



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de la Calidad

Determinación de parámetros de gases de emisión en combustibles alternos, para mejorar la calidad de combustión.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de Calidad

Presenta:
Ana Celia Moreno Cruz

Dirigido por:
M.I Eric Leonardo Huerta Manzanilla

SINODALES


M.I. Eric Leonardo Huerta Manzanilla
Presidente


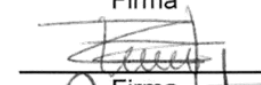
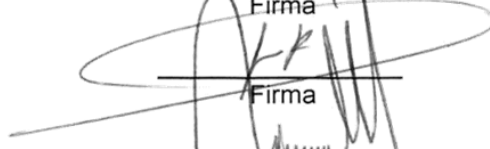
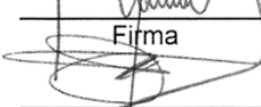


M.I. Raúl Arroyo Martínez Fabre
Secretario

M.C. Marcela Juárez Ríos
Vocal

Dr. Miguel Galván Ruíz
Suplente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

RESUMEN

La presente tesis muestra el desarrollo de un diseño experimental enfocado en obtener los parámetros óptimos de combustión del combustible alternativo generado en la empresa Givaudan de México. A lo largo de los cuatro capítulos principales se abordan temas relacionados con el proceso químico de la combustión y los factores que intervienen en ella para mejorar su eficiencia. Son estos mismos factores los que serán evaluados con herramientas estadísticas para definir su significancia en el proceso de combustión y posteriormente generar las gráficas de superficie de respuesta y de contorno que permitirán definir los niveles de operación óptimos. Los factores evaluados son el exceso de aire, la presión de operación del combustible alternativo y su impacto en la generación de dióxido de carbono en los gases de combustión. En la bibliografía actual se pueden encontrar recomendaciones de operación para mejorar la eficiencia de combustión, sin embargo al tratarse de un combustible alternativo único y con características especiales proveniente de los residuos de destilación de la compañía, no se puede concluir que los parámetros son los mismos que para combustibles comerciales provenientes principalmente de hidrocarburos. Una vez analizada la significancia de los factores seleccionados se concluye que: el exceso de aire sí es un factor que interfiere en la eficiencia de la combustión, no así la presión de operación o su interacción. Con apoyo de la gráfica de contorno y de superficie se define que los parámetros óptimos de operación, para este combustible en específico, está en el rango de 35% a 40% de exceso de aire, debido a que la presión de combustible no es un factor significativo, se puede trabajar en un rango de 30 libras a 33 PSI, sin afectar la eficiencia de la combustión.

(Palabras clave: combustible alternativo, combustión, superficie de respuesta, diseño y análisis de experimentos)

SUMMARY

The present thesis shows the development of an experimental design focused on obtaining the optimal parameters of combustion of an alternative fuel generated within the company "Givaudan de Mexico". Throughout the four main chapters, topics related to the chemical process of combustion and the factors involved in it to improve its efficiency are discussed. These factors will be evaluated with statistical tools to define their significance in the combustion process and then generate the response surface and contour graphs that will define the optimal operating levels. The factors evaluated are excess air, the pressure of the alternative fuel and its impact on the generation of carbon dioxide in the flue gases. In the current literature can be found operating recommendations to improve the combustion efficiency, however, being a single alternative fuel and from the distillation residues of the process with special features, cannot conclude that the parameters are same as for commercial fuels mainly from hydrocarbons. After analyzing the significance of the selected factors, it is concluded that the excess air is a factor that interferes with the efficiency of combustion, not the operating pressure or the interaction. With support of the contour and surface graphs, it is defined that the optimum operating parameters for this particular fuel, is in the range of 35% to 40 % excess air, since the fuel pressure is not a significant factor, it can work in a range of 30 to 33 PSI, without affecting the combustion efficiency.

(Key words: alternative fuel, combustion, response surface, design and analysis of experiments)

A mi familia y amigos que me han apoyado
en este importante proyecto

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia y amigos por aguantar mis ausencias, a los compañeros que me apoyaron durante esta gran e importante etapa de estudios, sin ustedes este proyecto no sería el mismo.

A mis profesores por el entusiasmo de compartir el conocimiento, a esta Universidad por considerar estudios más allá de una licenciatura y facilitar las oportunidades de estudio a nuevas generaciones.

Pero sobre todo a mis padres y hermanos que has sido motivo de inspiración, gracias mamá estar aquí, gracias a ti que sabes que en mi memoria nunca faltará tu nombre aunque te hayas ido, gracias a Dios por permitir cumplir esta meta.

ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ECUACIONES	ix
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
2 REVISIÓN DE LA LITERATURA	6
2.1 Combustión	6
2.1.1 Combustibles	11
2.1.2 Composición del aire.....	14
2.1.3 Relaciones aire combustible	15
2.1.4 Combustión con exceso o deficiencia de aire.....	17
2.1.5 Análisis de los productos de combustión	19
2.1.6 Ecuaciones de combustión.....	22
2.1.7 Calores de reacción	28
2.2 Generadores de Vapor	29
2.2.1 Clasificación	29
2.2.2 Componentes.....	35
2.3 Diseño de Experimentos	38
3 HIPOTESIS	51
4 OBJETIVOS	52
5 METODOLOGÍA	53
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	75
6.1 Conclusiones.....	79
LITERATURA CITADA	80
APÉNDICE	82
A. Certificado de calibración del analizador de gases	82
B. Formato de campo de análisis de emisiones.....	85
C. Impresiones de resultados de análisis de gases.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Pautas generales para diseñar un experimento.	39
5.1	Pautas generales para diseñar un experimento.	57
5.2	Resumen de resultados obtenidos para factorial completo.	63
5.3	Resumen de resultados obtenidos para puntos centrales.	71
6.1	Límites de emisión.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Imagen publicitaria de la empresa Givaudan.	2
2.1	Niveles de bióxido de carbono y oxígeno obtenidos en la combustión del combustóleo.	9
2.2	Esquema general de un proceso de combustión.	20
2.3	Variación esquemática de CO ₂ , CO y O ₂ en los productos de combustión.	27
2.4	Caldera pirotubular.	30
2.5	Caldera acuatubular.	31
2.6	Pasos de una caldera.	35
2.7	Componentes de una Caldera.	37
2.8	Clasificación de factores que intervienen en un diseño de experimentos.	43
2.9	Superficie de respuesta tridimensional donde se indica el rendimiento esperado (η) como una función de la temperatura (x_1) y la presión (x_2).	48
2.10	Grafica de contorno de una superficie de respuesta.	48
5.1	Servicios entregados a planta.	53
5.2	Diagrama de proceso para el combustible alterno.	55
5.3	Estrategia DOE.	56
5.4	Plantilla generada en el Software Minitab para el diseño factorial.	61
5.5	Formato para colección de datos en campo.	62
5.6	Gráfica de cubo de exceso de aire y presión de combustóleo.	64
5.7	Gráfica de Pareto de los efectos estandarizados.	65
5.8	Gráfica de probabilidad normal de los efectos estandarizados.	66

5.9	Gráfica de efectos principales para el CO ₂ .	67
5.10	Gráfica de interacción para el porcentaje de CO ₂ .	67
5.11	Gráfica de residuales.	68
5.12	Gráfica de cubo de exceso de aire y presión de combustible con punto central.	69
5.13	Plantilla generada en el Software Minitab para el diseño factorial con punto central.	70
5.14	Formato para colección de datos centrales en campo.	70
5.15	Gráfica de superficie de CO ₂ contra exceso de aire y presión de combustible.	73
5.16	Gráfica de contorno de CO ₂ contra exceso de aire y presión de combustible.	74
6.1	Gráfica costos unitarios del combustóleo.	76
6.2	Beneficios económicos por uso de combustible alterno.	77
6.3	Beneficios ambientales por uso de combustible alterno.	78

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación		Página
2.1	Ecuación de combustión completa para un combustible ideal.	7
2.2	Ecuación de combustión incompleta.	7
2.3	Ecuación de combustión con aire ambiental.	15
2.4	Ecuación de reactivos y productos de un octano gaseoso.	18
2.5	Ecuación balanceada con un 100% de exceso de aire.	18
2.6	Ecuación balanceada con un 80% de exceso de aire.	19
2.7	Ecuación calor de combustión.	20
2.8	Ecuación calor de combustión para un mol de combustible.	21
2.9	Ecuación de combustión del metano con oxígeno.	22
2.10	Ecuación de combustión completa del metano con oxígeno.	23
2.11	Ecuación de combustión completa del metano con aire ambiente.	23
2.12	Ecuación de superficie de respuesta.	47
2.13	Ecuación de la función de aproximación.	49
2.14	Ecuación de la función de aproximación con curvatura.	49

1 INTRODUCCIÓN

La búsqueda de la eficiencia, que permita un mejor posicionamiento en el mercado y hacer de una empresa rentable, así como la creciente preocupación por el cuidado del medio ambiente, ha llevado a diferentes instituciones y empresas a utilizar combustibles sustentables con una mayor compatibilidad con el medio ambiente; hoy en día se busca aprovechar al máximo todos los recursos administrados por la industria, desde el recurso humano, hasta los mismos residuos generados durante el procesos de producción.

Como resultado de la globalización, de la economía y del comercio, prácticamente todos los países están estudiando cómo cambiar la composición y el volumen de sus residuos. La visión mundial acerca de la gestión de residuos también ha cambiado. Los residuos que se generan en un país son el reflejo de las formas de producción y consumo de las sociedades en las que se vive actualmente.

1.1 Antecedentes

Givaudan es un empresa del giro química secundaria, nace en el año de 1796 y se establece como líder en la industria de la fragancia y el sabor, de origen suizo y filiales en más de 46 países.



Figura 1.1 Imagen publicitaria de la empresa Givaudan.

Givaudan cuenta con una planta dedicada a la elaboración de ingredientes para fragancias ubicada en el municipio de Pedro Escobedo, Qro.

La elaboración de los productos se lleva a cabo a través de reacciones y destilaciones químicas de diferentes estilos y grados de complejidad dando como resultado, además de un producto principal, la generación de residuos orgánicos. La mayoría de las reacciones requieren de calentamiento que se obtienen mediante el flujo de vapor a través de columnas de destilación, eyectores generadores de vacío, y reactores químicos. El vapor se obtiene de generadores de vapor mayormente conocidos como calderas, las cuales operan con combustóleo y combustible alterno.

Anteriormente los residuos orgánicos generados en planta eran enviados a disposición a diversas empresas que se dedican a esta actividad, las cuales son pocas en el país y con un elevado costo. Una parte de los residuos eran enviados a empresas cementeras que los utilizaban como combustible en hornos de altas temperaturas.

A partir del año 2007 los Ingenieros de Proceso de la planta comienzan a estudiar los residuos orgánicos que se generan de los procesos productivos, se

envían a laboratorio para identificar las principales características, y se determina que el valor calorífico de los mismos es similar al combustible que en ese momento era utilizado para la generación de vapor (combustóleo); se solicitaron los permisos legales ante las instancias correspondientes, los cuales fueron aceptados, y se iniciaron pruebas en planta, hasta lograr su quema en los generadores de vapor, sin embargo debido a las características únicas del combustible, se cuenta con poca información referente a su combustión, y hasta el momento se había manejado bajo los mismos parámetros de un hidrocarburo.

La investigación presentada está dividida en tres capítulos, y cada uno de ellos aborda el objeto de estudio desde diferentes perspectivas; revisión de la literatura, metodología y resultados y discusión.

El primer capítulo aborda de manera general la literatura existente para los temas relacionados con el presente proyecto, esta parte se divide en tres temas principales, los cuales son las bases para el desarrollo del proyecto, el primero de ellos está enfocado a describir el proceso general de combustión, particularmente de los productos que se obtienen a partir de ella así como los parámetros que garantizan una combustión de calidad que genere los menores impactos al medio ambiente. La bibliografía actual muestra los rangos de los gases de emisión O_2 , CO_2 y exceso de aire, como factores fundamentales a controlar para obtener una combustión completa principalmente de combustibles comerciales a base de petróleo (combustóleo, diésel, gas natural, etc.). Debido a que el combustible alternativo normalmente es único por ser una mezcla de los residuos que se generan en el proceso de producción, no existe información sobre los parámetros de operación. El presente proyecto busca como se mencionó anteriormente, a través del uso de herramientas estadísticas como diseño de experimentos y superficies de respuesta, obtener los parámetros de operación para mejorar la calidad de combustión y reducir el uso de combustible, lo que también tiene un impacto ambiental al reducir las emisiones enviadas a la atmósfera, generadas por una combustión incompleta. Dentro del primer tema también se encuentra información

referente a las reacciones químicas que se generan durante el proceso de combustión.

El segundo tema contiene información sobre los equipos involucrados en el proceso de combustión, específicamente de Calderas generadoras de vapor, su clasificación, operación y principales componentes.

El tercer tema de esta sección está principalmente enfocado a describir los métodos estadísticos mencionados anteriormente y que serán la base para la parte experimental del presente proyecto.

La segunda parte está enfocada en establecer la metodología utilizada durante la fase de experimentación, como primer parte de esta sección se encuentra el desarrollo del diseño de experimentos con el cual se determina cuáles son los productos obtenidos en la combustión que afectan la calidad de la misma, una vez determinado cuáles son estos parámetros se utiliza la metodología de superficies de respuesta para conocer los valores óptimos que permitan mantener una combustión lo más eficiente posible.

La metodología utilizada para obtener los parámetros de operación no solo servirá para mejorar la calidad de combustión, si no que podrá ser punto de partida para aquellas empresas o instituciones generadoras de combustibles alternos.

En la tercera sección se presentan los resultados obtenidos en la fase experimental, en la cual se determinó que los parámetros óptimos del combustible alternativo en cuestión son los siguientes; operar la caldera con un exceso de aire en un rango del 35% al 40% y dado que se demostró que la presión de alimentación de combustible no es un factor significativo se recomienda operarlo en un rango de 30 a 33 PSI, en esta sección también se pueden encontrar los beneficios económicos y ambientales que se obtuvieron.

Se termina con un conjunto de conclusiones generales, la literatura citada y los anexos que facilitan una mejor comprensión del tema desarrollado.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Combustión

De acuerdo con Rolle (2006) entre las distintas reacciones químicas existe una muy común que es la oxidación del oxígeno con cualquier otro elemento.

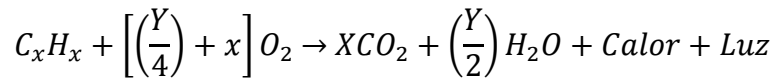
Los elementos esenciales de los combustibles son el carbono y el hidrogeno. El azufre y algunos elementos arden, pero no son importantes como combustibles. Tanto el hidrogeno como el carbono tienen muy alto valor calorífico. Estos elementos básicos de los combustibles se hallan en muchas combinaciones las que se conocen como hidrocarburos, algunos de los cuales normalmente se encuentran en forma de gas, líquido o sólidos.

Según Márquez (2005), la combustión es una forma de oxidación de los elementos constitutivos de un combustible con el oxígeno del aire en la cual las partículas del combustible y el oxígeno se combinan rápidamente y producen energía o calor.

La mayoría de los combustibles contienen uno o más de los siguientes elementos: carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y materias inertes como la ceniza. De estos, tres tienen la facilidad de reaccionar con el oxígeno.

Combustión completa (Wark, 2001), esto simplemente expresa que, si fuera posible mezclar completamente el oxígeno del aire con el carbón e hidrogeno durante la combustión, éstos serían totalmente quemados y no quedaría oxígeno, en el caso de un combustible ideal, es decir que contenga únicamente carbono e hidrogeno el proceso se puede representar de la siguiente manera:

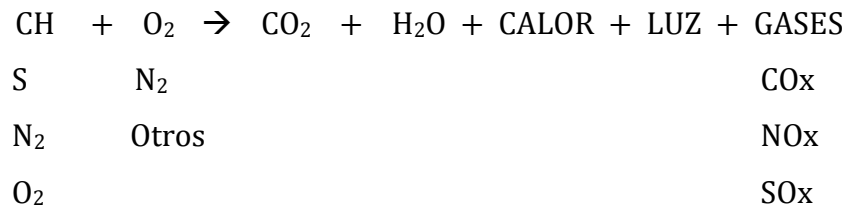
Ecuación 2.1 Ecuación de combustión completa para un combustible ideal (Wark, 2001).



El objetivo de una buena combustión es liberar todo el calor minimizando las pérdidas por combustión incompleta y aire innecesario; es decir, que mientras más completa y limpia es la combustión, mayor es el calor producido, aprovechado y menor la contaminación del aire.

Sin embargo los combustibles contienen impurezas y el aire también, que alteran la sencillez del proceso anterior así:

Ecuación 2.2 Ecuación de combustión incompleta (Wark, 2001).



Los subproductos extras de la combustión real son en su mayoría nocivos a la misma y al medio ambiente de aquí que se haga necesario buscar la manera de disminuir su proporción de ellos, sin embargo esto a veces no es muy sencillo.

Para disminuir los efectos de las impurezas en la combustión se pueden tomar varias medidas, la primera es tratar de minimizar su proporción en el combustible o en el aire, pero no es muy sencillo, por ejemplo con un proceso de refinación más complejo y por lo tanto más caro, es posible reducir el contenido de azufre de los aceites combustibles, pero su costo se eleva, ya que entre más pesado es, mayor cantidad de azufre puede retener y así mismo en combustibles gaseosos el problema es casi nulo.

Si la cantidad de SO_3 producido es proporcional al exceso de oxígeno, la combustión con bajo exceso de aire es deseable. Ahorro de combustible también resulta cuando la temperatura de diseño del vapor se mantiene con bajo exceso de O_2 . Tales reducciones pueden ser logradas mecánica o químicamente.

Por otro lado; si se quiere reducir el nitrógeno del combustible, resulta mucho más complicado e inútil porque el que contiene mayor cantidad de nitrógeno es el aire para la combustión, y si se quisiera usar oxígeno puro sería incosteable sostener la operación de un equipo generador de vapor, de aquí que el modo de reducir sus efectos es diseñar un quemador que inhiba el efecto del nitrógeno a base de una flama fría, pues con temperaturas extremadamente altas el nitrógeno tiene muchas facilidades para reaccionar, pero las emisiones de NO_x se pueden reducir al limitar la conversión del aire a NO_x .

Prácticamente nunca es posible tener combustión completa sin una cantidad mayor del aire teóricamente calculado. Cuando se aumenta el aire (exceso de aire), el porcentaje de CO_2 permanece constante con respecto al combustible, pero disminuye al diluirse por la presencia de mayor cantidad de aire, y el porcentaje de O_2 aumenta, la cantidad de O_2 en los gases de combustión es significativa para definir las condiciones del proceso de combustión. Su presencia siempre significa que se está introduciendo más aire del necesario. En una combustión completa los valores bajos de O_2 en los gases reflejan un exceso de aire moderado y pérdidas de calor reducidas.

El porcentaje de CO_2 disminuye cuando falta oxígeno a la combustión y comienza a formarse monóxido de carbono (CO) quedando combustible no quemado y generando humo en color negro (Wark, 2001).

Teóricamente se puede obtener una combustión completa pero en la práctica es muy complicado, así que es preferible mantenerlos trabajando dentro de una franja de la gráfica de combustión en el lado del exceso de aire y por

consiguiente exceso de oxígeno, como se muestra en la siguiente figura 2.1 (SELMEC, 2008).

Entre más pesado es el combustible más cantidad de exceso de aire requiere para su combustión y la franja de trabajo se puede hacer más ancha.

