

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE LA CALDERA
B-2952 EN LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA - ECOPETROL S.A**

JENIFER GUERRERO PARRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

BUCARAMANGA

2016

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE LA CALDERA
B-2952 EN LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA - ECOPETROL S.A**

JENIFER GUERRERO PARRA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Químico**

Dirección

DIONISIO ANTONIO LAVERDE CATAÑO

Ph. D. Ing. Metalúrgico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEORICO	14
1.1. Definición de caldera	14
1.2. Clasificación de las calderas	14
1.3. Tipos de calderas	14
1.3.1. Acuotubulares.....	14
1.3.2. Pirotubulares:.....	15
1.4. Descripción y funcionamiento de un generador de vapor.....	15
1.5. Descripción básica y funcionamiento de la caldera con código interno B-2952	16
2. METODOLOGÍA.....	21
2.1. Apropiación teórico-práctica del funcionamiento de la caldera con código interno B-2952 de la unidad de balance.....	21
2.2. Revisión bibliográfica y recopilación de datos experimentales de la caldera B-2952 en un período de tiempo de un año de operación	22
2.3. Especificación de datos de entrada y simulación de la caldera B-2952 usando la herramienta Aspen HYSYS V8.8	22
2.3.1. Lista de componentes (Component List)	23
2.3.2. Paquete de fluidos	23
2.3.3. Set de reacciones	23
2.4. Simulación del Proceso	23
2.5. Evaluación de la eficiencia y validación de la herramienta de simulación ...	24
2.5.1. Método de pérdidas de calor	24

2.5.1.1.	Cálculo por pérdidas de los gases de combustión	25
2.5.1.2.	Cálculo de pérdidas por incombustión química	26
2.5.1.3.	Cálculo de pérdidas por combustión mecánicamente incompleta..	26
2.5.1.4.	Cálculo de pérdida por radiación y conducción	27
2.5.2.	Método directo	28
3.	RESULTADOS	29
3.1.	Resultados y análisis de datos	29
3.2.	Resultados y análisis de la simulación	30
3.2.1.	Lista de componentes	31
3.2.2.	Paquete de fluidos.....	32
3.2.3.	Entorno de simulación.....	33
3.2.3.1.	Reactor de conversión y reactor Gibbs	34
3.3.	Validación de la simulación	36
4.	CONCLUSIONES	38
5.	RECOMENDACIONES.....	39
	BIBLIOGRAFIA	40
	ANEXOS	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques para la producción de vapor	13
Figura 2. Esquema de las calderas de Servicios Industriales	17
Figura 3. Elementos del proceso de producción de vapor	20
Figura 4. Etapas para el desarrollo del proyecto	21
Figura 5. Diagrama de caja para la temperatura de aire de entrada	30
Figura 6. Entorno de simulación usando reactor de conversión.....	33
Figura 7. Ambiente de simulación con un reactor Gibbs	34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de los cuartiles, mínimo y máximo para medidor de temperatura de aire a la entrada	29
Tabla 2. Intervalo de confianza para la temperatura de entrada del aire	30
Tabla 3. Composición de gas de entrada	31
Tabla 4. Comparación de los 2 paquetes termodinámicos, PR y SRK.....	32
Tabla 5. Comparación de la composición de gas de salida, reactor de conversión y Gibbs.....	35
Tabla 6. Validación de simulación con los medidores de temperatura.....	36
Tabla 7. Porcentaje de error entre la eficiencia simulada y reportada por ECOPETROL S.A.	37

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Depuración de datos mediante el método de diagrama	42
Anexo B. Intervalo de confianza de las variables	55
Anexo C. Diagrama de los desvíos presentados en ECOPETROL S.A.	60

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE LA CALDERA B-2952 EN LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA - ECOPETROL S.A

AUTOR: Jenifer Guerrero Parra.**

PALABRAS CLAVES: Caldera, generador de vapor, tren de calentamiento, combustion, eficiencia térmica, Aspen HYSYS, Intercambiadores de calor.

DESCRIPCIÓN

La crisis energética actual y sus consecuencias económicas en la productividad industrial han enfocado sus esfuerzos en el uso más eficiente de los recursos con los que se cuentan para realizar las actividades cotidianas. Sabiendo que las calderas son equipos de generación de vapor utilizados ampliamente, y que de ellos dependen muchos procesos de la refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL S.A., se desarrolló un software con ayuda del simulador Aspen Hysys V8.8 para evaluar la eficiencia de las calderas que posibiliten elevar la efectividad y su funcionamiento, así como disminuir su actual consumo de combustible y emisión de gases contaminantes al medio ambiente.

El generador de vapor, está siendo utilizado en la actualidad para reemplazar la denominada caldera, e indica el conjunto de equipos compuesto por: horno, cámara de agua, quemadores, sobre calentadores, tambores, economizadores, y pre calentadores de aire; y como su nombre lo indica, tiene la función de producir vapor para ser utilizado en la generación de energía mecánica y energía eléctrica y para la alimentación a equipos de proceso. Hoy en día este equipo es un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales. Se ha llegado a plantear que el generador de vapor es el corazón de toda industria moderna.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: CATAÑO LAVERDE Dionisio Antonio Ing. Metalúrgico PhD.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A SIMULATION TOOL OF THE BOILER B-2952 IN REFINERY BARRANCABERMEJA - ECOPETROL S.A.*

AUTHORS: Jenifer Guerrero Parra.**

KEYWORDS: Boiler, steam generator, train of heating, combustion, thermal efficiency, Aspen HYSYS, heat exchangers.

DESCRIPTION

The current energy crisis and its economic consequences in the industrial productivity have focused their efforts on the most efficient use of the resources with which they have to perform the basic activities of daily living. Knowing that the boilers are steam generation equipment used widely, and which depend on them many processes in the plant of ECOPETROL S.A., to develop a software with the help of the Aspen HYSYS simulator V8.8 for evaluating the efficiency of boilers which make it possible to raise the effectiveness and its operation, as well as to decrease its current fuel consumption and emission of pollutants to the environment.

The steam generator is being used today to replace the so-called boiler, and indicates the set of equipment consisting of: oven, water chamber, burners, on heaters, drums, economizers and air heaters pre; and as its name implies, it has the function to produce steam for use in the generation of mechanical energy and electrical energy and power to process equipment. Today this team is an essential element in the operation of virtually all industrial enterprises. It has come to raise the steam generator is the heart of any modern industry.

* Degree work

** Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. Director: CATAÑO LAVERDE Dionisio Antonio Ing. Metalúrgico PhD.

INTRODUCCIÓN

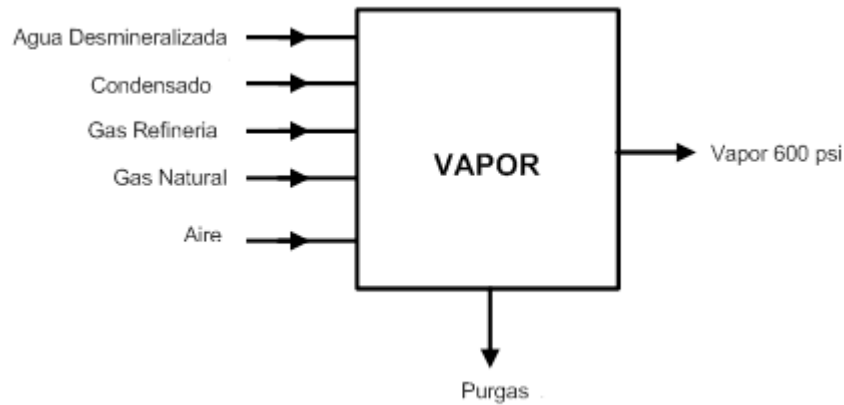
Ecopetrol es una compañía colombiana del sector petróleo y gas dedicada a la exploración, producción, refinación, transporte y comercialización de hidrocarburos. Con 64 años de historia ECOPETROL es la empresa más grande de Colombia y es una compañía integrada del sector de petróleo y gas [1]. Actualmente tiene participación de los biocombustibles y mediante la incursión internacional tiene presencia en Brasil, Perú y en el Golfo de México (Estados Unidos) [1].

Ecopetrol S.A. posee dos refinerías, las cuales están ubicadas en las ciudades de Barrancabermeja y Cartagena, diversos campos de extracción de hidrocarburos en el centro, sur y norte de Colombia, puertos en ambas costas para la exportación e importación de crudos y combustibles (tres puertos en total) [2]. Adicionalmente cuenta con una red de transporte de 8.500 kilómetros de oleoductos y poliductos a lo largo de toda la geografía nacional, que conectan los grandes centros de consumo con las terminales marítimas.

La refinería de Barrancabermeja en el año de 1979, con el objeto de aumentar su capacidad de producción, puso en operación la Unidad de Balance, esta unidad cuenta con las plantas de Demex, Viscosreductora, Hidrógeno, Unibón unidades de tratamiento como Amina, Merox, Azufre y la unidad de Cracking UOP I.

La producción de vapor en una refinería es sumamente importante para el desarrollo de los procesos de refinación, manejo de tanques, uso en actividades de mantenimiento y la generación de energía eléctrica. Para lograr el abastecimiento necesario de vapor en los diferentes bloques de la Unidad de Balance, el área de servicios industriales cuenta con cinco calderas acuotubulares capaces de generar 325 KLbh (Kilo libra por hora) de vapor de 600 psig (libra por pulgada cuadrada manométrica) cada una (datos de diseño de la caldera) [3]; es decir, una capacidad instalada de 1600 KLbh. La figura 1 muestra el diagrama de bloques asociado a la producción de vapor.

Figura 1. Diagrama de bloques para la producción de vapor



El principal objetivo de la refinería es el uso eficiente de los recursos para la realización de las actividades que la refinería demanda, sabiendo que las calderas y los hornos industriales forman parte de los equipos más utilizados por la industria para la generación de vapor y que de ellos dependen muchos procesos, se desarrolló un software para la eficiencia de las calderas que posibiliten elevar la efectividad y funcionamiento, así como disminuir su actual consumo de combustible y emisión de gases contaminantes al medio ambiente.

Este proyecto tiene como fin el desarrollo de una simulación de la caldera con código interno B-2952 de la unidad de Balance de la refinería de Barrancabermeja con ayuda del software ASPEN HYSYS, que permita predecir su comportamiento en un rango de condiciones de operación diferentes, buscando evaluar la eficiencia de la misma.

1. MARCO TEORICO

1.1. Definición de caldera

Las calderas son máquinas diseñadas para generar vapor saturado, donde, la energía que se cede a un fluido de trabajo (agua), proviene de la reacción de un combustible en aire para la generación de gases calientes; “Las calderas son diseñadas para transmitir el calor procedente de una fuente externa (generalmente combustión de algún combustible), a un fluido contenido dentro de la misma caldera. El líquido debe estar dentro del equipo con las debidas medidas de seguridad” [4]. El vapor o agua caliente, deben ser alimentados en las condiciones deseadas, es decir, de acuerdo con la presión, temperatura, calidad, y en la cantidad que se requiera. Por razones de economía, el calor debe ser generado y suministrado con un mínimo de pérdidas.

1.2. Clasificación de las calderas

La clasificación de las calderas se puede realizar atendiendo a diversos factores, pueden ser analizadas según: su aplicación, el uso, presión, materiales de construcción, tamaño, contenido de tubos, forma y posición de tubos, sistema de fogón, fuentes de calor, tipo de combustible, fluido utilizado, sistema de circulación, posición del hogar, tipo del fogón, forma general, propiedades especiales entre otros. Los diseñadores y fabricantes aplican los principios de transferencia térmica al diseño de sistemas de calderas, pero deben también tener amplia formación técnica en mecánica de fluidos, metalurgia, resistencia de materiales, quemadores, controles y dispositivos de seguridad para el diseño de este equipo.

