO_x y SO_2 , y finalmente se mide también con

la termocupla del analizador la temperatura de los gases de combustión en la chimenea.

Tercera etapa: Una vez seleccionados los factores, las corridas que se deben realizar y las variables respuesta que deben ser medidas, se pasó al banco de pruebas para ejecutar cada una de las 36 combinaciones diferentes. Para realizar de manera más eficiente y guiada cada uno de los pasos a seguir para operar el banco de pruebas con cada quemador y cúpula que estén montados, y hacer las mediciones a las condiciones que dictaminó el experimento, se estandarizaron estos pasos, los cuales se consignan en el diagrama de flujo mostrado a continuación.

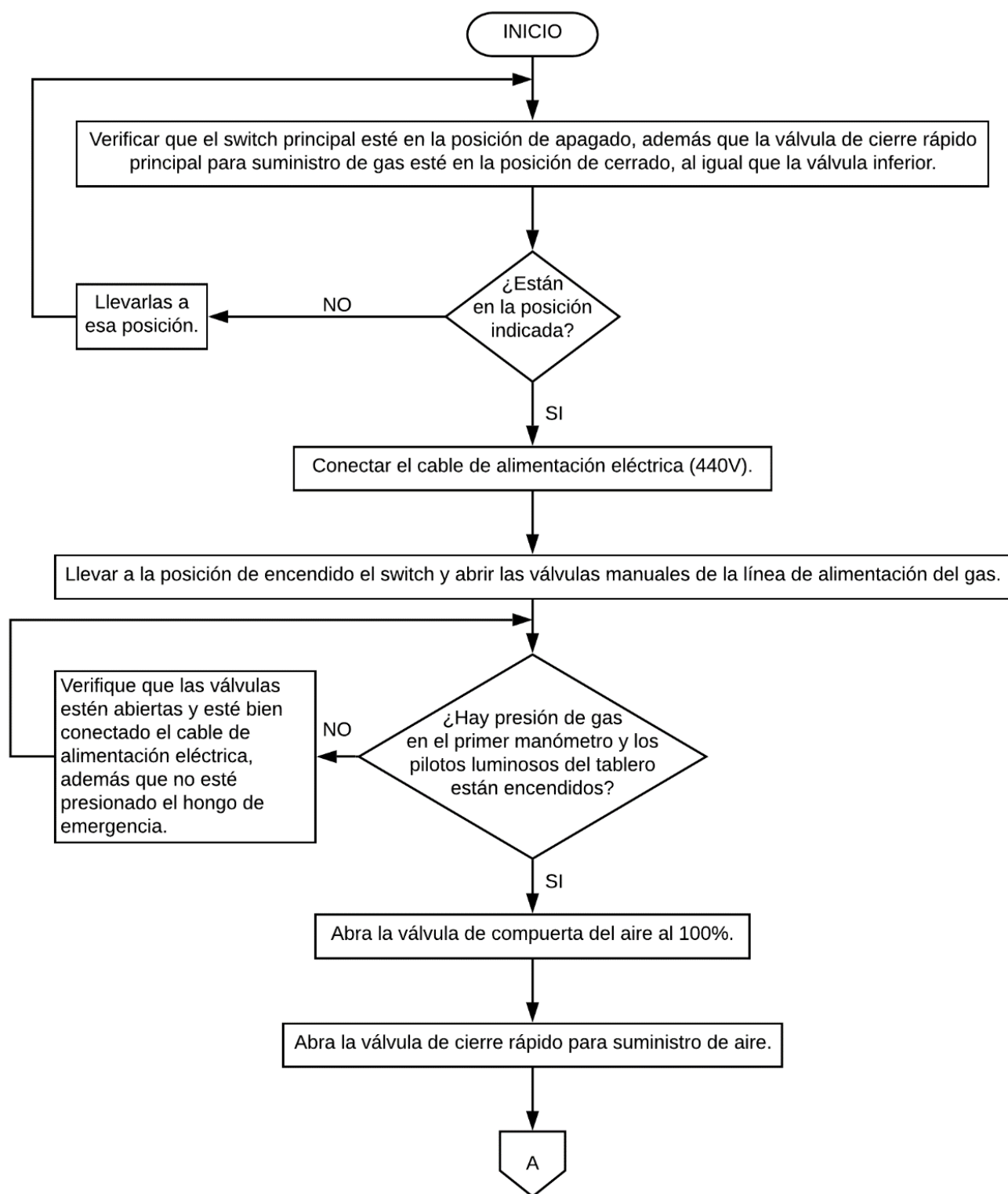


Figura 24. Estandarización del montaje de un experimento en el banco de pruebas y medición de variables respuesta (Parte 1). (Realización propia).

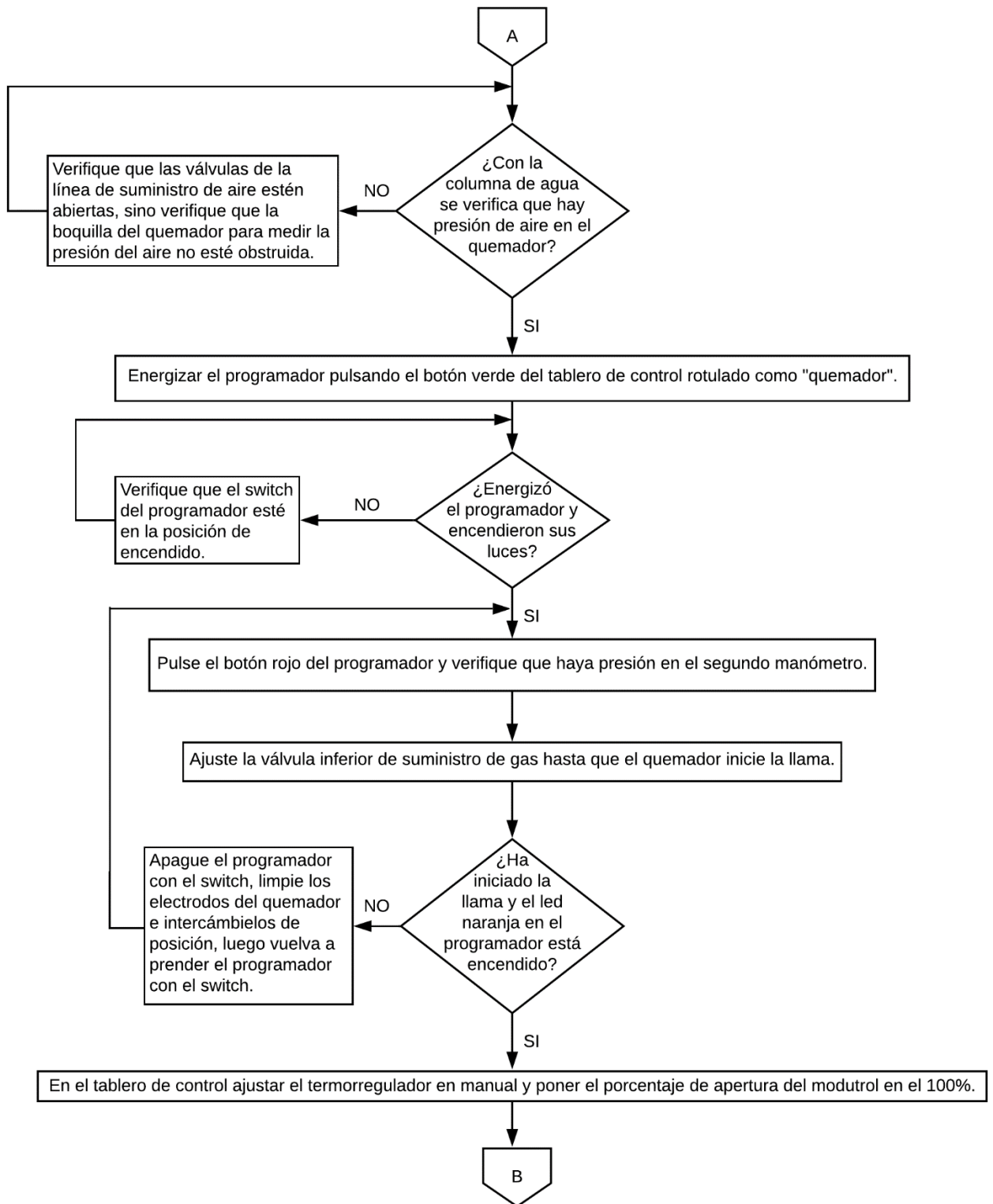


Figura 25. Estandarización del montaje de un experimento en el banco de pruebas y medición de variables respuesta (Parte 2). (Realización propia).

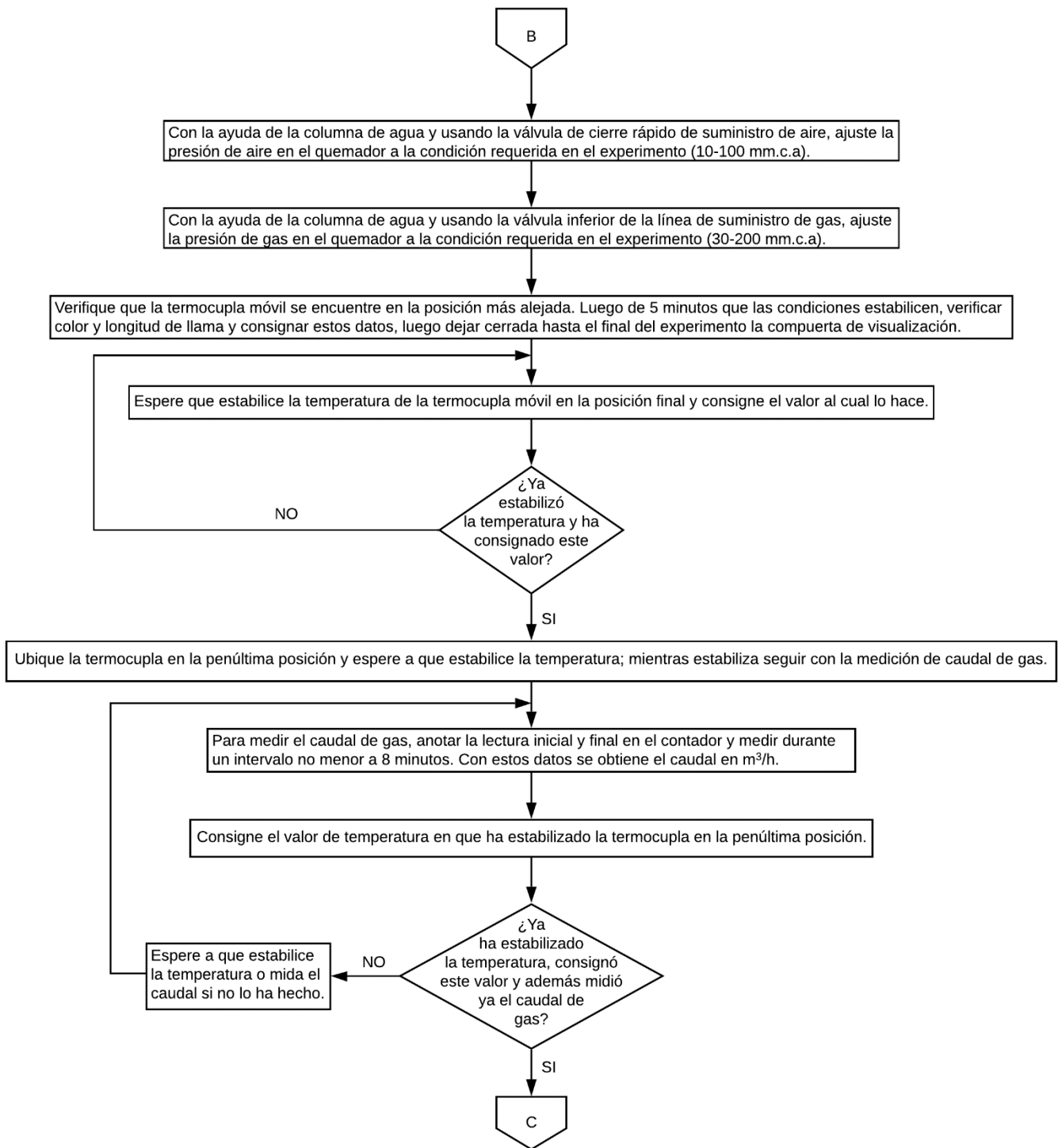


Figura 26. Estandarización del montaje de un experimento en el banco de pruebas y medición de variables respuesta (Parte 3). (Realización propia).

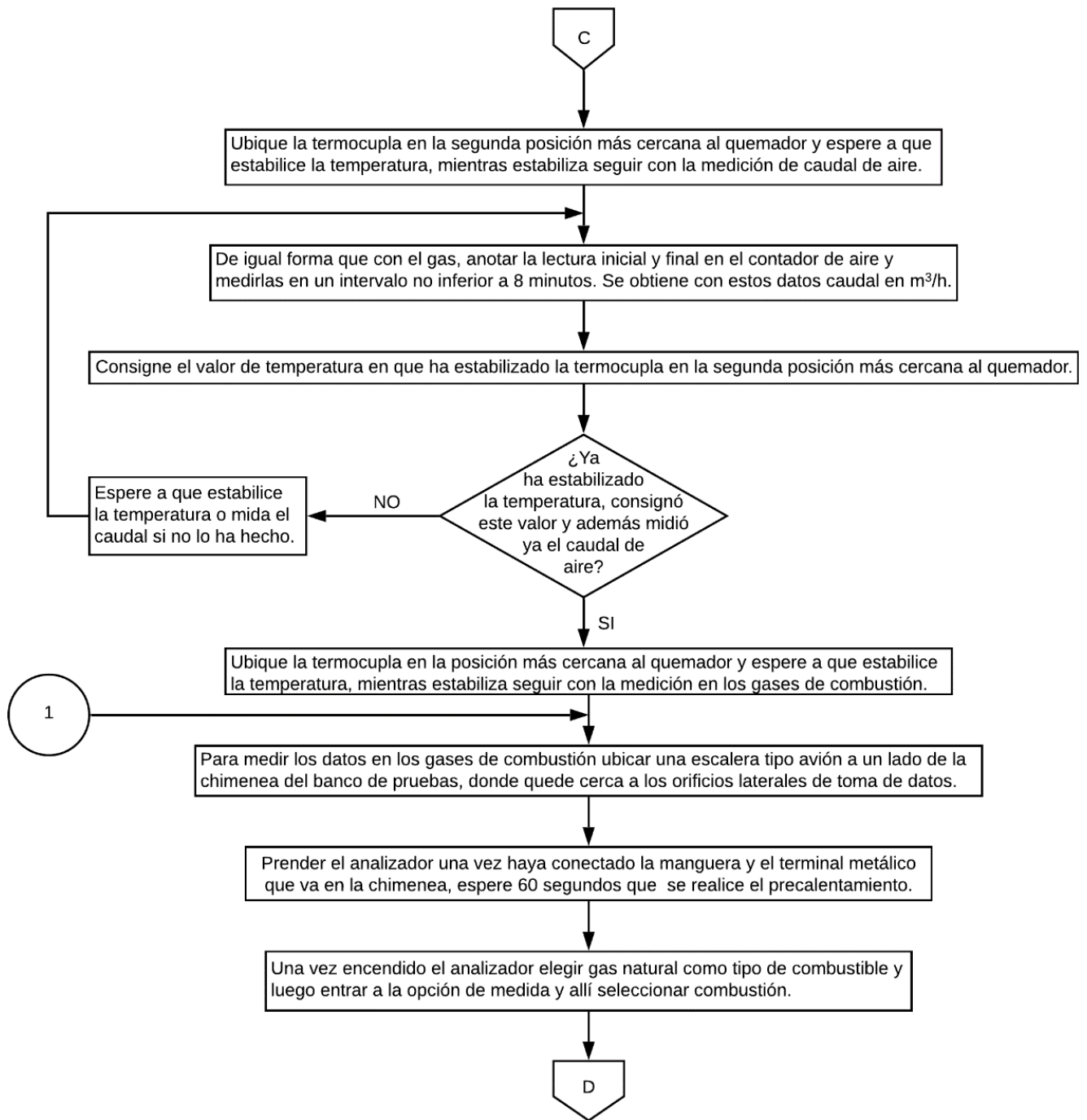


Figura 27. Estandarización del montaje de un experimento en el banco de pruebas y medición de variables respuesta (Parte 4). (Realización propia).

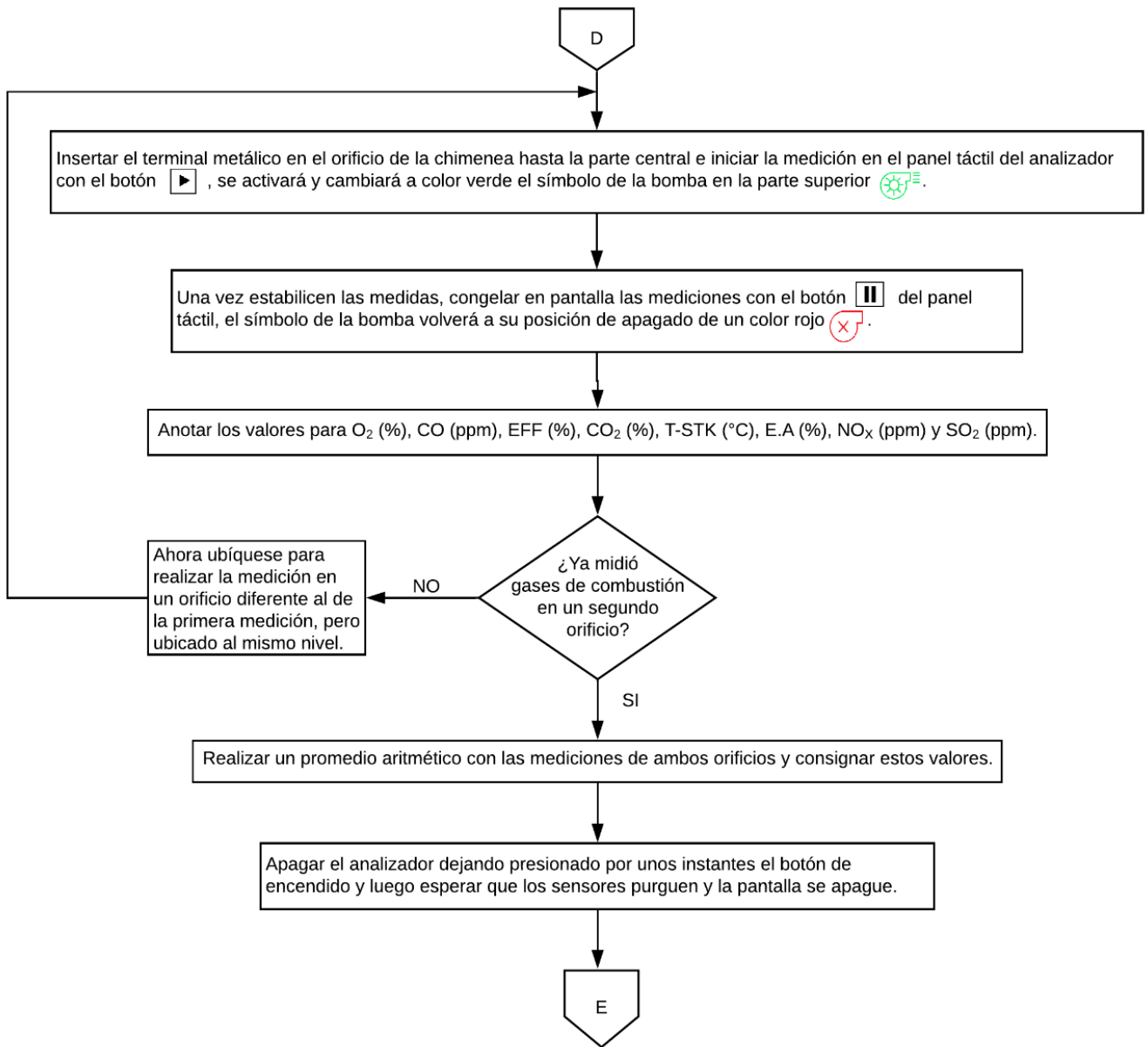


Figura 28. Estandarización del montaje de un experimento en el banco de pruebas y medición de variables respuesta (Parte 5). (Realización propia).