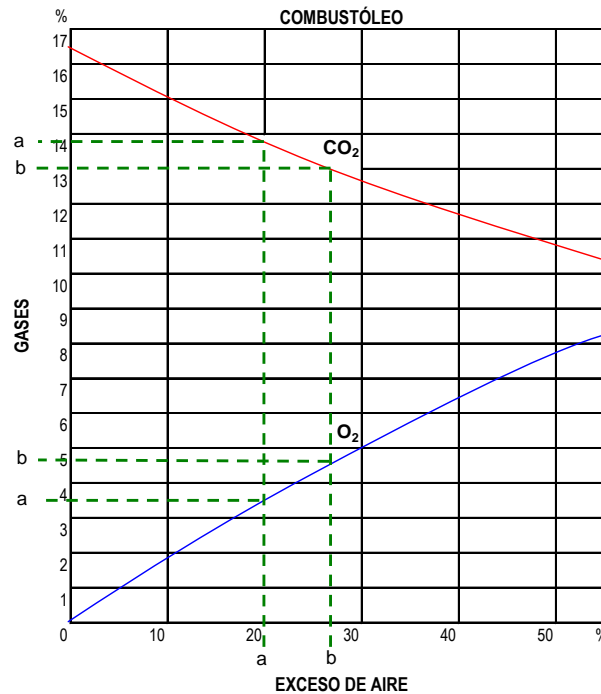


Figura 2.1. Niveles de bióxido de carbono y oxígeno obtenidos en la combustión del combustóleo. (SELMEC, 2008).

El termino combustión comúnmente se refiere a una reacción química en la que interviene un combustible y oxígeno o aire; por lo general va acompañada de una flama. Los procesos de combustión tienen gran aplicación en motores de combustión interna, plantas generadoras de vapor, hornos y celdas de combustible.

En el análisis de procesos de combustión surgen varias incógnitas: ¿Cuánta energía se libera en el procesos de combustión?, ¿cuánta masa de aire se requiere suministrar a una masa dada de combustible?, ¿cuál es la composición de los productos de combustión?, etcétera.

La mayor parte de los combustibles (carbón, combustóleo, gasolina, gas natural, etc.), están básicamente constituidos por carbono, hidrógeno y pequeñas porciones de azufre como elementos combustibles. (Manrique, 2001)

No hace mucho tiempo que los procesos químicos estaban casi totalmente a cargo del químico o del ingeniero químico. Pero cuando sobrevino la crisis energética se planteó la impresionante aseveración de que todos los combustibles fósiles son finitos o agotables. De pronto a todo el mundo le interesó el asunto de la energía.

La quema controlada de un combustible en el aire atmosférico es una reacción química exotérmica acompañada de un incremento sustancial de la temperatura. Como todos los procesos termodinámicos, tiene que ser eficiente. Deben ser correctos cuatro factores (entre otros) para que un proceso de combustión se lleve adecuadamente; tales factores se indican por la palabra mnemónica MATT. La M señala que debe haber una mezcla eficaz de combustible y comburente (oxidante); la A, el aire suficiente para suministrar el oxígeno adecuado; la T, la temperatura de ignición apropiada para iniciar y mantener el proceso de combustión, y la segunda T, el tiempo justo que permita la quema o combustión completa. (Faires, 2004)

Cuándo se combinan sustancias puras forman lo que llamamos una mezcla. Existen mezclas que no reaccionan, en las que las sustancias puras no cambian su composición química después de haber sido mezcladas, también existen mezclas de dos o más sustancias que si reaccionan y crean sustancias nuevas o diferentes, a partir de los componentes originales. La ciencia de la química estudia las reacciones que intervienen cuando se mezclan dos o más sustancias (o reactivos) entre sí.

La combustión es un proceso de oxidación que se lleva a cabo a gran velocidad. (Rolle, 2006)

2.1.1 Combustibles

En los procesos de combustión, una mezcla de oxígeno y otra sustancia reaccionan para formar dióxido de carbono y/o agua. Con frecuencia, a las sustancias que reaccionan con oxígeno se les llama combustibles, y al combustible y al oxígeno se les llama reactivos. A los componentes que se forman en un proceso de combustión se les llama productos de combustión, o solo productos. (Rolle, 2006)

Los combustibles fósiles se pueden clasificar convenientemente como: 1) sólidos, 2) líquidos y 3) gaseosos. El carbón (mineral) en sus diferentes clases es el combustible sólido más común. Los combustibles líquidos utilizados más ampliamente son los derivados de hidrocarburos, con fórmula química $C_x H_y$, donde los subíndices x y y poseen diversos valores. Los alcoholes, con fórmula química $C_x H_y O_z$, tienen aplicaciones cuando la desventaja en el precio es compensada por otras ventajas. Los combustibles gaseosos son por lo general los más limpios y, donde el gas natural sea abundante, probablemente resultan también los más baratos. Los gases de fabricación y subproductos se emplean tanto para la calefacción como para la generación de potencia. La era del espacio ha propiciado el desarrollo de más combustibles, en particular los reactivos que se combinan rápidamente y con liberación de grandes cantidades de energía, como el necesario para la propulsión de los cohetes. (Faires, 2004)

El carbón ha sido y sigue siendo una fuente importante de energía. El carbón es una mezcla de sustancias, y la más importante es el carbono. El carbón se extrae de la tierra como sólido mezclado con otros materiales; se lava, se separa de rocas y otras impurezas, y se usa como combustible. El carbón tiene otras sustancias, aun después de los procesos de lavado y separación. Sin embargo cuando se escribe la ecuación estequiométrica de la combustión del carbono, se considera carbono puro.

Es posible efectuar la combustión del carbón de diversas maneras. Se puede quemar en forma de grandes piedras, como combustible de quemado lento. También se puede moler en pequeñas partículas, y quemar para obtener fuegos relativamente calientes. Las pequeñas partículas se mezclan mejor con el oxígeno que los trozos grandes, por lo que la combustión es más rápida. También es posible pulverizar el carbón, formando un polvo para mezclarlo todavía mejor con el oxígeno, y obtener un fuego algo más controlable que con partículas más grandes. Por último, se puede quemar en lechos fluidizados. En este caso, el carbón se muele para formar partículas pequeñas de aproximadamente 1 a 2 cm de diámetro, y mezclarse con piedra caliza. A continuación, se hace pasar aire desde abajo, a través del lecho de carbón y caliza. La combustión que resulta puede ser más lenta, con menores temperaturas que en otros métodos de quemado, pero la combustión es más completa. De los diversos procesos de combustión de carbón, se ha sugerido que la combustión en lecho fluidizado forma productos de combustión que son menos perjudiciales a los humanos y medio ambiente.

El principal uso del carbón es como combustible para producir energía eléctrica, aunque también se usa para proporcionar calentamiento para otras aplicaciones.

El petróleo crudo, bombeado de pozos en áreas petrolíferas del mundo, es una mezcla muy compleja de sustancias, de donde se pueden separar o destilar varios productos. Casi todos esos productos son hidrocarburos; es decir, son sustancias que contienen hidrogeno y carbono en su estructura. Representan una gran fuente de energía y, por lo tanto, son combustibles importantes en los estudios de combustión. Los combustibles derivados del petróleo crudo se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Gasolina.
- Destilados y residuos.

- Gas licuado (LP) del petróleo.
- Queroseno y combustible para reactores.

La gasolina es una mezcla de varios hidrocarburos, que en general se evapora o hierve a bajas temperaturas, en comparación con otros hidrocarburos combustibles. Se usa como combustible en motores de combustión interna con ignición por chispa, en transportes y otras aplicaciones. Se requiere que la gasolina no detone o se encienda antes de que la dispare una chispa eléctrica controlada, por lo que las características de ignición de la gasolina son importantes.

Los destilados son mezclas de hidrocarburos que en general tienen mayores presiones de vapor y mayores temperaturas de ebullición que las de las gasolinas. Con frecuencia se usan para calefacción residencial, como aceites combustibles y en motores de diésel ligero, donde la ignición es por compresión, los combustibles residuales se usan en motores diésel grandes, y para algunas aplicaciones de calefacción. Los destiladores y residuales se llaman, a veces, aceite combustible o diésel. Se requiere que el diésel tenga auto ignición, por lo que sus características deben ser distintas a las de las gasolinas, las cuales no presentan auto ignición.

Los gases LP, incluyendo el gas natural, son vapores y líquidos naturales, y también refinados industrialmente, que se obtiene del petróleo. El gas natural tiene un alto porcentaje de metano, CH_4 . El gas LP está formado, con frecuencia, de propano, C_3H_8 . El gas butano suele estar formado por un 95% de la sustancia química butano, C_4H_{10} .

En ciertas áreas de la tecnología, la biomasa ha llegado a ser un combustible importante. En general, el termino biomasa significa madera y sus productos derivados, como papel. La principal sustancia identificada en la madera es la celulosa, $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$, y el análisis de los desechos de la sociedad (desechos o basura) indica, con frecuencia, un alto porcentaje celulosa. En consecuencia, la celulosa intervienen en una gran variedad de casos tecnológicos: como

combustible en aplicaciones de quemado de madera, y como sustancia de desecho, en incineración de basura.

Por último, los alcoholes son una clase de sustancias químicas que se han sugerido para sustituir a los combustibles basados en el petróleo, que se están agitando. Los alcoholes pueden derivarse de materiales orgánicos o biológicos como madera, maíz y granos. Los dos alcoholes más abundantes son el alcohol metílico, CH_3OH , y el alcohol etílico, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$; sin embargo es probable que el alcohol combustible sea una mezcla compleja de varios alcoholes. También, los alcoholes tienden a atraer agua, por lo que un alcohol combustible podría contener cantidades importantes de agua, al analizarlo. (Rolle, 2006)

2.1.2 Composición del aire

El aire atmosférico tienen una composición volumétrica de 20.99% de oxígeno, 78.03% de nitrógeno, algo menos que 1% de argón, y pequeñas cantidades de varios otros gases como vapor de agua, dióxido de carbono, helio, hidrogeno y neón. Para la mayor parte de cálculos de ingeniería generalmente basta incluir todos los gases además del oxígeno, como nitrógeno, y utilizar valores de composición de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno “atmosférico”, en volumen. Por tanto, en 100 moles de aire existen más o menos 21 moles de O_2 y 79 moles de N_2 , o sea,

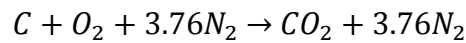
$$\frac{79}{21} = 3.76 \frac{\text{moles } \text{N}_2}{\text{mol } \text{O}_2} \text{ o bien, } 3.76 \frac{\text{m}^3 \text{N}_2}{\text{m}^3 \text{O}_2}$$

Que es un valor útil para el estudio general. La composición gravimétrica aproximada del aire es 23.1% O_2 , 76.9% N_2 , o bien, de $76.9/23.1=3.32 \text{ kg } \text{N}_2 / \text{Kg } \text{O}_2$. (Faires, 2004)

2.1.3 Relaciones aire combustible

Los combustibles que participan en un proceso de quemado reaccionan con oxígeno y forman los productos de la combustión. Es común mezclar un combustible con aire, y no con oxígeno, porque el oxígeno puro no es un material fácilmente disponible como el aire. Además, el oxígeno puro puede ser una sustancia peligrosa, que representa un riesgo de incendio. Por lo anterior, si el aire se mezcla con un combustible para promover un proceso de combustión, se debe revisar la ecuación estequiométrica para tener en cuenta que se trata de aire, y no de oxígeno. El análisis molar aceptado del aire, o aire normal, es 1 mol de oxígeno a 3.76 moles de nitrógeno. Por lo anterior si quemamos carbono con aire normal, en lugar de oxígeno puro, la ecuación de combustión será:

Ecuación 2.3 Ecuación de combustión con aire ambiental (Rolle, 2006).



Observe que se supone que el nitrógeno gaseoso es una sustancia inerte. En el análisis de la combustión veremos que el nitrógeno absorbe mucha de la energía térmica, o poder calorífico del combustible, en el proceso de quemado. También en los procesos reales de combustión el nitrógeno puede alcanzar temperaturas lo suficientemente altas como para reaccionar con el oxígeno y formar varios óxidos nítricos: NO, NO₂, NO₃, etcétera. Estos óxidos de nitrógeno se pueden combinar entonces con átomos de hidrogeno libre y formar ácidos nítricos que se cree son una de las fuentes de contaminación atmosférica.

En los análisis de la combustión conviene usar el término relación aire/combustible, que se define como:

$$AF = \frac{\textit{masa de aire}}{\textit{masa de combustible}}$$

Esta relación se puede determinar para un proceso de combustión donde intervengan cantidades estequiométricas de oxígeno y combustible, y se puede modificar para tener en cuenta el nitrógeno en el aire normal. En estos casos se dice que el proceso tiene 100% del aire teórico.

La relación aire/combustible en los procesos reales de combustión se ajusta o cambia con frecuencia, respecto a la calculada con 100% de aire teórico. Si se suministra menos aire que el 100% se dice que la mezcla de aire/combustible es “rica”, y es probable que la combustión sea incompleta, aunque puede comenzar a menor temperatura cuando la mezcla es rica. Si la relación AF se aumenta a más de 100%, se dice que es “pobre” y hay exceso de aire. Las mejores economías de combustible, en los motores de combustión interna, se obtienen con frecuencia con mezclas pobres. El exceso de aire suele expresarse en porcentajes, y se puede decir que:

$$\text{exceso de aire \%} = \text{aire teorico\%} - 100\%$$

Por consiguiente, para el 100% de aire teórico el exceso de aire es cero. Para el 250% de aire teórico, el exceso de aire sería 150%. Es claro que el mayor exceso de aire equivale también a mayores relaciones AF. El exceso de aire permite que haya presente oxígeno gaseoso en los productos de la combustión (Rolle, 2006).

Si en las proporciones de los componentes de los reactivos hay exactamente las suficientes moléculas de oxidante para lograr y la reacción completa hasta formar moléculas estables de los productos, se dice que dichas proporciones son estequiométricas. Para las mencionadas proporciones hay una cantidad ideal de oxidante; en el caso de combustibles que reaccionan con O_2 puro, se habla del “100% de aire” (o bien, el 100% de O_2).

En la práctica, para asegurar una reacción total del combustible (combustión completa), se proporciona un exceso de aire o de oxígeno. Cualquier

cantidad de aire superior a la requerida prácticamente para la situación particular, hace que una mayor cantidad de energía salga del sistema como energía almacenada (molecular), en tanto la temperatura a la cual los productos de la combustión son enfriados debe ser la más baja posible económicamente. La experiencia indica los siguientes valores de exceso de aire en el caso de los hogares (u hornos) de las plantas de vapor: para carbón pulverizado del 15 al 20%; para combustóleo del 5 al 20%, para gas natural del 5 al 12%.

En ocasiones en que se requiere una deficiencia (o defecto) de aire (u oxidante) y, en el caso de los combustibles, se habla de, por ejemplo, un “80% de aire” (o bien, un 80% de O_2). En general, si no hubiera algún exceso de combustible, la pérdida por el combustible no quemado, o sea, la combustión incompleta, sería antieconómica (Faires, 2004).

2.1.4 Combustión con exceso o deficiencia de aire

Se considera que el exceso de aire pasa por la reacción químicamente sin cambio alguno. Suponga que desea tener un 100% de exceso de aire (“el 200% de aire”). En primer lugar se debe equilibrar la ecuación de combustión en el caso de aire estequiométrico, de modo que se conozca la cantidad ideal; luego se puede determinar la cantidad de aire correspondiente a un porcentaje dado de exceso (o deficiencia). Con deficiencia de aire se deben admitir supuestos acerca de la composición de los productos en esta etapa. Supondremos que todo el H_2 va al H_2O (debido a que existe una fuerte afinidad entre el H_2 y el O_2), y el estado incompleto de la combustión origina la aparición de algo de CO , así como CO_2 .

A manera de ejemplo utilizaremos la siguiente ecuación:

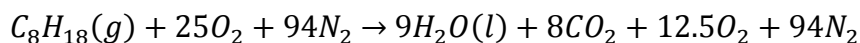
Ecuación 2.4 Ecuación de reactivos y productos de un octano gaseoso (Faires, 2004).

	Reactivos				Productos		
	$C_8H_{18}(g)$	+ 12.5 O_2	+ 47 N_2	→	9 $H_2O(l)$	+ 8 CO_2	+ 47 N_2
Moles:	1	+ 12.5	+ 47	→	9	+ 8	+ 47
Volumen relativo:	1	+ 12.5	+ 47	→	0	+ 8	+ 47
Masa relativa:	114	+ 400	+ 1316	=	162	+ 352	+ 1316
Masa / kg (comb.):	1	+ 3.51	+ 11.54	=	1.42	+ 3.09	+ 11.54

La primera línea después de la ecuación es simplemente el número de moles de cada componente para combustión completa en aire estequiométrico. La línea de “Volumen relativo” muestra los volúmenes relativos cuando los reactivos y los productos están a las mismas temperatura y presión; el H_2O líquido se indica con volumen cero (pues es muy pequeño comparado con los volúmenes de gas). La línea de “masa relativa” se halla multiplicando el número de moles de cada componente por su masa molecular M (kg/mol). La línea de “Masa/kg (comb.)” se obtiene dividiendo cada término de la línea precedente entre la masa de combustible.

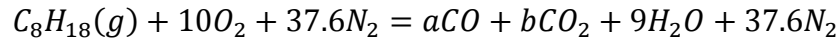
Para el 100% de exceso de aire en esta ecuación, habría 25 moles de O_2 y 94 moles de N_2 . La ecuación balanceada queda como:

Ecuación 2.5 Ecuación balanceada con un 100% de exceso de aire (Faires, 2004).



Supóngase que 80% del aire estequiométrico es suministrado por el octano en la ecuación anterior; entonces el O_2 en los reactivos es $(0.80)(12.5)=10$ moles, y el N_2 correspondiente es $(3.76)(10)=37.6$ moles. La ecuación química será:

Ecuación 2.6 Ecuación balanceada con un 80% de exceso de aire (Faires, 2004).



A partir de los balances de átomos de carbono y oxígeno

$$C: \quad 8 = a + b \text{ o bien } a = 8 - b$$

$$O_2: \quad 20 = a + 2b + 9$$

Una resolución simultánea da $b=3$ moles y $a=5$ moles. Se puede escribir ahora la ecuación balanceada y realizar otros cálculos (Faires, 2004).

2.1.5 Análisis de los productos de combustión

Estos productos se analizan con el fin de saber cómo se realiza el proceso de combustión, por ejemplo, la cantidad de aire suministrada. El aparato Orsat, determina los porcentajes de CO_2 , CO y O_2 en los productos secos (aunque la muestra de prueba está saturada con H_2O). Puesto que los desechos de un motor de combustión interna contienen hidrógeno H_2 e hidrocarburos – principalmente metano, CH_4 – estos componentes pueden ser: (1) omitidos, (2) determinados por una prueba más completa, o bien, (3) estimados. La experiencia indica que la cantidad de CH_4 es de aproximadamente el 0.22% del volumen del gas seco de salida, y que la cantidad de H_2 libre en el volumen es de cerca de la mitad del porcentaje volumétrico de CO .

A partir de los análisis de productos podemos formular la ecuación química teórica correspondiente, o bien, obtener parte de ella, dependiendo de lo que se conoce al respecto del combustible. Existen fuentes de error inevitables, tales como combustible no quemado en la ceniza y el humo (hollín). El análisis del combustible y de los productos puede ser completo, en cuyo caso es posible

realizar balances de material. Sin embargo, podemos obtener una conveniente aproximación del aire proporcionado (si el contenido de O₂, H₂ y N₂ libres es pequeño), de un balance del carbón conociendo solo la cantidad de carbón quemado pro unidad de masa de combustible (Faires, 2004).