1.3. Tipos de calderas

Según el material de las calderas se encuentran dos tipos de calderas muy usadas en la industria, estas son:

1.3.1. Acuotubulares

Son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza a través de tubos durante su calentamiento. La llama se forma en un recinto de paredes tubulares que

configuran la cámara de combustión. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación.

1.3.2. Pirotubulares:

En este tipo de calderas, el fluido de trabajo (agua) se encuentra contenido en un recipiente, y es atravesado por tubos, por los cuales circulan gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión realizado en el hogar de la caldera; los gases de chimenea que son producidos en el hogar, evaporan el agua por medio de transferencia de calor debido al contacto con estos tubos calientes.

1.4. Descripción y funcionamiento de un generador de vapor

La combinación de una caldera y un sobre calentador se le conoce como un generador de vapor, debido a que no se limita el uso de vapor saturado, se le adiciona una energía más al vapor para llevarlo a condiciones de sobrecalentamiento [5].

El generador de vapor tiene la función de transferir al agua la energía en forma de calor de los gases producto de la combustión de la sustancia combustible, para que esta se convierta en vapor. Este equipo, que tuvo prácticamente su origen con el surgimiento de la máquina de vapor en la época de la revolución industrial, se ha desarrollado vertiginosamente y en la actualidad se encuentra altamente especializado en su función [5]. Lo componen diferentes partes, algunas de las cuales tienen funciones específicas, imprescindibles para el funcionamiento y otras cuya misión es la de aumentar la eficiencia de la recuperación del calor desprendido y contribuir, de paso, al funcionamiento correcto del generador de vapor. En dicho funcionamiento tiene gran importancia el movimiento de los gases portadores del calor, desde el horno donde se producen hasta la chimenea que los expulsa al medio ambiente; durante este recorrido es que se ponen en contacto con la superficie de transferencia de calor.

Por otra parte, el movimiento del agua y de la mezcla agua - vapor que se crea producto de la aceptación de calor, tiene también singular interés en el funcionamiento del generador de vapor; este movimiento puede tener dos orígenes: natural, producto de las fuerzas de empuje que se crean como consecuencia de las diferencias de densidades entre las partes calentadas y las no calentadas; o forzado, cuando se crea mediante un equipo mecánico, es decir, una bomba.

El generador de vapor está compuesto principalmente por el horno, quemadores, economizador, calentador de agua, ventilador de tiro forzado e inducido, sobre calentador de vapor y alimentador de agua

1.5. Descripción básica y funcionamiento de la caldera con código interno B-2952

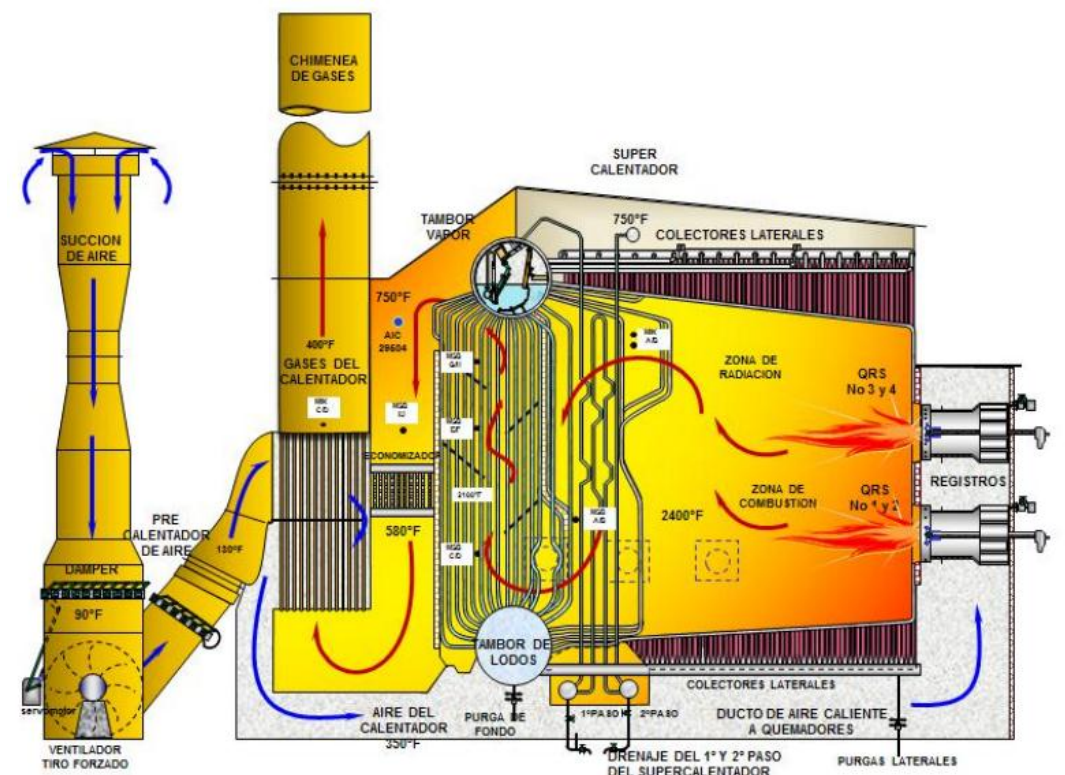
El generador de vapor identificado con código interno B-2952, ver figura 2, tiene la capacidad nominal de generar 325 KLB/hr de vapor sobrecalentado de 600 psig, el cual se utiliza en la generación de energía eléctrica, en las plantas de procesos para el accionamiento de equipos rotativos y en forma de calor para la transformación de materias primas [3].

Consta de los siguientes equipos:

CALDERA: Sistema que genera vapor saturado (489°F) mediante la transformación de la energía del combustible en calor, el cual es transferido al agua de alimentación en el economizador, en las superficies de convección (tubos del banco principal) y en las paredes de agua del hogar, donde se convierte en vapor. Los tubos del banco principal unen los domos de la caldera (tambor de vapor y tambor de lodos); los tubos generadores del hogar van conectados a colectores ubicados en el piso y techo de la caldera [6].

SOBRECALENTADOR: Intercambiador de calor que aprovecha la energía térmica de los gases de combustión para elevar la temperatura del vapor generado en la caldera por encima de la temperatura de saturación, (750°F) [6].

Figura 2. Esquema de las calderas de Servicios Industriales



HOGAR: Espacio o cámara donde se produce la combustión. En éste, el calor generado es transferido por radiación a las paredes de tubos que le dan su contorno. Estas paredes de tubos generadores o evaporadores son: paredes laterales, pared de pantalla, pared de quemadores, piso, techo, tubos colgantes, cabezales, y los que están en el plano de salida del hogar

ECONOMIZADOR: Es un intercambiador de calor con el haz de tubos en forma de “U” que va dispuesto horizontalmente detrás del banco principal de la caldera. Consta de 266 filas de tubos de 2 pulgadas de diámetro de superficie lisa. En este equipo el agua intercambia calor con los gases y sale a través de un tubo de 6 pulgadas que lo conecta con el tambor de vapor.

CALENTADOR DE AIRE: Intercambiador de calor de tipo tubular con área efectiva de 30600 ft² diseñado para transferir calor de los gases de combustión al aire.

PRECALENTADOR DE AIRE: Intercambiador de calor que se utiliza para subir la temperatura del aire de combustión con la energía remanente del vapor. Utiliza 3 a 4 Klb/h de vapor de 50 psig el cual se condensa y luego es descargado en el tambor identificado con código interno D-2955.

VENTILADOR DE TIRO FORZADO (Identificado con código interno VTF): Ventilador de aire para la combustión de la caldera fabricado por DISTRAL, de entrada doble, carcasa divisible y pedestales independientes. El diseño contempla una capacidad de 98288 SCFM – pies cúbicos por minutos (413.4 Klb/hr), con una presión estática de entrada de 0,8 psi [6].

EQUIPO DE COMBUSTION: La cámara de aire o Windbox es de lámina de acero soldada y llevan soportes y refuerzos para que su construcción sea a prueba de escapes. Los quemadores están diseñados para quemar gas y/o aceite combustible, con capacidad de diseño de 119 MBTU/hr de gas o 109 MBTU/hr de aceite. Están diseñados para reducir las emisiones de NOx térmico y NOx del combustible.

SISTEMA DE IGNICIÓN: Su función es proporcionar el encendido de los pilotos de los quemadores de la caldera. Está compuesto por las bujías, los transformadores voltaje de 125 VAC (corriente alterna) a 6000 VDC (corriente continua).

CIRCUITO AGUA- VAPOR: El agua desairada (a 260°F) entra al economizador, donde se calienta hasta una temperatura próxima a la de saturación (290°F - 300°F) luego se introduce en el domo superior y desciende por los tubos del banco principal o tubos bajantes hasta el colector inferior, distribuyéndose hacia los tubos de paredes de agua (vaporizadores o elevadores), donde se forman las burbujas de vapor que a su vez se separan en el tambor superior. El vapor saturado generado (489°F) se calienta por encima de su temperatura de saturación en el sobre calentador (750°F).

CIRCUITO AIRE DE COMBUSTIÓN: El aire requerido para la combustión descargado por el ventilador de tiro forzado es regulado por el dámper y antes de llegar a los quemadores es obligado a pasar por dos intercambiadores de

calor; el primero es el pre calentador de aire donde aprovecha el calor transferido con vapor de 50 psig para subir su temperatura de 75°F a 155°F, el segundo es el calentador de aire a través del cual, en dos pasos, absorbe la energía de los gases calientes de combustión antes de salir por la chimenea. En este punto el aire puede alcanzar una temperatura cercana a 392°F.

En la figura 3 se muestran los elementos básicos para el proceso de producción de vapor, este inicia con la entrada de agua desmineralizada a las calderas por el economizador, donde se aumenta la temperatura del agua, al aprovechar el intercambio de calor con los gases de combustión que provienen de la zona de combustión de la caldera y se desplazan hacia la chimenea. Este aumento de temperatura hace que se requiera menos combustible para evaporar el agua, mejorando los índices de eficiencia de la caldera.