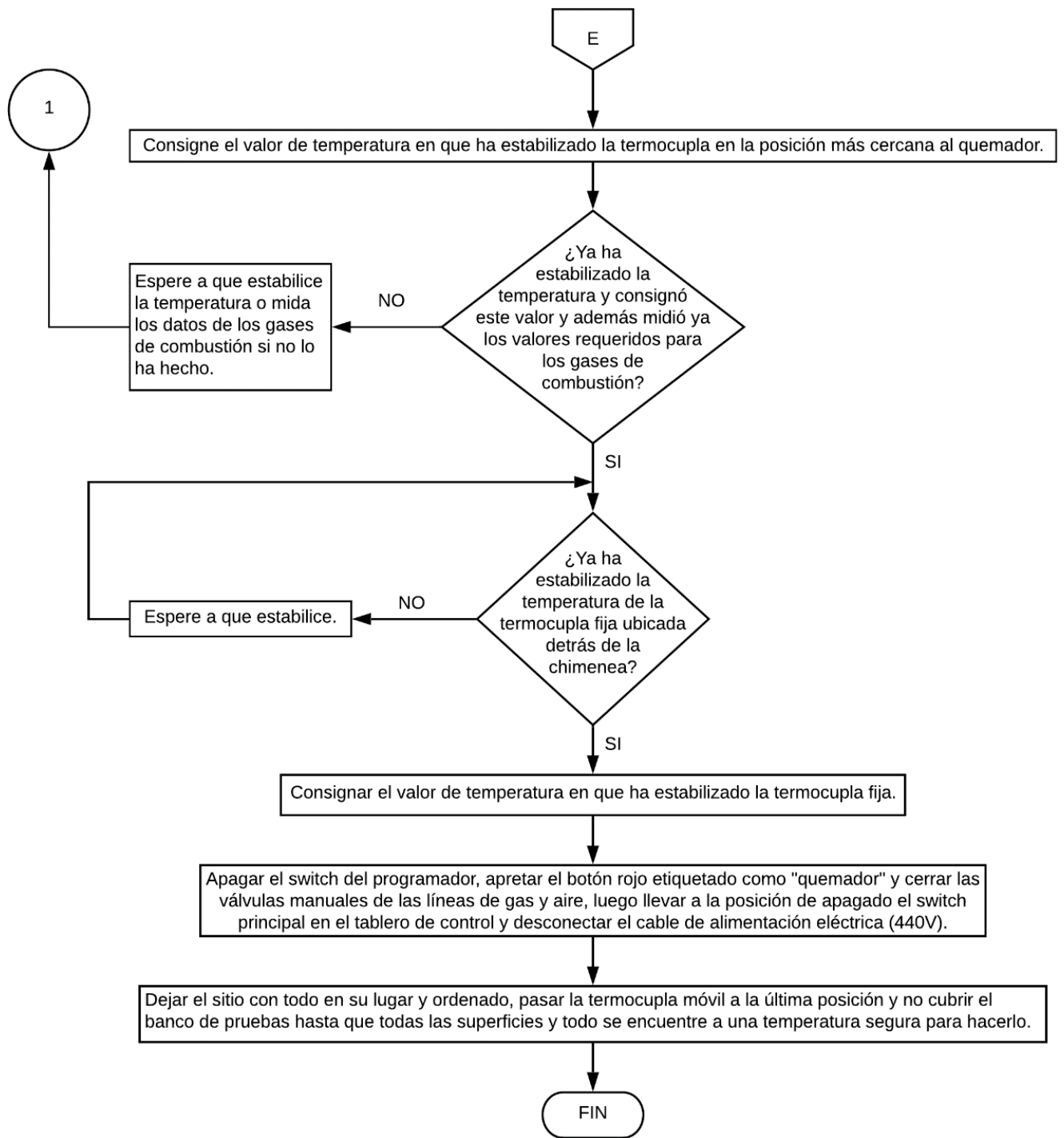


Figura 29. Estandarización del montaje de un experimento en el banco de pruebas y medición de variables respuesta (Parte 6). (Realización propia).

Cuarta etapa: Ya obtenidos los valores de las variables respuesta, y normalizados los caudales de gas y aire, se procede en Statgraphics a montar los datos y hacer el análisis del diseño de experimentos, con el cual se logra generar superficies y contornos de respuesta, así como gráficos Pareto, de interacción de variables y de efectos principales, con los cuales se pudieron realizar los análisis correspondientes a cada combinación de cúpula-quemador, además, se generaron otros gráficos que quedan como archivo de base de datos en la empresa para futuros estudios o correcciones de momento que se deben realizar en función a alguna variable respuesta en específico que se necesitase. La forma en que se analizaron los datos no siempre fue la misma, pues cada caso particular presentaba ventajas o no en analizar primero algunas gráficas y luego otras, pero en forma somera se puede decir que primero se tuvo en cuenta las gráficas hechas en Excel® de porcentaje de CO₂ y O₂ y de eficiencia en función del exceso de aire para hallar un rango ideal de operación de cada combinación cúpula-quemador, luego, en función de la longitud de llama requerida con cada cúpula, y la temperatura que se necesitase en función de la zona donde está ubicada en el horno, se seleccionaban preliminarmente algunas condiciones de presión de aire y presión de gas, para finalmente, con la gráfica de consumo, elegir cuál sería la condición más adecuada sin sacrificar en demasía temperatura ni tener un consumo muy elevado de gas. Además del análisis directo de cada combinación cúpula-quemador, se analizó de forma paralela los posibles cambios de quemadores que se podrían realizar en función de las configuraciones existentes del horno, esto, ya sea para ganar mayor temperatura sin comprometer el consumo de gas, o bien, bajar con el cambio el gas consumido por el quemador.

Quinta etapa: Ya seleccionadas las condiciones de presión de aire y de gas más adecuadas según el análisis de las gráficas generadas con Statgraphics®, primero se midió en el horno las condiciones existentes de trabajo, esto con el consumo de gas, el consumo específico de energía y cómo estaban los niveles de gases de combustión por cada zona del horno, luego, se implementaron de las condiciones seleccionadas, las más factibles de llevar a cabo al momento en el horno, además se cambiaron algunas nuevas configuraciones de quemadores-cúpula que fueron analizados de forma paralela para las zonas, así, luego de verificar que no haya descendido la calidad del producto (planaridad, trapecio, tonalidad, entre otras), se midieron nuevamente los indicadores clave, para hacer la comprobación de que con los cambios implementados, se pudieron lograr los objetivos planteados.

Sexta etapa: En esta etapa fue donde, si se lograban solo de manera parcial los objetivos o alguno de ellos se alejaba en demasía o que de alguna forma se viese afectada la calidad del producto, se retrocedió al análisis para hacer una selección de condiciones o configuraciones que en el primer caso no fueron seleccionadas como las más adecuadas, y así, se realizaron los ajustes necesarios hasta lograr quedar satisfechos con la disminución en los indicadores clave analizados.

Resultados y análisis.

Una vez fueron tomados los datos de las variables respuesta en el banco de pruebas, lo primero a proceder es hacer la normalización de los caudales de gas y aire con el factor de corrección de la ecuación 5, obteniéndose los valores para los factores en cada combinación cúpula quemador como se puede observar en las *tablas 6 a 11* del *anexo A*.

Luego, los valores definitivos con caudales normalizados que fueron ingresados al diseño de experimentos en Statgraphics® son mostrados en las *tablas 12 a 23* del *anexo B*. Para estas *tablas* se nota que con el quemador Modena los experimentos con mínima presión de aire y máxima de gas no pudieron realizarse a 10 mm.c.a y 140 mm.c.a respectivamente, esto porque a esta condición no alcanzaba a estar en el rango de inflamabilidad para el gas natural, ya que el quemador Modena respecto al TCK tiene un caudal de gas de salida mayor, al tener más cantidad de orificios en la boquilla de gas, lo que causa que no se produzca llama y hacía que el equipo cortara el flujo de gas, para solucionar esto, se llevó el equipo a las condiciones mínimas de aire y máxima de gas con que se podía producir llama sin que el equipo cortase el flujo de gas para cada cúpula en particular.

Según la curva de cocción del horno, cada combinación de cúpula-quemador es usada en diferentes configuraciones para alcanzar la temperatura requerida, además de ir calentando las zonas específicas del horno donde la baldosa en sentido de avance va requiriendo. En el *anexo C* se pueden ver las temperaturas del set point en las zonas del horno y la configuración de cúpula-quemador existente.

De acuerdo a lo anterior, se tiene que para la cúpula de 60 mm, con una longitud de 37 cm, que es usada para calentar el área de la segunda baldosa como se muestra en la *figura 18*, se necesitaría una longitud de llama de unos 50 cm, pues la longitud de la cúpula es muy similar al espesor de las paredes del horno. También, para la cúpula de 500x40 mm, con una longitud de 50 cm, que se usa para calentar la zona intermedia del horno, se necesitaría una longitud de llama de unos 80 cm, pues la cúpula sobresale unos 12 cm desde la pared interna del horno, y con esa longitud de llama se acercaría al área de la tercera baldosa. Finalmente, para la cúpula Ray con un largo de 47 cm, que se usa para calentar las paredes del horno, por el área de la primera baldosa de tal forma que su llama no afecte la segunda, se necesitaría para esto una llama de longitud inferior a los 40 cm, pues la cúpula sobresale de la pared interna del horno unos 10 cm.

Con el análisis del párrafo anterior y la *figura 30* a continuación, se podrá hacer un análisis más detallado de las gráficas obtenidas con los datos del banco de pruebas en el análisis experimental.

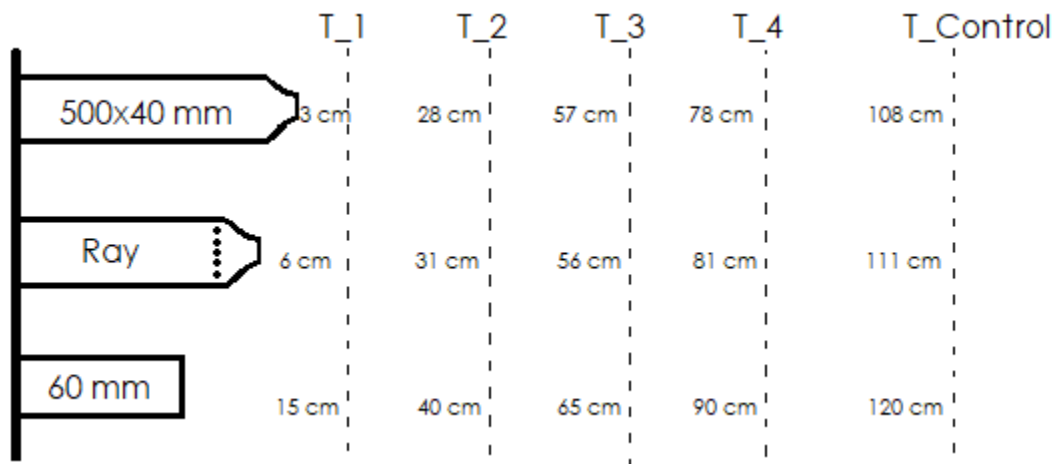


Figura 30. Distancia de las diferentes cúpulas a cada punto de medición de temperatura medidas en el banco de pruebas (Realización propia).

A continuación, se presentan las gráficas más representativas con que se desarrolla el análisis de cada combinación cúpula-quemador, además se establece según criterios operacionales, cuál sería la condición más adecuada según la zona donde se encuentre ubicada esta combinación.

De forma algo general, el modus operandi para establecer la condición más adecuada, es fijar primero la longitud requerida según la cúpula, pues según la estructura de la llama, es al final de esta donde se logra la mayor temperatura al ocurrir allí con un exceso de aire la combustión completa; segundo es obtener una temperatura a esta longitud (ver *figura 30*) no demasiado alejada del set point, pues hasta unos 200-300 °C aproximadamente, los 8 quemadores en total por zona a ambos lados del horno, podrán llegar a compensar lo que falta de temperatura hasta alcanzar la del set point. Finalmente, con las condiciones que cumplan estos criterios, se puede decidir la que menor consumo de gas natural posea, además, que no esté demasiado alejada de la zona de operación ideal de los quemadores (ver *figura 17*), siempre y cuando cumpla las anteriores condiciones.

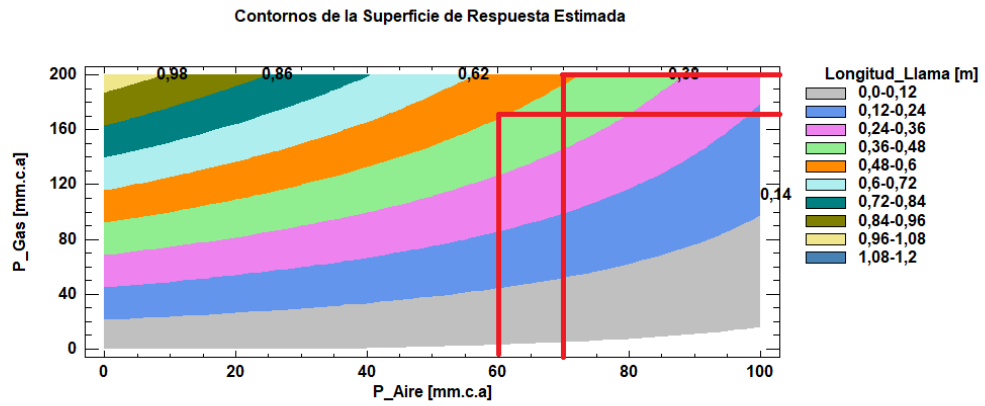


Figura 31. Contorno de longitud de llama para combinación quemador TCK-cúpula 60 mm.

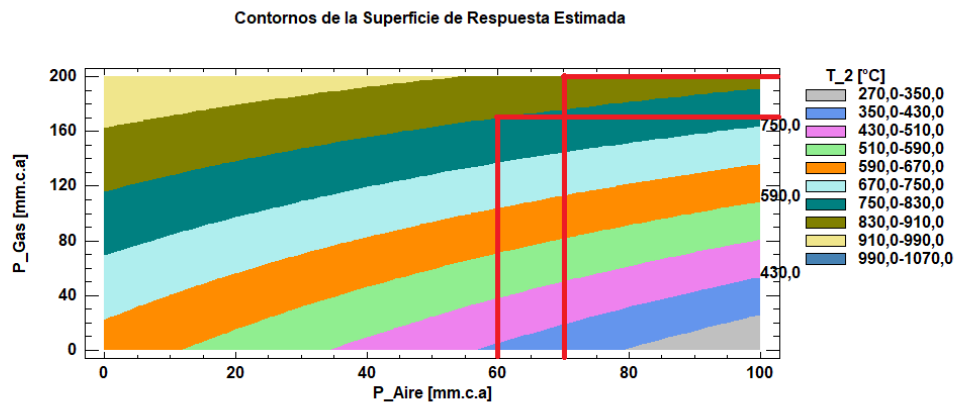


Figura 32. Contorno de temperatura en el punto T_2 para combinación quemador TCK-cúpula 60 mm.

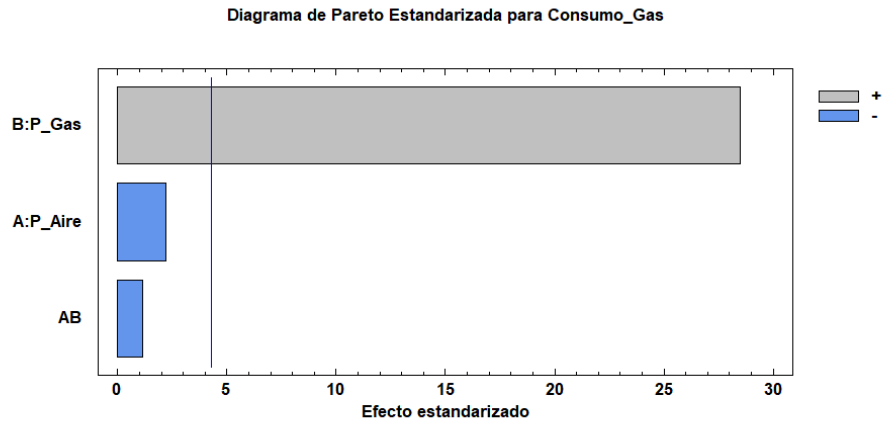


Figura 33. Gráfico de Pareto en consumo de gas natural para combinación quemador TCK-cúpula 60 mm.

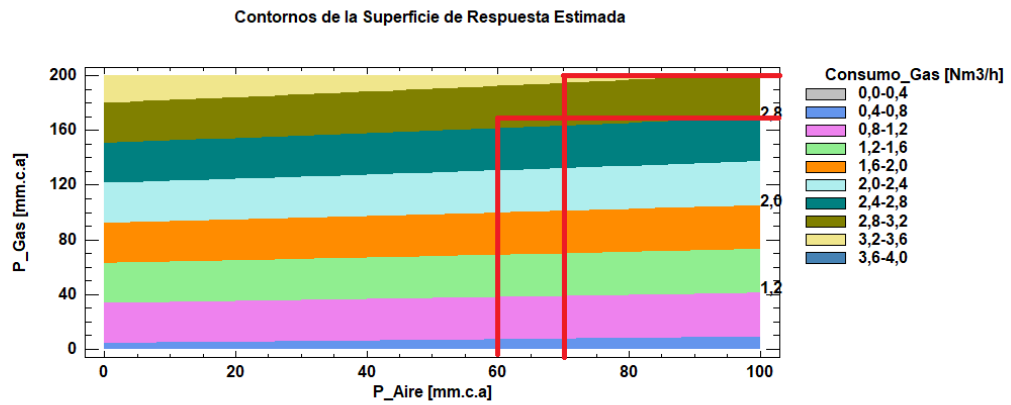


Figura 34. Contorno de consumo de gas natural para combinación quemador TCK-cúpula 60 mm.