Es posible visualizar los procesos de combustión como la mezcla de un combustible con aire, para formar los productos de la combustión. Con frecuencia, esos procesos se efectúan a presión constante, ya sea en un sistema cerrado o en uno abierto. El problema general de la combustión se ilustra en el esquema de la figura 2.2 De acuerdo con este esquema, y con la conservación de energía:

Ecuación 2.7 Ecuación calor de combustión (Manrique, 2001).

$$Q_1 = \sum m_3 h_3 - m_1 h_1 - m_2 h_2$$

Donde Q₁ es el calor desprendido en el proceso de combustión, que se llama calor de combustión. Como con frecuencia hay más de un producto en la combustión, la entalpia en el estado 3 (de los productos) se indica con una suma de todos los productos de la combustión $\sum m_3 h_3$.

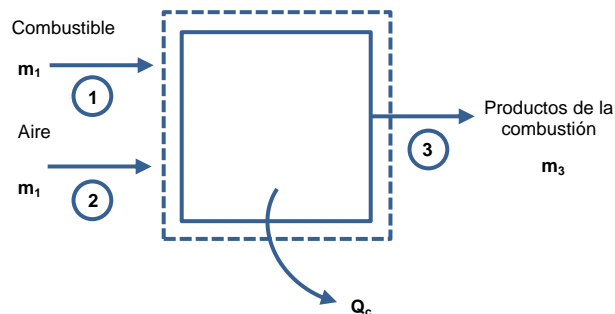


Figura 2.2 Esquema general de un proceso de combustión (Manrique, 2001).

Con frecuencia, el calor de combustión se determina para 1 mol de un combustible.

Entonces, la ecuación 2.7 se debe escribir como sigue:

Ecuación 2.8 Ecuación calor de combustión para un mol de combustible (Manrique, 2001).

$$q_c = \sum N_3 \bar{h}_3 - \bar{h}_1 - N_2 \bar{h}_2$$

Donde $\sum N_3 \bar{h}_3$ es la suma de los productos de la combustión para un mol de combustible. Las entalpías \bar{h}_3 , \bar{h}_1 y \bar{h}_2 se basan en 1 mol de la sustancia.

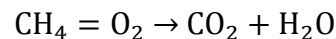
El calor de combustión suele determinarse con los procesos donde el combustible y el aire están a presión y temperatura normal, 298 K y 101 kPa. Si también suponemos que los productos de la combustión están a presión y temperatura normales, al calor de combustión se le llama poder calorífico del combustible. En los procesos reales de combustión, los productos normalmente están a una temperatura alta, por lo que el calor de combustión, Q_c o q_c , podría representar una transferencia potencial de calor, si se enfrían los productos a la salida, a la temperatura normal. Los valores de entalpía en las ecuaciones 2.7 y 2.8 se pueden igualar a los calores de formación.

A su vez el poder calorífico se puede interpretar de dos maneras: 1) los productos contiene agua en forma de vapor, o 2) los productos contienen agua en estado líquido. Si se supone que los productos de combustión contienen agua líquida, al poder calorífico se le llama poder calorífico superior, PCS; y si se supone que el agua es un vapor, o un vapor saturado, el poder calorífico es el poder calorífico inferior, PCI (Manrique, 2001).

2.1.6 Ecuaciones de combustión

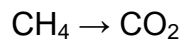
Una reacción química se basa en el principio de conservación de la materia, en términos de la conservación de átomos. Para ilustrar este punto considere la combustión de metano (CH₄) con oxígeno (O₂). La combustión completa implica que el carbono se convierte totalmente en dióxido de carbono (CO₂), el hidrogeno se transforma en agua (H₂O) y el azufre, si hay, se convierte en dióxido de azufre (SO₂). Así la combustión de metano con oxígeno, si se consideran solo los compuestos que intervienen, puede analizarse como sigue:

Ecuación 2.9 Ecuación de combustión del metano con oxígeno (Manrique, 2001).

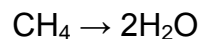


Para determinar el número de moles de cada componente de un modo que satisfaga los requisitos impuestos por la conservación de la materia, es necesario realizar balances de carbono, hidrógeno y oxígeno esto es,

Balance de carbono ($C_{\text{reactivos}} = C_{\text{productos}}$):



Balance de hidrogeno ($H_{\text{reactivos}} = H_{\text{productos}}$):

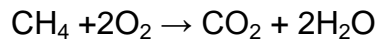


Balance de oxígeno ($O_{\text{reactivos}} = O_{\text{productos}}$):



En consecuencia, la ecuación de combustión completa del metano con oxígeno queda así:

Ecuación 2.10 Ecuación de combustión completa del metano con oxígeno (Manrique, 2001).

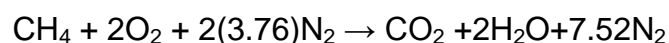


Es decir, un mol de metano reacciona con dos moles de oxígeno para formar un mol de dióxido de carbono y dos moles de agua. El agua puede encontrarse como vapor, como líquido o como sólido, según las condiciones de presión y temperatura de los productos de combustión.

Puesto que un mol de cualquier gas ideal ocupa un volumen definido en condiciones fijas de presión y temperatura, la ecuación 2.9 establece también que un volumen de metano reacciona con un volumen de oxígeno para formar un volumen de dióxido de carbono y un volumen de vapor de agua. Debe destacarse que el número de moles o volúmenes de reactivos y productos no son necesariamente iguales en magnitud. Sin embargo, la masa de los reactivos debe ser siempre igual a la de los productos.

En la mayor parte de los procesos de combustión, el oxígeno se suministra a través del aire ambiente. El aire seco está constituido básicamente por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen. Es decir, por cada mol de oxígeno hay $79/21 = 3.76$ moles de nitrógeno presentes. Aun cuando el contenido de humedad en el aire ambiente es variable, su presencia solo implica una cantidad adicional de materia esencialmente inerte. En consecuencia, la ecuación 2.9 queda expresada así:

Ecuación 2.11 Ecuación de combustión completa del metano con aire ambiente (Manrique, 2001).



La ecuación anterior no garantiza por supuesto que la reacción se lleve a cabo o no. La posibilidad o imposibilidad de que la reacción suceda es una

consecuencia de la segunda ley de la termodinámica. Se supondrá que este tipo de reacciones ocurre de forma espontánea al suministrar al combustible la cantidad apropiada de aire. La cantidad mínima de este último, requerida para oxidar por completo todos los elementos combustibles, se conoce como cantidad de aire teórico, cantidad químicamente correcta de aire o cantidad estequiométrica de aire.

La relación aire-combustible se define como el cociente de la masa de aire a la masa de combustible. Para la combustión de metano con la cantidad teórica de aire, la relación aire-combustible puede determinarse mediante la ecuación 2.11 teniendo en cuenta que el peso molecular del aire es aproximadamente 29 y el del metano es 16, esto es:

$$r_{a/c} = \frac{m_a}{m_c} = \frac{(2 + 7.52)29}{(1)16}$$

$$r_{a/c} = 17.26 \text{ kg}_a/\text{kg}_c$$

Dado que a bajas temperaturas el agua en los productos de combustión está por lo general en estado líquido, el análisis volumétrico en base seca implica que el agua en los productos se encuentra condensada. En estas circunstancias, el líquido ocupa un volumen insignificante. El análisis volumétrico en base seca de los productos de combustión del metano con la cantidad teórica de aire es el siguiente:

$$\text{CO}_2 = \frac{1}{8.52} (100) = 11.74\%$$

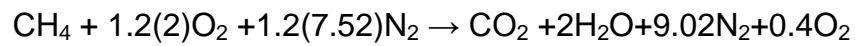
$$\text{N}_2 = \frac{7.52}{8.52} (100) = \frac{88.26\%}{100\%}$$

Cuando el aire no alcanza a tener la cantidad químicamente correcta, parte del carbono se une con el oxígeno para formar monóxido de carbono (CO). Por otra parte, al suministrar exceso de aire respecto a la químicamente correcta, aparece oxígeno (O₂) en los productos de combustión. El exceso de aire solo disminuye la temperatura de los productos de combustión y, por tanto, la transferencia de calor.

El exceso o deficiencia de aire pueden detectarse a través de un análisis de los productos de combustión.

i. Combustión con exceso de aire

Considere la combustión del metano con 20% de exceso de aire. En estas circunstancias, la ecuación 2.11 se modifica así:



Con 20% de exceso de aire la relación aire-combustible es:

$$r_{a/c} = \frac{(2.4 + 9.02)29}{(1)16}$$

$$r_{a/c} = 20.71\text{kg}_a/\text{kg}_c$$

El análisis volumétrico en base seca de los productos de combustión, con 20% de exceso de aire, es el siguiente:

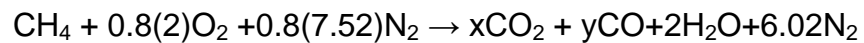
$$\text{CO}_2 = \frac{1}{10.42} (100) = 9.60\%$$

$$\text{O}_2 = \frac{0.4}{10.42} (100) = 3.84\%$$

$$N_2 = \frac{9.02}{10.42} (100) = \frac{86.56\%}{100\%}$$

ii. Combustión con deficiencia de aire

Considere ahora la combustión del metano con 20% de deficiencia de aire, es decir, con 80% del aire teórico. En estas condiciones:



Mediante un balance de carbono y oxígeno, respectivamente, se obtiene:

$$x+y=1$$

Además,

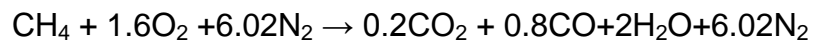
$$2x+y+2=3.2$$

Resolviendo las incógnitas x y y ,

$$X=0.2$$

$$Y=0.8$$

Por tanto, la ecuación de combustión con 20% de deficiencia de aire es:



En este caso:

$$r_{a/c} = \frac{(1.6 + 6.02)29}{(1)16}$$

$$r_{a/c} = 13.81 \text{kg}_a/\text{kg}_c$$

El análisis volumétrico en base seca de los productos de combustión, con 20% de deficiencia de aire, es el siguiente:

$$\text{CO}_2 = 2.85\%$$

$$\text{O}_2 = 11.40\%$$

$$\text{N}_2 = \frac{85.75\%}{100\%}$$

Como puede observarse en la figura 2.3, el porcentaje de CO_2 en los productos de combustión es máximo cuando la relación aire-combustible es químicamente correcta. Este porcentaje disminuye al haber exceso o deficiencia de aire. Por otra parte, el CO_2 aparece en mezclas ricas (mezclas con exceso de combustible o deficiencia de aire). De manera similar, el O_2 aparece en mezclas pobres (mezclas con deficiencia de combustible o exceso de aire).

El Orsat constituye uno de los métodos tradicionales más empleados para analizar de forma experimental la composición volumétrica (en base seca) de los productos de combustión, mediante absorción de estos. (Manrique, 2001)

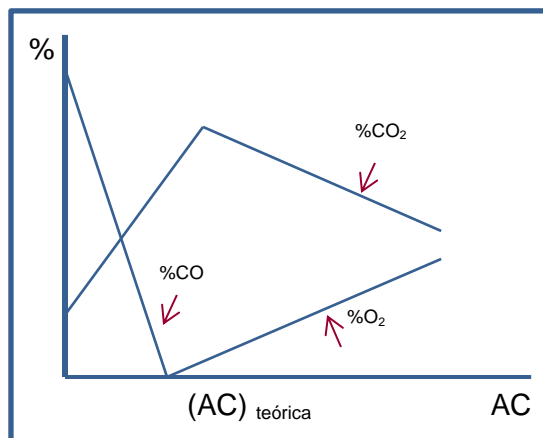


Figura 2.3. Variación esquemática de CO_2 , CO y O_2 en los productos de combustión (Manrique, 2001).

2.1.7 Calores de reacción

El calor de combustión poder calorífico de un combustible se define como la cantidad de calor disipada por él cuando se quema por completo y se enfrían los productos hasta la temperatura inicial. El calor de combustión es una medida cuantitativa de la energía química liberada por un combustible. Según el tipo de proceso, tenemos calor de combustión a volumen constante y el calor de combustión a presión constante. (Manrique, 2001)

Con frecuencia, las reacciones químicas tienen transferencias de energía asociadas con ella, y casi siempre esas transferencias de energía son en forma de calor. Las moléculas de las sustancias químicas se pueden imaginar cómo sustancias formadas por átomos naturales, mediante una transferencia de energía o calor de formación. (Rolle, 2006)

Tratándose de combustibles, el calor de la reacción química de combustión es conocido como poder calorífico, calor de combustión, entalpia de reacción h_{rp} , o energía interna de reacción U_{rp} . El término poder calorífico es un nombre general sin significado específico, a menos que se exprese la forma en que se mide (o bien, este implícita) en el contexto. Si el poder calorífico se mide por un calorímetro de bomba (idealmente es una cámara rígida a volumen constante), de uso normal en el caso de combustible sólidos y líquidos, el poder calorífico obtenido es el valor, a volumen constante q_v , igual a la energía interna de la reacción, $-U_{rp}$. El poder calorífico de combustibles gaseosos por lo general se halla con un calorímetro de flujo constante, sobre todo a presión invariable, dispositivo que da el poder calorífico a presión constante q_p , el que numéricamente es igual a la entalpia de reacción $|h_{rp}|$. En cada caso para combustibles que tengan hidrogeno, existe un poder calorífico superior (PCS) q_{vh} , q_{ph} (la h es del inglés higher), cuando el H_2O en los productos se ha condensado a la forma $[H_2O (g)]$. El PCS q_1 es igual al valor del PCS menos el calor latente del vapor de agua condensado. En trabajos de prueba el poder calorífico se convierte

a un estado estándar, simbolizado por q_p° , q_v° , y así sucesivamente, y con los datos suficientes es posible calcular cualquier valor de poder calorífico a partir de otro. La entalpía y la energía interna de la reacción desde el punto de vista química, son negativas cuando la reacción es exotérmica. Por otra parte los ingenieros generalmente consideran el poder calorífico como positivo; en consecuencia q_p° , $-h_{rp}^\circ$ y $q_v^\circ = -u_{rp}^\circ$. (Faires, 2004)

2.2 Generadores de Vapor

De acuerdo a la definición que encontramos en el manual de SELMEC (2008), un generador de vapor o caldera es un equipo intercambiador de calor, cerrado herméticamente, sujeto a presión, que transfiere energía a un fluido, generalmente agua, para obtener vapor o agua caliente.

2.2.1 Clasificación

Existen diversas formas de clasificar a los generadores de vapor; por la disposición de los fluidos o gases de combustión, por la presión de operación, por el tipo de combustible que utilizan entre otras, a continuación alguna de las clasificaciones más utilizadas.

- i. Por la disposición de los fluidos



Esta es la clasificación más utilizada y que será más detallada en esta sección.

Pirotubulares: En este tipo de calderas los gases de combustión circulan por el interior de los tubos y manejan presiones de operación de 0-300 PSIG.

Ventajas:

- Menor costo inicial debido a la simplicidad de su diseño.
- Mayor flexibilidad de operación.
- Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación.
- Son pequeñas y eficientes.

Inconvenientes:

- Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.
- No son empleables para altas presiones.



Figura 2.4. Caldera pirotubular.

http://www.selmec.com.mx/images/Folleto_CleaverBrooks.pdf

Acuatubulares: En este tipo de calderas el agua circula por el interior de los tubos y manejan presiones de operación de 0-2200 PSIG.

Ventajas:

- Pueden ser puestas en marcha rápidamente y trabajan a 300 o más PSI.

Inconvenientes:

- Mayor tamaño y peso, mayor costo.
- Debe ser alimentada con agua de gran pureza.



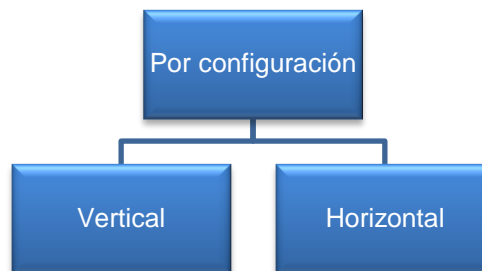
Figura 2.5. Caldera acuatubular.

http://www.selmec.com.mx/images/Folleto_CleaverBrooks.pdf

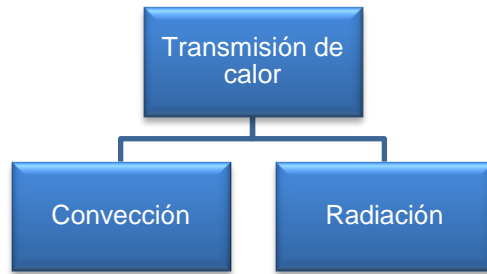
ii. Por la presión de operación



iii. Por su configuración



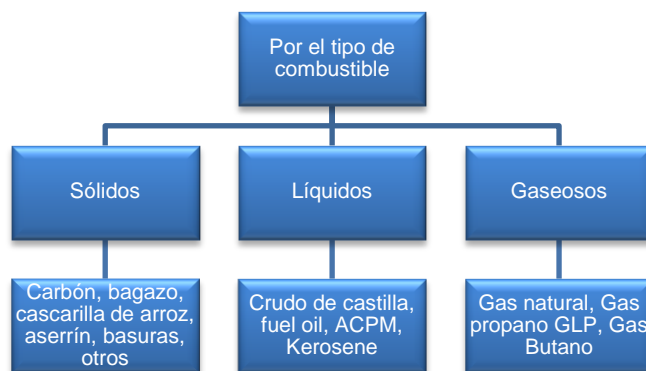
iv. Por el mecanismo de transmisión de calor dominante



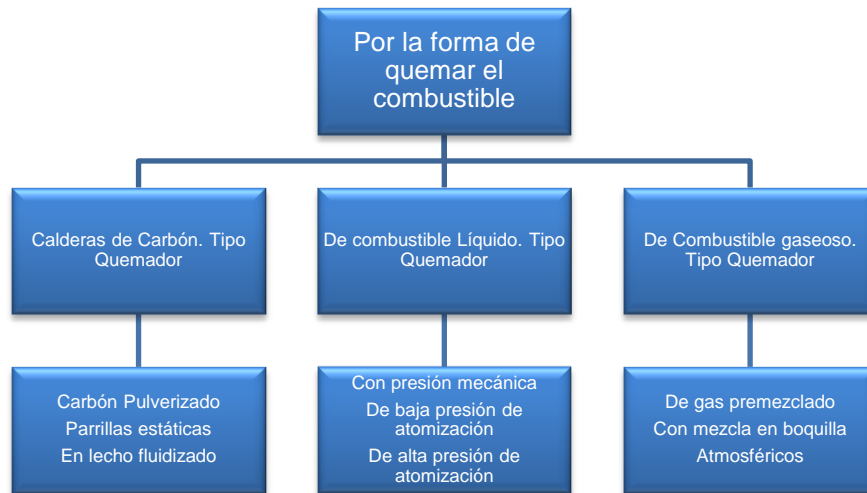
Convección: es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, disminuyen su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

Radiación: es la transferencia de calor a través de la radiación electromagnética. Fríos o calientes, todos los objetos emiten radiación a un índice igual a su emisividad multiplicada por la radiación que emitiría si fuera un cuerpo negro. Para que la radiación ocurra no se necesita ningún medio; la radiación incluso ocurre en vacío perfecto.

v. Por el mecanismo de transmisión de calor dominante



vi. Por el mecanismo de transmisión de calor dominante



vii. Por el tiro

Tiro: se llama tiro a la corriente de aire en la caldera, necesario para la combustión.



Tiro natural: se produce por la diferencia de densidades, provocado por la temperatura, en la chimenea hay cantidad de gases a una temperatura elevada, la parte externa es mayor que la interior, por diferencia de densidades ya que la altura es la misma, el producirse esta diferencia de presiones el aire del exterior quiere entrar, y produce el tiro natural. Para mejorar el tiro, se podría conseguir elevando la temperatura de los gases de escape, pero de esta manera no conseguiríamos mayor rendimiento de la combustión, entonces se hace

umentando la altura de la chimenea. Este tipo de tiro en caldera es muy clásico, solo utilizado actualmente en casas.