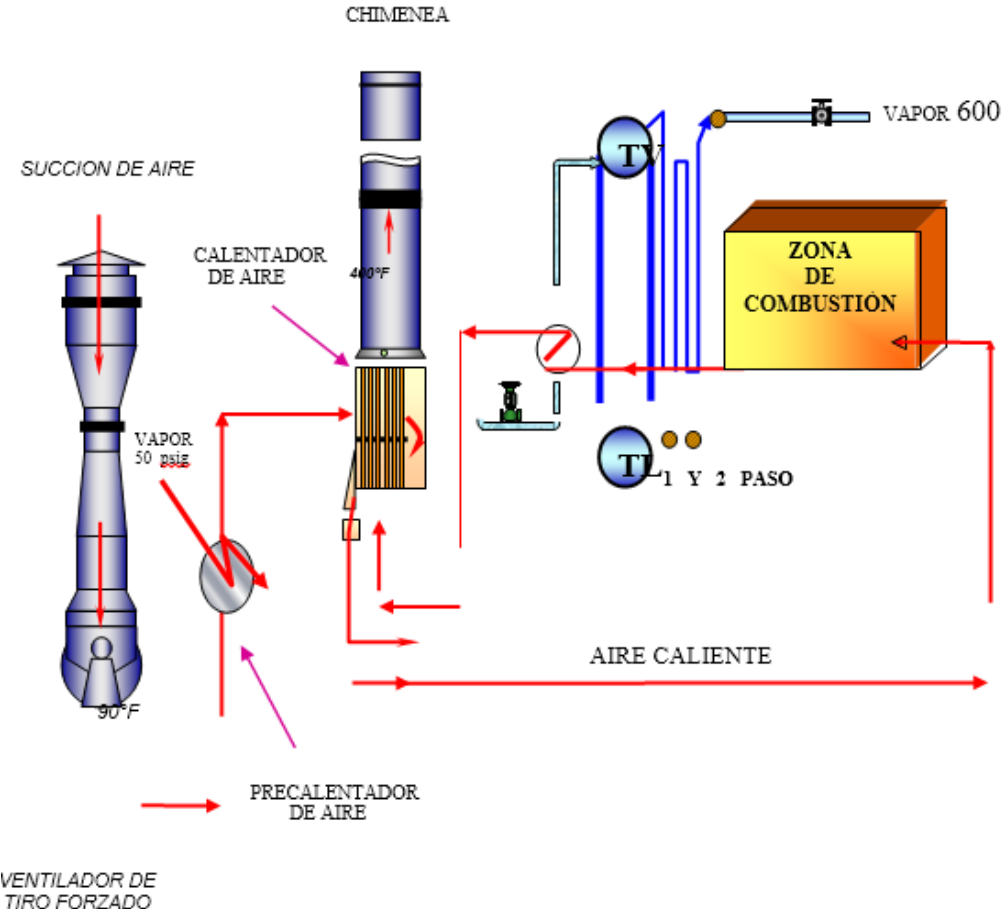
Posteriormente, inicia una circulación natural por diferencias de densidades, en donde el agua en el tambor de vapor pasa al tambor de lodos a través de la tubería (tubos bajantes o tubos de agua) que los comunica. Del tambor de lodos salen dos cabezales laterales a partir de los cuales se conforman las paredes laterales del hogar de la caldera; otras tuberías salen directamente del tambor de lodos, formando la pared de pantalla, pared de quemadores, piso del hogar y ático (tubos elevadores o generadores de vapor) que, en conjunto, forman el hogar de la caldera.

Los tubos generadores son calentados principalmente por la radiación que produce la quema del combustible en el hogar, haciendo que en su interior se genere vapor húmedo. El vapor producido pasa a través de unos paneles secadores ubicados en la parte superior del interior del tambor de vapor para obtener un vapor seco.

Finalmente, el vapor pasa por los tubos del súper calentador a fin de aumentar su temperatura, aprovechando la energía de los gases de combustión en la zona de convección de la caldera. El vapor sobrecalentado sale de la caldera hacia el cabezal de vapor de 600 psig (libras por pulgada cuadrada manométricas), para ser distribuido a los usuarios, a lo largo de la unidad de balance.

El aire con que se produce la combustión proviene directamente de la atmósfera y entra a la caldera a temperatura ambiente por el ventilador de tiro forzado, el aire regulado accede al pre-calentador de aire por el lado externo de los tubos, donde hace intercambio con vapor de 50 psig, para aumentar levemente su temperatura; posteriormente continúa al calentador de aire en donde el aire se dirige por el lado externo de los tubos, para ganar temperatura de los gases de combustión que circulan por entre los tubos del calentador de aire. El aire es conducido a través de un ducto llamado caja de aire para finalmente llegar a los quemadores, entrando así al hogar de la caldera, donde se origina la combustión al mezclarse con el gas combustible que se compone por una mezcla de gases.

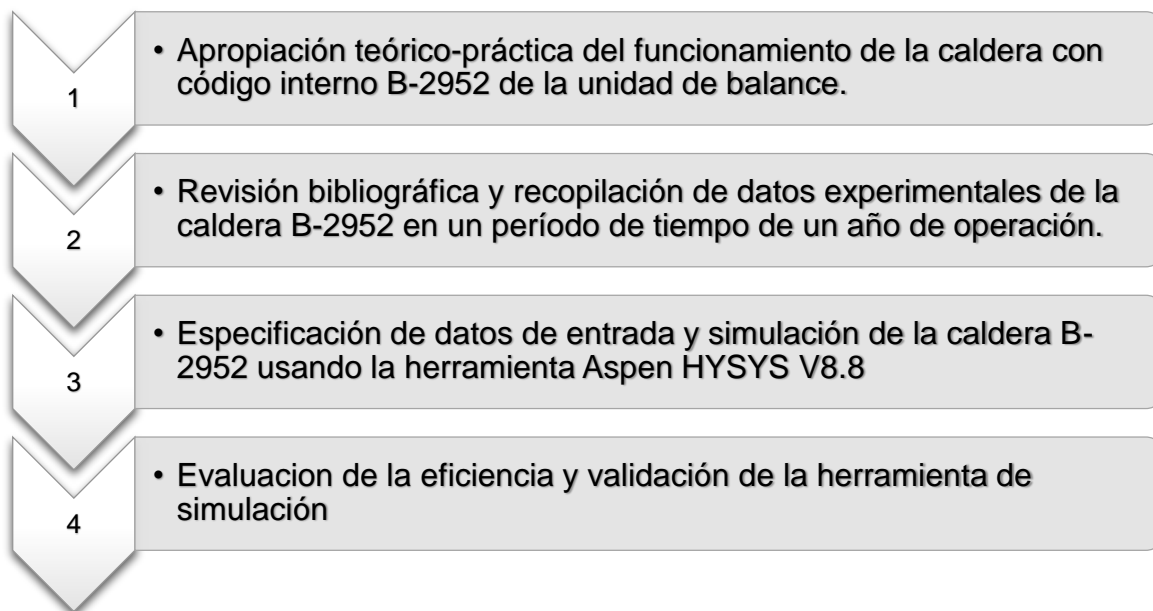
Figura 3. Elementos del proceso de producción de vapor



2. METODOLOGÍA

Se plantearon 4 etapas que se pueden ver en la figura 4 para el desarrollo de una herramienta de simulación de la caldera B-2952 de la unidad de balance.

Figura 4. Etapas para el desarrollo del proyecto



2.1. Apropriación teórico-práctica del funcionamiento de la caldera con código interno B-2952 de la unidad de balance.

Para esta etapa del proyecto se realizaron visitas a la unidad de Balance de la refinería de Ecopetrol S.A, así como una recopilación de información acerca del funcionamiento de las calderas. Se hizo la identificación de las principales variables asociadas a la caldera; se hizo un estudio detallado de los manuales de descripción del proceso, realización del balance de masa y toma de información suministrada por ECOPETROL S.A.

2.2. Revisión bibliográfica y recopilación de datos experimentales de la caldera B-2952 en un período de tiempo de un año de operación

La búsqueda de información se hizo conforme al tema de interés; se documentó y se tomó referencias de libros, tesis doctorales, artículos y manuales, los puntos clave de esta búsqueda fueron: calderas, modelos termodinámicos, manuales de Hysys, cálculo de pérdidas en calor y cálculo de eficiencias.

Se hizo la recopilación de los datos históricos suministrados por ECOPETROL S.A. del primero de diciembre del 2014 al primero de diciembre del 2015, entre las variables presentes están: temperatura a la entrada del calentador (código interno TI_29509), temperatura de gases entrada economizador (TI_29508), temperatura de gases salida economizador (código interno TI_29511), temperatura de gases a chimenea (código interno TI_29512), temperatura del agua al economizador (código interno TI_29536), temperatura del vapor generado (código interno TI_29513), flujo agua de alimentación (código interno FIC_29509.PV), flujo vapor producción de 600 psi (código interno FIC_29508.PV), flujo de gas de combustión (código interno FIC_29507.PV), flujo aire de combustión (código interno FIC_29510.PV), exceso de oxígeno (código interno AIC_29502), eficiencia (código interno EFIC_2952).

2.3. Especificación de datos de entrada y simulación de la caldera B-2952 usando la herramienta Aspen HYSYS V8.8

Los datos usados para la simulación de la caldera se tomaron de los históricos recopilados del archivo de ECOPETROL S.A.; estos fueron depurados, usando el método de diagrama de caja [7], lo que permitió determinar los valores atípicos, que posteriormente fueron eliminados de la base de datos. Al eliminar los datos atípicos se estimó y se generó un intervalo de confianza del 95%, para proporcionar una estimación puntual y confiable con el fin de aumentar la calidad de la información recopilada [7].

El proceso básico que se usó en Aspen HYSYS fue:

2.3.1. Lista de componentes (Component List)

Selección de los componentes que se usaron en el proceso, para la combustión se requiere de aire y un combustible que consiste en una mezcla de gases. De la librería se escogieron los compuestos necesarios para las corrientes del proceso: metano, propano, i-butano, n-butano, i-pentano, etano, etileno, propeno, agua, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, ácido sulfhídrico, monóxido de carbono, dióxido de carbono, aire.

2.3.2. Paquete de fluidos

La selección del paquete de fluidos es importante en la simulación, aquí se escogen los modelos que representan el comportamiento de las distintas fases (sólido, líquido y vapor) según el valor de las variables termodinámicas: presión, temperatura y volumen, así como su composición.

Los modelos recomendados para la simulación son Peng Robinson (PR) y sus variantes PR-SV, SOUR PR, Soave-Redlich-Kwong (SRK) y sus variantes SRK EOS, SOUR SRK [8], estos dos modelos requieren el uso de coeficientes de interacción binarias para considerar las mezclas multi-componentes [8], [9].

2.3.3. Set de reacciones

Se definieron las reacciones involucradas en el proceso, para ello, en la ventana de propiedades (reacciones) se ingresan todas las reacciones posibles que se puedan involucrar con la mezcla de gases y el aire. Se consideraron la reacción del hidrogeno con oxígeno para la formación de agua, monóxido de carbono y oxígeno para la formación de dióxido de carbono, y los hidrocarburos que junto con el aire reaccionan para formar agua y dióxido de carbono.

2.4. Simulación del Proceso

Como el software de simulación no posee en su biblioteca de equipos un generador de vapor, se simuló el proceso que lleva a cabo la generación de vapor.

El proceso y los equipos usados para la simulación de la caldera acuo-tubular B-2952 fueron:

El aire de entrada al horno y que se usa para el proceso de combustión, primero es calentado en un calentador (heater) y es llevado de una temperatura de 60°F a 150°F, posterior a ello se aprovecha una parte del calor de los gases de chimenea usando un intercambiador de tubo y carcasa (heat exchanger) para calentar aún más el aire hasta una temperatura de 350°F. La mezcla de gases proviene de una etapa anterior y por ello entran al horno con una temperatura de 90°F.

El agua de calderas entra a un tren de intercambiadores de calor tipo tubo y carcasa para producir el vapor que se usará en la planta, estas tres zonas son el economizador, que lleva el agua de 260°F y una presión de 790 psia a 350°F; el tambor para pasar a una temperatura de 496°F y una presión de 650 psia y finalmente al súper calentador para llevarlos a una temperatura final de 750°F (398,9°C) que será el vapor final usado para los servicios industriales de la planta.

2.5. Evaluación de la eficiencia y validación de la herramienta de simulación

Posterior a ingresar los componentes, elegir el mejor paquete termodinámico, y diseñar el proceso para la generación de vapor, se evaluó la eficiencia; conocer la eficiencia del equipo ayudará a adoptar medidas para mejor u optimizar el proceso de generación de vapor. Para calcular la eficiencia del generador de vapor se usó como referencia el código PTC 4.1 para unidades de generación de vapor del ASME, aquí se establecen dos métodos para el cálculo de la eficiencia, métodos por pérdidas de calor, y el de entradas y salidas (Directo) [10],[11].