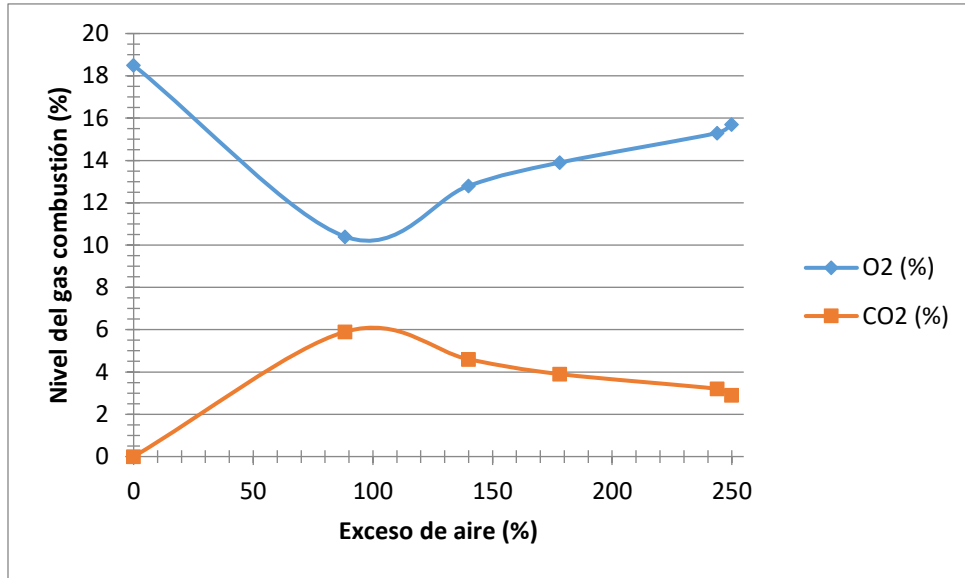


Figura 35. Gráfica de niveles de CO₂ y O₂ en función del exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula 60 mm.

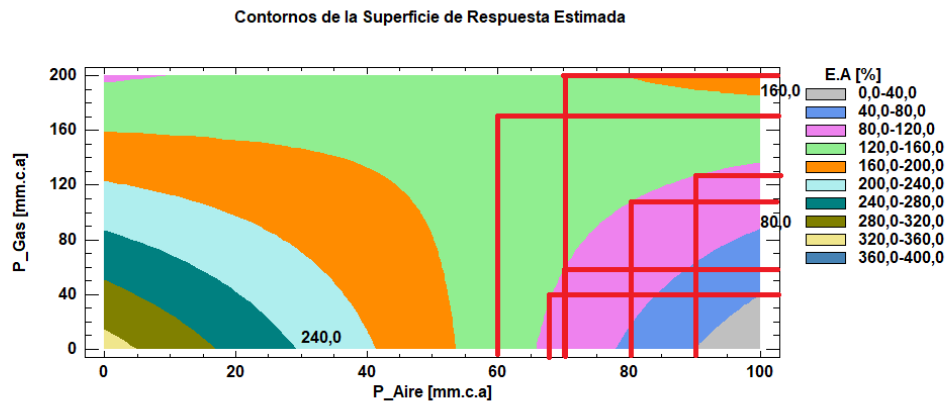


Figura 36. Contorno de exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula 60 mm.

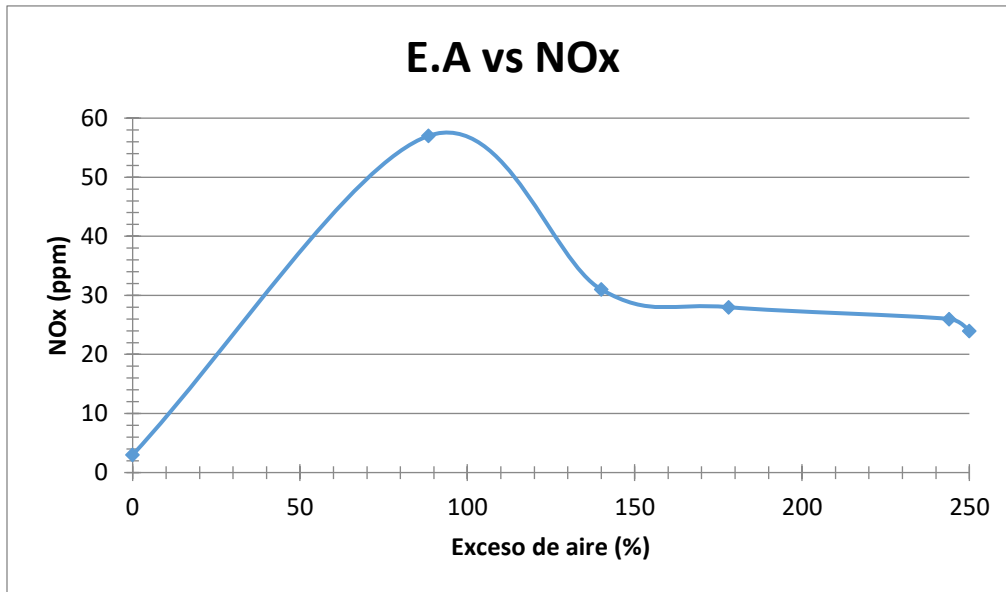


Figura 37. Gráfica de nivel de NO_x en función del exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula 60 mm.

Para la combinación TCK-60 mm, se requiere una longitud de llama de unos 50 cm, por lo cual según la *figura 30*, la posición más adecuada para ver la temperatura es T₂. Al usarse TCK-60 mm en zonas S18 (1160 °C), S20 (1160 °C), S17 (1130 °C) y S21 (1010 °C), se escoge la condición de 70 mm.c.a en presión de aire y 200 mm.c.a en presión de gas como una condición adecuada, con esta condición no se aleja mucho del rango de operación ideal de quemadores (110-130 % exceso de aire, *figura 35*), además los niveles de NO_x en este punto también han bajado. Con respecto al consumo de gas, según el gráfico Pareto el aire no tiene gran relevancia en el consumo, por lo cual no habría que desplazar el exceso de aire sabiendo que podría cambiar la longitud de llama requerida, además, al tener más cantidad de aire a calentar en el volumen del horno, habría que destinar mayor presión de gas para alcanzar la temperatura requerida. Respecto al exceso de aire, en la *figura 36* se puede observar que si se quisiera un exceso del 120% que correspondería justo dentro del rango de operación ideal de los quemadores, esto no sería factible, pues a las condiciones que propician ese exceso de aire no se logra ni la longitud de llama ni la temperatura requerida para la cúpula y zona del horno respectivamente.

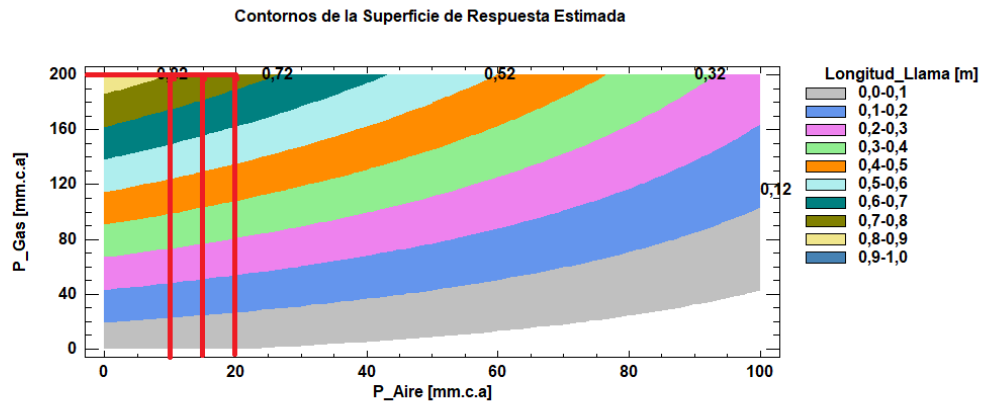


Figura 38. Contorno de longitud de llama para combinación quemador TCK-cúpula 500x40 mm.

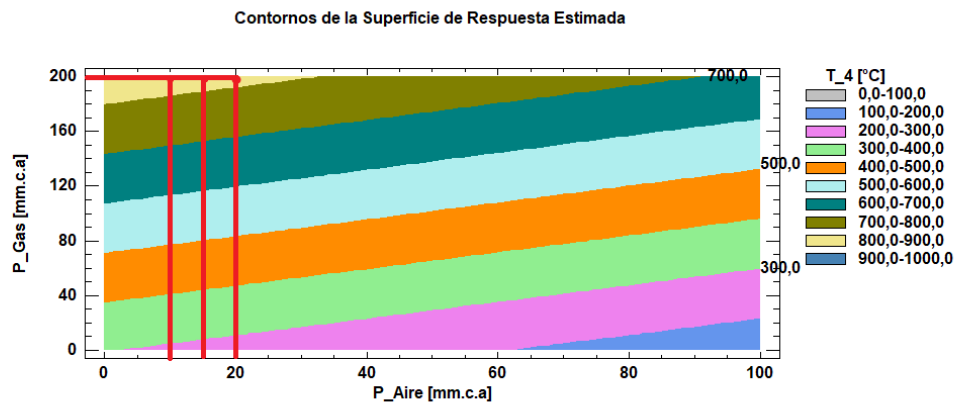


Figura 39. Contorno de temperatura en el punto T_4 para combinación quemador TCK-cúpula 500x40 mm.

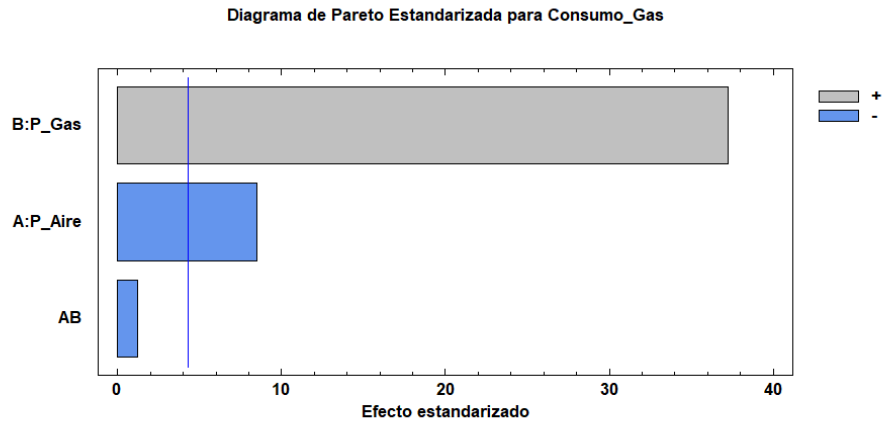


Figura 40. Gráfico de Pareto en consumo de gas natural para combinación quemador TCK-cúpula 500x40 mm.

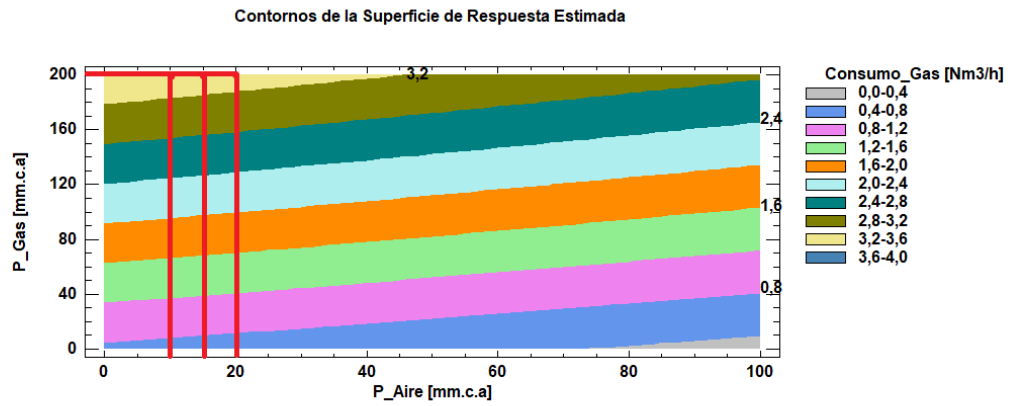


Figura 41. Contorno de consumo de gas natural para combinación quemador TCK-cúpula 500x40 mm.

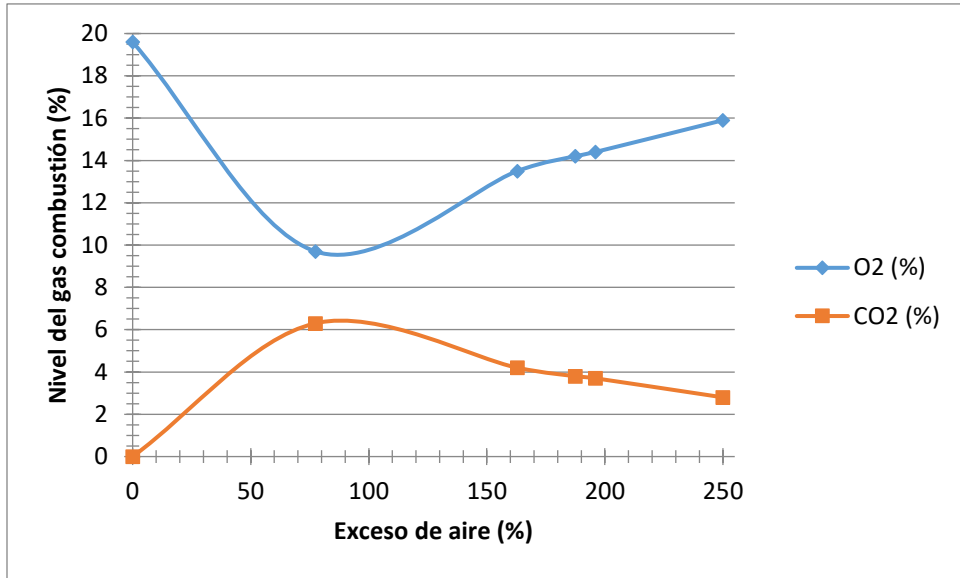


Figura 42. Gráfica de niveles de CO₂ y O₂ en función del exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula 500x40 mm.

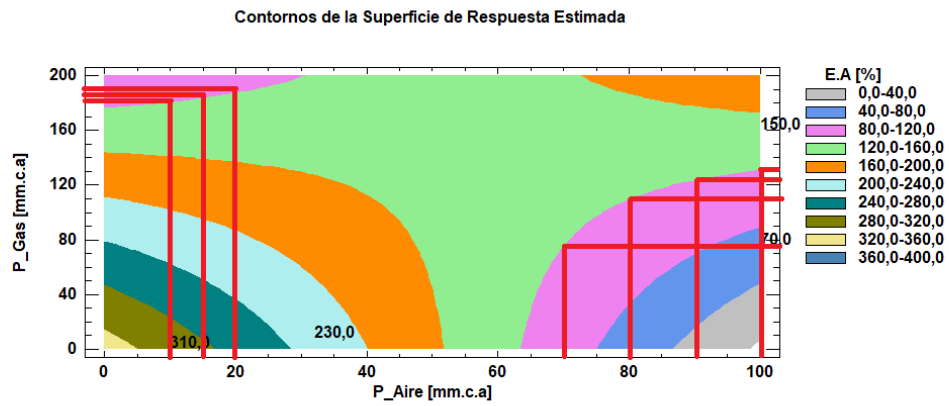


Figura 43. Contorno de exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula 500x40 mm.

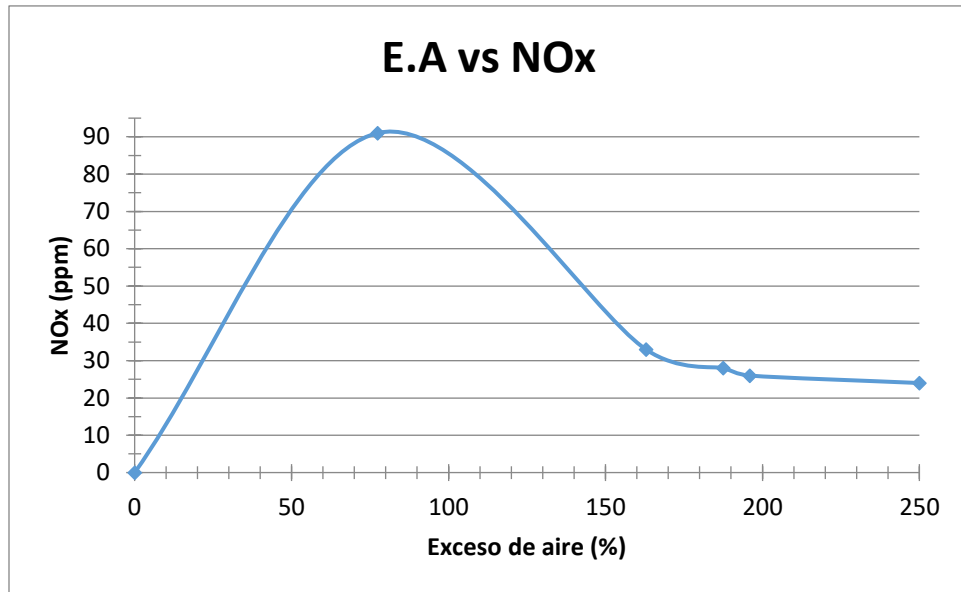


Figura 44. Gráfica de nivel de NO_x en función del exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula 500x40 mm.

Para la combinación TCK-500x40 mm, se requiere una longitud de llama de unos 80 cm, por lo cual según la *figura 30*, la posición más adecuada para ver la temperatura es T₄. Al usarse TCK-500x40 mm en zonas S18 (1160 °C), S15 (1130 °C), S17 (1130 °C) y S19 (1130 °C), y con la longitud requerida, se observa en la *figura 38*, que a partir de 60 mm.c.a en presión de aire ya no se alcanzaría la longitud requerida, además, con presiones de aire bajas (alrededor de 20 mm.c.a), se puede lograr un exceso de aire cercano al de operación ideal (110-130 %). Con 10 mm.c.a se podría alcanzar los requerimientos necesarios, pero experimentalmente se ha observado que a esta condición tan baja en presión de gas, la llama es demasiado inestable y es de muy mala calidad (color muy amarillo y frente de llama no direccionado), y sabiendo que según el gráfico Pareto el consumo de gas no se ve muy afectado por un incremento pequeño en presión de aire, se escoge la condición de 20 mm.c.a en presión de aire y 200 mm.c.a en presión de gas como una condición adecuada, que cumple con las condiciones requeridas y además mejorando la estabilidad y calidad de llama. Como se puede observar en la *figura 43*, el exceso de aire en el rango de operación ideal se podría alcanzar desde dos frentes, sin embargo, condiciones señaladas del lado derecho de la gráfica no lograrían alcanzar longitud de llama ni temperatura requerida, por lo cual son descartadas como opciones viables.