En estas calderas, según sea el sistema de encendido, hay dos tipos de modelos.

Con llama piloto: la llama principal -la del quemador- se enciende gracias a una llama piloto que permanece encendida mientras está conectada la caldera, a la espera de ser utilizada. Aunque la potencia de esta llama es pequeña, del orden de 150 W, por comodidad del usuario está muchas horas encendida y supone un gasto de energía apreciable.

Sin llama piloto: la llama principal se enciende directamente.

Tiro artificial: existen tres tipos de tiro forzado:

Caldera abierta de tiro forzado: la combustión se realiza también con el aire del local donde está instalada, pero, a diferencia de las anteriores, los gases se expulsan por medio de un ventilador (tiro forzado) y se conducen al exterior por un conducto específico.

Tiro inducido: Extrae los gases de la cámara de combustión y los expulsa hacia la chimenea, pero el inconveniente que tiene es que el ventilador que extrae el aire de la cámara se encuentra trabajando en una zona conflictiva por la elevada temperatura, trabaja en una zona donde hay gases corrosivos y hay sólidos como ceniza, que pueden llegar a estropear las paletas de los ventiladores

Tiro equilibrado: Se utiliza las dos cosas, el tiro forzado y el tiro inducido, con esta conseguimos no presurizar la cámara de combustión. Este tiro es utilizado en calderas muy largas, ya que hay que perdidas de carga muy considerables (perdidas de presión) si solo colocásemos tiro forzado aumentaríamos la presión de la cámara de combustión y si solo colocásemos tiro inducido crearíamos mucho vacío, que provocaría deformaciones a la cámara de combustión.

Las calderas en su configuración interna presentan tuberías para el transporte de los fluidos, las cuales pueden ser de 1, 2 ó 3 (4) pasos.

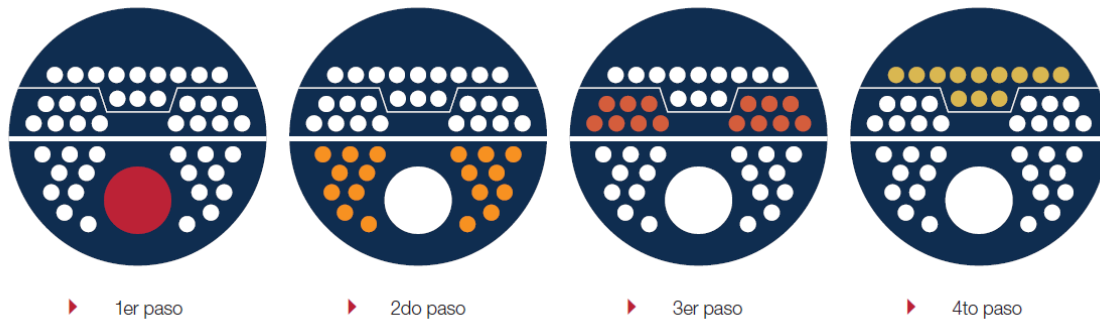


Figura 2.6. Pasos de una caldera.

http://www.selmec.com.mx/images/Folleto_CleaverBrooks.pdf

2.2.2 Componentes

Las calderas de vapor, constan básicamente de 2 partes principales:

- Cámara de agua: recibe este nombre el espacio que ocupa el agua en el interior de la caldera, el nivel de agua se fija en su fabricación, de tal manera que sobrepase en unos 15 cms por lo menos a los tubos o conductos de humo superiores. Con esto, a toda caldera le corresponde una cierta capacidad de agua, lo cual forma la cámara de agua. Según la razón que existe entre la capacidad de la cámara de agua y la superficie de calefacción, se distinguen calderas de gran volumen, mediano y pequeño volumen de agua.

Las calderas de gran volumen de agua son las más sencillas y de construcción antigua, se componen de uno a dos cilindros unidos entre sí y tienen una capacidad superior a 150 HLt de agua por cada m² de superficie de calefacción.

Las calderas de mediano volumen de agua están provistas de varios tubos de humo y también de algunos tubos de agua, con lo cual aumenta la superficie de calefacción, sin aumentar el volumen total del agua.

Las calderas de pequeño volumen de agua están formadas por numerosos tubos de agua de pequeño diámetro, con los cuales se aumenta considerablemente la superficie de calefacción.

Como características importantes podemos considerar que las calderas de gran volumen de agua tienen la cualidad de mantener más o menos estable la presión del vapor y el nivel del agua, pero tienen el defecto de ser muy lentas en el encendido y debido a su reducida superficie producen poco vapor, adicionalmente son muy peligrosas en caso de explosión y poco económicas.

Por otro lado, las calderas de pequeño volumen de agua, por su gran superficie de calefacción, son muy rápidas en la producción de vapor, tienen muy buen rendimiento y producen grandes cantidades de vapor, debido a esto requieren especial cuidado en la alimentación del agua y regulación del fuego, pues de faltarles alimentación, pueden secarse y quemarse en breves minutos.

- Cámara de vapor: es el espacio ocupado por el vapor en el interior de la caldera, el cual debe ser separado del agua en suspensión. Cuanto más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara, de manera que aumente también la distancia entre el nivel del agua y la toma de vapor.

Adicionalmente las calderas tienen dentro de su configuración gran cantidad de elementos en cuanto a operación y control:

- Válvulas de seguridad
- Válvulas reguladoras de flujo
- Bomba de alimentación

- Tanque de condensados
- Trampas de vapor
- Redes de distribución
- Equipos consumidores
- Sistemas de recuperación de calor

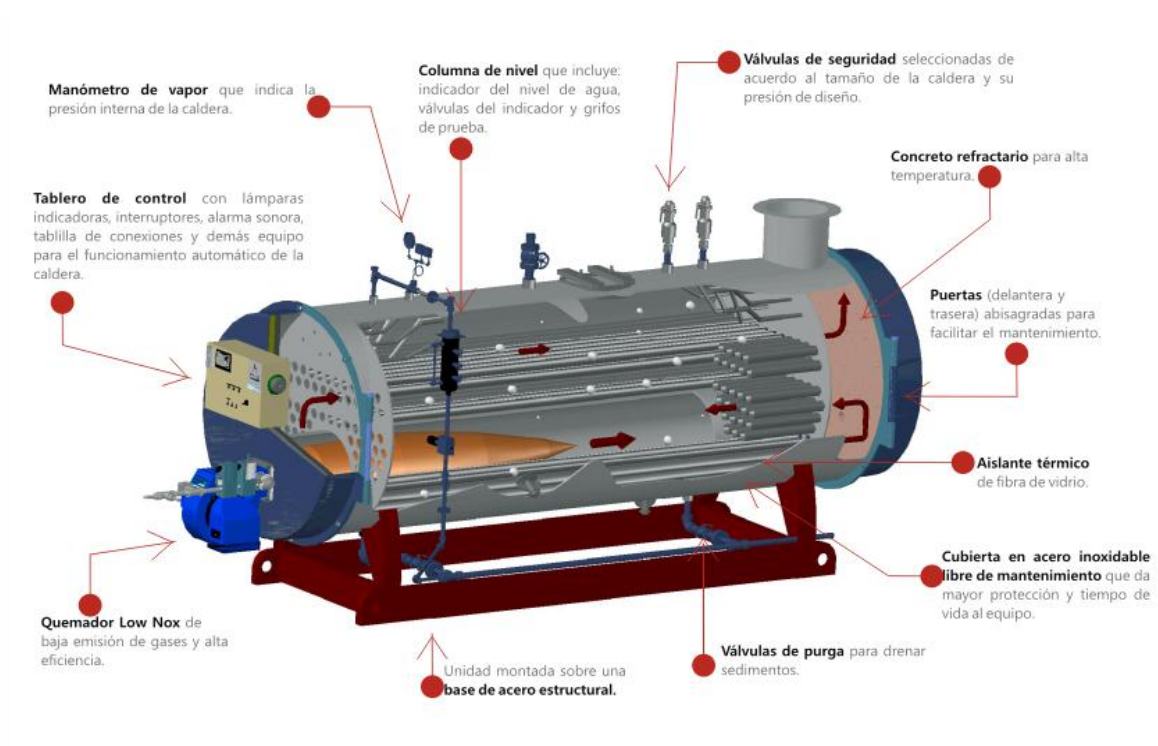


Figura 2.7. Componentes de una Caldera.

http://www.calderaspimmsa.com.mx/c_horizontales.html

2.3 Diseño de Experimentos

El diseño estadístico de experimentos se debe usar como una metodología que permite plantear distintas estrategias para seleccionar, controlar, analizar e interpretar diferentes condiciones de estudio en un fenómeno de una manera objetiva y sistemática. El diseño de experimentos tiene una enorme utilidad en la industria porque permite mejorar el rendimiento de los procesos y la calidad de sus productos. También en el desarrollo de nuevos productos, a nivel de laboratorio o de planta piloto, el diseño de experimentos desempeña un papel muy importante. Múltiples ejemplos de aplicación se dan en biotecnología, química, veterinaria, agronomía, educación, entre otras, en las que se realiza investigación experimental, siendo así esta metodología una herramienta de mucha utilidad (Castaño, 2003).

Un diseño experimental consiste de dos estructuras básicas. Esencialmente se tienen tratamientos y unidades experimentales en donde serán aplicados tales tratamientos. Así, la primera estructura responde a como se agrupan o miden a las unidades experimentales para acotar o aprovechar ruidos circundantes.

Estructura de tratamiento:

Factor. Una variable de interés controlada por el experimentador, de la que se desea estudiar sus efectos en una o varias respuestas.

Nivel. Modalidad específica dentro del factor.

Tratamiento. Se refiere a los distintos niveles de un factor o a la combinación de los niveles de varios factores.

Estructura de tratamientos de un diseño experimental. Consiste del conjunto de tratamientos que el experimentador ha seleccionado para estudiar y /

o comparar. Puede haber estructuras con uno o varios factores; pueden considerarse todos los tratamientos (diseño factorial) o un subconjunto del total de tratamientos según el interés (diseño factorial incompleto).

Efecto principal. Indica la contribución que cada factor tienen sobre las variables respuesta. Esta se mide evaluando el cambio que produce en la respuesta en cada nivel del factor.

Interacción. Considerando los efectos sobre las variables respuesta bajo estudio, la interacción implica una relación o dependencia entre dos o más factores (Montgomery, 2006, 2007).

Para aplicar el enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento, es necesario que todos los que participan en el mismo tengan desde el principio una idea clara de qué es exactamente lo que va a estudiarse, como van a colectarse los datos, y al menos una comprensión cualitativa de la forma en que van a analizarse estos datos. El cuadro 2.1 muestra un esquema general del procedimiento recomendado (Montgomery, 2006).

Cuadro 2.1 Pautas generales para diseñar un experimento. (Montgomery, 2006).

-
1. Identificación y exposición del problema
 2. Elección de los factores, los niveles y rangos. ^a
 3. Selección de la variable de respuesta. ^a
 4. Elección del diseño experimental
 5. Realización del experimento
 6. Análisis estadístico de los datos.
 7. Conclusiones y recomendaciones
-

^a En la práctica, los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

Los puntos arriba enlistados se describen a continuación:

1. Identificación y exposición del problema.

Este punto podría parecer obvio, pero es común que en la práctica no sea sencillo darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación, y tampoco es fácil desarrollar una enunciación clara, con la que todos estén de acuerdo, de este problema. Es necesario desarrollar todas las ideas acerca de los objetivos del experimento. Generalmente, es importante solicitar aportaciones de todas las áreas involucradas. Por esta razón se recomienda un enfoque de equipo para diseñar experimentos.

Es conveniente realizar una lista de los problemas o las preguntas específicas que van a abordarse en el experimento. Una enunciación clara del problema contribuye sustancialmente para alcanzar una mejor comprensión de los fenómenos bajo estudio y la solución final del problema. Es importante también tener presente el objetivo global. En un experimento puede haber muchos objetivos posibles, incluyendo la confirmación, el descubrimiento y la estabilidad. Obviamente, las cuestiones específicas que habrán de abordarse en el experimento se relacionan de manera directa con los objetivos globales. Con frecuencia en esta etapa de la formulación del problema muchos ingenieros y científicos se percatan de que no es posible que un experimento comprensivo extenso responda las cuestiones clave y de que un enfoque secuencial en el que se utilice una serie de experimentos más pequeños es una estrategia adecuada.

2. Elección de los factores, los niveles y rangos.

Cuando se consideran los factores que pueden influir en el desempeño de un proceso o sistema, el experimentador suele descubrir que estos factores pueden clasificarse como factores potenciales de diseño o bien como factores perturbadores. Los factores de diseño son aquellos que el experimentador posiblemente quiera hacer variar en el experimento. Es frecuente encontrar que

hay muchos factores potenciales del diseño por lo que es conveniente contar con alguna clasificación adicional de los mismos. Algunas clasificaciones útiles son factores de diseño, factores que se mantienen constantes y factores a los que se permite variar. Los factores del diseño son los que se seleccionan realmente para estudiarlos en el experimento. Los factores que se mantienen constantes son variables que pueden tener cierto efecto sobre la respuesta, pero que para los fines del experimento en curso no son de interés, por lo que se mantendrán fijos en un nivel específico. Como un ejemplo de factores a los que se permite variar, las unidades experimentales o los “materiales” a los que se aplican factores del diseño son homogéneos por lo general, no obstante lo cual con frecuencia se ignora esta variabilidad de una unidad a otra y se confía en la aleatorización para compensar cualquier efecto del material o la unidad experimental. Muchas veces se trabajará con el supuesto de que los efectos de los factores que se mantienen constantes y de los factores a los que se permite variar son relativamente pequeños.

Por otra parte, los factores perturbadores pueden tener efectos considerables que debe tomarse en consideración, a pesar de que no haya interés en ellos en el contexto del experimento en curso. Los factores perturbadores suelen clasificarse como factores controlables, no controlables o de ruido. Un factor perturbador controlable es aquel cuyos niveles pueden ser ajustados por el experimentador. Si un factor perturbador no es controlable en el experimento, pero puede medirse, muchas veces puede utilizarse el procedimiento de análisis de covarianza para compensar este efecto. Cuando un factor que varía de manera natural y no controlable en el proceso puede controlarse para los fines de un experimento, con frecuencia se llama factor de ruido. En tales situaciones, es común que el objetivo sea encontrar los ajustes de los factores controlables del diseño que minimicen la variabilidad transmitida por los factores de ruido. En ocasiones esto se llama el estudio de robustez del proceso o el problema de robustez del diseño.

Una vez que el experimentador ha seleccionado los factores del diseño, debe elegir los rangos en los que hará variar estos factores, así como los niveles específicos con los que realizarán las corridas. También deberá pensarse cómo van a controlarse estos factores en los valores deseados y cómo van a medirse. Para ello se requiere del conocimiento del proceso. Este conocimiento del proceso suele ser una combinación de experiencia práctica y conocimientos teóricos. Es importante investigar todos los factores que pueden ser de importancia y no dejarse influir demasiado por la experiencia pasada, en particular cuando uno se encuentra en las fases iniciales de la experimentación o cuando el proceso no está del todo maduro.

Cuando el objetivo del experimento es el tamizado de los factores o caracterización del proceso, por lo general es mejor mantener reducido el número de niveles de los factores. En general, dos niveles funcionan bien en los estudios de tamizado de factores. Elegir la región de interés también es importante. En el tamizado de factores, la región de interés deberá ser relativamente grande; es decir, el rango en el que se hacen variar los factores deberá ser amplio. Conforme se sepa más acerca de las variables que son importantes y de los niveles que producen los mejores resultados, la región de interés se hará por lo general más estrecha.

En la figura 2.8 se muestra la clasificación de los factores en base a lo descrito en los párrafos anteriores.

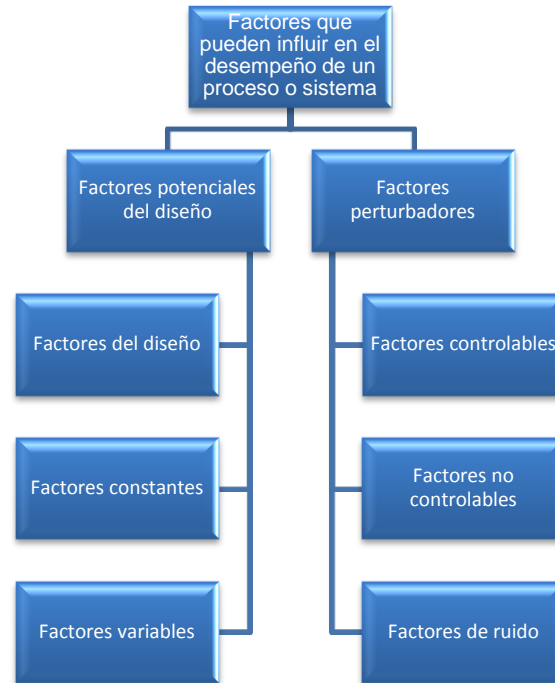


Figura 2.8 Clasificación de factores que intervienen en un diseño de experimentos.

3. Selección de la variable de respuesta.

Para determinar la variable respuesta, el experimentador deberá tener la certeza de que esta variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar de la característica medida será la variable de respuesta. No son la excepción las respuestas múltiples. La eficiencia de los instrumentos de medición también es un factor importante. Si la eficiencia de los instrumentos de medición es inadecuada, el experimentador sólo detectará los efectos relativamente grandes de los factores o quizá sean necesarias réplicas adicionales. En algunas situaciones en que la eficiencia de los instrumentos de medición es pobre, el experimentador puede decidir medir varias veces cada unidad experimental y usar el promedio de las mediciones repetidas como respuesta observada. Suele ser de importancia determinante identificar aspectos relacionados con la definición de las respuestas de interés y cómo van a medirse antes de llevar a cabo el experimento.

En ocasiones se emplean experimentos diseñados para estudiar y mejorar el desempeño de los sistemas de medición.

4. Elección del diseño experimental

Si las actividades de planeación previas al experimento se realizan como es debido, este paso es relativamente sencillo. La elección del diseño implica la consideración del tamaño de la muestra (número de réplicas), la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación de si entran en juego o no la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización.

Al seleccionar el diseño, es importante tener en mente los objetivos experimentales. En muchos experimentos de ingeniería se sabe de antemano que algunos niveles de los factores se producirán valores diferentes de la respuesta. En consecuencia, el interés se centra en identificar qué factores causan esta diferencia y en estimar la magnitud del cambio de la respuesta. En otras situaciones podría haber más interés en verificar la uniformidad.

5. Realización del experimento

Cuando se lleva a cabo el experimento es vital monitorear con atención el proceso a fin de asegurarse de que todo se esté haciendo conforme a la planeación. Los errores en el procedimiento experimental en esta etapa destruirán por lo general la validez experimental. Poner en un primer plano la planeación es crucial para el éxito. Es fácil subestimar los aspectos de logística y planeación cuando se corre un experimento diseñado en un ambiente complejo de manufactura o de investigación y desarrollo.

Se sugiere que antes de llevar a cabo el experimento, es conveniente en muchas ocasiones realizar algunas corridas piloto o de prueba. Estas corridas proporcionan información acerca de la consistencia del material experimental, una

comprobación del sistema de medición, una idea aproximada del error experimental y la oportunidad de poner en práctica la técnica experimental global. Esto ofrece también una oportunidad para revisar, de ser necesario, las decisiones tomadas en los pasos 1 al 4.