2.5.1. Método de pérdidas de calor

El método por pérdidas de calor determina la eficiencia mediante la sustracción en porcentaje de cada una de las pérdidas de la caldera, cálculo por pérdida de los gases de combustión, cálculo de pérdidas por incombustión química, combustión

mecánicamente incompleta, pérdidas por radiación y conducción [12], la ecuación que denota este método es:

$$n = 100 - \sum Q \quad (1)$$

Donde:

$n = \text{Eficiencia}$

$\sum Q = \text{pérdidas de calor por gases de combustión, incombustión química, combustión mecánicamente incompleta, radiación y conducción, pérdidas por ceniza.}$

2.5.1.1. Cálculo por pérdidas de los gases de combustión

Los gases al salir de la caldera tienen una alta temperatura, por lo que arrastran consigo una determinada cantidad de calor sensible hacia la atmósfera, constituyendo esto una pérdida para el generador de vapor, pues ese calor procede del calor disponible y no ha podido ser convertido en calor útil. La pérdida por calor en los gases de escape es la mayor de todas las pérdidas que ocurren en el generador. Generalmente esta pérdida corresponde entre un 5 a 30% de la pérdida total.

$$q = \frac{V_G * C_p * \rho * (T_{gas} - T_{amb})}{VCI} * 100 \quad (2)$$

Donde:

$V_G = \text{volumen del gas de escape } \frac{m^3}{kg}$

$C_p = \text{capacidad calorífica media de los gases a presión constante } \frac{kJ}{m^3 * kg}$

$\rho = \text{densidad de los gases de combustión } \frac{kg}{m^3}$

$T_{gas} = \text{temperatura de los gases de escape } K$

T_{amb} = temperatura del medio ambiente K

$$VCI = \text{Poder calorífico} \frac{kJ}{kg}$$

2.5.1.2. Cálculo de pérdidas por incombustión química

La pérdida por incombustión química tiene su origen en el hecho de que no todo el carbono y demás sustancias combustibles, encuentran la cantidad suficiente de oxígeno como para sufrir una oxidación total, lo cual trae como consecuencia que en la reacción, cierta cantidad de combustible solo llegue a productos intermedios, dejándose de desprender una determinada cantidad de calor.

$$q = \frac{237(C + 0,375 * S)CO}{(RO_2 + CO)VCI} * 100 \quad (3)$$

Donde:

C, S = Contenido de carbono y azúfre en el combustible, %

CO = Contenido de monóxido de carbono en los gases de escape, %

RO_2 = Contenido de dióxido de carbono y dióxido de azúfre, %

$$VCI = \text{Poder calorífico} \frac{kJ}{kg}$$

2.5.1.3. Cálculo de pérdidas por combustión mecánicamente incompleta

La pérdida por incombustión mecánica tiene su origen en el hecho que, en ocasiones en una combustión real, una pequeña parte de las sustancias combustibles, no encuentra oxígeno y no se quema. Este combustible no quemado puede tomar dos caminos, irse por el extractor de gases, constituyendo parte de los residuos volátiles o quedarse en la parrilla del horno y en los ceniceros, para formar parte de los residuos que deberán ser extraídos mediante limpiezas.

Estas pérdidas son debidas fundamentalmente a la presencia de partículas de carbono y hollín en los gases.

2.5.1.4. Cálculo de pérdida por radiación y conducción

La parte fundamental del calor perdido sale por conducción a través de las paredes, por lo que, la magnitud de esta pérdida va a depender directamente de las características aislantes de las mismas. Dado que en la actualidad las paredes son construcciones típicas ya estandarizadas, la magnitud de la pérdida puede ponerse en función del área exterior del generador, la que a su vez depende de la potencia del equipo, pues es esta la que decide su tamaño.

$$q = \frac{h * \sum Apa * (Tpar - Tam)}{1000 * B * VCI} \quad (4)$$

$$h = 9,5 + 0,08 * (Tpar - Tam) \quad (5)$$

Donde:

h = Coeficiente de transferencia por radiación y conducción

$\sum Apa$ = Área total de las paredes

$Tgas$ = temperatura de los gases de escape K

$Tamb$ = temperatura del medio ambiente K

B = Flujo de combustible

VCI = Poder calorífico $\frac{kJ}{kg}$

Se definieron algunos flujos, temperaturas y eficiencias como variables importantes para validar los resultados de la simulación. La validación consistió en la comparación entre los valores de las variables descritas anteriormente simuladas y los valores reales de la unidad B-2952. Se toleró una desviación no superior al 20% entre los datos simulados y reales para validar la simulación.

2.5.2. Método directo

En el método directo, la eficiencia de una caldera se define como la relación entre la energía aprovechada en la transformación del agua en vapor, y la energía suministrada por el combustible [12].

Para el método directo se requiere evaluar lo siguiente:

- Calor que entra con el combustible.
- Calor que entra con el agua de alimentación.
- Calor que entra por créditos.
- Calor que sale con el vapor generado.
- Calor que sale con la purga continúa.
- Calor que sale con las pérdidas en el generador de vapor

La ecuación para el cálculo de la eficiencia usando el método directo es:

$$Eficiencia = \frac{Q \text{ aprovechado}}{Q \text{ suministrado}} * 100 \quad (6)$$

Para el cálculo de la eficiencia de la caldera B-2952 se usó el método directo, debido a los problemas que se tiene en el quemador, en la cámara de combustión y los derivados de la relación aire/combustible para obtener una combustión completa, se hizo el cálculo de pérdidas por radiación y conducción.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados y análisis de datos

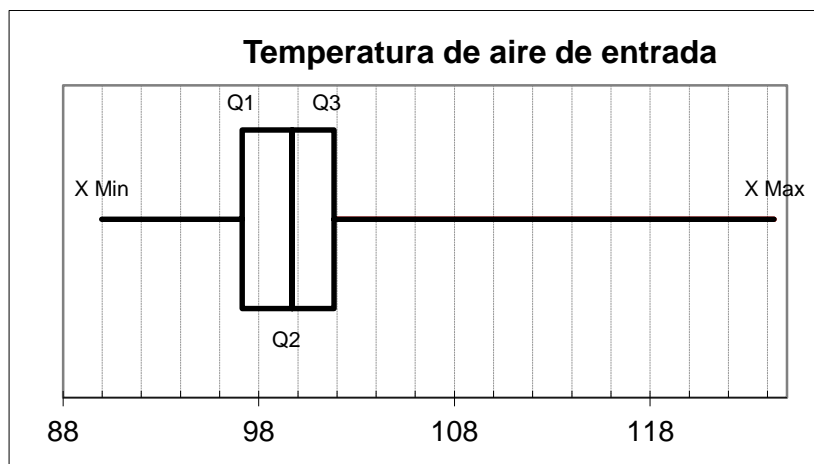
A los valores suministrados por ECOPETROL S.A. y debido a la gran variabilidad de los datos, se les realizó un análisis exploratorio. Estos datos abarcan la fecha comprendida entre el primero de diciembre del 2014 al primero de diciembre del 2015. El método usado para eliminar valores atípicos fue el diagrama de caja, comúnmente llamado diagrama de caja y bigotes; en él se exhiben los tres cuartiles, el mínimo y el máximo de los datos en una caja rectangular, alineada en forma horizontal o vertical. La caja encierra el intervalo intercuartil con la línea izquierda en el primer cuartil y la línea derecha en el tercer cuartil.

A manera de ejemplo, en la tabla 1 se presentan los cuartiles, mínimo y máximo para los históricos de la variable temperatura de aire a la entrada, como se puede observar, la mínima temperatura entre la fecha de los datos tomados fue de 89,98°F y el máximo valor fue de 124,34°F. El diagrama de caja ilustra mejor los valores atípicos de la variable temperatura de entrada del aire, ver figura 5. Los análisis de datos de las demás variables se encuentran en el anexo A. Posterior a eso, solo se dejaron los valores comprendidos entre el Q1 y Q3, con el fin de establecer un intervalo de confianza y tener datos con más exactitud.

Tabla 1. Valores de los cuartiles, mínimo y máximo para medidor de temperatura de aire a la entrada

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
89,98	97,15	99,71	101,84	124,34

Figura 5. Diagrama de caja para la temperatura de aire de entrada



Eliminar los valores atípicos permite tener más claridad de los datos que normalmente maneja la refinería, pero se hace necesario aumentar la calidad y precisión de los mismos, para ello se estima un intervalo de confianza con un 95%. En la tabla 2 se muestra el intervalo de confianza para la variable temperatura de entrada del aire, y se obtiene que el rango de entrada más frecuente entre el primero de diciembre del 2014 al primero de diciembre del 2015 es de 99,38 – 99,81 °F. En el anexo B se pueden encontrar el análisis de las demás variables.

Tabla 2. Intervalo de confianza para la temperatura de entrada del aire

Variable	Valor
Tamaño muestra	182,00
Media	99,59
Cuasi desviación	1,47
Intervalo de confianza (%)	95
1-Alfa	0,05
Margen de error (%)	0,21
Intervalo de confianza [°F]	99,38
	99,81

3.2. Resultados y análisis de la simulación

Los resultados obtenidos por la simulación son presentados a continuación, lista de componentes, paquete de fluidos y entorno de simulación.

3.2.1. Lista de componentes

Para comenzar con la simulación, primero se fijaron los componentes que involucra el proceso, aire y combustible; los datos históricos muestran variaciones en la composición del gas; estas variaciones se deben a tres tipos de desvíos; desvíos de propano a la red de gas combustible, este se genera en las unidades de ruptura catalítica, los cambios de composición son debido a fallas en las presiones de trabajo o la calidad del producto que se está manejando.

Desvíos de GLP originados en las unidades de ruptura catalítica, se hace para mejorar el poder calorífico del gas combustible de manera controlada, para esto se requiere el paso del GLP por un vaporizador que garantiza el estado gaseoso y minimiza la presencia del butano líquido, este desvío consta de n-butano, propano, i-butano y etano con 60, 9, 30 y 1% respectivamente.

Desvíos de Etano-Etileno, estos desvíos se realizan desde las unidades de craqueo catalítico o desde la planta de etileno, se puede desviar con una mezcla aproximada de 50%.

Cada uno de estos desvíos genera cambios bruscos en la composición del gas combustible, ver anexo C, para conocer la composición de gas combustible de entrada, se depuraron los datos históricos de la cromatografía de gases a la entrada del proceso, al eliminar los datos muy atípicos y atípicos, se obtiene la composición que se usó en la simulación, el óptimo de la composición se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Composición de gas de entrada

COMPOSICIÓN DEL GAS DE ENTRADA	
Componentes	% mol
Sulfuro de hidrógeno	0,23
Etileno	0,82
Etano	2,42
Dióxido de carbono	0,19
Propileno	1,37
Propano	0,93

Oxígeno	0,03
Nitrógeno	2,32
n-Butano	0,42
Monóxido de carbono	0,61
Metano	75,22
i-Pentano	0,31
i-Butano	0,41
Hidrogeno	13,90
Oleo finas	0,82

3.2.2. Paquete de fluidos

El segundo paso para continuar con la simulación es escoger un paquete de fluidos apropiado para el proceso. El paquete de fluidos recomendado para este tipo de procesos fueron Peng Robinson (PR) y sus variantes, Soave-Redlich-Kwong (SRK) y sus variantes, para escoger el mejor paquete termodinámico se usaron los dos modelos y se compararon los datos arrojados por la simulación con los datos obtenidos de la base de datos de ECOPETROL S.A. En la tabla 4 se muestra los resultados obtenidos al comparar el dato teórico (suministrado por Ecopetrol) y el dato generado en la simulación, para este caso se tomó el medidor de temperatura a la entrada del economizador (código interno TI_29508), y el medidor de temperatura a la salida del economizador (código interno TI_29511). Para hallar el porcentaje de error se usó la ecuación

$$\%Error = Abs \left(\frac{Valor simulado - Valor real}{Valor real} \right) * 100 \quad (7)$$