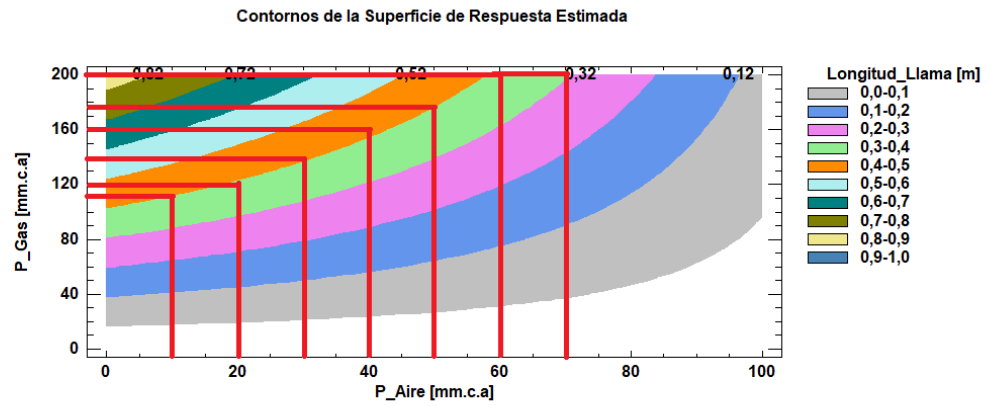


Figura 45. Contorno de longitud de llama para combinación quemador TCK-cúpula Ray.

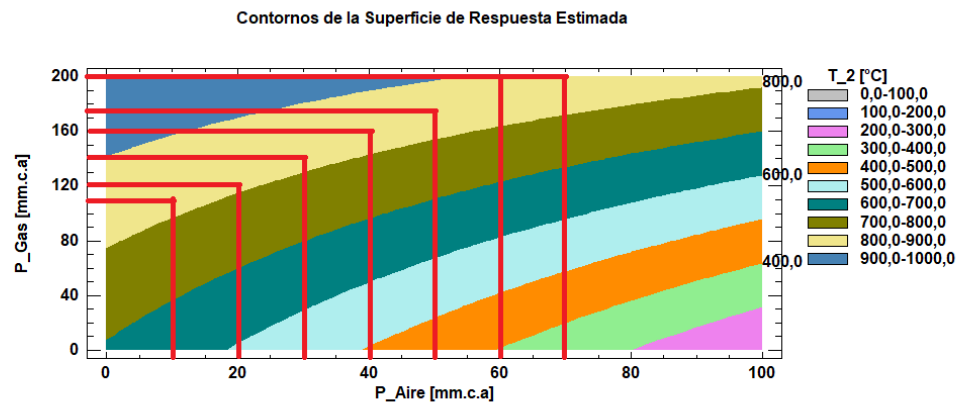


Figura 46. Contorno de temperatura en el punto T_2 para combinación quemador TCK-cúpula Ray.

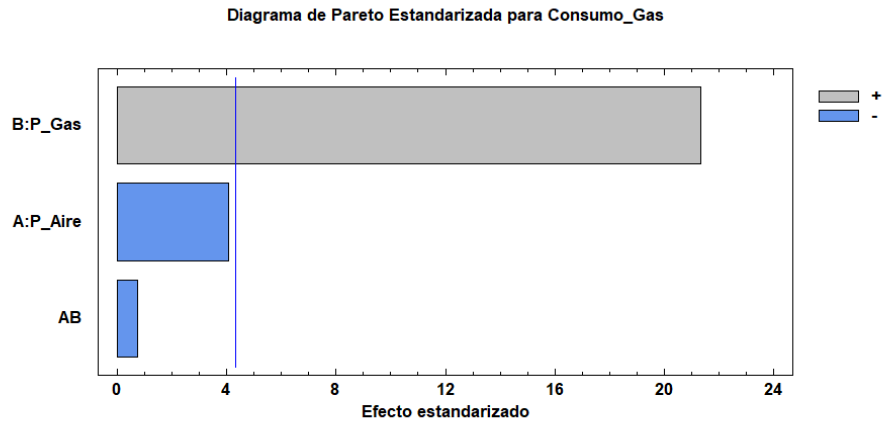


Figura 47. Gráfico de Pareto en consumo de gas natural para combinación quemador TCK-cúpula Ray.

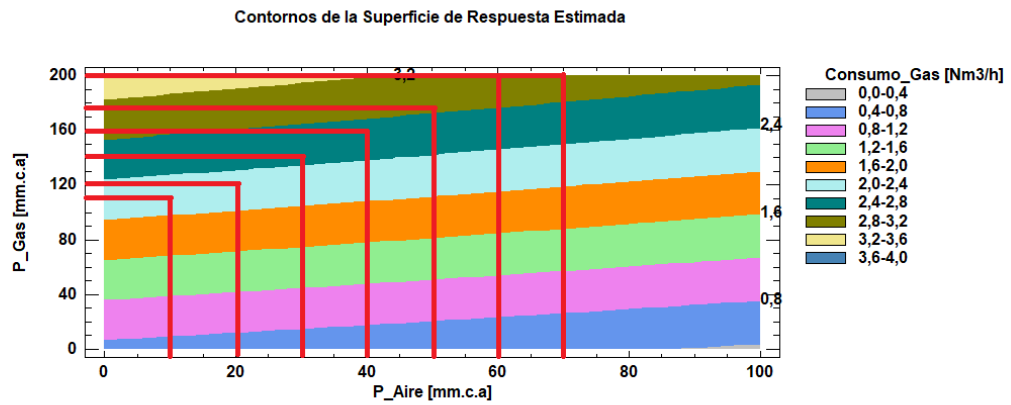


Figura 48. Contorno de consumo de gas natural para combinación quemador TCK-cúpula Ray.

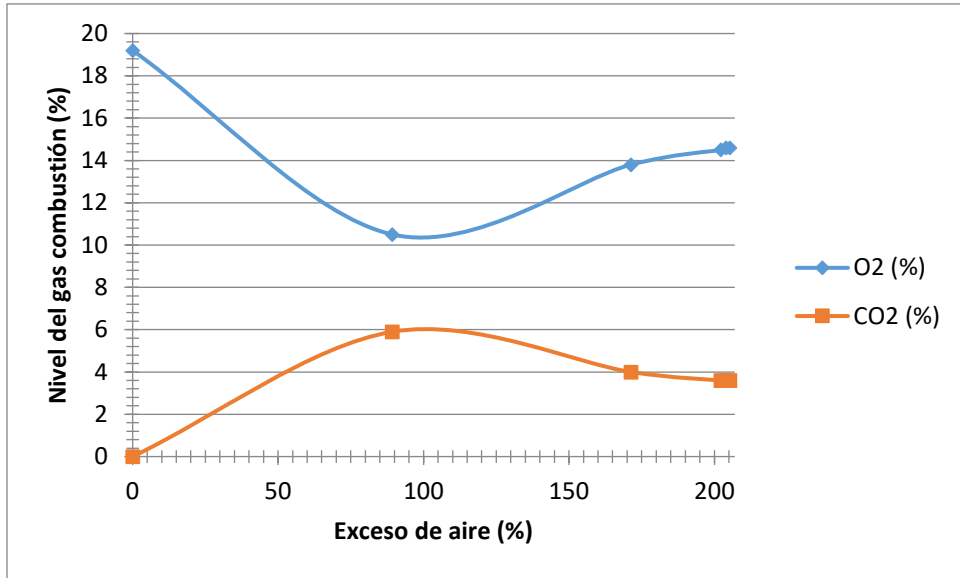


Figura 49. Gráfica de niveles de CO₂ y O₂ en función del exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula Ray.

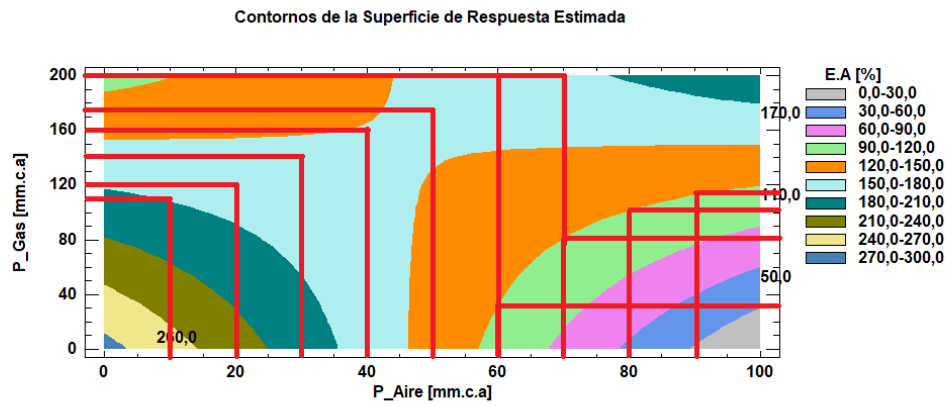


Figura 50. Contorno de exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula Ray.

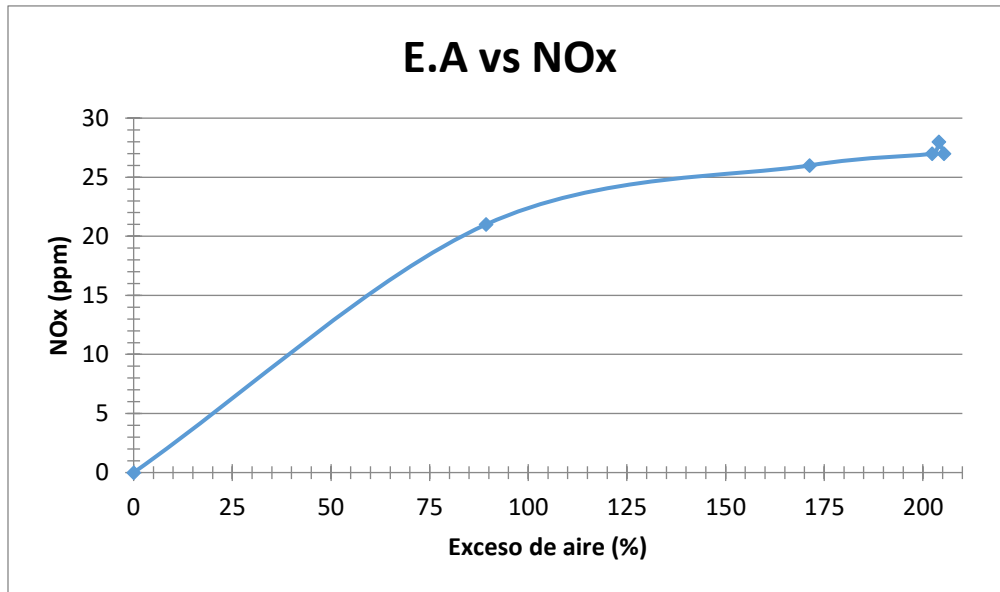


Figura 51. Gráfica de nivel de NO_x en función del exceso de aire para combinación quemador TCK-cúpula Ray.

Para la combinación TCK-Ray, se requiere una longitud de llama menor a los 40 cm, por lo cual según la *figura 30*, la posición más adecuada para ver la temperatura es T₂. Al usarse TCK-Ray en zonas S16 (1130 °C), S18 (1160 °C), S20 (1160 °C), S15 (1130 °C), S17 (1130 °C) y S19 (1130 °C), para lograr estos requerimientos, se escoge como la opción más adecuada 60 mm.c.a en presión de aire y 200 mm.c.a en presión de gas, ya que con esta no difiere en demasía con las condiciones más cercanas respecto a la presión de aire. Como se observa en la *figura 50*, si se quisiera acercarse más al rango de exceso de aire de operación ideal (110-130 % en *figura 49*), se necesitaría mayores presiones de aire y menores de gas, pero con estas condiciones no se lograría la temperatura requerida, por lo cual son descartadas como opciones viables.

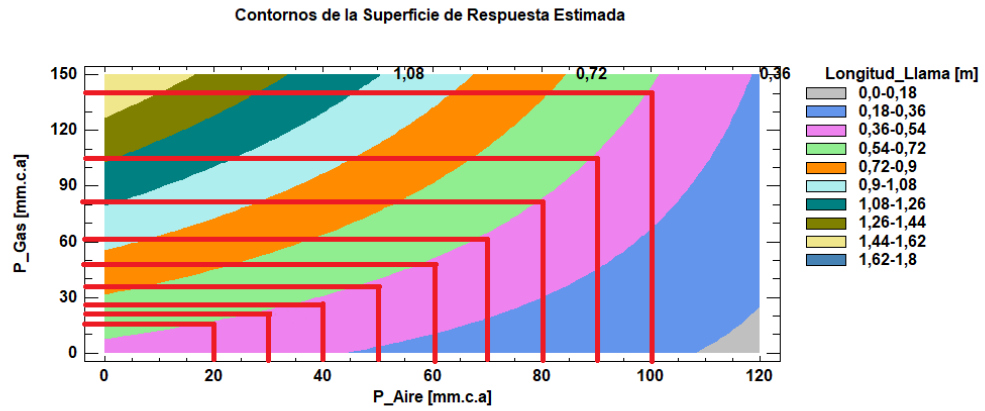


Figura 52. Contorno de longitud de llama para combinación quemador Modena-cúpula 60 mm.

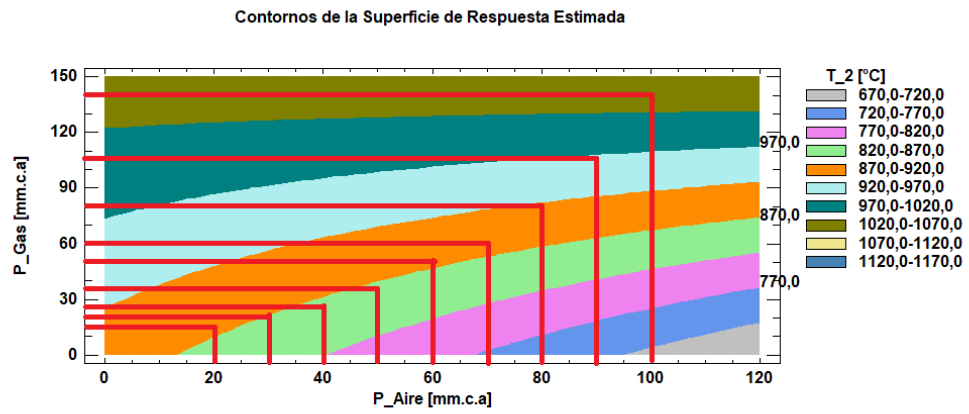


Figura 53. Contorno de temperatura en el punto T_2 para combinación quemador Modena-cúpula 60 mm.

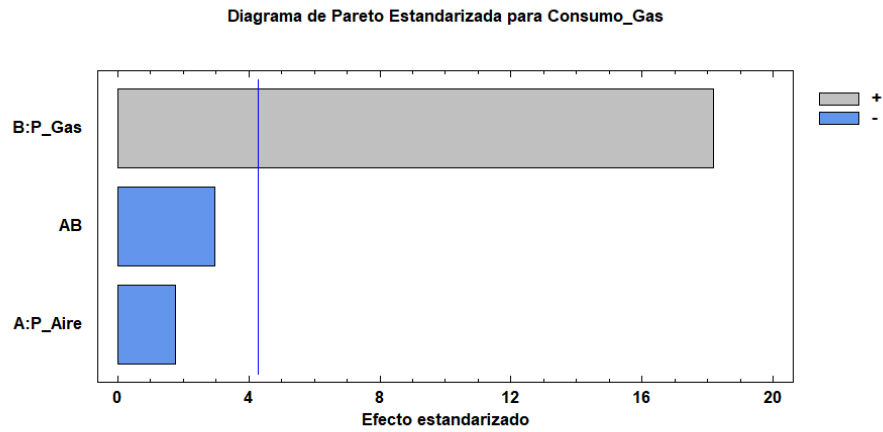


Figura 54. Gráfico de Pareto en consumo de gas natural para combinación quemador Modena-cúpula 60 mm.

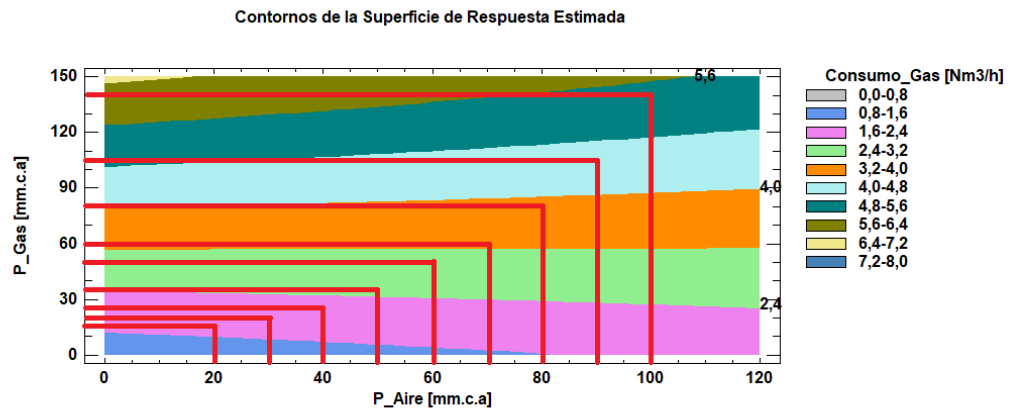


Figura 55. Contorno de consumo de gas natural para combinación quemador Modena-cúpula 60 mm.

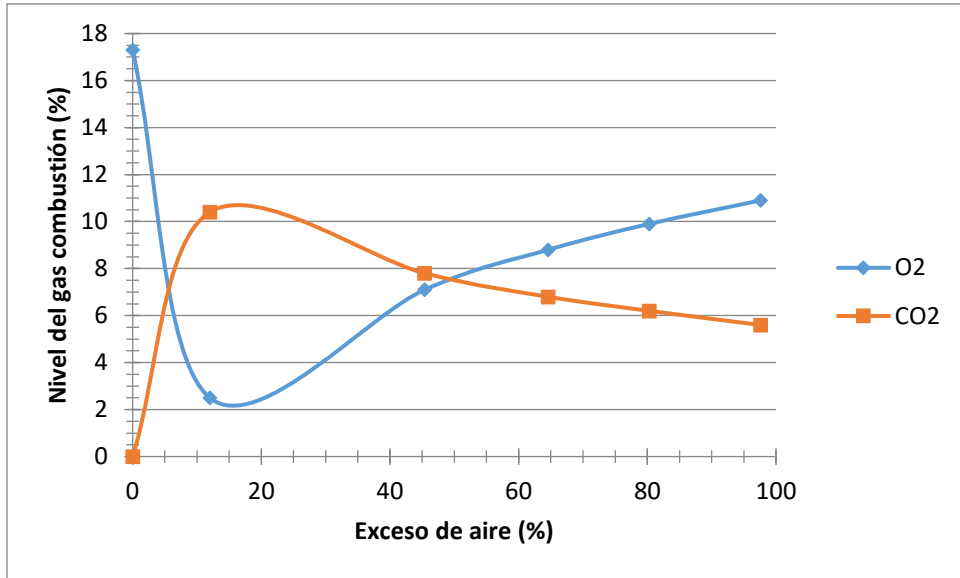


Figura 56. Gráfica de niveles de CO₂ y O₂ en función del exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula 60 mm.