6. Análisis estadístico de los datos.

Deberán usarse los métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo. Si el experimento se ha diseñado correctamente y si se ha llevado a cabo de acuerdo con el diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados. Existen varios paquetes de *software* excelentes diseñados para auxiliar en el análisis de datos, y muchos de los programas usados en el paso 4 para seleccionar el diseño cuentan con una interface directa para el análisis estadístico. Con frecuencia se encuentra que los métodos gráficos desempeñan un papel importante en el análisis de interpretación de datos. Debido a que muchos de las preguntas que el experimentador quiere responder pueden insertarse en el marco de la prueba de hipótesis, los procedimientos para probar hipótesis y estimar intervalos de confianza son muy útiles en el análisis de datos de un experimento diseñado. Muchas veces es útil también presentar los resultados de varios experimentos en términos de un modelo empírico, es decir mediante una ecuación derivada de los datos que expresa la relación entre la respuesta y los factores importantes del diseño. El análisis residual y la verificación de la adecuación del modelo son también técnicas de análisis importantes.

Los métodos estadísticos no pueden demostrar que un factor (o factores) posee un efecto particular, solo proporcionan pautas generales en cuanto la confiabilidad y al validez de los resultados. Aplicados en forma correcta, los métodos estadísticos no permiten la demostración experimental de nada, pero sirven para medir el error posible en una conclusión o asignar un nivel de confianza a un enunciado. La ventaja principal de los métodos estadísticos es que

agregan objetividad al proceso de toma de decisiones. A las técnicas aunadas a una buena ingeniería o conocimiento del proceso y sentido común, llevarán por lo general a conclusiones sólidas.

7. Conclusiones y recomendaciones

Una vez que se han analizados los datos, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. Los métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa, en particular para presentar resultados. También deberán ser realizadas corridas de seguimiento o pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

A lo largo del proceso completo es importante tener presente que la experimentación es una parte esencial del proceso de aprendizaje, en la que se formulan hipótesis tentativas acerca de un sistema, se realizan experimentos para investigar estas hipótesis y se formulan nuevas hipótesis con base en los resultados, y así sucesivamente. Esto sugiere que la experimentación es iterativa. Por lo general es un gran error diseñar un solo experimento comprensivo y extenso al principio de un estudio. Un experimento exitoso requiere conocer los factores importantes, los rangos en los que deberán hacerse variar estos factores, el número apropiado de niveles deberá usarse y las unidades de medición apropiadas para estas variables. En general, no se conocen las respuestas precisas de estas cuestiones, pero se aprende acerca de ellas sobre la marcha. A medida que avanza un programa experimental, es común abandonar algunas variables de entrada e incorporar otras, modificar la región de exploración de algunos factores o incorporar nuevas variables de respuesta. Por consiguiente, generalmente la experimentación se hace en forma secuencial y, como regla general, no deberá invertirse más del 25% de los recursos disponibles en el primer experimento. Con esto se asegurara que se contará con los recursos suficientes para realizar las corridas de confirmación y que se alcanzará en última instancia el objetivo final del experimento.

Superficie de respuesta

De acuerdo a Montgomery (2006, 2007), la metodología de superficie de respuesta, o MSR, es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la influencia de diversas variables donde el objetivo es optimizar esta respuesta. Si la respuesta esperada se denota por:

Ecuación 2.12 Ecuación de superficie de respuesta (Montgomery, 2006).

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$$

Entonces a la superficie representada por $\eta = f(x_1, x_2)$ se le llama superficie de respuesta.

Por lo general la superficie de respuesta se representa gráficamente como en la figura 2.9, donde η se grafica contra los niveles x_1 y x_2 . Para ayudar a visualizar la forma de la superficie de respuesta, con frecuencia se grafican los contornos de la superficie de respuesta, como se muestra en la figura 2.10. En la gráfica de contorno se trazan líneas de respuesta constante en el plano x_1, x_2 . Cada contorno corresponde a una altura particular de respuesta.

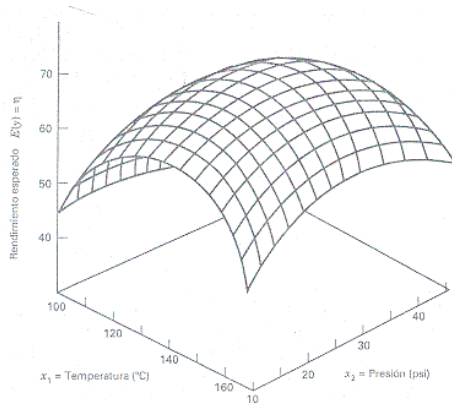


Figura 2.9 Superficie de respuesta tridimensional donde se indica el rendimiento esperado (η) como una función de la temperatura (x_1) y la presión (x_2). (Montgomery, 2006)

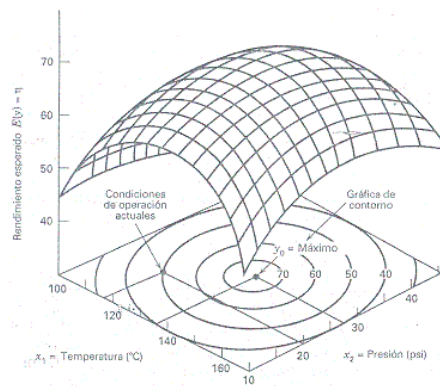


Figura 2.10 Grafica de contorno de una superficie de respuesta. (Montgomery, 2006).

En la mayoría de los problemas MSR, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto, el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre y y el conjunto de variables independientes. Por lo general se emplea un polinomio de orden inferior en alguna región de las variables independientes. Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es el modelo de primer orden:

Ecuación 2.13. Ecuación de la función de aproximación (Montgomery, 2006).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

Si hay curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de orden superior, tal como el modelo de segundo orden:

Ecuación 2.14. Ecuación de la función de aproximación con curvatura (Montgomery, 2006).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

En casi todos los problemas MSR se usa uno de estos modelos, o ambos. Desde luego, es probable que un modelo polinomial sea una aproximación razonable de la verdadera relación funcional en el espacio completo de las variables independientes, pero para la región relativamente pequeñas suele funcionar bastante bien.

Se utiliza el método de mínimos cuadrados para estimar los parámetros de los polinomios de aproximación. Después se realiza el análisis de la superficie de respuesta utilizando la superficie ajustada. Si la superficie ajustada es una aproximación adecuada de la verdadera función de la respuesta, entonces el análisis de la superficie ajustada será un equivalente aproximado del análisis del sistema real. Los parámetros del modelo pueden estimarse de manera más eficiente cuando se emplean los diseños experimentales apropiados para recolectar los datos.

La MSR es un procedimiento secuencial. Muchas veces, cuando se está en un punto de la superficie de respuesta que esta apartado del óptimo, el sistema presenta una curvatura moderada y el modelo de primer orden será apropiado. El objetivo en este caso es llevar al experimentador de manera rápida y eficiente por la trayectoria del mejoramiento hasta vecindad general del óptimo. Una vez que se

ha encontrado la región del óptimo, puede emplearse un modelo más elaborado, como el de segundo orden, y llevarse a cabo un análisis para localizar el óptimo.

El objetivo último de la MSR es determinar las condiciones de operación óptimas del sistema o determinar una región del espacio de los factores en la que se satisfagan los requerimientos de operación (Montgomery, 2006, 2007).

3 HIPOTESIS

Es posible establecer una metodología para implementar el uso de combustibles alternos, con base en materiales reciclados, en calderas de vapor comerciales de combustóleo o diesel, parametrizando el exceso de aire y la presión de entrada del combustible, mejorando la eficiencia, reduciendo el impacto ambiental y reduciendo los costos de operación.

4 OBJETIVOS

- Identificar niveles óptimos de exceso de aire y presión de entrada de combustible en calderas de vapor Cleaver Brooks modelos 800-600 para usar combustibles alternos.
- Establecer una metodología con base en optimización estadística para la implementación en combustibles alternos en calderas comerciales.
- Confirmar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por operación de las calderas.
- Confirmar la reducción de costos por incremento de la eficiencia de la caldera.

5 METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló en el área de Servicios a Procesos de la empresa Givaudan de México S. A. de C. V., ubicada en el municipio de Pedro Escobedo, Qro.

El área de Servicios a Procesos es la responsable de suministrar los recursos energéticos requeridos por el área de Producción, tales como agua de enfriamiento, energía eléctrica, nitrógeno, aire comprimido, agua cruda y vapor principalmente.



Figura 5.1 Servicios entregados a planta.

La generación de vapor se realiza en equipos denominados Calderas, como se vio en la sección 2 las calderas son un tipo de intercambiador de calor, el cual se obtiene a través de la combustión de algún combustible.

El combustible utilizado en Givaudan es generado internamente, denominado "Combustible Alterno", el cual proviene de las colas de destilación de los productos, compuestos químicos con características similares a los de un combustóleo.

En la figura 5.2 se observa el diagrama de flujo que se tiene actualmente para la generación del combustible alternativo. Se cuenta con dos tipos de residuos de acuerdo a su viscosidad, los residuos 1 presentan una viscosidad muy ligera, se descargan de las columnas directamente a tambores y posteriormente se cargan en un tanque de almacenamiento, para después ser bombeados a un tanque de mezcla, en este tanque son mezclados con residuos de mayor viscosidad que se descargan directamente de las columnas de destilación al tanque de mezcla, una vez que están mezclados se envían a un tanque de almacenamiento, de donde se distribuye a las áreas de servicio, para finalmente ser quemados en las Calderas de vapor.

La combustión es un proceso químico en el cuál se desprende una gran cantidad de energía o calor, luz y gases de emisión. Para que una combustión se presente deben existir dos elementos uno llamado combustible, y el segundo conocido como comburente, generalmente es el oxígeno el que realiza esta actividad.

Si en el proceso de combustión la proporción de los dos elementos principales no es la adecuada se genera una combustión incompleta, es decir si el combustible se encuentra en mayor proporción que el comburente, se tendrá como resultado de la reacción además de dióxido de carbono y agua, otros subproductos de la combustión, los cuales incluyen hidrocarburos que no fueron quemados, ocasionando pérdidas económicas al quemar una mayor cantidad de combustible y no utilizar todo su poder calorífico, además de las emisiones de

gases contaminantes que intervienen en el proceso de efecto invernadero del planeta.

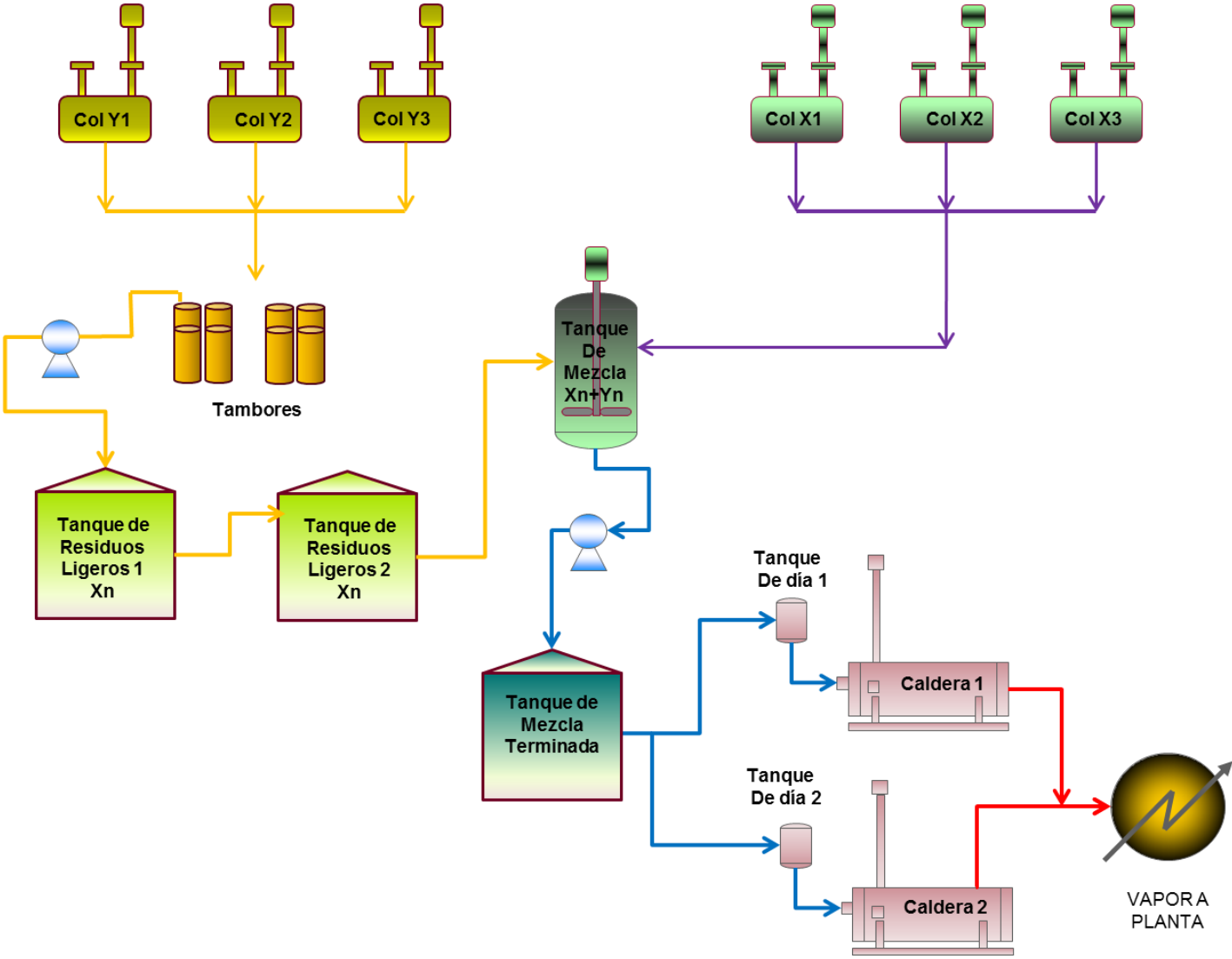


Figura 5.2 Diagrama de proceso para el combustible alternativo

Para la mayoría de los combustibles derivados de hidrocarburos existe ya una gran cantidad de información en referencia a la proporción en que deben quemarse para poder obtener, si bien no una combustión completa, si lo más cercano, de tal manera que la eficiencia de los equipos de combustión sea lo más alta posible.

En base a lo descrito anteriormente se desea conocer los parámetros óptimos en que debe quemarse el combustible alterno, específicamente, conocer la relación de bióxido de carbono y oxígeno que se deben obtener en las emisiones del equipo de combustión de tal manera que nuestra combustión se acerque lo más posible a una combustión completa y de esta manera mejorar la eficiencia de las calderas.

Determinación de estrategia de experimentación

Se utilizaron diversas herramientas estadísticas, las cuales contribuyeron a obtener los parámetros óptimos de los dos gases en cuestión.

La figura 5.3 establece la estrategia a seguir de acuerdo con Montgomery (2006) para llegar a la optimización que se busca.

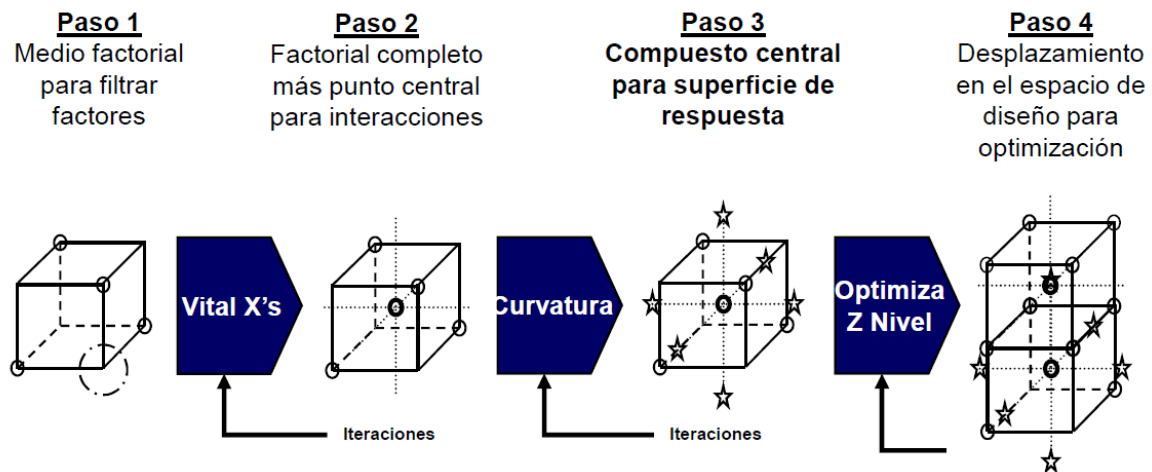


Figura 5.3 Estrategia DOE (Montgomery, 2006).

Paso 1. Diseño factorial

El primer paso implica la generación de un Diseño de Experimentos, se seguirá nuevamente con la metodología propuesta por Montgomery (2006) presentada en el cuadro 5.1.

Cuadro 5.1 Pautas generales para diseñar un experimento. (Montgomery, 2006).

-
1. Identificación y exposición del problema
 2. Elección de los factores, los niveles y rangos. ^a
 3. Selección de la variable de respuesta. ^a
 4. Elección del diseño experimental
 5. realización del experimento
 6. Análisis estadístico de los datos.
 7. Conclusiones y recomendaciones
-

^a En la práctica, los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

1. Identificación y exposición del problema.

Para el presente proyecto se ha determinado cuál es el problema que se busca solucionar mediante el diseño de experimentos y se ha planteado el objetivo.

La necesidad de realizar un diseño de experimentos se deriva de obtener mejores rendimientos del combustible alterno generado en la Empresa Givaudan de México S. A.de C.V. En un inicio la empresa busco la forma de disponer de manera sustentable los residuos generados en el procesos de destilación, los cuales se enviaban a industrias cementeras que lo utilizaban como combustible en hornos de altas temperaturas, después de una serie de análisis y propuestas, se llegó a la conclusión que por las características combustibles de los residuos era factible quemarlos en los generadores de vapor que se tienen en planta, hasta este punto los resultados se mostraban satisfactorios.

El quemar los residuos definitivamente soluciono el problema de disposición sustentable de los mismos, sin embargo con la finalidad de optimizar el proceso de quemado se ha planteado un nuevo problema; determinar los parámetros de emisiones que si bien no son de una combustión completa se acerquen lo más

posible, para de esta manera obtener los mejores rendimientos de los residuos quemados.

Así, la búsqueda de la estandarización de los factores de emisión generados por un combustible alternativo son el enfoque, se pretende obtener los rangos óptimos de generación de CO₂ y exceso de aire adecuados para obtener un mejor rendimiento.

2. Elección de los factores, los niveles y rangos.

Se seleccionó el exceso de aire y presión de operación de combustible como los factores de este diseño en base a lo revisado en la literatura, ya que de acuerdo a la información que se tiene, una combustión depende principalmente de dos factores, la cantidad de combustible y la cantidad de oxígeno que se tenga en la reacción de combustión.

Como se explicó también en la sección II, no es posible utilizar oxígeno puro para una combustión ya en la práctica, dado su costo y peligro que representa, por lo tanto se utiliza aire ambiente, este aire ambiente es proporcionado a la caldera por un motor-ventilador y la presencia en la reacción de combustión se determina a través del exceso de aire que se tenga en los productos de la reacción.

El segundo factor considerado es la alimentación de combustible, este se realiza a través de una bomba centrífuga hacia el quemador de la Caldera, una forma de controlar el flujo de combustible al quemador es a través de la presión de alimentación.

No se consideran a otros productos de la reacción como son óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre entre otros, ya que como se vio en la sección 2, estos productos de la combustión están en función de los componentes adicionales que tenga cada combustible.

Por lo tanto los factores considerados para el presente diseño quedan de la siguiente forma:

Factores potenciales de diseño

Factores del diseño

- % de exceso de aire
- Presión de operación de combustible (PSI)

Factores que se mantienen constantes

- Combustible alterno
- Generador de vapor (CB-800 T.H. S2)

El experimento se realizará en un solo generador de vapor y quemando únicamente combustible alterno.