Tabla 4. Comparación de los 2 paquetes termodinámicos, PR y SRK

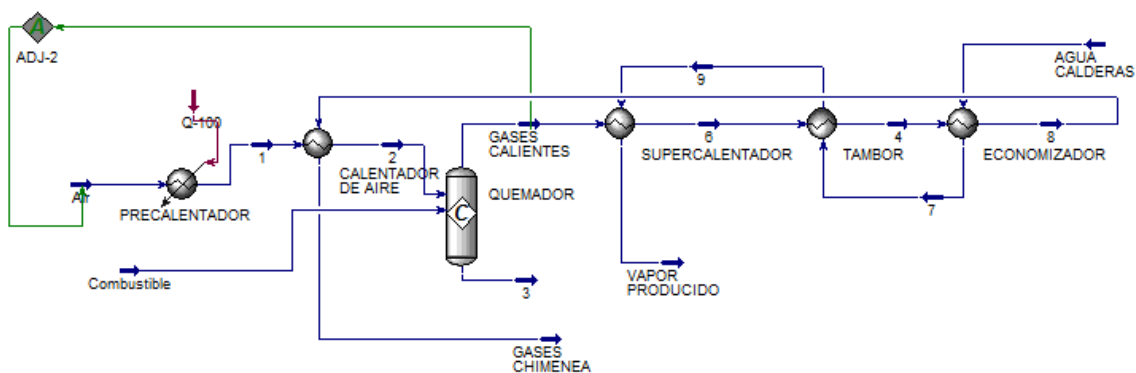
Corriente	DATO REAL [°F]	SOAVE REDLICH KWONG.		PENG ROBINSON	
		SIMULADO	ERROR %	SIMULADO	ERROR %
TI_29508	647	693,5	7,2	698,1	7,9
TI_29511	525	550,2	4,8	552,3	5,2

De acuerdo con la tabla 4, se observa que, al comparar el porcentaje de error, es posible usar cualquiera de los dos paquetes de fluidos para la simulación, por esta razón se escogió el de menor error, Soave-Redlich-Kwong.

3.2.3. Entorno de simulación

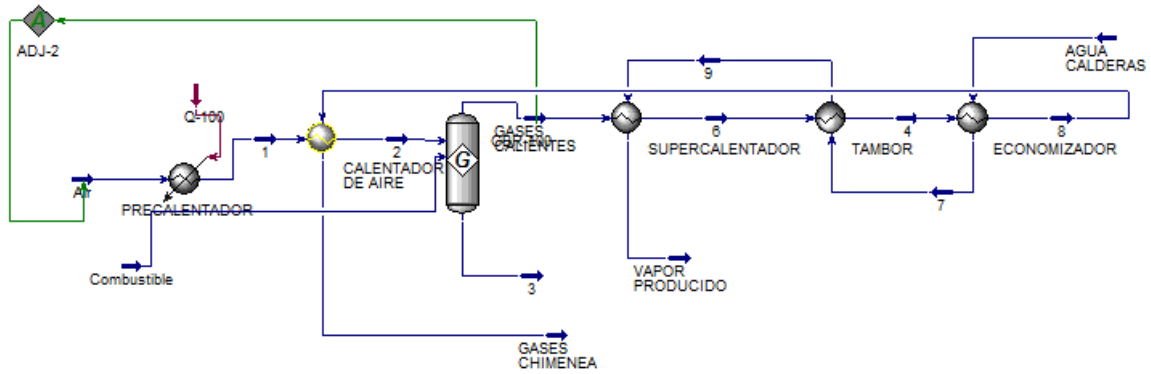
En la figura 6 se muestra el diagrama de la caldera acuo-tubular, contó con seis equipos de los cuales 5 fueron intercambiadores de calor de tubo y carcasa, y el reactor donde ocurre la combustión. La simulación contó con dos partes, en la primera se trabajó con un reactor de conversión con la suposición de que el combustible reaccionaba completamente, sin la formación de monóxido de carbono, y que el monóxido de carbono que entraba formaba, junto con oxígeno, dióxido de carbono.

Figura 6. Entorno de simulación usando reactor de conversión.



Para un segundo caso se cambió el reactor de conversión y se trabajó con un reactor de Gibbs para la cámara de combustión, en la figura 7 se puede ver el diagrama de simulación. Los Reactores de Gibbs calculan la composición de equilibrio de la corriente de salida minimizando la energía libre de Gibbs de la corriente de entrada. Solo se requiere especificar la estequiometría. Al minimizar la energía de Gibbs se producen las reacciones más probables. Este es un proceso espontáneo en la naturaleza. [13].

Figura 7. Ambiente de simulación con un reactor Gibbs



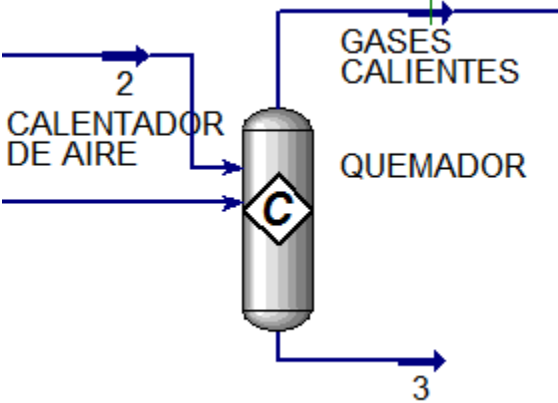
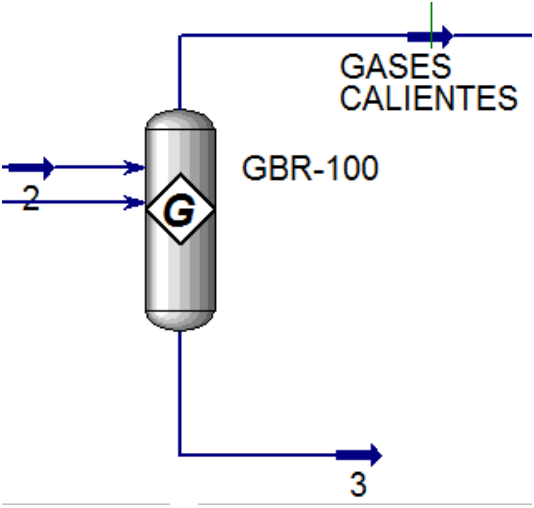
3.2.3.1. Reactor de conversión y reactor Gibbs

Como no se contó con una cromatografía de gases de salida, se optó por simular estos dos equipos.

A diferencia del reactor de conversión que se le suministró un valor de conversión del 100%, el reactor de Gibbs calcula la composición de equilibrio de la corriente de salida, solo requiere especificar la estequiometría del proceso. Al minimizar la energía de Gibbs se producen las reacciones más probables a las condiciones calculadas. Estos reactores no requieren de un set de reacciones, y la(s) reacción(es) solo se desplazan a la derecha.

Como se observa en la tabla 5, hay formación de CO, y la conversión de los hidrocarburos es muy cercana al 100%.

Tabla 5. Comparación de la composición de gas de salida, reactor de conversión y Gibbs

Equipo	Composición gases salida
<p>Reactor de Conversión</p>  <p>The diagram shows a vertical cylindrical reactor labeled 'C'. On the left, there are two input streams labeled '2'. The top one is labeled 'CALENTADOR DE AIRE' and the bottom one is unlabeled. The reactor is labeled 'QUEMADOR'. On the right, there is an output stream labeled 'GASES CALIENTES'. At the bottom, there is another output stream labeled '3'.</p>	<p>Methane 0,000000 Propane 0,000000 i-Butane 0,000000 n-Butane 0,000000 i-Pentane 0,000000 Ethane 0,000000 Ethylene 0,000000 H2O 0,166735 Nitrogen 0,723980 Oxygen 0,025018 Hydrogen 0,000000 H2S 0,000305 CO 0,000000 CO2 0,083963 Propene 0,000000</p>
<p>Reactor de Gibbs</p>  <p>The diagram shows a vertical cylindrical reactor labeled 'G' and 'GBR-100'. On the left, there are two input streams labeled '2'. On the right, there is an output stream labeled 'GASES CALIENTES'. At the bottom, there is another output stream labeled '3'.</p>	<p>Methane 0,000000 Propane 0,000000 i-Butane 0,000000 n-Butane 0,000000 i-Pentane 0,000000 Ethane 0,000000 Ethylene 0,000000 H2O 0,167925 Nitrogen 0,720768 Oxygen 0,024076 Hydrogen 0,001569 H2S 0,000310 CO 0,003796 CO2 0,081557 Propene 0,000000</p>

3.3. Validación de la simulación

La tabla 6 muestra los datos registrados por la refinería de Barrancabermeja y los valores obtenidos por la simulación de los medidores, temperatura a la entrada del economizador (TI_29508), temperatura a la salida del economizador (TI_29511) y temperatura gases de chimenea (TI_29512)

Tabla 6. Validación de simulación con los medidores de temperatura

Corriente	DATO MEDIDO [°F]	DATO SIMULADO [°F]	ERROR (%)
(TI_29508)	647	693,5	7,2
(TI_29511)	525	550,2	4,8
(TI_29512)	347	382	10,1

El cálculo de la eficiencia, ecuación 8, es la relación entre la cantidad de calor útil y la cantidad de calor disponible de la caldera.

$$\eta = \frac{\text{Calor util}}{\text{Calor disponible}} = \frac{m * (H_2 - H_1)}{M * VCI} \quad (8)$$

Donde

m = Producción de vapor

$(H_2 - H_1)$ = cambio de entalpías entre la entrada y salida de la caldera

M = consumo de combustible

VCI = Poder calorífico inferior

Los valores para el cálculo de la eficiencia se obtuvieron de la simulación, obteniendo un valor del 91,23%. Como existen pérdidas por radiación se tomó la ecuación 4 y 5, obteniendo un valor para la pérdida por radiación del 2,7369%. Los valores de la eficiencia se reportaron en la tabla 7.

Tabla 7. Porcentaje de error entre la eficiencia simulada y reportada por ECOPETROL S.A.

Corriente	Dato reportado Ecopetrol	Intervalo de confianza	Dato simulado (Método directo)	Dato calculado (Con pérdidas)	ERROR (%)
Eficiencia (%)	86,42	± 0,056	91,23	88,4931	2,40

En la tabla 7 se muestran los valores de eficiencia calculados por medio del método directo, así como el dato calculado con las pérdidas por radiación, estos valores se compararon con los datos históricos de eficiencia reportados por ECOPETROL S.A., el cual fue depurado usando el diagrama de caja, y con un intervalo de confianza del 95%, obteniendo una eficiencia de 86,42% para el año comprendido entre el primero de diciembre del 2014 al primero de diciembre del 2015.

Una vez calculados se halló el porcentaje de error, entre los dos valores, ecuación 7, obteniendo un porcentaje de error del 2,4%; es un error bastante alto, considerando que los equipos no están aprovechando toda la energía y existen partes dañadas dentro de la caldera, tubos e intercambiadores de calor ubicada en varias zonas. Estos daños generan que las temperaturas medidas y las calculadas con el software tengan porcentajes de error alto, estando en un rango del 4 al 10%.

Al variar los flujos de entrada a la caldera, la eficiencia mejorará, debido a que existirá una mayor cantidad de energía disponible para la transferencia con el agua que se encuentra en el exterior.