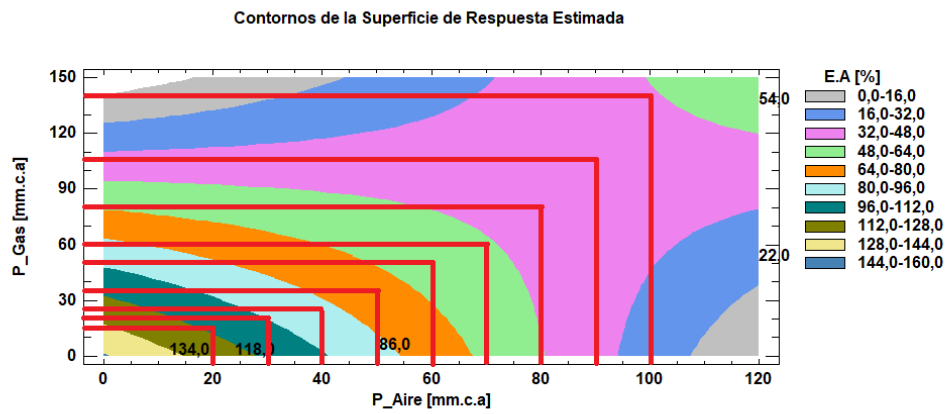


Figura 57. Contorno de exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula 60 mm.

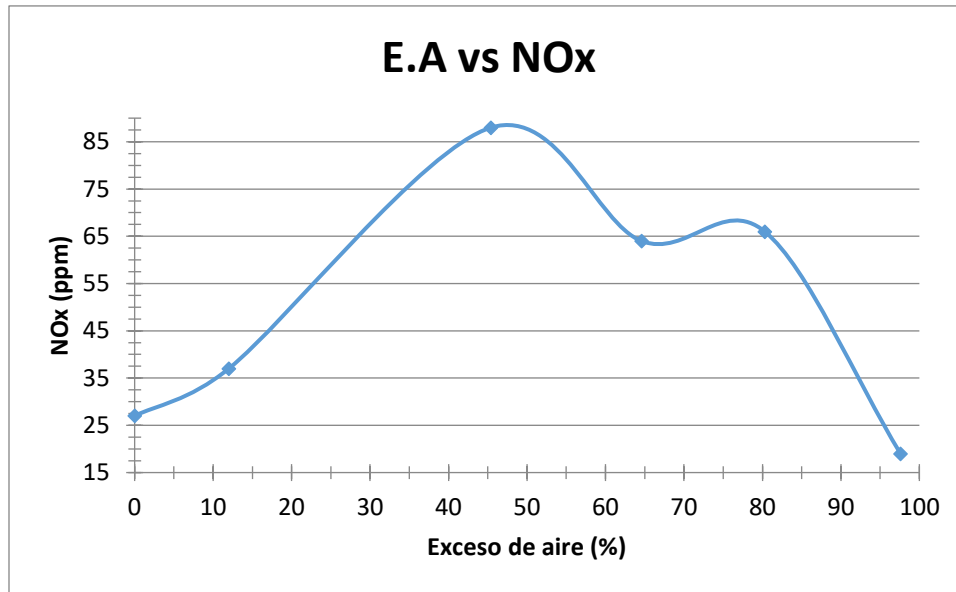


Figura 58. Gráfica de nivel de NO_x en función del exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula 60 mm.

Para la combinación Modena-60 mm, se requiere una longitud de llama de unos 50 cm, por lo cual según la *figura 30*, la posición más adecuada para ver la temperatura es T₂. Al usarse Modena-60 mm en zonas K4-K6 (820-850 °C), S8-S10 (900-930 °C), S12 (990 °C), S14 (1080 °C), S16 (1130 °C), S7 (880 °C), S9 (950 °C), S11 (1020 °C), S13 (1080 °C) y S22 (1050 °C), se decide no solo proponer una sola condición generalizada para todas las zonas, pues es una combinación que está distribuida en gran parte a lo largo del horno, y a condiciones de temperatura muy diversas, por lo que se elegirá por zonas o grupos de zonas. Para las zonas K4, K6, S7, S8 y S10 se tiene adecuado el uso de 20 mm.c.a en presión de aire y 15 mm.c.a en presión de gas, cumpliendo con los requerimientos de longitud de llama y de temperatura. Para zonas S9 y S12, donde se requiere una mayor temperatura, es adecuado usar 80 mm.c.a en presión de aire y 80 mm.c.a en presión de gas, para zonas S11, S13, S14 y S22, aunque se necesita un poco más de temperatura, las condiciones de 80 mm.c.a en presión de aire y 80 mm.c.a en presión de gas también se observan propicias. Finalmente, para la zona S16 resultaría adecuado una presión de 90 mm.c.a en aire y de 105 mm.c.a en presión de gas, pues así se puede alcanzar la temperatura requerida de una zona de quema. Según lo observado en la *figura 56*, el rango de operación ideal para esta combinación está entre 20-40 % de exceso de aire, sin embargo, en la *figura 57* se observa que no se puede lograr este exceso para todas las zonas del horno, pues no se alcanzaría la temperatura o longitud de llama requerida, sin embargo, en las condiciones planteadas, se sobrepasa el pico

de NOx (alrededor de 45% de exceso de aire, *figura 58*), logrando así, niveles más bajos de este contaminante.

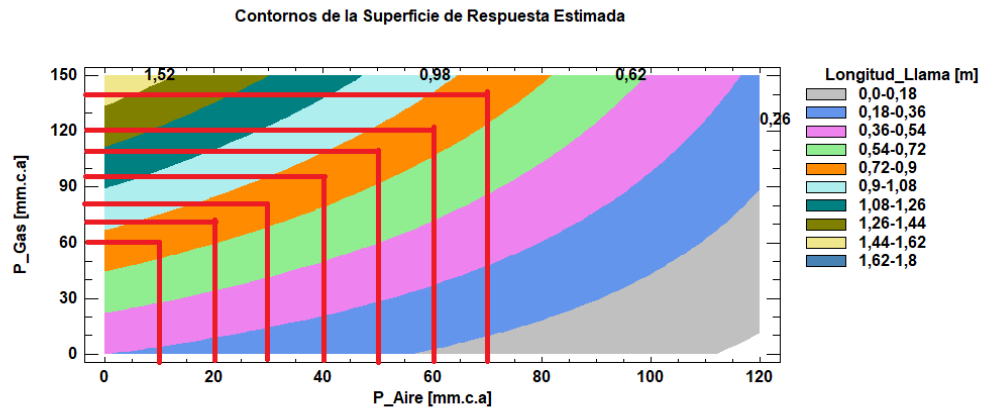


Figura 59. Contorno de longitud de llama para combinación quemador Modena-cúpula 500x40 mm.

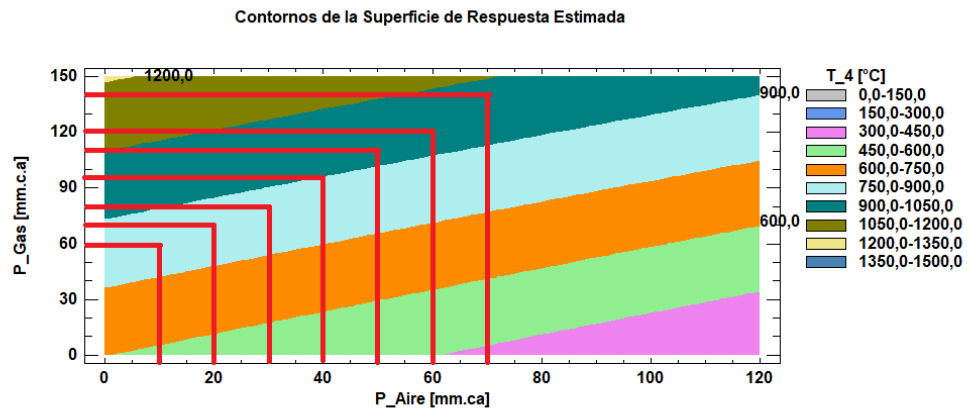


Figura 60. Contorno de temperatura en el punto T_4 para combinación quemador Modena-cúpula 500x40 mm.

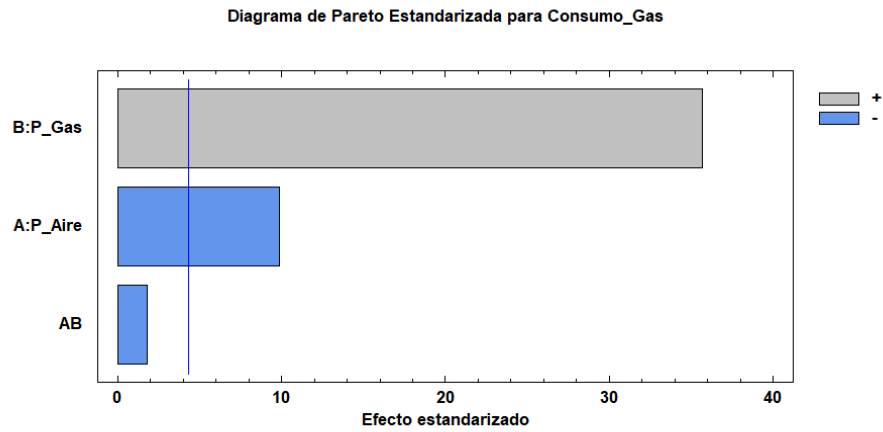


Figura 61. Gráfico de Pareto en consumo de gas natural para combinación quemador Modena-cúpula 500x40 mm.

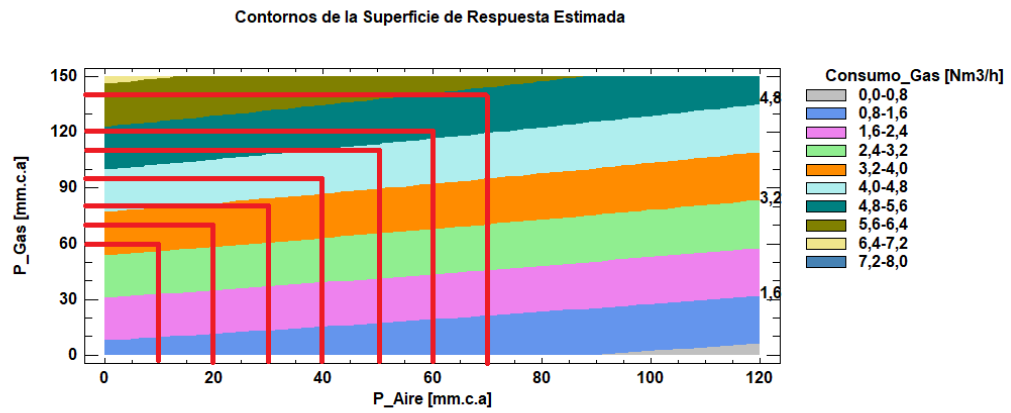


Figura 62. Contorno de consumo de gas natural para combinación quemador Modena-cúpula 500x40 mm.

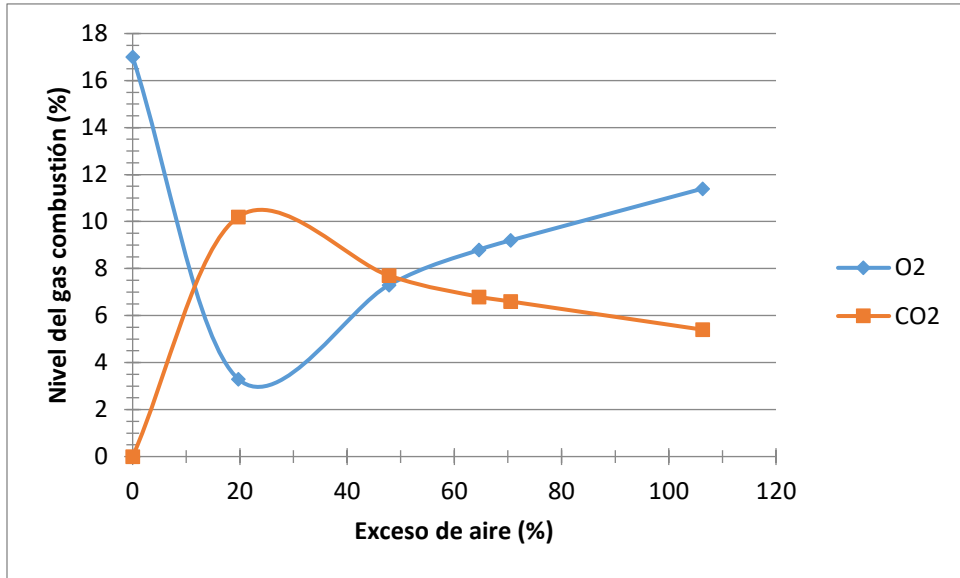


Figura 63. Gráfica de niveles de CO₂ y O₂ en función del exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula 500x40 mm.

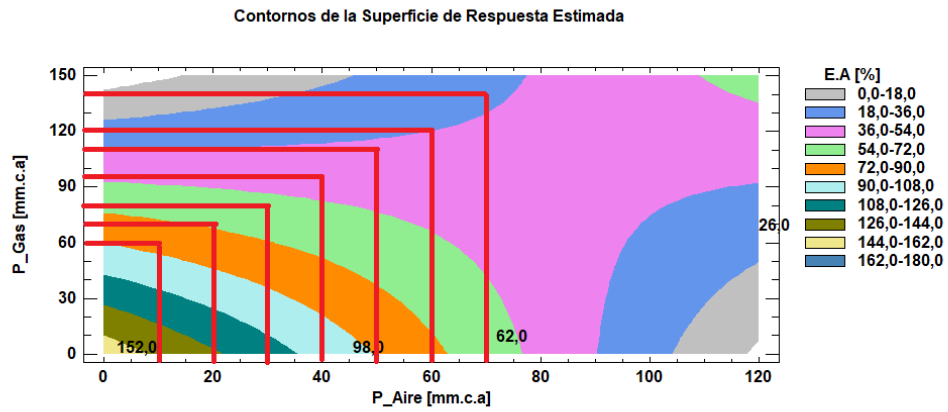


Figura 64. Contorno de exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula 500x40 mm.

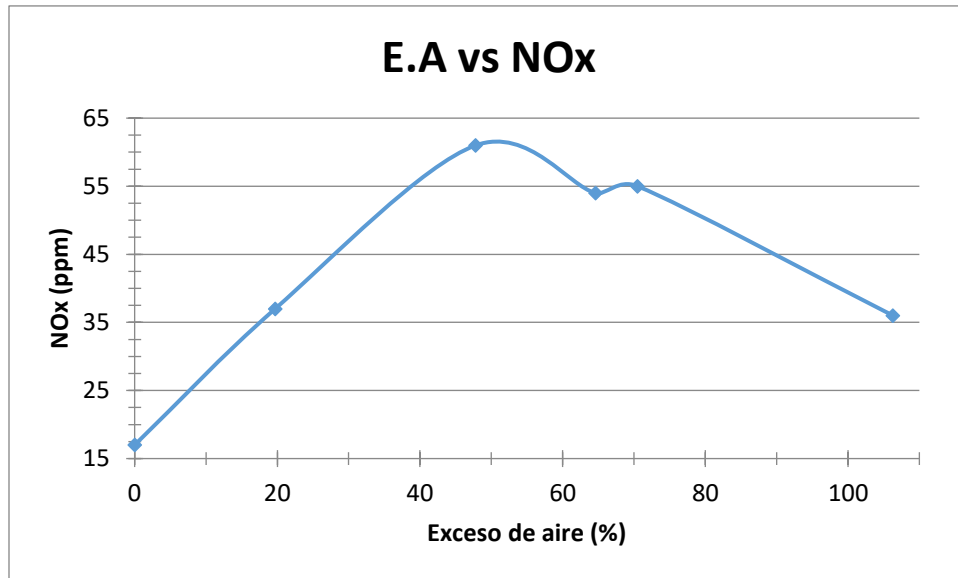


Figura 65. Gráfica de nivel de NO_x en función del exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula 500x40 mm.

Para la combinación Modena-500x40 mm, se requiere una longitud de llama de unos 80 cm, por lo cual según la *figura 30*, la posición más adecuada para ver la temperatura es T₄. Al usarse Modena-500x40 mm en la zona S16 (1130 °C), se puede alcanzar una buena temperatura y cumplir las condiciones con 50 mm.c.a de presión en aire y 110 mm.c.a en presión de gas, además, a estas condiciones, se puede observar en la *figura 64* que se está en el rango de operación ideal (30-50 % de exceso de aire según *figura 63*), además, aún no se alcanzaría el pico de nivel de NO_x de la *figura 65*.

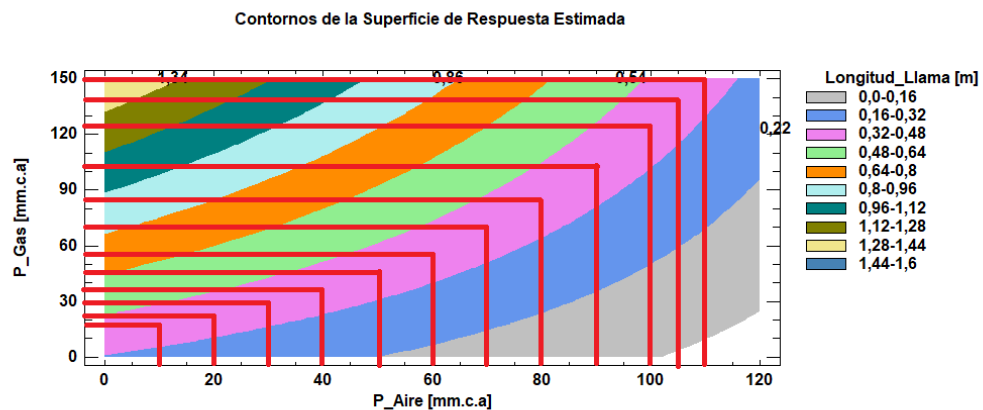


Figura 66. Contorno de longitud de llama para combinación quemador Modena-cúpula Ray.