Factores a los que se permite variar

- Operador de maquinaria
- Condiciones climatológicas
- Monóxido de carbono
- PPM de óxidos de nitrógeno
- PPM de dióxido de azufre
- Horario de lecturas
- Días de lecturas

Estos factores pueden variar al momento de realizar el experimento ya que no influyen considerablemente en resultado del experimento.

Factores perturbadores

Factores controlables

- Calibración del equipo de medición.
- Fallas en componentes mecánicos del equipo como pueden ser válvulas de seguridad, servomecanismos, bombas de alimentación de combustible, reguladoras de presión, etc.

Se cuenta con certificado de calibración del equipo de medición (Apéndice), también se cuenta con un programa de mantenimiento preventivo que reduce las probabilidades de falla y por consecuencia afectación en los resultados del experimento.

Factores no controlables

- No se identifican factores no controlables que afecten el resultado del experimento.

Factores de ruido

- No se identifican factores de ruido que afecten el resultado del experimento.

Ya definidos los factores de diseño el siguiente paso es definir los niveles y rangos, para lo cual se determina que en ambos factores se trabajará con dos niveles y los siguientes rangos:

25% > Exceso de aire < 35%

30 lbs. > Presión de Operación < 33 lbs.

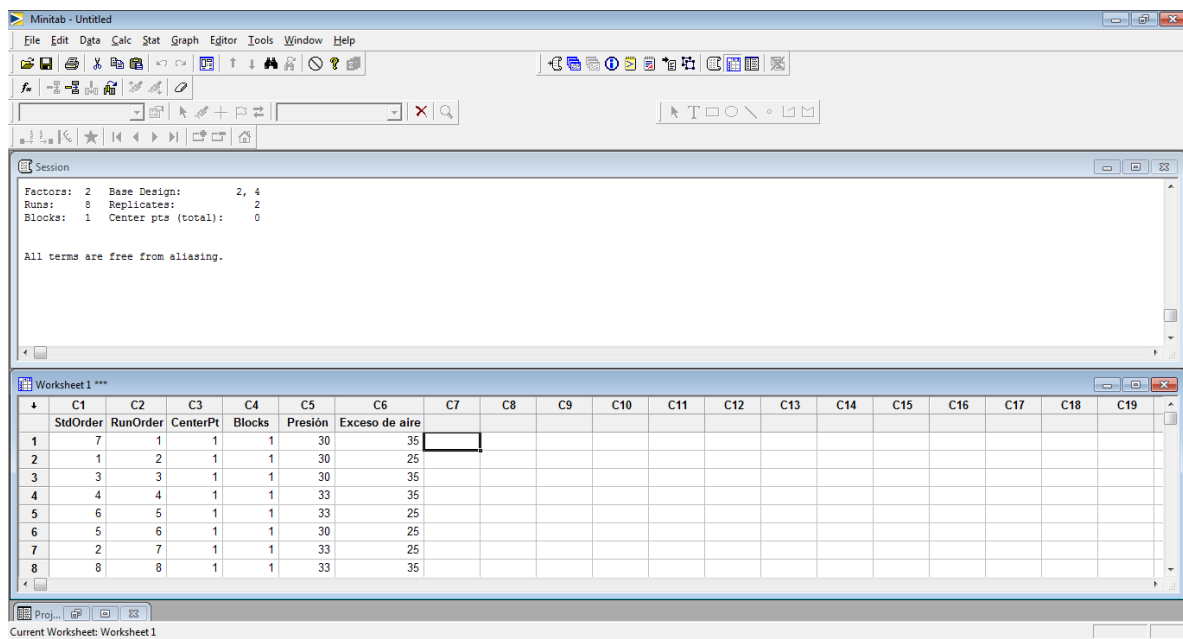
Se consideran estos rangos ya que son los que tenemos como referencia para combustibles como el combustóleo, de acuerdo a la figura 2.4.

3. Selección de la variable de respuesta.

La variable respuesta en el experimento desarrollado para este proyecto se determina que es el % de dióxido de carbono, la cual se ve afectado por los factores seleccionados de exceso de aire y presión de alimentación de combustible.

Elección del diseño experimental.

Se seleccionó un diseño factorial 2^2 con 2 réplicas, se creó este diseño en el software Minitab y se utilizó la plantilla generada para realizar los experimentos en campo.



Session

Factors: 2 Base Design: 2, 4
Runs: 8 Replicates: 2
Blocks: 1 Center pts (total): 0

All terms are free from aliasing.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Presión	Exceso de aire													
1	7	1	1	1	30	35													
2	1	2	1	1	30	25													
3	3	3	1	1	30	35													
4	4	4	1	1	33	35													
5	6	5	1	1	33	25													
6	5	6	1	1	30	25													
7	2	7	1	1	33	25													
8	8	8	1	1	33	35													

Figura 5.4 Plantilla generada en el Software Minitab para el diseño factorial.

Realización del experimento.

El experimento se realizó con apoyo de los operadores del área de Calderas 2, donde se encuentra el equipo que está consumiendo el combustible alterno, se manipularon las variables en los rangos establecidos y se realizó el análisis de emisiones con apoyo del analizador de Gases Testo. La figura 5.5 muestra el formato utilizado en campo para llevar a cabo el experimento, en el apéndice, se encuentran los formatos con los datos obtenidos.

Hoja de Campo para recolección de Datos
Toma de lecturas de análisis de emisiones

Operador: _____
Fecha: _____ Turno: _____
Equipo: _____ Combustible: _____

No.	Presión (lbs)	% Exceso de Aire	CO ₂	Observaciones
1	30	35		
2	30	25		
3	30	35		
4	33	35		
5	33	25		
6	30	25		
7	33	25		
8	33	35		

Figura 5.5 Formato para colección de datos en campo.

Los datos obtenidos se resumen en el cuadro 5.2.

Cuadro 5.2 Resumen de resultados obtenidos para factorial completo.

No.	Presión (lbs.)	% Exceso de Aire	%CO ₂
1	30	35	12.20
2	30	25	13.20
3	30	35	12.19
4	33	35	12.19
5	33	25	13.21
6	30	25	13.21
7	33	25	13.21
8	33	35	12.17

Análisis estadístico de los datos.

Una vez colectado los datos, se ingresan al software Minitab para realizar el análisis estadístico.

Factorial Fit: %CO₂ versus Presión, Exceso de aire

Estimated Effects and Coefficients for %CO₂ (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		12.6975	0.003062	4146.99	0.000
Presión	-0.0050	-0.0025	0.003062	-0.82	0.460
Exceso de aire	-1.0200	-0.5100	0.003062	-166.57	0.000
Presión*Exceso de aire	-0.0100	-0.0050	0.003062	-1.63	0.178

S = 0.00866025 PRESS = 0.0012
 R-Sq = 99.99% R-Sq(pred) = 99.94% R-Sq(adj) = 99.97%

Analysis of Variance for %CO₂ (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	2.08085	2.08085	1.04043	13872.33	0.000
2-Way Interactions	1	0.00020	0.00020	0.00020	2.67	0.178
Residual Error	4	0.00030	0.00030	0.00008		
Pure Error	4	0.00030	0.00030	0.00008		
Total	7	2.08135				

Estimated Coefficients for %CO₂ using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	15.1800
Presión	0.0183333
Exceso de aire	-0.0810000
Presión*Exceso de aire	-6.66667E-04

En este primer análisis se observa que la presión de combustible así como la interacción de los factores no son significativas dado que el valor P es muy grande, sin embargo debido a que el valor de R ajustada es alto se decide continuar trabajando con este factor y la interacción.

En las figura 5.6 a 5.11 se muestran las gráficas obtenidas durante el análisis.

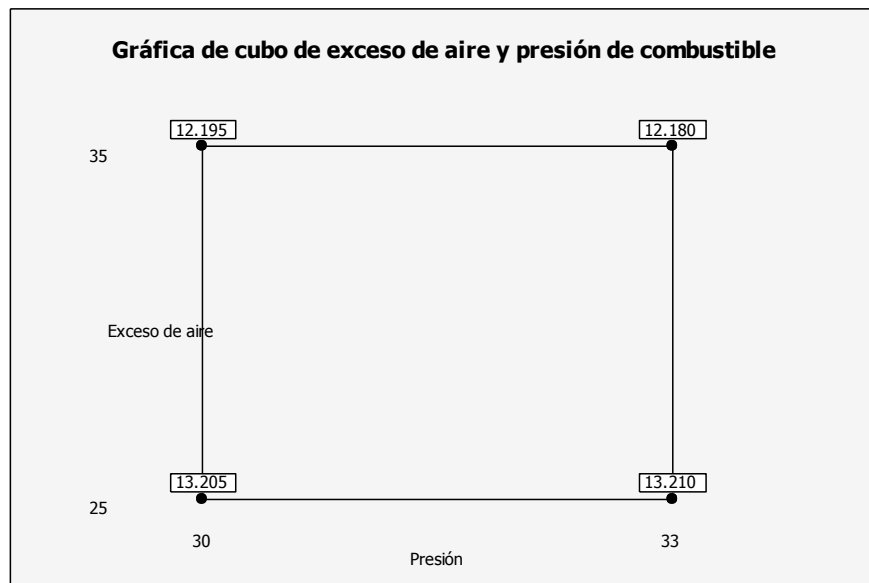


Figura 5.6 Gráfica de cubo de exceso de aire y presión de combustóleo.

El la figura 5.6 se observa la gráfica de cubo del experimento diseñado, en ella se observan los dos niveles seleccionados para cada factor.

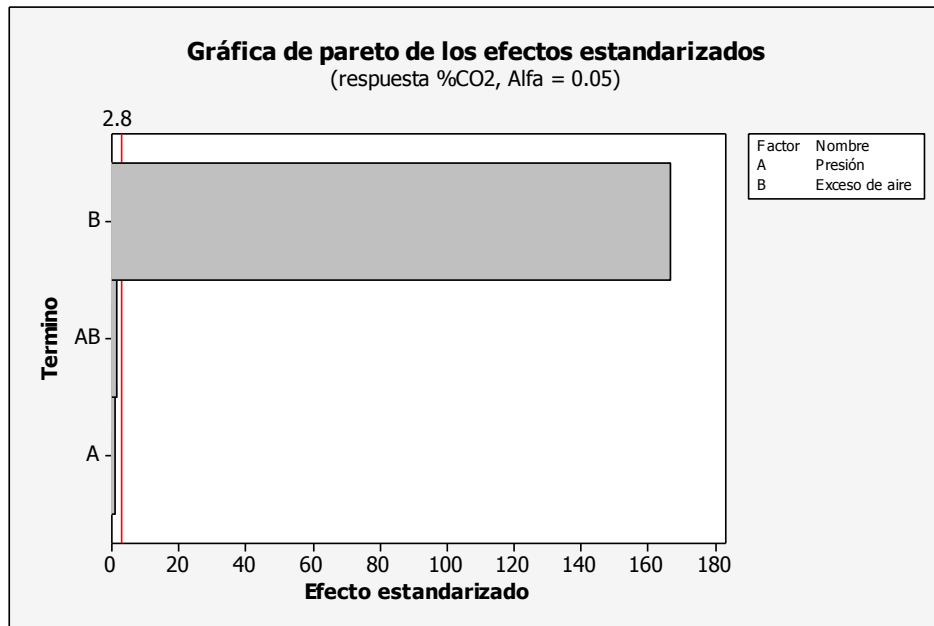


Figura 5.7 Gráfica de Pareto de los efectos estandarizados.

En la figura 5.7 se observa la gráfica de los efectos estandarizados; presión representado por A, exceso de aire representado por B y la interacción entre los dos factores representados por AB, donde se percibe únicamente como valor significativo el exceso de aire, sin embargo como se comentó anteriormente el valor de R ajustada es muy grande y no interviene en los resultados del experimento.

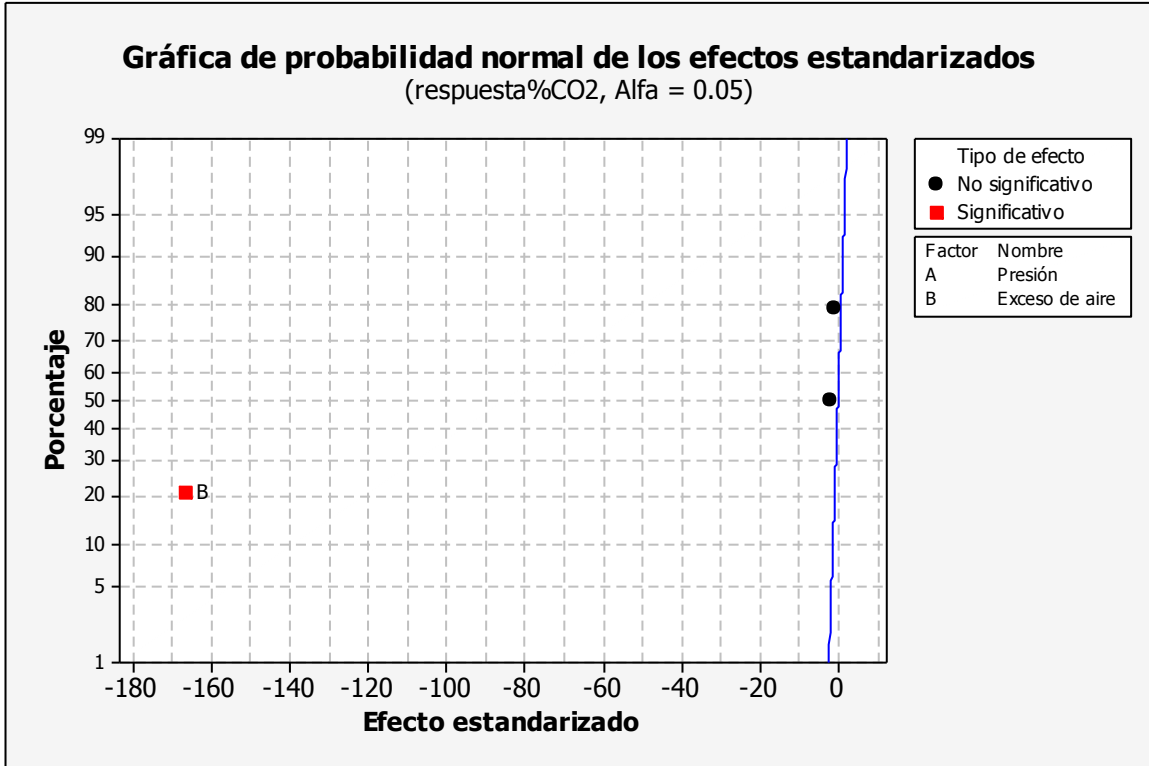


Figura 5.8 Gráfica de probabilidad normal de los efectos estandarizados.

El la figura 5.8 se confirma que el exceso de aire es el único factor significativo.

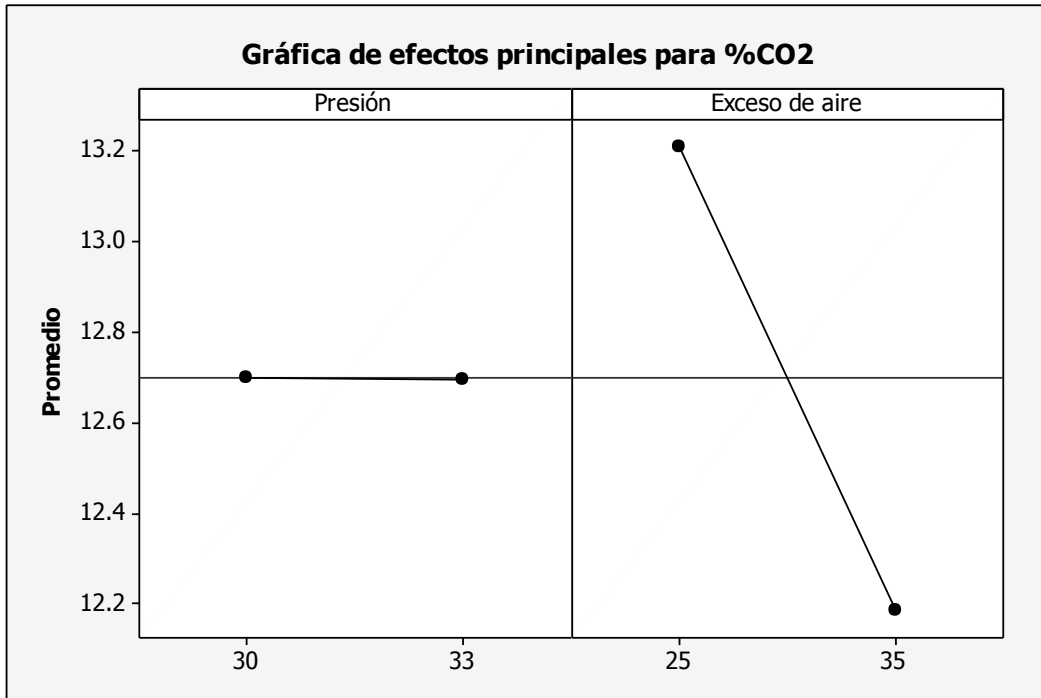


Figura 5.9 Gráfica de efectos principales para el CO₂.



Figura 5.10 Gráfica de interacción para el porcentaje de CO₂

De acuerdo con la figura 5.10 se confirma que no hay interacción entre los dos factores.

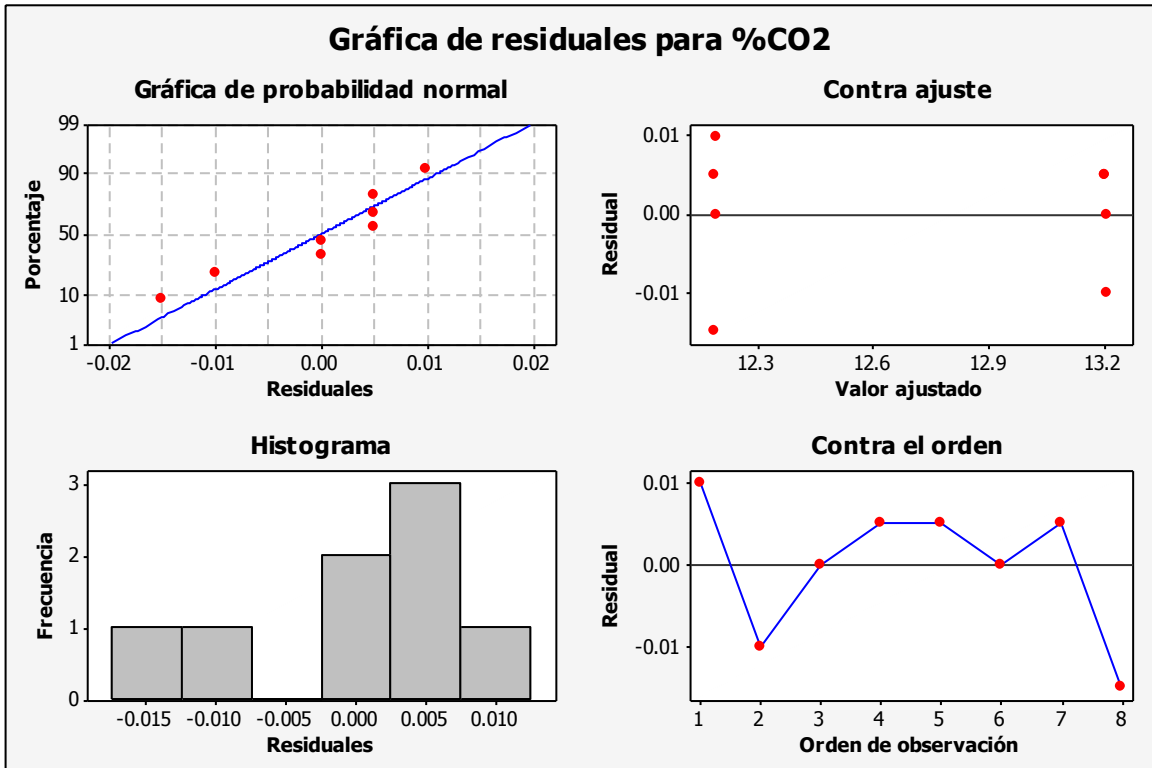


Figura 5.11 Gráfica de residuos.