4. CONCLUSIONES

- Se desarrolló una simulación válida para la unidad de balance usando la herramienta Aspen Hysys V.8.8 y que pueda ser aplicada a las 5 calderas que constituyen esta unidad, construida con datos operacionales actuales, permitiendo analizar y prever soluciones a problemas futuros.
- El análisis estadístico de datos permitió conocer las variaciones que se presentan en la materia prima usada (gas combustible) en la planta durante un año, y como estas variaciones no controladas afecta altamente la eficiencia de las calderas.
- Escoger el modelo termodinámico no presento problemas cuando se representó el proceso, pero el uso de reactor de conversión y de Gibbs, generaron porcentajes de error altos en los medidores TI_29508, TI_29511, TI_29512, por lo que se determinó usar el reactor de conversión para representar el proceso.
- La eficiencia reportada por ECOPETROL S.A. es reportada por el DCS (sistema de control distribuido), en comparación con la eficiencia, generada con el método directo más las perdidas, y gracias al software se tiene una herramienta que determina mejor el desempeño de las calderas.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una cromatografía de los gases de chimenea para conocer la composición de gases de salida, y así realizar un balance de masa más preciso y real, conociendo la conversión real de los compuestos de entrada.
- Se recomienda realizar un análisis último a la entrada y salida del proceso para, con el fin de aplicar el método indirecto para el cálculo de las eficiencias.
- Realizar un estudio de costos, para ver el rendimiento operacional de la caldera.
- Se recomienda hacer un análisis a los procesos anteriores a la entrada de la unidad, con el fin de determinar las posibles causas de los desvíos no controlados.
- Se recomienda analizar el sistema de control de la unidad de balance, así como el DCS, para el cálculo de la eficiencia de las calderas.

BIBLIOGRAFIA

- BENH, O. Analisis de la eficiencia en calderas. Diciembre 2008, Santiago de Chile.
- BONILLA, J *et al.* Construcción de un generador de vapor con capacidad para 7.5 kg/hr de gasto a 10 Bar. de presión y 220°C y manual de uso, reglas de *seguridad y mantenimiento del mismo; así como prácticas de laboratorio.* Marzo 2004, Universidad de las Americas Puebla, Puebla.
- CAMPOS, J *et al.* Eficiencia Energética en la generación y distribución de vapor. [en línea] Marzo 2009. [Consultado 10 Diciembre 2015]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/vapor.pdf>.
- CORZO, C. Manual de Calderas. Enero 2015 Vol 1 pp 40-100 Barrancabermeja, Santander, Colombia: Servicios Industriales Balance.
- DEGLER, H. La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases. Barcelona 1987, Editorial REVERTÉ.
- HENAO, I *et al* Uso del paquete de simulacion en HYSYS. Noviembre edl 2002. Medellin.
- ECOPETROL, S.A. Reporte integrado de gestion Sostenible. Barrancabermeja, Santander, Colombia Ecopetrol S.A. [en línea] marzo del 2015 Vol 1 [consultado 2 febrero 2016]. Disponible en: [http://www.ecopetrol.com.co/documentos/Ecopetrol IA 2015 29marzo.pdf](http://www.ecopetrol.com.co/documentos/Ecopetrol_IA_2015_29marzo.pdf).
- ECOPETROL S.A. Resumen ejecutivo. Barrancabermeja: Ecopetrol S.A. [en línea] mayo del 2015 Vol 2 [consultado 3 febrero 2016]. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/documentos/inversionistas/Resumen-Ejecutivo-Informe-Sostenibilidad-2015.pdf>
- ECOPETROL. Instructivo operacional para la puesta en servicio de la caldera SB-2951. Santander. Barrancabermeja: Servicio Industriales de Balance. 2015 Vol 2 pp 230-340.

MONTGOMERY, D *et al.* Probabilidad y estadística para ingeniería y administración. México D.F., Mexico 1996, Compañía Editorial Continental S.A.

OCA, L *et al.* Simulación de una caldera de recuperación de calor utilizando el software HYSYS. Tecnología química, marzo del 2008.

PULL, E. Calderas de vapor: selección, funcionamiento y conservación de las calderas de vapor y de su equipo auxiliar. (G. Gili, Ed.) Barcelona 1972, España.

TECH, A. *Bases de simulación.* Mexico D.F, México Aspen Tech.

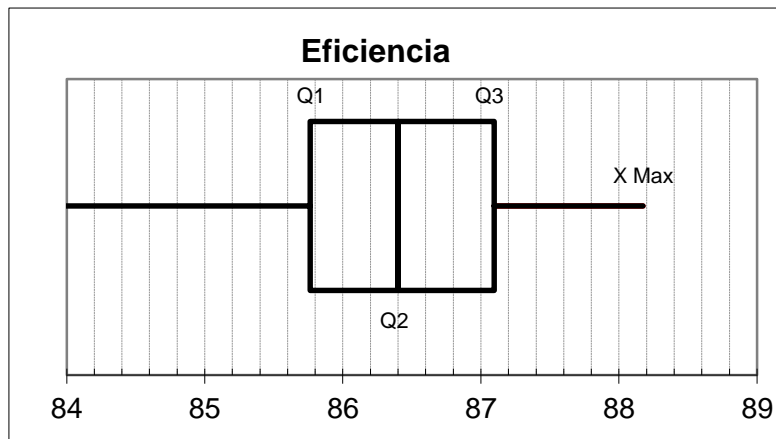
ANEXOS

Anexo A: Depuración de datos mediante el método de diagrama

La depuración de datos y eliminación de valores atípicos se realizó mediante el método de caja, obteniendo los valores X Min, Q1, Q2, Q3 y X Max; esto con el fin de eliminar los datos atípicos de cada una de las variables medidas, y que se encuentran en el registro de ECOPETROL S.A.

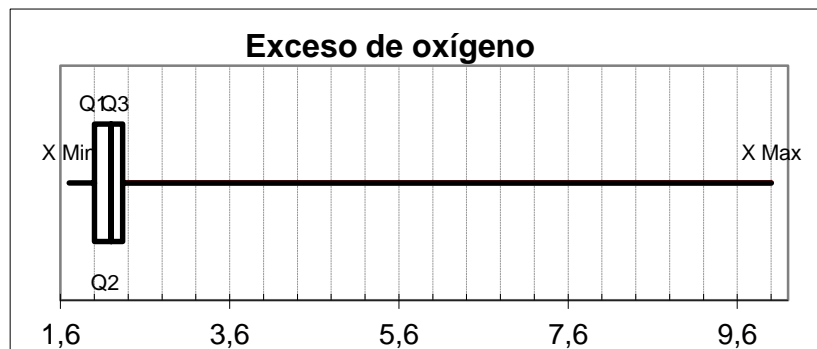
Eficiencia

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	85,76	86,40	87,10	88,17



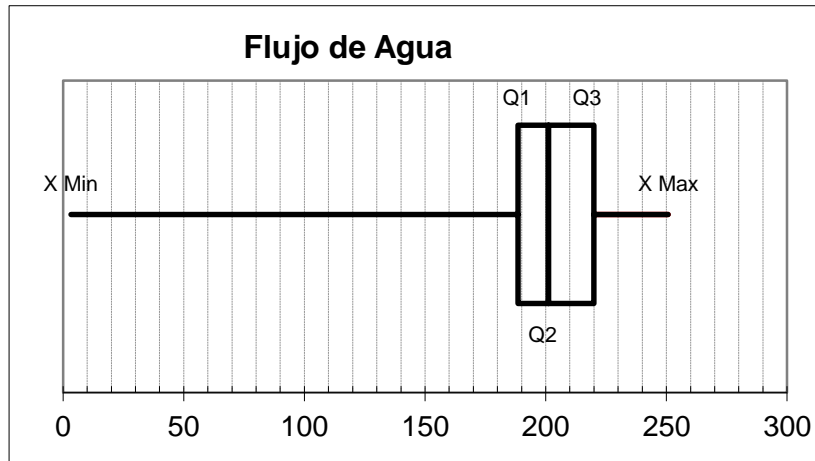
Exceso de Oxígeno

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
1,70	2,00	2,20	2,33	10,00



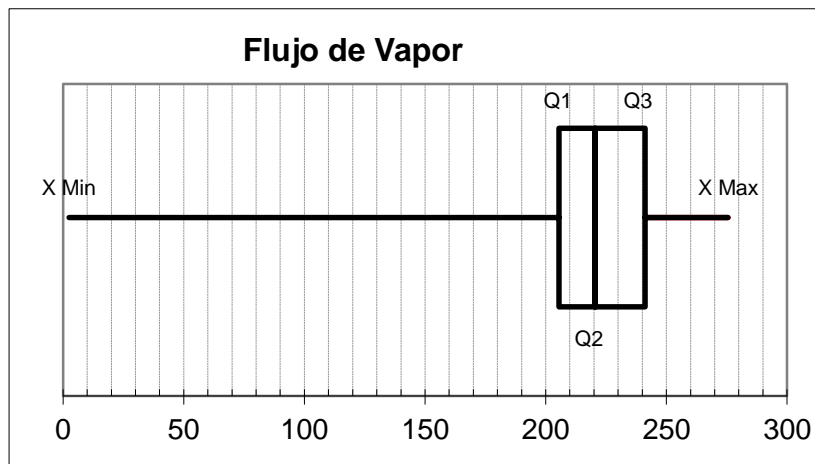
Flujo de agua de calderas

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
3,27	188,48	201,13	219,99	250,67



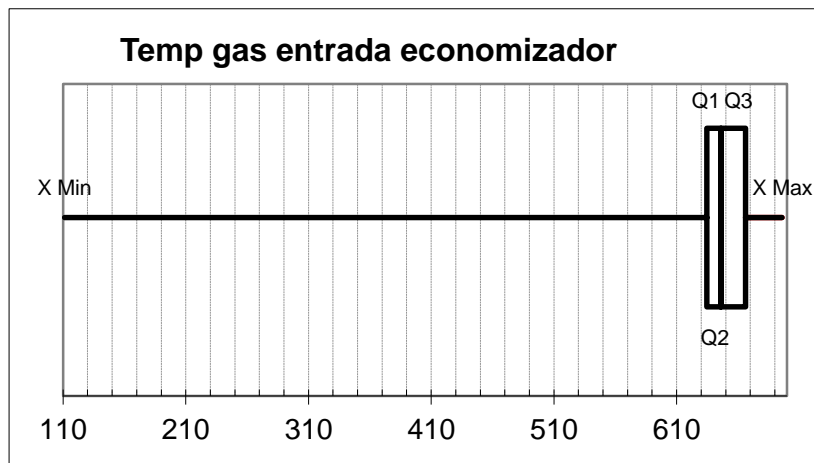
Flujo de vapor

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
2,43	205,49	220,41	241,12	275,51



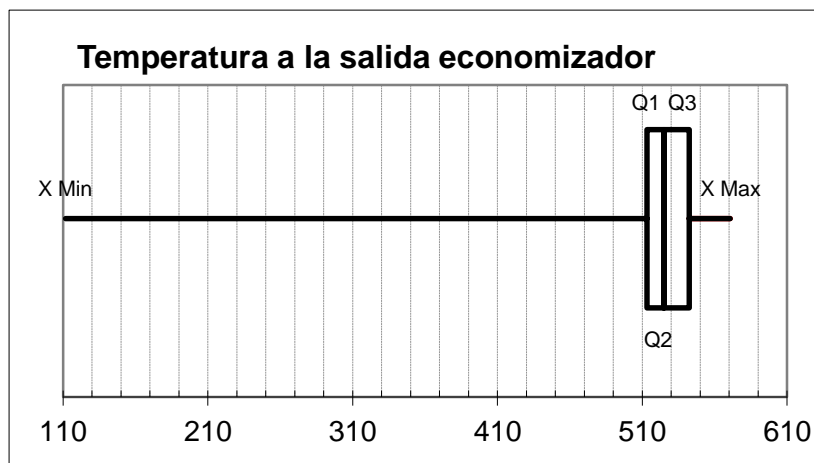
Temperatura de gas a la entrada al economizador

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
111,33	634,56	646,10	666,15	695,97