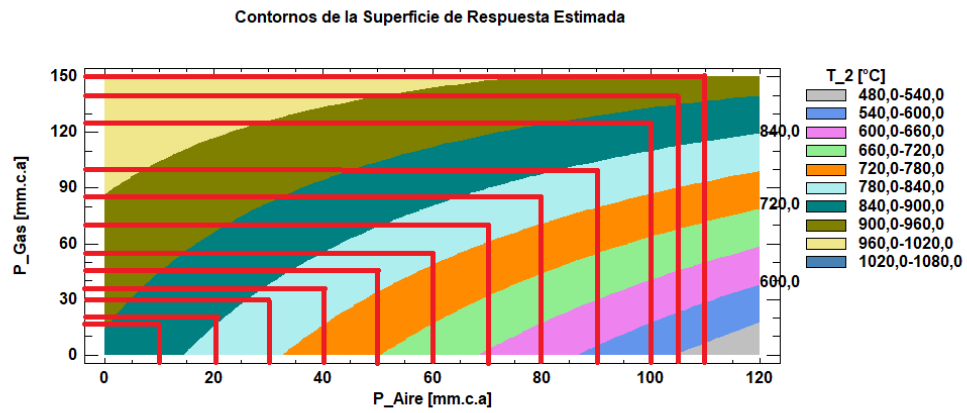


Figura 67. Contorno de temperatura en el punto T₂ para combinación quemador Modena-cúpula Ray.

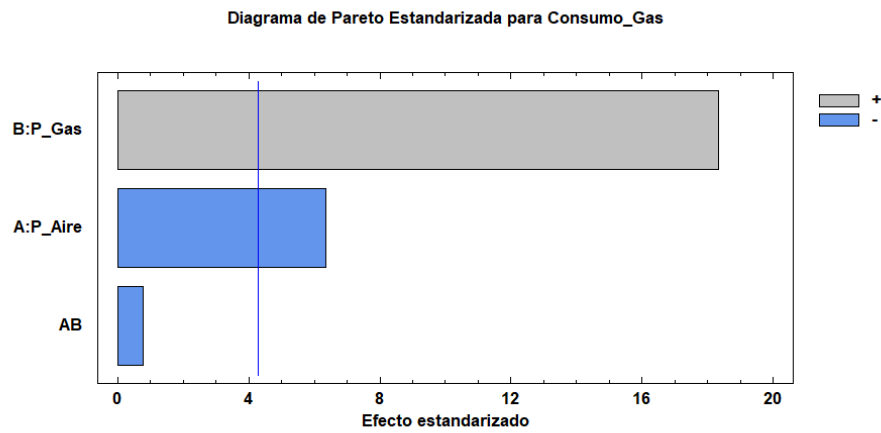


Figura 68. Gráfico de Pareto en consumo de gas natural para combinación quemador Modena-cúpula Ray.

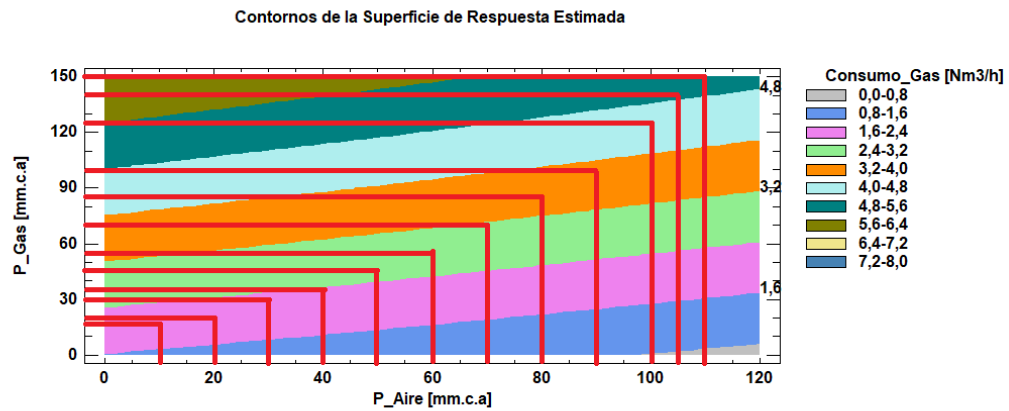


Figura 69. Contorno de consumo de gas natural para combinación quemador Modena-cúpula Ray.

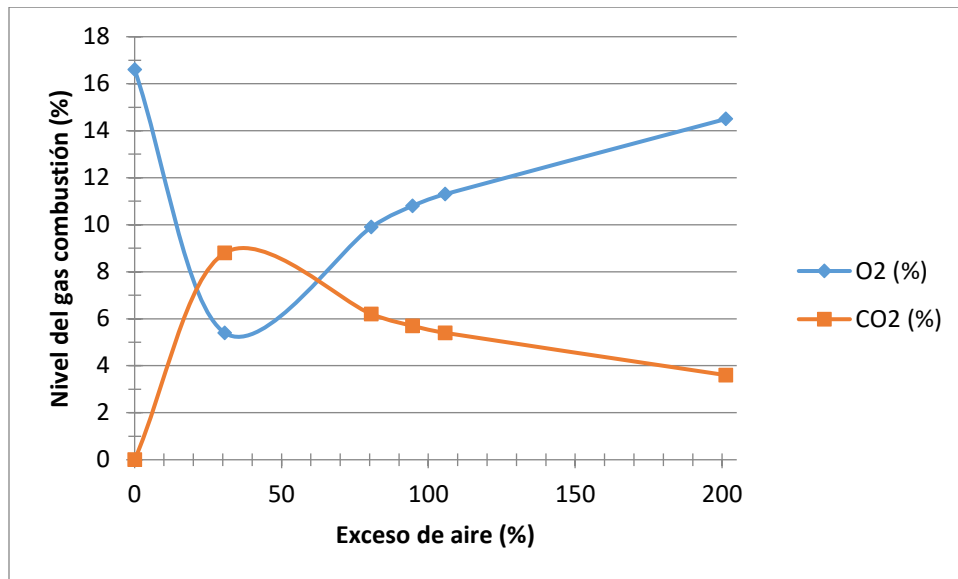


Figura 70. Gráfica de niveles de CO₂ y O₂ en función del exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula Ray.

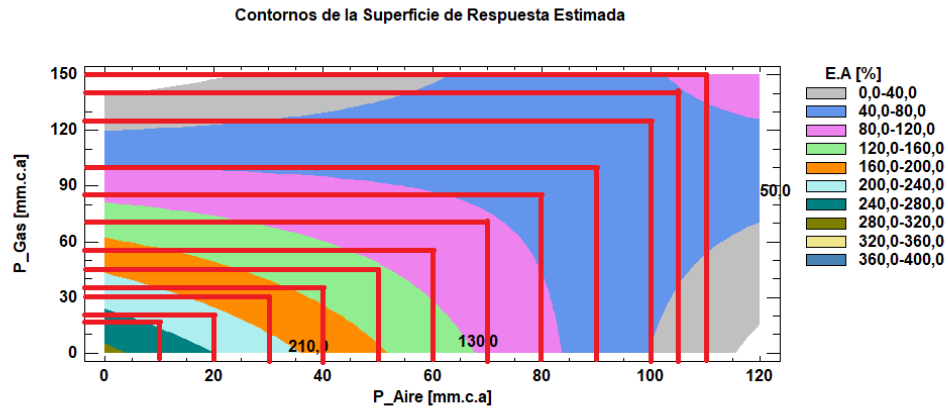


Figura 71. Contorno de exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula Ray.

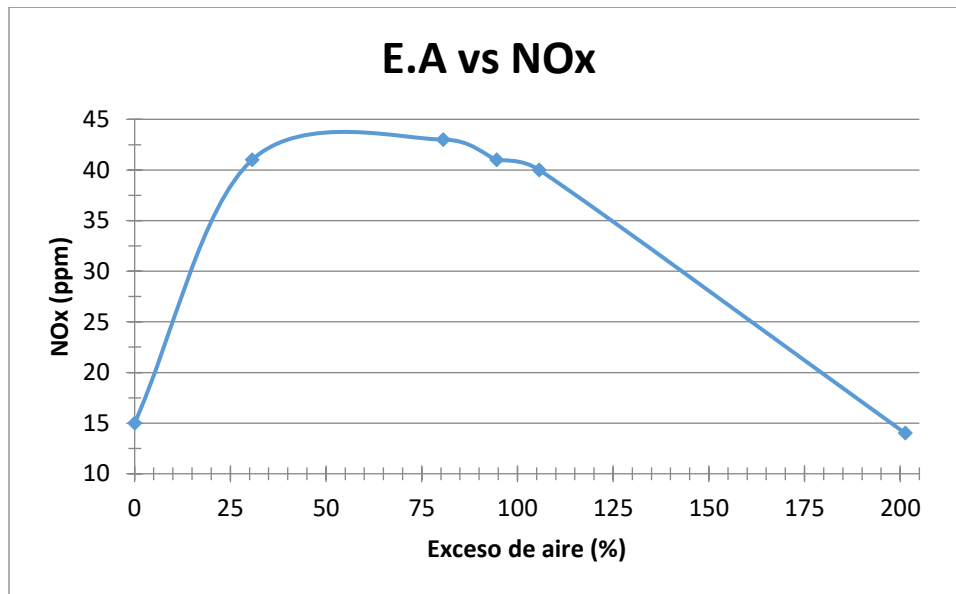


Figura 72. Gráfica de nivel de NO_x en función del exceso de aire para combinación quemador Modena-cúpula Ray.

Para la combinación Modena-Ray, se requiere una longitud de llama menor a los 40 cm, por lo cual según la *figura 30*, la posición más adecuada para ver la temperatura es T₂. La combinación Modena-Ray no se usa actualmente en ninguna de las zonas del horno, sin embargo, de usarse en algunas, se usaría en zonas S16 (1130 °C), S18 (1160 °C), S20 (1160 °C), S15 (1130 °C), S17 (1130 °C) y S19 (1130 °C), de la misma forma que se usa TCK-Ray. Para cumplir estos requerimientos, se nota adecuado el uso de 100 mm.c.a en presión de aire y de 125 mm.c.a en presión de gas, donde además se trabajaría en el rango de operación ideal (50-70 % de exceso de

aire según *figura 70*), aunque el nivel de NO_x en este rango está en el límite superior como se observa en la *figura 72*.

Un resumen de todas las condiciones obtenidas con el análisis anterior de todas las combinaciones quemador-cúpula, además de los consumos de gas natural para cada condición se pueden observar en el *anexo D*.

Otro aspecto importante a considerar es el cambio de quemadores en las diferentes zonas del horno (TCK a Modena o viceversa), pues esto podría conllevar a reducir el consumo de gas, o, ganar un poco de temperatura con un consumo de gas similar, o bien, reducir el consumo y ganar un poco de temperatura de forma simultánea. Otra forma de verlo, es que al ganar un poco de temperatura en la zona, aunque el consumo en gráficas se vea similar, implica indirectamente una reducción en el consumo, pues al alcanzar la zona del horno la temperatura requerida por el set point más rápidamente, el modutrol cierra el porcentaje de apertura de la válvula solo para mantener la temperatura de la zona, mientras que si se haría con una configuración a condiciones que den una temperatura menor, el modutrol mantendría más alto el porcentaje de apertura de la válvula durante más tiempo para alcanzar y luego mantener la temperatura de la zona, lo que implica un consumo mayor.

A continuación, se analiza el cambio de todas las configuraciones de quemador-cúpula, donde se obtiene cuáles cambios resultan convenientes y cuáles no, esto en función de la temperatura requerida y si se puede ahorrar consumo de gas natural con el cambio.

-Con TCK-60 mm para las zonas S18 y S20 (1160 °C) y para S17 (1130 °C), se usaría según el análisis inicial 200 mm.c.a de presión de gas y 70 mm.c.a de presión de aire, obteniéndose una temperatura alrededor de 870 °C y un consumo de 3.3 Nm³/h. En vez de ello, si se usaría Modena-60 mm, con una presión de gas de 60 mm.c.a y 70 mm.c.a en presión de aire, se obtendría una temperatura cercana a los 880 °C y un consumo de gas de 3.2 Nm³/h, así pues, se ganaría un poco en temperatura y se tiene un consumo de gas similar e incluso un poco menor, por lo que se define que este cambio sería adecuado.

-Con TCK-60 mm para la zona S21 (1010 °C), se usaría según el análisis inicial una presión de gas de 200 mm.c.a y presión de aire de 70 mm.c.a, y de igual forma que el caso anterior, un cambio a Modena-60 mm, con una presión

de gas de 60 mm.c.a y 70 mm.c.a en presión de aire, se obtendría el mismo beneficio, por lo que también es un cambio adecuado.

-Con Modena-60 mm para zonas K4, K6, S7, S8 y S10 que según el análisis inicial se podría usar con 15 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire, con una temperatura alrededor de 870 °C y un consumo de 1.8 Nm³/h, si se usara TCK-60 mm con 200 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire, se obtendría de igual forma una temperatura cercana a los 870 °C, pero el consumo de gas natural sería de unos 3.3 Nm³/h, definiéndose así que este no sería un cambio adecuado.

-Con Modena-60 mm para zonas S9, S11, S12, S13 y S14 que según el análisis inicial se usaría con una presión de gas de 80 mm.c.a y de aire de 80 mm.c.a, se obtendría una temperatura alrededor de 920°C y un consumo de 3.9 Nm³/h, sin embargo, al usarse TCK-60 mm con 240 mm.c.a en presión de gas y 80 mm.c.a en presión de aire, se obtendría una temperatura alrededor de 990 °C y con un consumo alrededor de 3.8 Nm³/h, ganándose así un poco en temperatura con un consumo similar o incluso un poco menor, por lo que este sería un cambio adecuado a realizar.

-Con Modena-60 mm para zona S16 (1130 °C), según el análisis inicial con 105 mm.c.a en presión de gas y 90 mm.c.a en presión de aire, se alcanza unos 970 °C y un consumo alrededor de 4.5 Nm³/h, sin embargo, al usarse TCK-60 mm con una presión de gas de 240 mm.c.a y presión de aire de 80 mm.c.a, se alcanzarían unos 990 °C y un consumo alrededor de 3.8 Nm³/h, entonces este sería un cambio adecuado, pues se gana un poco en temperatura, además que se reduce el consumo de gas natural.

-Con Modena-60 mm para zona S22 (1050 °C), se usaría según el análisis inicial 80 mm.c.a en presión de gas y 80 mm.c.a en presión de aire, alcanzándose unos 920 °C y un consumo de unos 3.9 Nm³/h, pero al usarse TCK-60 mm, con una presión de gas de 240 mm.c.a y 80 mm.c.a en presión de aire, se obtendrían unos 990 °C con un consumo de 3.8 Nm³/h, lo que significaría una ganancia de un poco de temperatura y un consumo similar o un poco menor, lo cual indica que este cambio sería adecuado de realizarse.

-Con TCK 500x40 para zonas S18 (1160 °C) y S15, S17, S19 (1130°C), según el análisis inicial se usaría con una presión de gas de 200 mm.c.a y una presión de aire de 20 mm.c.a, alcanzándose una temperatura cercana a los 820 °C y un consumo de 3.4 Nm³/h; al usarse Modena 500x40 con 70 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire, se alcanzarían unos 830 °C, pero con un consumo de 3.6 Nm³/h, lo que indica que para ganar tan poco

en temperatura a costo de aumentar el consumo, no sería este un cambio adecuado.

-Con Modena 500x40 para zona S16 (1130 °C), según el análisis inicial se operaría a 110 mm.c.a en presión de gas y 50 mm.c.a en presión de aire, alcanzándose una temperatura cercana a los 920 °C con un consumo de 4.7 Nm³/h; usando TCK 500x40 con presión de gas de 260 mm.c.a y 40 mm.c.a en presión de aire, se pueden alcanzar unos 950 °C con un consumo alrededor de 4 Nm³/h, lo cual indica una ventaja al realizar este cambio, pues se ganaría un poco de temperatura y se disminuiría también el consumo de gas natural.

-Con TCK-Ray usado en las zonas S15, S16, S17 y S20 (1130 °C) y en zonas S18 y S20 (1160 °C), según el análisis inicial se usaría a 200 mm.c.a de presión de gas y 60 mm.c.a en presión de aire, alcanzándose unos 900 °C con un consumo de 3.1 Nm³/h; sin embargo, al usar Modena-Ray para alcanzar una temperatura cercana a los 900 °C, se usaría 140 mm.c.a en presión de gas y 105 mm.c.a en presión de aire, con un consumo alrededor de 4.8 Nm³/h, indicando así que habría un incremento considerable con una temperatura similar, lo cual no sería entonces un cambio adecuado a realizarse.

-Con Modena-Ray, aunque no se usa en la configuración actual del horno, se usaría en zonas con temperaturas sobre los 900 °C, por lo cual, el análisis de cambiarlo a TCK-Ray sería contrario al caso anterior, por lo que se ahorraría consumo de gas natural para estas temperaturas y sería un cambio adecuado para realizarse.

Un resumen de todas las condiciones obtenidas con el análisis hecho inicialmente, junto con los cambios adecuados a realizarse propuestos para todas las combinaciones quemador-cúpula, además de los consumos de gas natural en cada condición se pueden observar en el *anexo E*.

Antes de realizar modificaciones de presiones y cambio de quemadores, el horno trabaja a las condiciones de presión de aire y presión de gas presentadas en la *tabla 29* del *anexo F*, con las cuales se suma un consumo teórico de gas natural de 430.8 Nm³/h. Además, en la *tabla 30* del *anexo F* se pueden observar los niveles de gases de combustión por zona antes de realizarse los cambios. Para esta *tabla*, se puede observar que en las zonas S21 y S22 no se pudo cuantificar los niveles de algunos gases de combustión y otros datos, esto, debido a que el porcentaje de O₂ sobrepasa el 16% y a

estas condiciones el equipo analizador de gases no cuantifica los datos faltantes. El O₂ sobrepasa el 16% en estas zonas porque se encuentran inmediatamente antes de la zona de enfriamiento rápido, por lo que, debido a la succión del ventilador de gases de combustión, también es succionada una parte de este aire, incrementando el nivel de O₂.

Además de medidos los niveles en los gases de combustión antes de realizar cambios o modificaciones, también son medidos los indicadores clave en un inicio, que con los datos necesarios medidos y haciendo uso de la ecuación 10, se obtuvo un consumo neto de gas natural del horno entre 430 y 440 Nm³/h, esto con un consumo específico de energía entre 420 y 430 kcal/(kg baldosa cocida).

Ya definidas las condiciones óptimas con que podría trabajar en teoría el horno, al momento de realizarse este proyecto, son ingresadas solo algunas condiciones que se presentan más factibles de implementarse, esto es, las que son más favorables solo con cambios de condiciones de presión en los quemadores existentes, por lo cual, fueron elegidas las siguientes condiciones:

-Cambio en los 2 TCK-60 mm en S18 a 200 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire.