En la figura 5.11 se muestran las gráficas referentes al análisis de residuos, existe una dispersión de los datos y no se muestra una tendencia específica, además se ajusta a un modelo normal.

Conclusiones y recomendaciones.

En el primer paso del presente diseño de experimentos concluimos que el exceso de aire es un factor significativo que afecta el % de CO₂ emitido al quemar el combustible alternativo, los siguientes pasos estarán enfocados en determinar cuál es el nivel óptimo de exceso de aire que debemos mantener en la operación de las Calderas de vapor para minimizar las emisiones de CO₂ a la atmosfera.

Paso 2. Factorial completo más punto central

El siguiente paso es agregar puntos centrales en el diseño anterior para determinar la curvatura, para ello generemos nuevamente con apoyo del Software Minitab el modelo agregando 3 puntos centrales, la siguiente figura muestra la gráfica de cubo, donde se incluye el punto central.

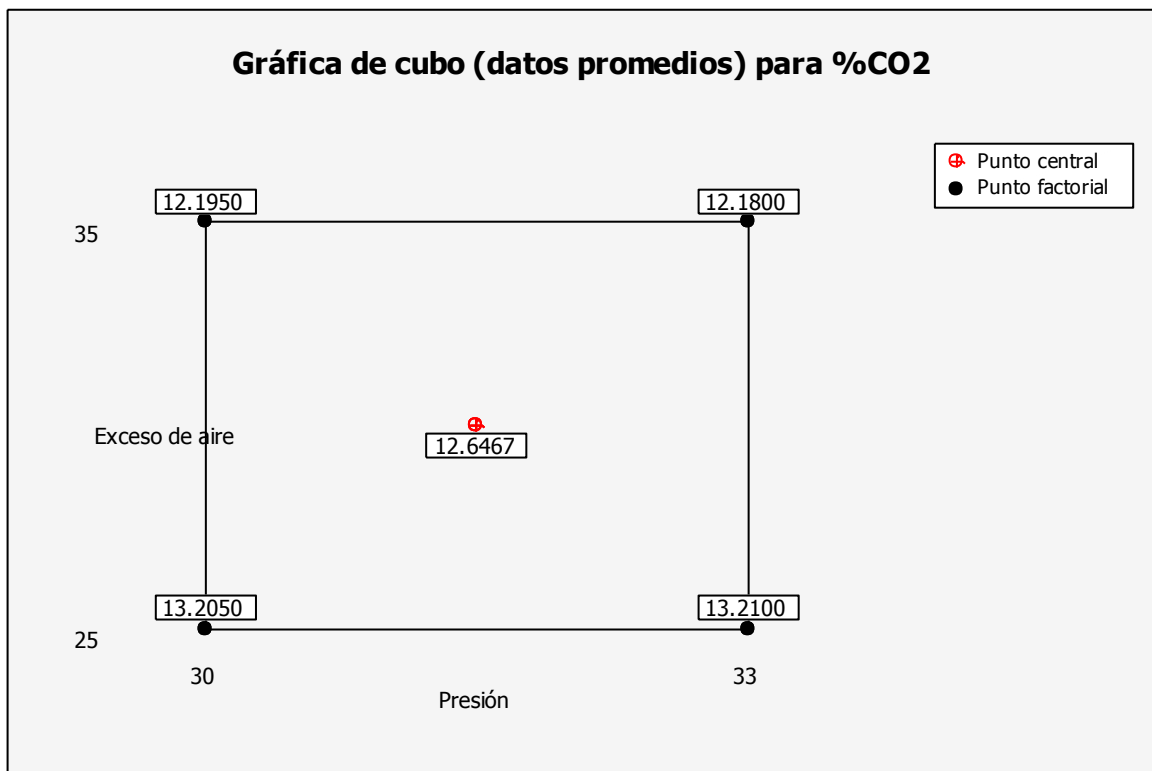


Figura 5.12 Gráfica de cubo de exceso de aire y presión de combustible con punto central.

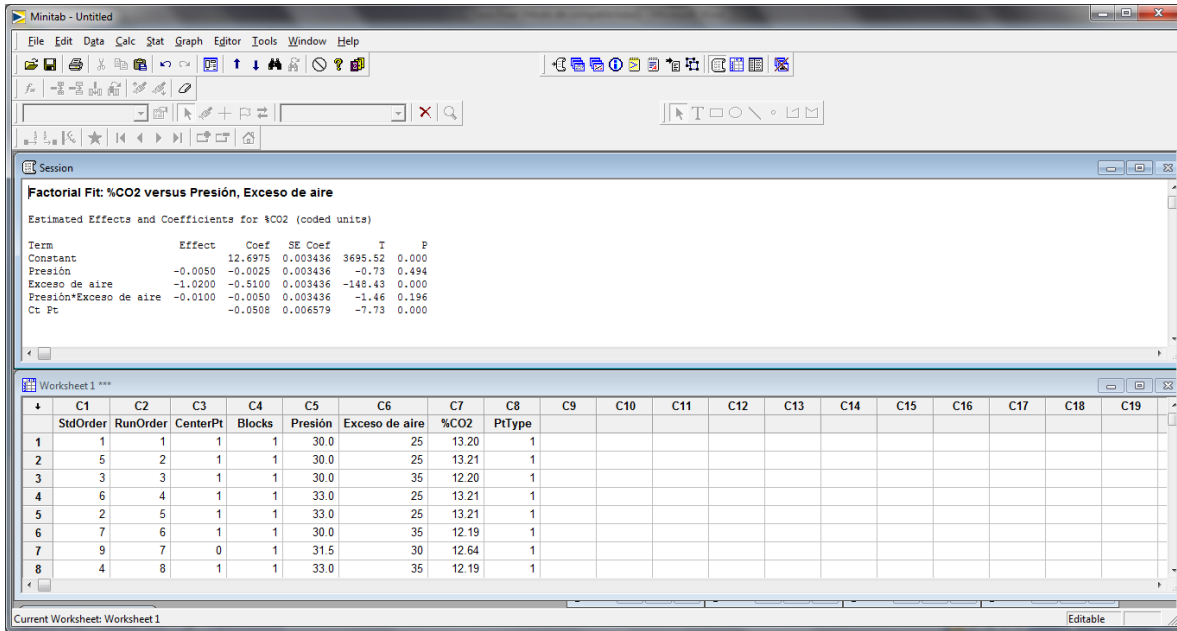


Figura 5.13 Plantilla generada en el Software Minitab para el diseño factorial con punto central.

En base a este diseño se genera el formato mostrado en la figura 5.14 para coleccionar datos campo.

Hoja de Campo para recolección de Datos
 Toma de lecturas de análisis de emisiones

Operador: _____ Turno: _____
 Fecha: _____ Combustible: _____
 Equipo: _____

No.	Presión (lbs)	% Exceso de Aire	CO ₂	Observaciones
1	31.5	30		
2	31.5	30		
3	31.5	30		

Figura 5.14 Formato para colección de datos centrales en campo.

Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro 5.3 y se pueden observar la sección II y III del apéndice.

Cuadro 5.3 Resumen de resultados obtenidos para puntos centrales.

No.	Presión (lbs.)	% Exceso de Aire	%CO ₂
1	31.5	30	12.64
2	31.5	30	12.64
3	31.5	30	12.66

Al realizar el análisis de diseño en Minitab se obtienen los siguientes resultados:

Factorial Fit: %CO2 versus Presión, Exceso de aire

Estimated Effects and Coefficients for %CO2 (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		12.6975	0.003436	3695.52	0.000
Presión	-0.0050	-0.0025	0.003436	-0.73	0.494
Exceso de aire	-1.0200	-0.5100	0.003436	-148.43	0.000
Presión*Exceso de aire	-0.0100	-0.0050	0.003436	-1.46	0.196
Ct Pt		-0.0508	0.006579	-7.73	0.000

S = 0.00971825 PRESS = 0.0116735
R-Sq = 99.97% R-Sq(pred) = 99.44% R-Sq(adj) = 99.95%

Analysis of Variance for %CO2 (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	2.08085	2.08085	1.04043	11016.26	0.000
2-Way Interactions	1	0.00020	0.00020	0.00020	2.12	0.196
Curvature	1	0.00564	0.00564	0.00564	59.70	0.000
Residual Error	6	0.00057	0.00057	0.00009		
Pure Error	6	0.00057	0.00057	0.00009		
Total	10	2.08725				

Estimated Coefficients for %CO2 using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	15.1800
Presión	0.0183333
Exceso de aire	-0.0810000
Presión*Exceso de aire	-6.66667E-04
Ct Pt	-0.0508333

```
Alias Structure
I
Presión
Exceso de aire
Presión*Exceso de aire
```

Se realiza una segunda corrida retirando los factores no significativos, sin embargo el valor de R ajustado no cambio y se decide continuar trabajando el experimento en ellos.

Factorial Fit: %CO2 versus Exceso de aire

Estimated Effects and Coefficients for %CO2 (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		12.6975	0.003572	3554.56	0.000
Exceso de aire	-1.0200	-0.5100	0.003572	-142.77	0.000
Ct Pt		-0.0508	0.006840	-7.43	0.000

S = 0.0101036 PRESS = 0.0114512
R-Sq = 99.96% R-Sq(pred) = 99.45% R-Sq(adj) = 99.95%

Analysis of Variance for %CO2 (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	1	2.08080	2.08080	2.08080	20383.35	0.000
Curvature	1	0.00564	0.00564	0.00564	55.23	0.000
Residual Error	8	0.00082	0.00082	0.00010		
Pure Error	8	0.00082	0.00082	0.00010		
Total	10	2.08725				

Unusual Observations for %CO2

Obs	StdOrder	%CO2	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	8	12.1700	12.1875	0.0051	-0.0175	-2.00R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Coefficients for %CO2 using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	15.7575
Exceso de aire	-0.102000
Ct Pt	-0.0508333

```
Alias Structure
I
Exceso de aire
```

Se observa que existe una curvatura dado que el valor de P es muy pequeño.

Paso 3. Superficie de respuesta

Ya con los puntos centrales establecidos realizamos las gráficas de superficie y de contorno mostradas en las figuras 5.15 y 5.16.

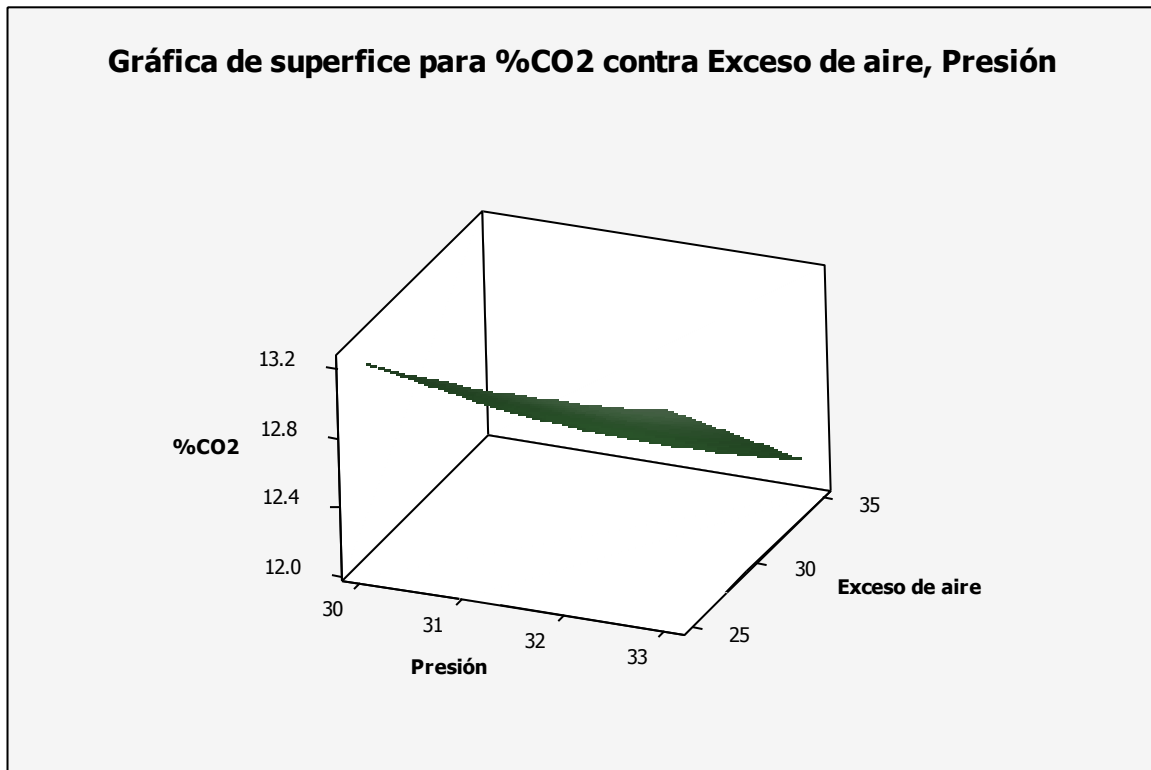


Figura 5.15 Gráfica de superficie de CO₂ contra exceso de aire y presión de combustible.

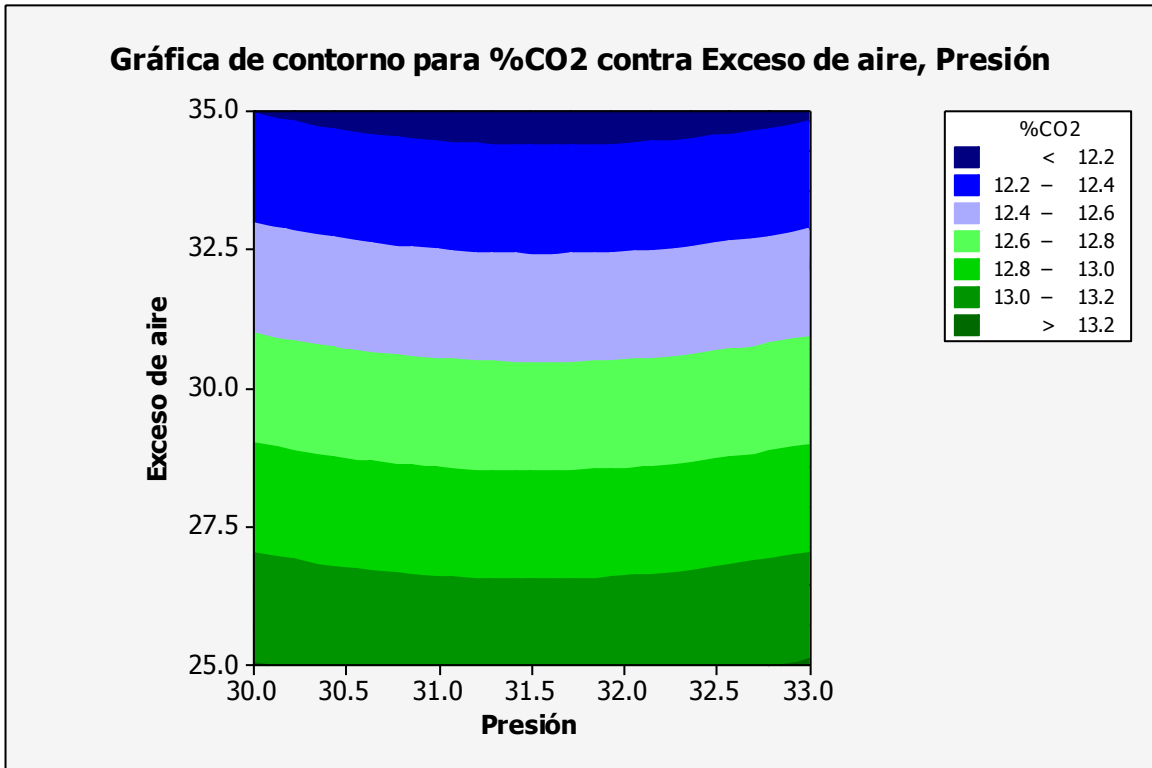


Figura 5.16 Gráfica de contorno de CO₂ contra exceso de aire y presión de combustible.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se logró un resultado importante al conocer cuáles son los parámetros más adecuados que se deben mantener en los gases de combustión durante la operación de un equipo generador de vapor, obteniendo beneficios ambientales y económicos, cumpliendo así con el objetivo del proyecto.

En base al análisis estadístico, las gráficas de control y de superficie, se determinó que la presión de operación del combustible no es un factor significativo que afecte la composición de los gases que se generan en el proceso de combustión en un generador de vapor. Con la gráfica de contorno se pudo determinar que entre mayor sea el porcentaje de exceso de aire menor será la cantidad de CO₂ emitido a la atmosfera, sin embargo con base en la NOM-085-SEMARNAT-1994 (Cuadro 6.1) el máximo para un exceso de aire es del 40% (para este caso en específico por las dimensiones del generador de vapor se localiza en la zona de 5,250 a 43,000 MJ/h), ya que al tener un exceso de aire estamos enviando aire caliente a la atmosfera y también se considera un impacto al medio ambiente. Con esta información se seleccionó un rango de operación de 35 a 40% de exceso de aire.

Si bien se determinó que la presión no es un factor significativo por la curvatura que se manifiesta en las gráficas de control de superficie, es preferible, para este combustible en específico, mantenerla lo más cercano al punto central seleccionado de 31.5 PSI.

Al utilizar estos parámetros se mejora la calidad de combustión; se reducen las emisiones de CO₂ a la atmosfera, lo que se traduce en un menor uso de combustible.

Los beneficios económicos que se pueden obtener al eficientar una combustión están en función de la reducción de consumo del combustóleo, al aprovechar al

máximo su poder calorífico, transferir este calor al fluido y no enviarlo como un producto de la combustión en los gases de combustión.

Cuadro 6.1 Límites de emisión (NOM-085 SEMARNAT-1994)

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD DEL HUMO	PARTICULAS (PST) mg/m ³ (kg/10 ⁶ kcal)			BIOXIDO DE AZUFRE ppm V (kg/10 ⁶ kcal)			OXIDOS DE NITROGENO ppm V (kg/10 ⁶ kcal)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTION % volumen (5)
		Número de mancha u opacidad	ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (4)	RP	
Hasta 5,250	Combustóleo o gasóleo	3	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	50
	Otros líquidos	2	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
De 5,250 a 43,000	Líquidos	NA	75 (0.106)	350 (0.426)	450 (0.568)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	190 (0.507)	190 (0.507)	375 (1.0)	40
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	190 (0.486)	190 (0.486)	375 (0.959)	
De 43,000 a 110,000	Líquidos	NA	60 (0.805)	300 (0.426)	400 (0.568)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	30
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.959)	
Mayor de 110,000	Sólidos	NA	60 (0.090)	250 (0.375)	350 (0.525)	550 (2.16)	1,100 (4.31)	2,200 (8.16)	110 (0.309)	110 (0.309)	375 (1.052)	25
	Líquidos	NA	60 (0.085)	250 (0.355)	350 (0.497)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.959)	

En la figura 6.2 se observan los beneficios económicos que se han obtenido durante los años 2010-2013 por la quema de un combustible alternativo y no utilizar un combustible comercial como el combustóleo.