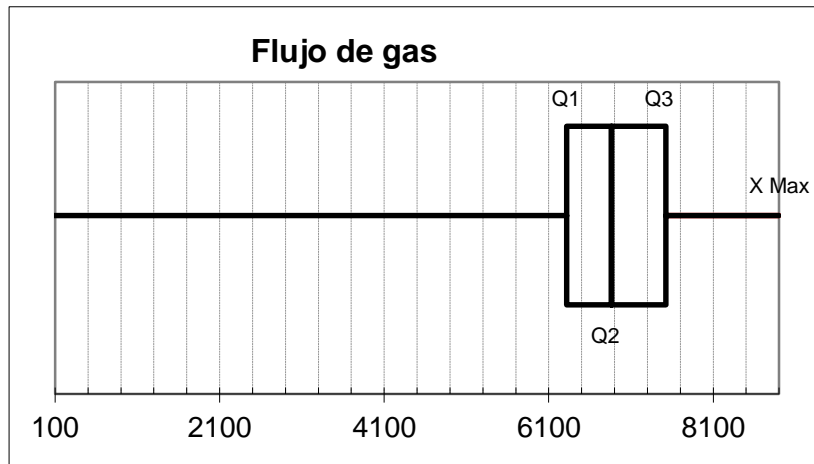
Temperatura del gas a la salida del economizador

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
111,61	513,17	525,05	542,54	570,67



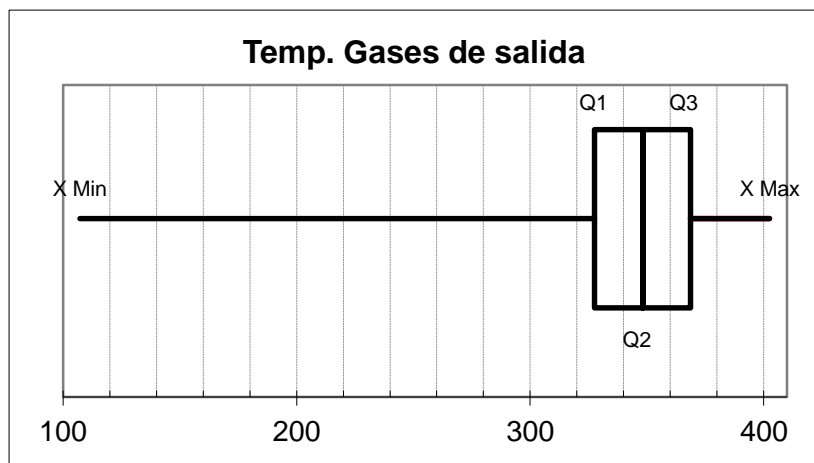
Flujo de gas combustión

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	6319,16	6860,63	7525,02	8897,60



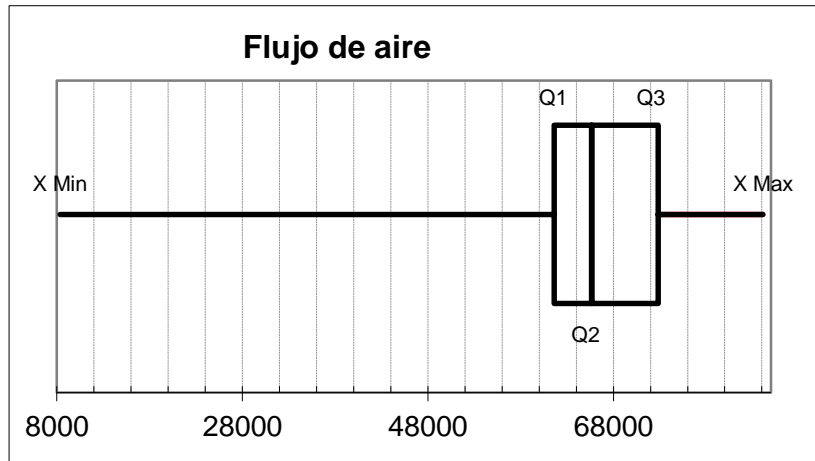
Temperatura de los gases a la salida

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
107,27	327,51	348,24	368,69	402,44



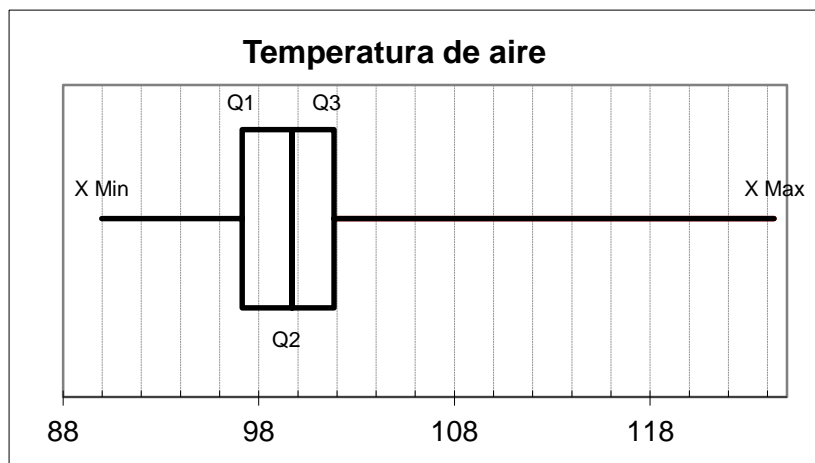
Flujo de aire

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
8354,36	61619,46	65634,34	72812,15	84097,83



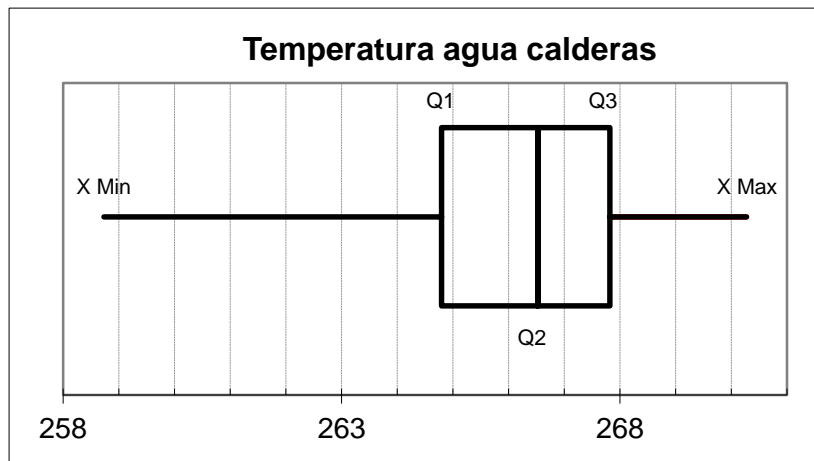
Temperatura de aire a la entrada

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
89,98	97,15	99,71	101,84	124,34



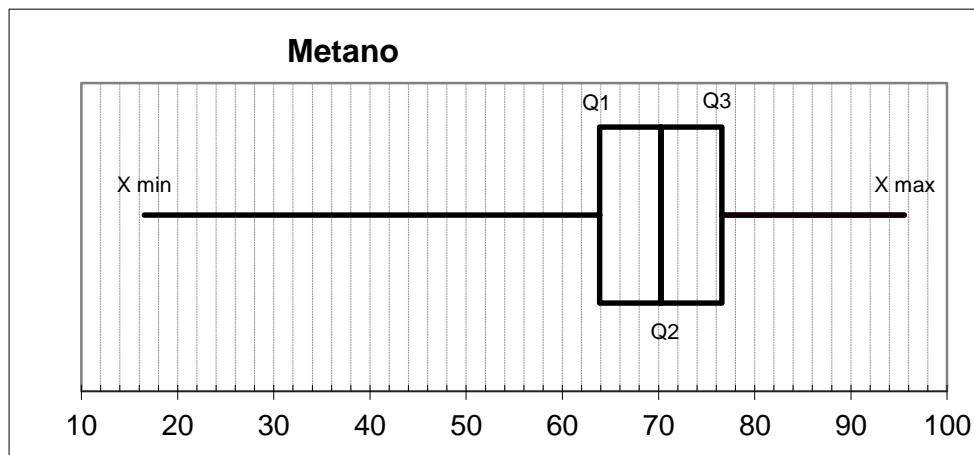
Temperatura de agua de calderas a la entrada

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
258,73	264,80	266,53	267,82	270,27



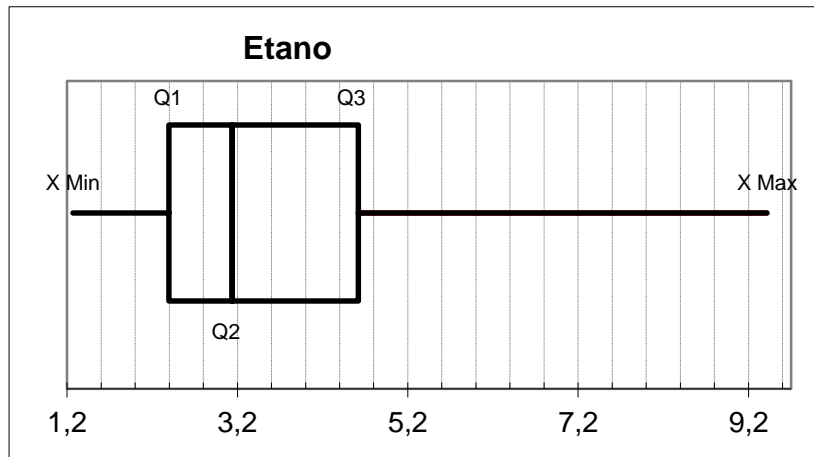
Metano

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
16,55	63,86	70,22	76,59	95,56