-Cambio en los 4 TCK-60 mm en S20 a 200 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire.

-Cambio en los 8 Modena-60 mm en K4 y 8 Modena-60 mm en K6 a 15 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire.

-Cambio en los 4 Modena-60 mm en S22 a 80 mm.c.a en presión de gas y 80 mm.c.a en presión de aire.

-Cambio en los 8 Modena-60 mm en S7 a 15 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire.

-Cambio en los 8 Modena-60 mm en S8 a 15 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire.

Las anteriores condiciones son resultantes del análisis inicial del diseño de experimentos, además que con el cambio dirigido solo en cúpulas de 60 mm se puede reducir el riesgo de obtener defectos al final del proceso, ya que cambios en cúpulas de 500x40 mm y cúpulas Ray son muy propensos a afectar la planaridad y ocasionar problemas de trapecio en la baldosa.

Antes de implementar condiciones nuevas en el horno, se planteó como estrategia planes alternos como un plan B o un plan B y C, por si con las condiciones mencionadas anteriormente resultan en defectos del producto o no se logran las características de longitud de llama y temperatura de la zona del horno. Dichos planes estratégicos son descritos a continuación.

-Para el cambio en 8 quemadores Modena con cúpula de 60mm en la zona K4, a 15 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire:

Plan B: En caso de verse afectada esta condición por la depresión en esta zona del horno, se usaría 50 mm.c.a en presión de gas y 60 mm.c.a en presión de aire.

Plan C: En caso de no funcionar con el plan B como medida, usar 60 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire.

-Para el cambio en 8 quemadores Modena con cúpula de 60mm en la zona K6, a 15 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire:

Plan B: En caso de verse afectada esta condición por la depresión en esta zona del horno, se usaría 50 mm.c.a en presión de gas y 60 mm.c.a en presión de aire.

Plan C: En caso de no funcionar con el plan B como medida, usar 60 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire.

-Para el cambio en 8 quemadores Modena con cúpula de 60mm en la zona S7, a 15 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire:

Plan B: En caso de verse afectada esta condición por la depresión en esta zona del horno, se usaría 50 mm.c.a en presión de gas y 60 mm.c.a en presión de aire.

Plan C: En caso de no funcionar con el plan B como medida, usar 60 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire.

-Para el cambio en 8 quemadores Modena con cúpula de 60mm en la zona S8, a 15 mm.c.a en presión de gas y 20 mm.c.a en presión de aire:

Plan B: En caso de verse afectada esta condición por la depresión en esta zona del horno, se usaría 50 mm.c.a en presión de gas y 60 mm.c.a en presión de aire.

Plan C: En caso de no funcionar con el plan B como medida, usar 60 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire.

-Para el cambio en 2 quemadores TCK con cúpula de 60mm en la zona S18, a 200 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire:

Plan B: En caso de verse afectada esta condición por no llegar a la temperatura de la zona, se usaría 220 mm.c.a en presión de gas y 75 mm.c.a en presión de aire.

-Para el cambio en 4 quemadores TCK con cúpula de 60mm en la zona S20, a 200 mm.c.a en presión de gas y 70 mm.c.a en presión de aire:

Plan B: En caso de verse afectada esta condición por no llegar a la temperatura de la zona, se usaría 220 mm.c.a en presión de gas y 75 mm.c.a en presión de aire.

-Para el cambio en 4 quemadores Modena con cúpula de 60mm en la zona S22, a 80 mm.c.a en presión de gas y 80 mm.c.a en presión de aire:

Plan B: En caso de verse afectada esta condición por no llegar a la temperatura de la zona, se usaría 90 mm.c.a en presión de gas y 85 mm.c.a en presión de aire.

Plan C: En caso de verse afectada esta condición por no llegar a la temperatura de la zona, se usaría 100 mm.c.a en presión de gas y 90 mm.c.a en presión de aire.

En el horno fueron implementadas estas condiciones planteadas, exceptuando que los planes B de las zonas K4, K6, S7 y S8 tuvieron que ser llevados a cabo porque la llama resultante no resultaba estable en estas zonas por la depresión del horno en su curva de presión, tendiendo su dirección a desviarse hacia la entrada del horno, y bien, como no es una llama direccionada, no se alcanza fácilmente la temperatura requerida, pues el frente de llama no se encuentra en la zona donde debería estar.

Finalmente, con las condiciones nuevas en el horno, trabajando de forma estable, se midieron un consumo neto de gas entre 420-426 Nm³/h y un consumo específico de energía entre 410-415 kcal/(kg baldosa cocida), que implican una reducción del 1-2% y del 1.1-1.9% respectivamente, además de tenerse una reducción promedio en los niveles de CO₂ y NO_x en las zonas modificadas del 2% y 4% respectivamente.

Conclusiones y recomendaciones.

-El diseño de experimentos planteado cumplió con los requerimientos que fueron establecidos para reducir el consumo neto de gas natural, consumo específico de energía y reducir los niveles de los gases de combustión, por lo que es apropiado para la continuación en la modificación de las condiciones y además los cambios de quemadores de las zonas restantes del horno donde no fueron implementados cambios.

-Fue apropiado establecer antes de implementar modificaciones, unos planes estratégicos en caso de que con las condiciones iniciales no se obtuviesen los resultados esperados, pues así se logró implementar de forma exitosa condiciones para las zonas K4, K6, S7 y S8.

-Por medio de los cambios propuestos que fueron implementados en el horno #4, se disminuyó el consumo neto de gas natural entre un 1-2%, y el consumo específico de energía entre un 1.1-1.9%.

-Con la reducción en el consumo neto de gas natural, se espera disminuir el rubro de energéticos en al menos \$30 millones mensuales de acuerdo al precio actual promedio del gas natural.

-Al reducir el consumo de gas natural se pudo disminuir también los niveles de CO₂ en un 2%, además, que, con el establecimiento de temperaturas más adecuadas para las zonas intervenidas, se pudo bajar también los niveles de NO_x en un 4%.

-La zona de operación ideal para el quemador TCK fue indiferente del tipo de cúpula usada, mientras que para el quemador Modena, el uso de una u otra cúpula puede tener un cambio significativo, esto por el manejo de caudales mayores, que al estar confinados en espacios diferentes se dará la combustión estequiométrica en una relación aire/combustible un poco diferente.

-No es posible definir para cada combinación cúpula-quemador una condición óptima general, pues esto depende de factores como la longitud y la temperatura de llama requerida, además de que con las condiciones inicialmente planteadas no necesariamente serán las que se puedan implementar, pues por motivos operacionales y de funcionamiento del horno estas pueden cambiar.

-Resulta importante estudiar para los requerimientos específicos de cada zona del horno, el tipo de quemador a usar, pues dependiendo de este, se

puede ahorrar en consumo de combustible o ganar temperatura con solo cambiar el tipo de quemador a otras condiciones.

-La presión de aire tiene gran incidencia en la longitud y también en la temperatura de la llama, pero para incidir de forma muy relevante en el consumo de gas se tienen que tener diferencias grandes, sin embargo, al usarse un exceso de aire mayor al necesario, se estaría calentando un volumen de aire extra en vez de usarse para calentar la baldosa, lo cual se traduce en una eficiencia de calentamiento baja, aumentando así el consumo específico de energía.

-El color y estabilidad de llama son dos parámetros visuales cualitativos que también tienen gran peso a la hora de elegir una condición óptima, pues una mala combustión puede implicar efectos negativos en la baldosa como cambio de tonalidad, además de tenerse una llama no direccionada por la curva de presión en el horno.

-Con la estandarización del funcionamiento, operación y toma de datos en el banco de pruebas, se espera que en un futuro se pueda implementar de forma fácil y segura otras experimentaciones con quemadores o cúpulas que no fueron probadas en este proyecto.

-Resulta adecuada la estrategia de establecer en orden cronológico longitud, temperatura de llama y consumo de gas natural para la selección de las condiciones adecuadas a implementar, pues así se cubren los requerimientos para los que son usadas las cúpulas según la zona del horno donde se encuentre ubicadas, además de acompañar esto con el exceso de aire y el rango de operación ideal, observando cómo es el comportamiento de los niveles en los gases de combustión.

-Se recomienda seguir implementando en el horno #4 las condiciones y cambios en quemadores que fueron recomendados y no han sido implementados, pues se lograría reducir aún más los indicadores clave (consumo neto de gas, consumo específico de energía y niveles de gases de combustión) en el horno, reduciendo el rubro de energéticos.

-Se recomienda continuar con estudios y proyectos similares para los 3 hornos restantes de la fábrica y así reducir en todos, un porcentaje apreciable de los indicadores clave.

-De acuerdo a las mediciones realizadas en campo, se recomienda una revisión periódica de las líneas de gas de los quemadores, evitando que se encuentren obstruidas o tensionadas (dobladitas), además de que las boquillas de medición de presión no se encuentren taponadas y tengan su

respectivo tornillo-tapón, pues así se evita que el flujo de gas encuentre obstrucciones, además de que se pueden medir las presiones con facilidad.

-Se recomienda revisar de forma exhaustiva y actualizar la plantilla de consumo de gas natural existente en la planta, pues, aunque el factor de corrección no parezca variar en demasía, tiene gran incidencia sobre el resultado final de consumo de gas natural.

-Se recomienda poner el poder calorífico como una función de la composición del gas natural, pues aunque las fluctuaciones si vienen de un mismo pozo son pequeñas y no varían el valor en forma significativa, si lo podría hacer el caso que se usara gas natural de distintas fuentes (Cusiana y Guajira en el caso de Colombia), además, de que el cambio en estas composiciones también pueden variar la relación aire/combustible necesaria.

-Se recomienda la instalación gradual de válvulas reguladoras de gas directamente en cada uno de los quemadores, pues esto facilita en gran medida fijar para cada quemador individualmente la presión de gas.

Referencias Bibliográficas.

- ¹ Escrig Vidal, A. (2017). *Simulación de la transferencia de energía en hornos monoestrato de rodillos para la cocción de baldosas cerámicas*. (Tesis de Doctorado). Universitat Jaume I.
- ² *Notas tomadas del plan de entrenamiento*. (2020). Eurocerámica.
- ³ Mezquita Martí, A. (2018). *Energía, Medio Ambiente e Industria 4.0*. Presentación, Universitat Jaume I.
- ⁴ Brizuela, E., & Romano, S. (2003). *Combustión*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- ⁵ Combustión gas natural | Industria | Metrogas. (2020). Recuperado el 8 de julio de 2020, de http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1
- ⁶ Barrera, P.C., Betoret, V.N., Castelló, G.M., & Pérez, E.E. *Principios Básicos de la Combustión*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- ⁷ Universidad de Buenos Aires. (2003). *Combustión-Unidad I*. Buenos Aires, Argentina.
- ⁸ Inmaculada Fernández, D., Severiano F., P., & Carlos J., R. (2008). *Termodinámica y termotecnia. Tema 08. Combustión*. Presentación, Universidad de Cantabria.
- ⁹ Heywood, J.B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. (p. 915).
- ¹⁰ Reed, R.J. (2001). *North American combustion handbook*. Cleveland, OH: North American Mfg.
- ¹¹ Murcia, L. (2017). *Cocción*. Guarne, Colombia: Eurocerámica S.A.
- ¹² O., Juan Manuel. *Fundamentos de la intercambiabilidad del gas natural*. CDT De GAS. Recuperado el 12 de julio de 2020, de http://cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra_Revista/MetFlu9/1_Intercambiabilidad_del_gas_natural.pdf
- ¹³ Serrano J, Alonso A. *¿Es posible inferir la eficiencia de un proceso de combustión a partir de una inspección visual de llama?*. CDT De GAS. Recuperado el 12 de julio de 2020, de http://cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra_Revista/MetFlu7/7_Eficiencia_de_un_Proceso_de_Combustion.pdf
- ¹⁴ Iniciativa para la Transparencia de las Industrias Extractivas. (2017). *Perfiles-Gas*. Bogotá, Colombia. Recuperado el 25 de julio de 2020, de

eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2077/perfiles-hidrocarburos/perfiles-gas/

¹⁵ Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2008). *Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema nacional de transporte de gas-número de Wobbe-*. Recuperado el 30 de julio de 2020, de

[http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ffad21a8c27fd8a20525785a007a7086/\\$FILE/D-062-08%20N%C3%9AMERO%20DE%20WOBBE.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ffad21a8c27fd8a20525785a007a7086/$FILE/D-062-08%20N%C3%9AMERO%20DE%20WOBBE.pdf)

¹⁶ A. Amell, A., A. Bedoya, C. & Suárez, B., (2006). *Efectos del cambio de composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbinas a gas: Una aproximación al caso colombiano*. Revista Energética, 35.

¹⁷ M., Víctor., C., Diana. *Hacia el establecimiento de una cadena de trazabilidad para las mediciones de calidad de aire, Emisiones de fuentes fijas y emisiones de fuentes móviles en Colombia*. CDT De GAS. Recuperado el 13 de julio de 2020, de http://cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra_Revista/MetFlu9/2_Mediciones_de_calidad_de_aire.pdf

¹⁸ Gómez Macías, E., Bobadilla Alfaro, E., & Ramírez Botero, B. *Factores que determinan la emisión de contaminantes gaseosos y particulados por la combustión de combustibles fósiles*. Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia.

¹⁹ Bürssner, R., & Jecht, U. *Flue Gas Analysis in Industry. Practical guide for Emission and Process Measurements (1st ed.)*. TESTO.

²⁰ TruTechTools, (2010). *Combustion Analysis Of Gas And Oil Appliances*. Recuperado el 1 de agosto de 2020, de <https://www.trutechtools.com/assets/images/EducationalMaterials/TruTech%20Tools%20%20Combustion%20Guide.pdf>

²¹ BACHARACH®, (2019). *Combustion Analyzer For Commercial And Light Industrial Use. User Manual*.

²² Bermúdez Tamarit, V. (2000). *Tecnología energética*. (s. Servicio de publicaciones camino de Vera, Ed.) Valencia, España: Reproval, S.L.

²³ Sáenz López, J.P. (2011). *Sistema No Intrusivo De Detección De Congelación En Conductos De Agua*. (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Madrid.

- ²⁴ Ministerio de Ambiente. (2008). *Resolución 909 Del 5 De Junio De 2008*. Minambiente.
- ²⁵ IDEAM, (2010). *Protocolo Para El Control Y Vigilancia De La Contaminación Atmosférica Generada Por Fuentes Fijas*.
- ²⁶ Echeverri Londoño, C.A. (2006). *Determinación De La Emisión De Material Particulado En Fuentes Fijas*. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia.
- ²⁷ Sistema Único de Información Normativa. (2013). *Resolución 127 De 2013*. SUIN Juriscol.
- ²⁸ Gestión y Servicios Ambientales. (2019). *Estudio De Emisiones Atmosféricas*. Eurocerámica S.A. Guarne, Colombia: GSA S.A.S.
- ²⁹ SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada (Vol. II)*. Castellón, España: SACMI IMOLA s.c.a.r.l.
- ³⁰ Parra Henao, J.E. (2017). *Diseño, Construcción Y Puesta En Marcha De Un Banco De Pruebas Para Quemadores Industriales A Gas Natural*. (Trabajo final de pregrado). Universidad Nacional de Colombia.
- ³¹ Sánchez Samanez, S. (2013). *Cerámicas. Lección 7. Cocción*.
- ³² Estrada Mesa, S.A. (2017). *Identificación De Barreras Para La Implementación De Medidas De Eficiencia Energética En Procesos De Alta Temperatura En Diferentes Regiones De Colombia*. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico Metropolitano.
- ³³ Ferrero, J. *Tecnología Cerámica*. [online] W.ceramica.name. Recuperado el 5 de agosto de 2020, de <http://w.ceramica.name/hornos>
- ³⁴ Baukal, C.E. (2003). *Industrial Burners Handbook*. Boca Ratón: CRC Press.
- ³⁵ L. Kohan, A. (2000). *Manual De Calderas Vol. II*. Mc Graw Hill.
- ³⁶ Montgomery, Douglas C., (1996). *Design And Analysis Of Experiments*. 2nd ed. McGraw Hill.
- ³⁷ Universidad Carlos III de Madrid. (s.f). *Modelo de diseños factoriales y diseños 2k*. Recuperado el 10 de febrero de 2020, de <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Disenno/tema3DE.pdf>

Anexos.

Anexo A. Factores de corrección obtenidos para las combinaciones cúpula-quemador.

Tabla 6. Factores de corrección por temperatura y presión en gas para cúpulas de 60 mm, 500x40 mm y Ray con quemador TCK (Realización propia).

GAS	Símbolo	Unidades	Valor					
Presión barométrica	P_b	mm.c.a	8027.81					
Presión manométrica del gas	P_{gas}	mm.c.a	30	200	115	200	115	30
Presión barométrica de referencia	P_{br}	mm.c.a	10332.3					
Temperatura del gas	T_{gas}	°C	45					
Temperatura absoluta de referencia	T_a	K	273.15					
Factor de corrección por temperatura y presión	k	---	0.670	0.684	0.677	0.684	0.677	0.670

Tabla 7. Factores de corrección por temperatura y presión en aire para cúpulas de 60 mm, 500x40 mm y Ray con quemador TCK (Realización propia).

AIRE	Símbolo	Unidades	Valor					
Presión barométrica	P_b	mm.c.a	8027.81					
Presión manométrica del aire	P_{aire}	mm.c.a	10	100	55	10	55	100
Presión barométrica de referencia	P_{br}	mm.c.a	10332.3					
Temperatura del aire	T_{aire}	°C	80					

Temperatura absoluta de referencia	T_a	K	273.15					
Factor de corrección por temperatura y presión	k	---	0.602	0.608	0.605	0.602	0.605	0.608

Tabla 8. Factores de corrección por temperatura y presión en gas para cúpulas de 60 mm y 500x40 mm con quemador Modena (Realización propia).

GAS	Símbolo	Unidades	Valor					
Presión barométrica	P_b	mm.c.a	8027.81					
Presión manométrica del gas	P_{gas}	mm.c.a	30	30	85	140	110	85
Presión barométrica de referencia	P_{br}	mm.c.a	10332.3					
Temperatura del gas	T_{gas}	°C	45					
Temperatura absoluta de referencia	T_a	K	273.15					
Factor de corrección por temperatura y presión	k	---	0.670	0.670	0.674	0.679	0.676	0.674

Tabla 9. Factores de corrección por temperatura y presión en aire para cúpulas de 60 mm y 500x40 mm con quemador Modena (Realización propia).

AIRE	Símbolo	Unidades	Valor					
Presión barométrica	P_b	mm.c.a	8027.81					
Presión manométrica del aire	P_{aire}	mm.c.a	10	120	65	120	30	65

Presión barométrica de referencia	P_{br}	mm.c.a	10332.3					
Temperatura del aire	T_{aire}	°C	80					
Temperatura absoluta de referencia	T_a	K	273.15					
Factor de corrección por temperatura y presión	k	---	0.602	0.610	0.606	0.610	0.603	0.606

Tabla 10. Factores de corrección por temperatura y presión en gas para cúpula Ray con quemador Modena (Realización propia).