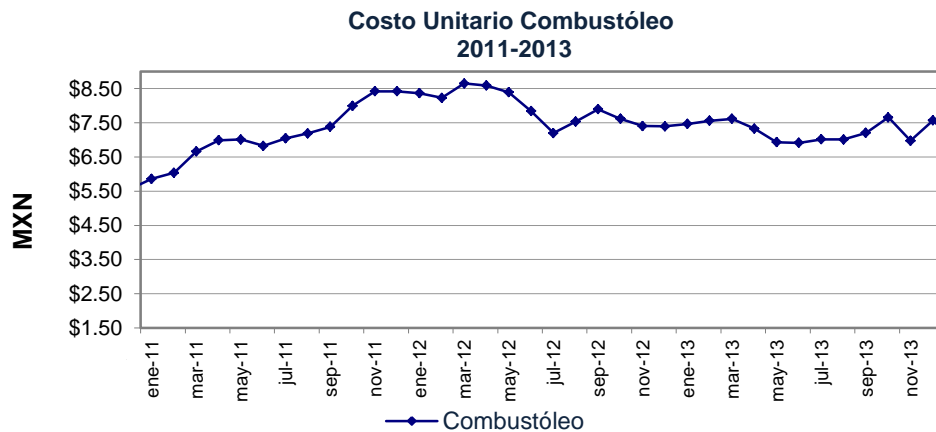


Figura 6.1 Gráfica costos unitarios del combustóleo.

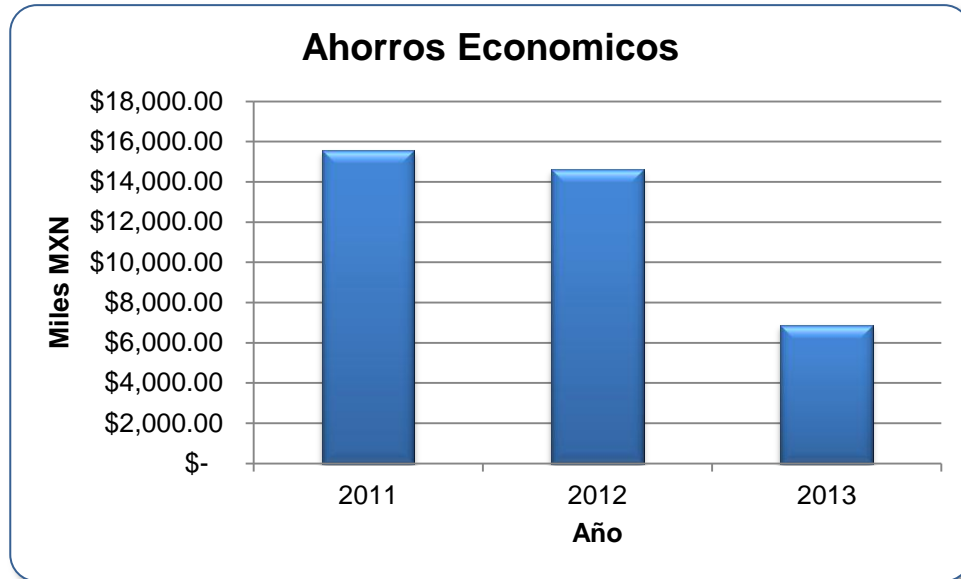


Figura 6.2 Beneficios económicos por uso de combustible alterno.

Los beneficios económicos que se lograron con el presente proyecto es la reducción del consumo de combustible alterno para obtener la misma energía, como se comentó anteriormente, esta es en función de la reducción de emisiones a la atmosfera, si logramos trabajar por arriba de un 35% de exceso de aire, se logra una reducción del 1%, si comparamos este 1% con los ahorros que se han tenido durante los últimos años tenemos los siguientes beneficios:

2011	\$155,587.47
2012	\$146,247.75
2013	\$ 68,871.88

Los beneficios ambientales que se tienen están en función de la reducción de emisiones de CO₂, se considera un factor de emisión del 2,947 kg. CO₂/m³ de residuos, al quemar los residuos de manera interna, se reducen las emisiones que se generarían durante su destrucción externa, y las emisiones que se tienen por la quema de combustóleo comercial. La figura 6.3 muestra las emisiones que se lograron evitar por la destrucción externa.

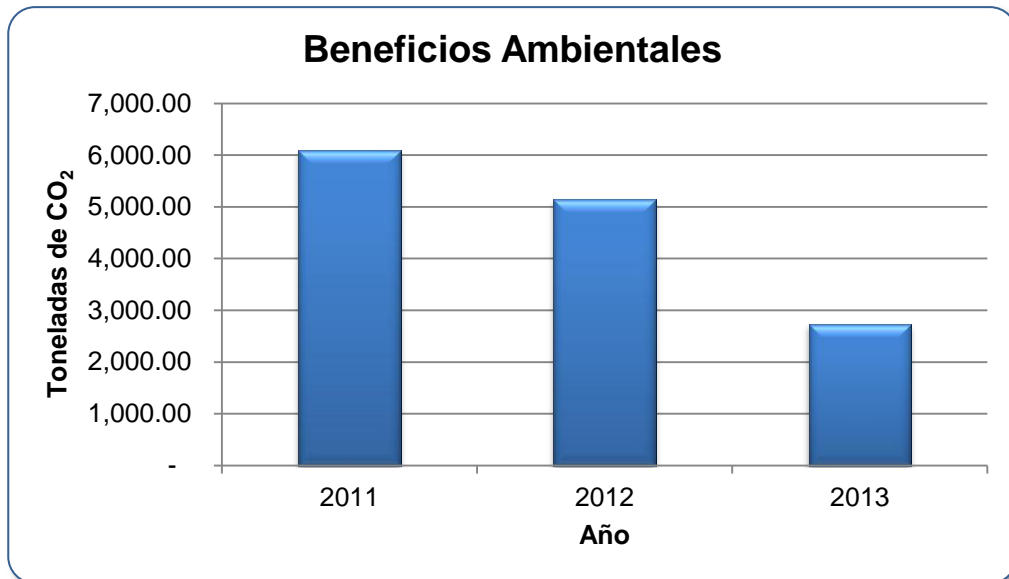


Figura 6.3 Beneficios ambientales por uso de combustible alterno.

Si se logra reducir las emisiones de CO₂ en un 1% los beneficios ambientales son los siguientes:

2011	60,902.65 Kg. CO ₂
2012	51,417.80 Kg. CO ₂
2013	27,318.78 Kg. CO ₂

Además de estos beneficios obtenidos, el objetivo que se cumple con la presente tesis es dar a conocer una metodología para que aquellas empresas que puedan producir un combustible alterno, aseguren la calidad de combustión y se evite así una contaminación ambiental y se obtenga además un beneficio económico, sin la necesidad de recurrir a un análisis químico, que además de complejo, resulta de un alto costo.

6.1 Conclusiones

En respuesta a la hipótesis definida en el presente documento, se concluye que si existen los parámetros de combustión adecuados que mejoran la calidad de la combustión del combustible alternativo desarrollado por Givaudan y en consecuencia se obtienen tanto beneficios económicos como ambientales, de esta manera logramos cumplir con el objetivo que nos planteamos en un inicio.

Como cumplimiento al objetivo también podemos concluir que la metodología de diseño de experimentos nos permitirá hacer un análisis de diversos combustibles alternos y no solo del realizado por la compañía Givaudan y determinar sus parámetros óptimos para mejorar su eficiencia.

LITERATURA CITADA

1. Castaño, E. T. y J. D. Domínguez, 2003. Experimentos: Estrategia y análisis en ciencia y tecnología. Centro de Investigación en Matemáticas. México, D. F.
2. Eco, H., 2001. Como se hace una tesis. Gedisa. España, Madrid.
3. Hodson, W. K. 2002. Maynard manual del ingeniero industrial (4ª. Ed.). Mc Graw Hill. México D.F.
4. Instituto SELMEC de capacitación, 2008. Manual del curso “Generadores de vapor para operadores de calderas Cleaver Brooks” (4a. Ed.). Grupo CONDUMEX. México, D. F.
5. Organización Internacional de Normalización (ISO). ISO 9000:2000. Sistemas de gestión de la calidad – conceptos y vocabulario.
6. Márquez, M. M., 2005. Combustión y quemadores. Marcombo. Barcelona, España.
7. Montgomery, D. C., 2006. Diseño y análisis de experimentos (2da. Ed.). Limusa Wiley. México, D.F.
8. Montgomery, D. C., 2007. Control estadístico de la calidad (3ª. Ed.). Limusa Wiley. México, D.F.
9. Montgomery, D. C. y G. C. Runger, 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. Mc Graw Hill. México, D. F.
10. Münch, L. y A. Ernesto, 2000. Métodos y técnicas de investigación (2da. Ed.). Trillas. México, D.F.
11. Secretaria de desarrollo social. Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994. México D. F.
12. Rolle, K. C., 2006. Termodinámica (6ª. Ed.). Prentice Hall. México, D. F.
13. Wark, K. Y D. E. Richards, 2001. Termodinámica (6ª. Ed.). Mc Graw Hill. México, D.F.
14. Faires, V. M., 2004. Termodinámica. Limusa, México, D.F.
15. Manrique, V. J., 2001. Termodinámica (3ª. Ed.). Oxford, México, D.F.

16. http://www.selmec.com.mx/images/Folleto_CleaverBrooks.pdf
17. http://www.calderaspimmsa.com.mx/c_horizontales.html

APÉNDICE

A. Certificado de calibración del analizador de gases

 **Calibración y Metrología Industrial de México, S.A. de C.V.**
Número de acreditación asignado No. AE-06
Vigencia de acreditación 17 de Diciembre de 2012



México D. F. a 10 de Marzo de 2011

GIVAUDAN DE MÉXICO, S. A. DE C. V.
Camino Quintanares Km 1.5, Pedro Escobedo, Querétaro, México, C. P. 76700

Por este conducto me permito anexar al presente, los resultados obtenidos durante el desarrollo del procedimiento de calibración CMIM-TGLB-001 y que se identifica como:

IC-ECG-2330-11

Derivado de la cotización de servicio QC-02148 para la calibración del analizador de gases de combustión, propiedad de **Givaudan de México, S. A. de C. V.**

Con las siguientes características:

Marca:	Testo
Modelo:	300M-I
No. de serie:	01117018/508
No. de inventario:	L01769

Asimismo se le hace entrega del oficio de confidencialidad por el servicio prestado y del equipo referenciado conforme al inventario descrito en la hoja de recepción del equipo.

ATENTAMENTE


Ing. Luis Alberto David Cruz Estrada
Gerente de Laboratorio



ANEXOS: Informe de resultados (2 hojas).

Estudios Azteca Mx. B L. 23 No. 14 Col. Jardines Tecma 08920 México, D.F.
Tels. / Fax: 2621-2620, 2621-2622 e-mail: cmim@gimim.com



México, D. F. a 10 de marzo de 2011

IC-ECG-2330-11

Cotización de Servicio: QC-02148

INFORME DE CALIBRACIÓN

GIVAUDAN DE MÉXICO, S. A. DE C. V.
Camino Quintanares Km 1.5, Pedro Escobedo, Querétaro, México, C. P. 76700

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO.

Descripción del instrumento: Analizador de gases de combustión (celdas electroquímicas)
Marca: testo **Modelo:** 300M-I **No. de serie:** 01117018/508 **No. Inv.:** L01769
Descripción de la sonda: Sonda típica para testo 300M-I
Marca: testo **Modelo:** S/N

ALCANCE: Oxígeno, Monóxido de Carbono, Óxido Nítrico.

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN: CMIM-TGLB-001 - "Procedimiento para la calibración de analizadores de gases"

FECHA DE CALIBRACIÓN: 2011-03-10

NOMBRE Y PUESTO DE QUIEN CALIBRO: Jorge González Zuñiga
Responsable Técnico

Notas.

1. El instrumento fue calibrado cumpliendo los requisitos de la NMX-EC-17025-IMNC-2006, bajo un Sistema de Gestión y de competencia técnica. El procedimiento de calibración ha sido diseñado en base a la NCM-034-SEMARNAT-1993 vigente en el tiempo en que se realizó la calibración.
2. Los documentos que se han generado como resultado del presente informe de calibración, son estrictamente confidenciales y por ninguna causa serán exhibidos ni divulgados por el personal de CMIM, obligándose a guardar la confidencialidad de la información que se genere o se desarrolle.
3. El presente informe ampara únicamente al instrumento sometido a calibración. Los resultados presentados son válidos para el instrumento en su estado y bajo las condiciones que prevalecieron en la calibración.
4. El servicio de calibración es trazable al sistema internacional de unidades de medida (SI).

TABLA 1. CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LA CALIBRACIÓN

Temperatura	Humedad Relativa
20.9 °C ± 1 °C	30.6 % HR ± 3 % HR

QUEEN ESTERILIZACION, PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL DE ESTA INFORMACION SIN LA AUTORIZACION DEL DIRECTOR GENERAL POR DEBE DE LA COMPETENCIA PARA EL DISEÑO DE



Página 1/2



IC-ECG-2330-11

TABLA 2. RESULTADO FINAL DE CALIBRACIÓN.

Parámetro	Valor referencia	Valor actual en el instrumento	Desviación	Incertidumbre (k = 2)
Oxígeno	21.0 ppmol/mol	21.1 ppmol/mol	0.1 ppmol/mol	± 0.26 ppmol/mol
Oxígeno	10.4 ppmol/mol	10.3 ppmol/mol	-0.1 ppmol/mol	± 0.14 ppmol/mol
Oxígeno	8.2 ppmol/mol	8.2 ppmol/mol	0.0 ppmol/mol	± 0.10 ppmol/mol
Oxígeno	2.1 ppmol/mol	2.1 ppmol/mol	0.0 ppmol/mol	± 0.093 ppmol/mol
Monóxido de carbono	875 ppmol/mol	860 ppmol/mol	-15 ppmol/mol	± 14.4 ppmol/mol
Monóxido de carbono	492 ppmol/mol	490 ppmol/mol	-2 ppmol/mol	± 7 ppmol/mol
Monóxido de carbono	298 ppmol/mol	293 ppmol/mol	-5 ppmol/mol	± 4 ppmol/mol
Monóxido de carbono	18 ppmol/mol	17 ppmol/mol	-1 ppmol/mol	± 2 ppmol/mol
Oxido Nítrico	997 ppmol/mol	990 ppmol/mol	-7 ppmol/mol	± 18 ppmol/mol
Oxido Nítrico	496 ppmol/mol	495 ppmol/mol	-1 ppmol/mol	± 9 ppmol/mol
Oxido Nítrico	300 ppmol/mol	298 ppmol/mol	-2 ppmol/mol	± 6 ppmol/mol
Oxido Nítrico	100 ppmol/mol	101 ppmol/mol	1 ppmol/mol	± 2 ppmol/mol

- Las incertidumbres están expresadas como incertidumbres expandidas utilizando un factor de cobertura k = 2 con un nivel de confianza de aproximadamente el 95.4 %
- El valor actual en el instrumento es el promedio de 8 mediciones.

TABLA 3. PATRONES USADOS EN LA CALIBRACIÓN *

Material de referencia	Valor de referencia	Incertidumbre del material de referencia (k=2)	Número de serie del cilindro	Fecha de calibración del cilindro
Oxígeno	21.00 ppmol/mol	0.13 ppmol/mol	CC10634	2014-01-04
Monóxido de Carbono	875.0 ppmol/mol	8.0 ppmol/mol	CC10634	2014-01-04
Oxido Nítrico	996.0 ppmol/mol	8.7 ppmol/mol	CC11985	2012-11-24
Selenio de Azufre	991.5 ppmol/mol	7.4 ppmol/mol	CC11985	2012-11-24

- El método de calibración se basa en la división de los cilindros de gases de referencia grado primario EPA mediante un divisor de gases HORIBA, Modelo SGC-710C, número de serie FCF00VOR, con principio de medición de tubos catalíticos, certificado de calibración No. CMA-CC-030-0042010, expedido por el CEMAM.


Ing. Luis Alberto David Cruz Estrada
Gerente de Laboratorio



Página 20

B. Formato de campo de análisis de emisiones.

Hoja de Campo para recolección de Datos Toma de lecturas de análisis de emisiones

Operador: Oscar Revendic
 Fecha: 10/11/2011 Turno: 2º
 Equipo: CB-800 SZ Combustible: Residuos de destilación

No.	Presión (lbs)	% Exceso de Aire	CO ₂	Observaciones
1	30	35	12.20%	Flama estable, sin humos
2	30	25	13.20%	Flama estable, pocos humos
3	30	35	12.19%	Flama estable, sin humos
4	33	35	12.19%	Flama estable, sin humos
5	33	25	13.21%	Flama estable, sin humos
6	30	25	13.21%	Flama estable, sin humos
7	33	25	13.21%	Se observan columnas de humo color negro, flama estable
8	33	35	12.17%	Flama estable sin humos

Hoja de Campo para recolección de Datos Toma de lecturas de análisis de emisiones

Operador: Oscar Rosendo
 Fecha: 15/11/2011 Turno: 1^a
 Equipo: CB-800 S2 Combustible: Residuos de destilación

No.	Presión (lbs)	% Exceso de Aire	CO ₂	Observaciones
1	31.5	30	12.64	Flama estable, sin humos
2	31.5	30	12.64	Flama estable, sin humos
3	31.5	30	12.66	Flama estable, sin humos

C. Impresiones de resultados de análisis de gases.

183.3	°C T stack
26.8	°C Ambient temp
12.20	% CO2
5.66	% Oxygen
0	ppm CO
351	ppm NOx
88.4	% EFF
35.0	% ExAir
824	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P1 30 lb. 35% Exc

180.4	°C T stack
27.7	°C Ambient temp
13.20	% CO2
4.40	% Oxygen
0	ppm CO
300	ppm NOx
89.0	% EFF
25.1	% ExAir
862	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P2 30 lb. 25% Exc.

187.2	°C T stack
27.6	°C Ambient temp
12.19	% CO2
5.67	% Oxygen
0	ppm CO
354	ppm NOx
88.3	% EFF
35.1	% ExAir
832	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P3 30 lb. 35% Exc

176.5	°C T stack
26.7	°C Ambient temp
12.19	% CO2
5.67	% Oxygen
0	ppm CO
319	ppm NOx
88.7	% EFF
35.1	% ExAir
804	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P4 33 lb. 35% Exc

177.3	°C T stack
26.2	°C Ambient temp
13.21	% CO2
4.39	% Oxygen
0	ppm CO
336	ppm NOx
89.1	% EFF
25.1	% ExAir
865	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P5 33 lb. 25% Exc.

177.4	°C T stack
26.8	°C Ambient temp
13.21	% CO2
4.39	% Oxygen
0	ppm CO
328	ppm NOx
89.1	% EFF
25.1	% ExAir
835	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P6 30 lb. 25% Exc

183.2	°C T stack
26.3	°C Ambient temp
13.21	% CO2
4.39	% Oxygen
0	ppm CO
359	ppm NOx
88.9	% EFF
25.1	% ExAir
899	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P7 35 lb. 25% Exc.

189.5	°C T stack
27.3	°C Ambient temp
12.64	% CO2
5.11	% Oxygen
0	ppm CO
356	ppm NOx
88.4	% EFF
30.5	% ExAir
880	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P2 31.5 lb. 30% Exc.

191.7	°C T stack
26.5	°C Ambient temp
12.66	% CO2
5.08	% Oxygen
0	ppm CO
362	ppm NOx
88.3	% EFF
30.3	% ExAir
884	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P3 31.5 lb. 30% Exc

189.2	°C T stack
26.6	°C Ambient temp
12.64	% CO2
5.11	% Oxygen
0	ppm CO
361	ppm NOx
88.4	% EFF
30.5	% ExAir
905	ppm SO2

Smoke number: ---
 Mean: ---
 Oil derivative: ---
 Heat transf. °F: --- °F

P1 31.5 lb. 30% Exc.