GAS	Símbolo	Unidades	Valor					
Presión barométrica	P_b	mm.c.a	8027.81					
Presión manométrica del gas	P_{gas}	mm.c.a	30	30	85	140	120	85
Presión barométrica de referencia	P_{br}	mm.c.a	10332.3					
Temperatura del gas	T_{gas}	°C	45					
Temperatura absoluta de referencia	T_a	K	273.15					
Factor de corrección por temperatura y presión	k	---	0.670	0.670	0.674	0.679	0.677	0.674

Tabla 11. Factores de corrección por temperatura y presión en aire para cúpula Ray con quemador Modena (Realización propia).

AIRE	Símbolo	Unidades	Valor					
Presión barométrica	P_b	mm.c.a	8027.81					
Presión manométrica del aire	P_{aire}	mm.c.a	10	120	65	120	20	65
Presión barométrica de referencia	P_{br}	mm.c.a	10332.3					
Temperatura del aire	T_{aire}	°C	80					
Temperatura absoluta de referencia	T_a	K	273.15					
Factor de corrección por temperatura y presión	k	-	0.602	0.610	06.06	0.610	0.602	0.606

Anexo B. Valores de las variables respuesta obtenidas en el banco de pruebas ingresadas en el diseño de experimentos en Statgraphics®.

Tabla 12. Valores de las variables respuesta para cúpula 60 mm con quemador TCK (1) (Realización propia).

Color llama	P_AIRE	P_GAS	Consumo aire	Consumo gas	longitud_llama	T_1	T_2	T_3	T_4	T_control
---	mm.c.a	mm.c.a	Nm ³ /h	Nm ³ /h	m	°C	°C	°C	°C	°C
Amarillo	10	30	13.815	1.111	0.2	981	629	496	410	368
Rojizo	100	200	27.435	3.152	0.32	1099	833	750	698	662
Rojizo	55	115	24.052	2.273	0.25	1050	764	640	580	595
Amarillo	10	200	15.277	3.412	1	789	940	915	828	700
Rojizo	55	115	24.409	2.273	0.25	1025	740	628	578	602
Azul	100	30	28.773	1.031	0.07	565	340	277	281	305

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 13. Valores de las variables respuesta para cúpula 60 mm con quemador TCK (2) (Realización propia).

P_AIRE	P_GAS	CO ₂	CO	EFF	E.A	O ₂	NOx	SO ₂	T_Chimenea
mm.c.a	mm.c.a	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm	°C
10	30	3.2	0	42.5	244	15.3	26	0	419
100	200	4.6	0	32.3	140	12.8	31	0	698
55	115	2.9	0	15.1	250	15.7	24	0	598
10	200	5.9	0	38.4	88.4	10.4	57	0	770
55	115	3.9	0	30.5	178.1	13.9	28	0	621
100	30	0	781	0	0	18.5	3	31	314

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 14. Valores de las variables respuesta para cúpula 500x40 mm con quemador TCK (1) (Realización propia).

Color llama	P_AIRE	P_GAS	Consumo aire	Consumo gas	longitud_Llama	T_1	T_2	T_3	T_4	T_control
---	mm.c.a	mm.c.a	Nm ³ /h	Nm ³ /h	m	°C	°C	°C	°C	°C
Naranja	10	30	12.846	1.078	0.15	1046	583	348	340	364
Rojizo	100	200	26.011	2.817	0.28	1179	828	657	655	674
Rojizo	55	115	22.218	2.030	0.25	1135	781	603	588	605
Amarillo	10	200	12.937	3.412	0.82	814	999	915	809	837
Rojizo	55	115	22.327	2.084	0.25	1148	760	597	586	606
Azul	100	30	26.875	0.636	0	388	224	187	189	193

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 15. Valores de las variables respuesta para cúpula 500x40 mm con quemador TCK (2) (Realización propia).

P_AIRE	P_GAS	CO2	CO	EFF	E.A	O2	NOx	SO2	T_Chimenea
mm.c.a	mm.c.a	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm	°C
10	30	2.8	0	41.2	250	15.9	24	0	399
100	200	4.2	0	29.7	162.9	13.5	33	0	657
55	115	3.8	0	33.2	187.5	14.2	28	0	584
10	200	6.3	0	41.2	77.4	9.7	91	0	774
55	115	3.7	0	30.9	196	14.4	26	0	596
100	30	0	516	0	0	19.6	0	24	202

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 16. Valores de las variables respuesta para cúpula Ray con quemador TCK (1) (Realización propia).

Color llama	P_AIRE	P_GAS	Consumo aire	Consumo gas	longitud_Llama	T_1	T_2	T_3	T_4	T_control
---	mm.c.a	mm.c.a	Nm ³ /h	Nm ³ /h	m	°C	°C	°C	°C	°C
Amarillo	10	30	11.745	1.045	0.1	1006	668	521	415	387
Rojizo	100	200	25.530	2.837	0.12	1145	803	667	628	621
Rojizo	55	115	23.785	2.098	0.12	1096	748	590	554	554

Amarillo	10	200	11.842	3.336	0.82	917	949	811	728	673
Rojizo	55	115	22.648	2.111	0.12	1079	729	589	549	555
Azul	100	30	26.297	0.690	0	471	274	219	211	222

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 17. Valores de las variables respuesta para cúpula Ray con quemador TCK (2) (Realización propia).

P_AIRE	P_GAS	CO2	CO	EFF	E.A	O2	NOx	SO2	T_Chimenea
mm.c.a	mm.c.a	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm	°C
10	30	3.6	0	49.9	202.3	14.5	27	0	404
100	200	4.0	0	31.8	171.3	13.8	26	0	628
55	115	3.6	0	33.5	205.3	14.6	27	0	552
10	200	5.9	0	43.1	89.3	10.5	21	0	704
55	115	3.6	0	34.7	204	14.6	28	0	544
100	30	0	397	0	0	19.2	0	18	238

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 18. Valores de las variables respuesta para cúpula 60 mm con quemador Modena (1) (Realización propia)*.

Color llama	P_AIRE	P_GAS	Consumo aire	Consumo gas	longitud_Llama	T_1	T_2	T_3	T_4	T_control
---	mm.c.a	mm.c.a	Nm ³ /h	Nm ³ /h	m	°C	°C	°C	°C	°C
Amarillo	10	30	8.827	2.283	0.73	929	893	791	678	585
Violeta	120	30	25.441	2.538	0.28	907	727	657	613	641
Rojizo	65	85	21.852	4.126	0.45	1140	977	855	773	775
Violeta	120	140	25.361	5.260	0.41	1204	1021	928	852	897
Amarillo	30	110	17.294	4.990	1.23	843	949	955	948	915
Rojizo	65	85	21.591	3.863	0.45	1155	1009	897	809	754

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 19. Valores de las variables respuesta para cúpula 60 mm con quemador Modena (2) (Realización propia)*.

P_AIRE	P_GAS	CO ₂	CO	EFF	E.A	O ₂	NO _x	SO ₂	T_Chimenea
mm.c.a	mm.c.a	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm	°C
10	30	56	0	48.1	97.6	10.9	19	0	620
120	30	0	592	0	0	17.3	27	11	601
65	85	6.2	0	41.2	80.3	9.9	66	0	752
120	140	7.8	0	43.9	45.4	7.1	88	0	859
30	110	10.4	0	46.8	12.0	2.5	37	0	996
65	85	6.8	0	45.0	64.6	8.8	64	0	754

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 20. Valores de las variables respuesta para cúpula 500x40 mm con quemador Modena (1) (Realización propia)*.

Color llama	P_AIRE	P_GAS	Consumo aire	Consumo gas	Longitud_Llama	T_1	T_2	T_3	T_4	T_control
---	mm.c.a	mm.c.a	Nm ³ /h	Nm ³ /h	m	°C	°C	°C	°C	°C
Amarilla	10	30	8.544	2.277	0.63	843	935	843	697	640
Púrpura	120	30	24.544	1.513	0.15	691	487	443	427	450
Celeste	65	85	20.071	3.789	0.32	1059	961	817	807	850
Celeste	120	140	24.459	4.921	0.39	1129	1076	945	895	945
Amarilla	30	110	17.173	4.815	1.19	838	973	967	971	931

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 21. Valores de las variables respuesta para cúpula 500x40 mm con quemador Modena (2) (Realización propia)*.

P_AIRE	P_GAS	CO ₂	CO	EFF	E.A	O ₂	NO _x	SO ₂	T_Chimenea
mm.c.a	mm.c.a	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm	°C
10	30	5.4	0	44.5	106	11.4	36	0	623
120	30	0	985	0	0	17.0	17	36	461
65	85	6.6	0	40.5	70.5	9.2	55	0	798
120	140	7.7	0	42.6	47.8	7.3	61	0	867

30	110	10.2	0	43.9	19.7	3.3	37	0	997
65	85	6.8	0	43.0	64.6	8.8	54	0	784

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 22. Valores de las variables respuesta para cúpula Ray con quemador Modena (1) (Realización propia)*.

Color llama	P_AIRE	P_GAS	Consumo aire	Consumo gas	Longitud_Llama	T_1	T_2	T_3	T_4	T_control
---	mm.c.a	mm.c.a	Nm ³ /h	Nm ³ /h	m	°C	°C	°C	°C	°C
Rojizo	10	30	7.479	2.424	0.56	911	853	764	656	561
Rojizo	120	30	25.239	1.446	0.1	998	536	448	429	467
Azul claro	65	85	20.786	3.863	0.32	1116	943	782	699	750
Celeste	120	140	24.544	4.656	0.34	1061	863	792	780	847
Amarillo	20	120	13.338	5.145	1.15	901	908	882	878	846
Celeste	65	85	21.040	3.634	0.32	1093	901	764	708	772

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Tabla 23. Valores de las variables respuesta para cúpula Ray con quemador Modena (2) (Realización propia)*.

P_AIRE	P_GAS	CO2	CO	EFF	E.A	O2	NOx	SO2	T_Chimenea
mm.c.a	mm.c.a	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm	°C
10	30	3.6	0	30.5	201	14.5	14	0	580
120	30	0	1110	0	0	16.6	15	43	453
65	85	5.7	0	40.0	94.6	10.8	41	0	723
120	140	6.2	0	38.2	80.6	9.9	43	0	798
20	120	8.8	0	44.9	30.7	5.4	41	0	917
65	85	5.4	0	38.1	106	11.3	40	0	713

*El experimento con el nivel mínimo de aire y máximo de gas debió ser modificado.

Anexo C. Configuraciones actuales existentes en el horno.

Tabla 24. Curva de cocción horno 4 y configuración de cúpulas y quemadores (Realización propia).

Zona	Quemador-Cúpula	Set Point	Zona	Quemador-Cúpula	Set Point
K4	M60 M60 M60 M60	820 °C	S14	M60 M60 M60 M60	1080 °C
K6	M60 M60 M60 M60	850 °C	S15	T500x40 T500x40 TRay T500x40	1130 °C
S7	M60 M60 M60 M60	880 °C	S16	M60 TRay M60 M500x40	1130 °C
S8	M60 M60 M60 M60	900 °C	S17	T500x40 T500x40 TRay T60	1130 °C
S9	M60 M60 M60 M60	950 °C	S18	T60 TRay T500x40 TRay	1160 °C
S10	M60 M60 M60 M60	930 °C	S19	T500x40 TRay T500x40 T500x40	1130 °C
S11	M60 M60 M60 M60	1020 °C	S20	T60 TRay T60 TRay	1160 °C
S12	M60 M60	990 °C	S21	T60 T60	1010 °C

	M60 M60		S22	M60 M60	1050 °C
S13	M60 M60 M60 M60	1080 °C	-M: Modena; T: TCK. -60: Cúpula de 60 mm. -500x40: Cúpula de 500x40 mm. -Ray: Cúpula Ray.		

Anexo D. Resumen del análisis de las combinaciones quemador-cúpula.

Tabla 25. Resumen de condiciones del análisis de presiones de aire y gas y consumo de gas para las configuraciones de cúpulas y quemadores (Realización propia).

Zona	Quemador-Cúpula	P_Gas (mm.c.a)	P_Aire (mm.c.a)	Consumo Gas (Nm ³ /h)
K4	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
K6	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
S7	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
S8	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
S9	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
S10	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
S11	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
S12	M60	80	80	3.9

	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
S13	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9

Tabla 26. Resumen de condiciones del análisis de presiones de aire y gas y consumo de gas para las configuraciones de cúpulas y quemadores (continuación) (Realización propia).

Zona	Quemador-Cúpula	P_Gas (mm.c.a)	P_Aire (mm.c.a)	Consumo Gas (Nm ³ /h)
S14	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9
S15	T500x40	200	20	3.4
	T500x40	200	20	3.4
	TRay	200	60	3.1
	T500x40	200	20	3.4
S16	M60	105	90	4.5
	TRay	200	60	3.1
	M60	105	90	4.5
	M500x40	110	50	4.7
S17	T500x40	200	20	3.4
	T500x40	200	20	3.4
	TRay	200	60	3.1
	T60	200	70	3.3
S18	T60	200	70	3.3
	TRay	200	60	3.1
	T500x40	200	20	3.4
	TRay	200	60	3.1
S19	T500x40	200	20	3.4
	TRay	200	60	3.1

	T500x40	200	20	3.4
	T500x40	200	20	3.4
S20	T60	200	70	3.3
	TRay	200	60	3.1
	T60	200	70	3.3
	TRay	200	60	3.1
S21	T60	200	70	3.3
	T60	200	70	3.3
S22	M60	80	80	3.9
	M60	80	80	3.9

-M: Modena; T: TCK.
-60: Cúpula de 60 mm.
-500x40: Cúpula de 500x40 mm.
-Ray: Cúpula Ray.

Anexo E. Resumen del análisis de las combinaciones quemador-cúpula junto con los cambios convenientes de quemadores identificados.

Tabla 27. Resumen de condiciones del análisis de presiones de aire y gas y consumo de gas para las configuraciones de cúpulas y quemadores, junto con cambios en quemadores propuestos (Realización propia).

Zona	Quemador-Cúpula	P_Gas (mm.c.a)	P_Aire (mm.c.a)	Consumo Gas (Nm ³ /h)
K4	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
K6	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
S7	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
S8	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
S9	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
S10	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
	M60	15	20	1.8
S11	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8

S12	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
S13	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8

Tabla 28. Resumen de condiciones del análisis de presiones de aire y gas y consumo de gas para las configuraciones de cúpulas y quemadores, junto con cambios en quemadores propuestos (continuación) (Realización propia).

Zona	Quemador-Cúpula	P_Gas (mm.c.a)	P_Aire (mm.c.a)	Consumo Gas (Nm ³ /h)
S14	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
S15	T500x40	200	20	3.4
	T500x40	200	20	3.4
	TRay	200	60	3.1
	T500x40	200	20	3.4
S16	T60	240	80	3.8
	TRay	200	60	3.1
	T60	240	80	3.8
	T500x40	260	40	4
S17	T500x40	200	20	3.4
	T500x40	200	20	3.4
	TRay	200	60	3.1
	M60	60	70	3.2
S18	M60	60	70	3.2
	TRay	200	60	3.1
	T500x40	200	20	3.4
	TRay	200	60	3.1

S19	T500x40	200	20	3.4
	TRay	200	60	3.1
	T500x40	200	20	3.4
	T500x40	200	20	3.4
S20	M60	60	70	3.2
	TRay	200	60	3.1
	M60	60	70	3.2
	TRay	200	60	3.1
S21	M60	60	70	3.2
	M60	60	70	3.2
S22	T60	240	80	3.8
	T60	240	80	3.8
<p>-M: Modena; T: TCK. -60: Cúpula de 60 mm. -500x40: Cúpula de 500x40 mm. -Ray: Cúpula Ray.</p>				

Anexo F. Resumen condiciones en el horno antes de realizar modificaciones.

Tabla 29. Resumen de las condiciones de presión de aire, presión de gas y consumo de gas natural en el horno antes de realizar modificaciones (Realización propia).

Cúpula- Quemador	Cantidad	P_Gas (mm.c.a)	P_Aire (mm.c.a)	Consumo Gas (Nm³/h)
TCK 60	2 en S18	220	110	3.4
	4 en S20	220	120	3.4
	2 en S17	160	120	2.7
	4 en S21	200	120	3.2
TCK 500x40	2 en S18	230	130	3
	6 en S15	230	135	3
	4 en S17	160	130	2.2
	6 en S19	260	130	3.4
TCK Ray	2 en S16	60	100	1.2
	4 en S18	225	110	3.1
	4 en S20	230	120	3.2
	2 en S15	230	130	3.1
	2 en S17	160	120	2.3
	2 en S19	235	135	3.2
Modena 60	8 en K4	50	80	3
	8 en K6	40	80	2.8
	8 en S8	30	80	2.5
	8 en S10	60	80	3.2
	8 en S12	80	80	3.9
	8 en S14	35	90	2.7
	4 en S16	35	80	2.7
	4 en S22	150	100	5.8
	8 en S7	40	80	2.8
	8 en S9	60	80	3.2
	8 en S11	80	80	3.9
8 en S13	80	90	3.9	
Modena 500x40	2 en S16	45	40	2.5

Tabla 30. Resumen de las condiciones de niveles de gases de combustión en el horno antes de realizar modificaciones (Realización propia).

Zona		CO ₂ (%)	CO (ppm)	EFF. (%)	E.A (%)	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)
K4	Plano Inf.	4.5	10	80.9	146.3	13	126	0
	Plano sup.	5.5	0	85.4	100.7	11.1	372	0
K6	Plano Inf.	6.9	0	81.5	63.4	8.7	219	19
	Plano sup.	5.5	0	85.3	100.6	11.1	439	0
S7		6.3	0	84.6	78.4	9.8	393	57
S8		4.6	0	82.4	139.4	12.8	259	50
S9		5.3	0	77.4	108.7	11.5	180	31
S10		5.4	0	82.8	105.1	11.3	195	34
S11		6.2	0	77.3	81.7	10.0	111	58
S12		4.9	0	74.9	124.1	12.2	85	115
S13		4.9	0	70.4	105.3	12.3	78	212
S14		5.9	0	74.3	89.0	10.5	72	210
S15		4.5	0	77.6	146.7	13.0	43	204
S16		4.4	0	69.9	149.4	13.1	38	167
S17		4.1	36	43.1	167.9	13.7	43	112
S18		3.8	4	60.5	188.5	14.2	35	436
S19		3.4	0	25.9	215.9	14.8	229	36
S20		3.6	1	43.3	202.6	14.5	38	66
S21		----	0	----	----	20.3	9	0
S22		----	0	----	----	19.8	8	0