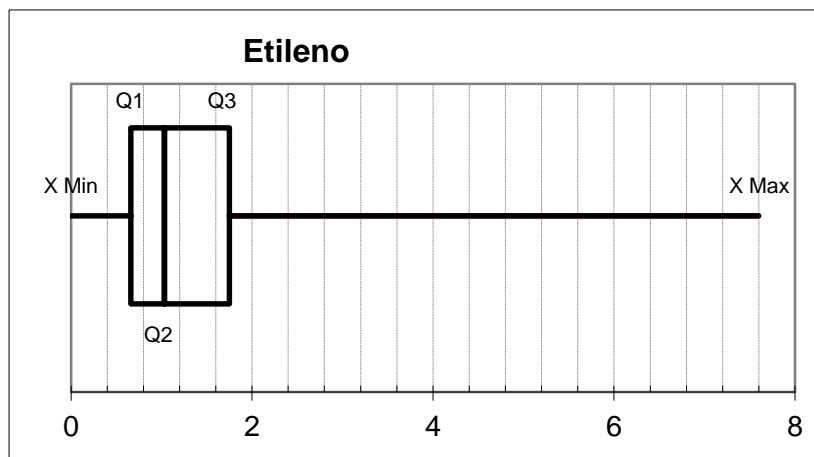
Etano

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
1,27	2,40	3,14	4,62	9,42



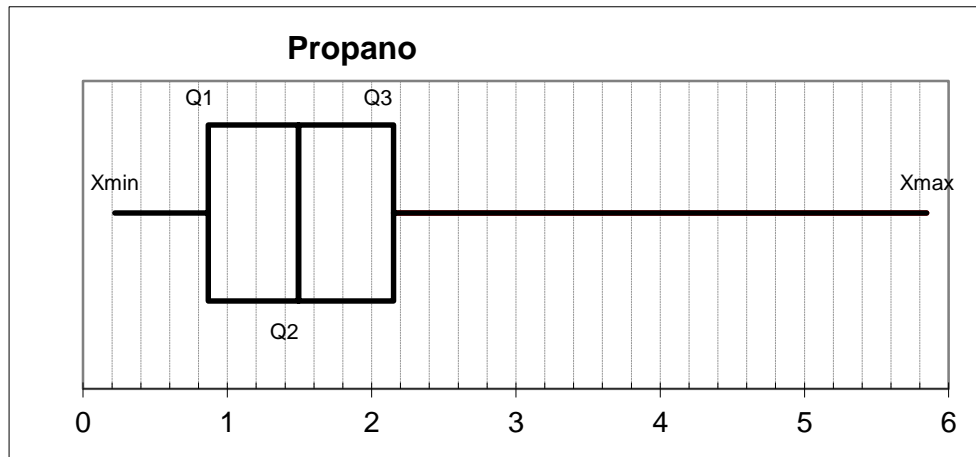
Etileno

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,66	1,03	1,75	7,60



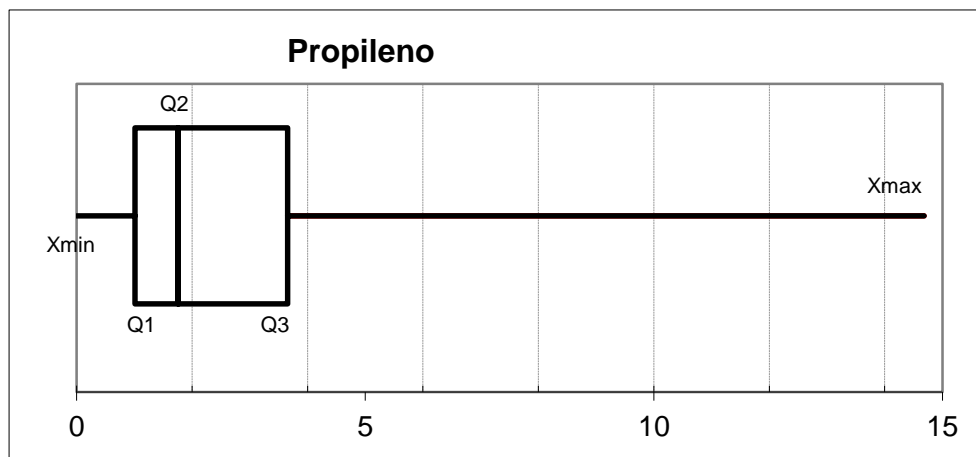
Propano

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,22	0,87	1,49	2,15	5,85



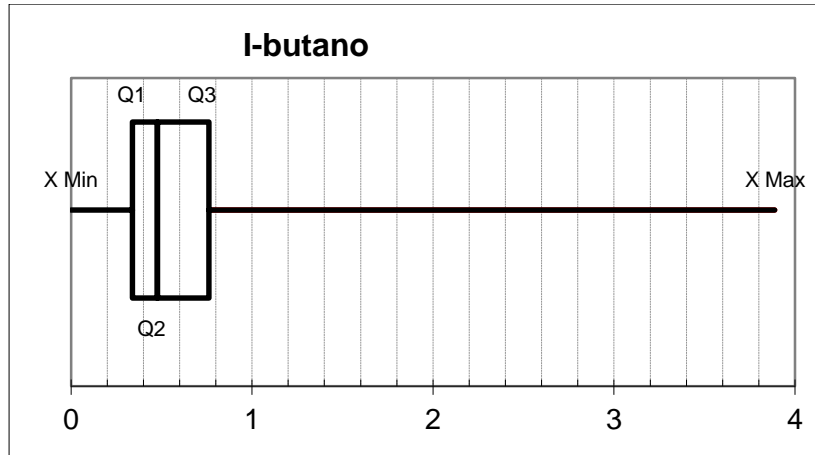
Propileno

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	1,01	1,76	3,65	14,69



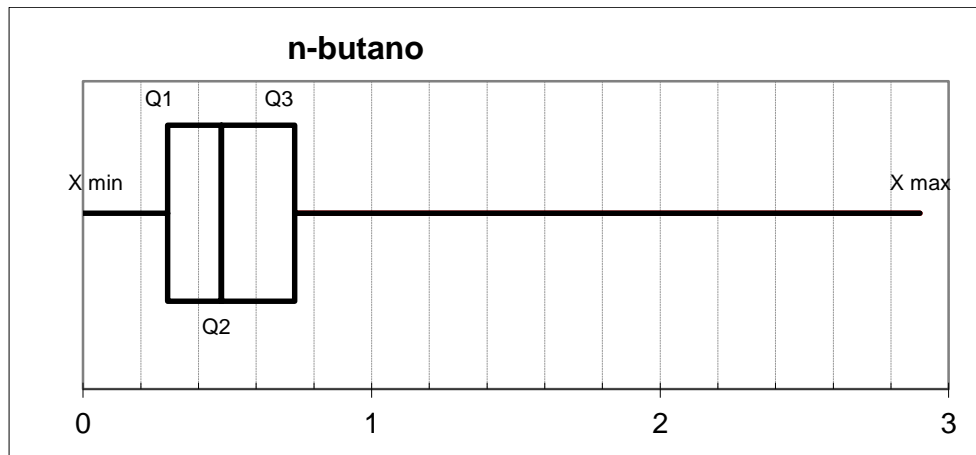
i-butano

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,34	0,48	0,76	3,89



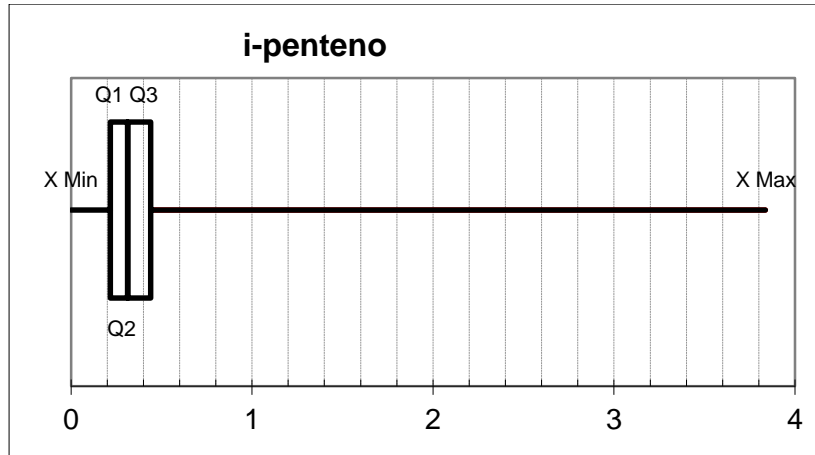
n-butano

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,29	0,48	0,73	2,90



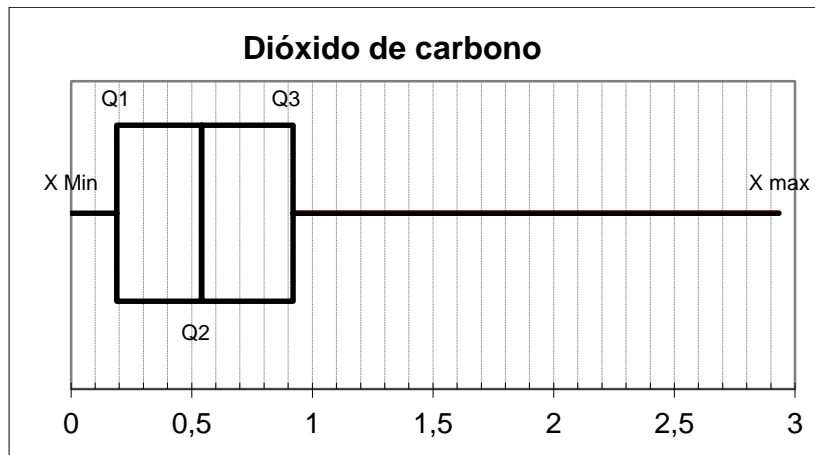
i-penteno

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,22	0,31	0,44	3,84



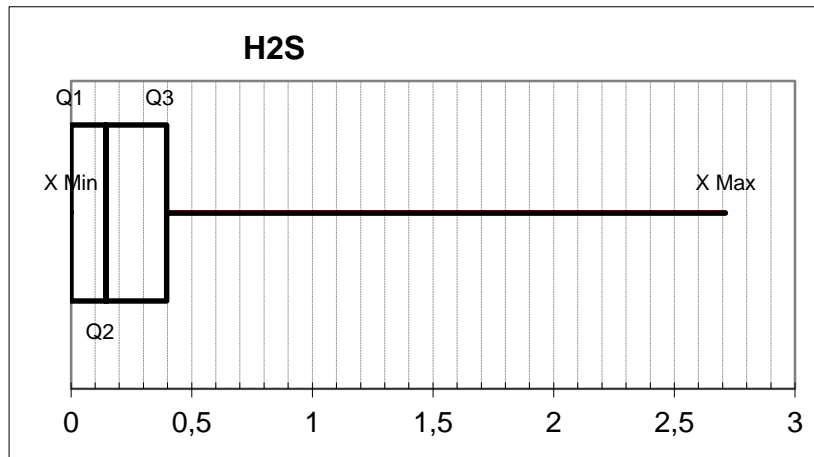
Dióxido de carbono

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,19	0,54	0,92	2,93



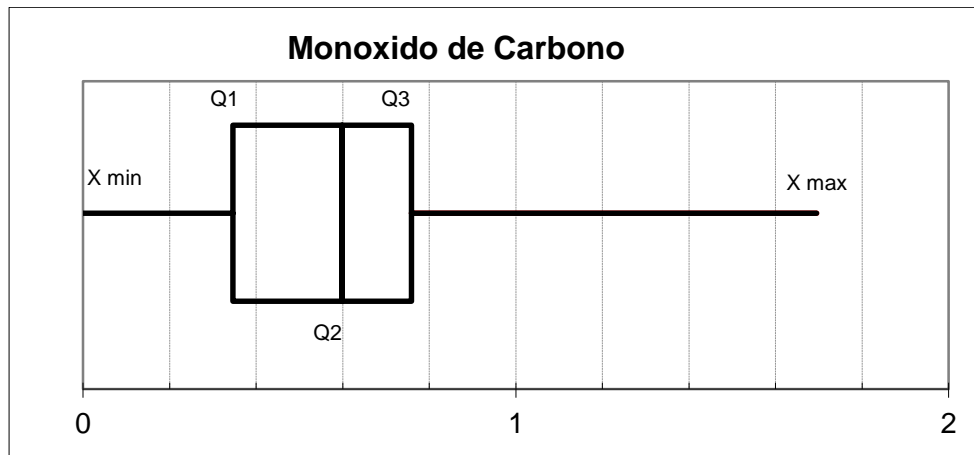
H2S

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,00	0,14	0,40	2,71



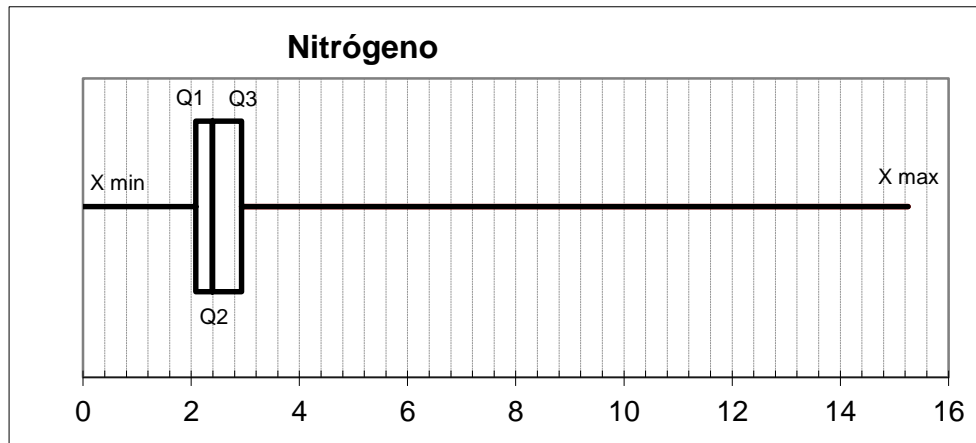
Monóxido de Carbono

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,35	0,60	0,76	1,69



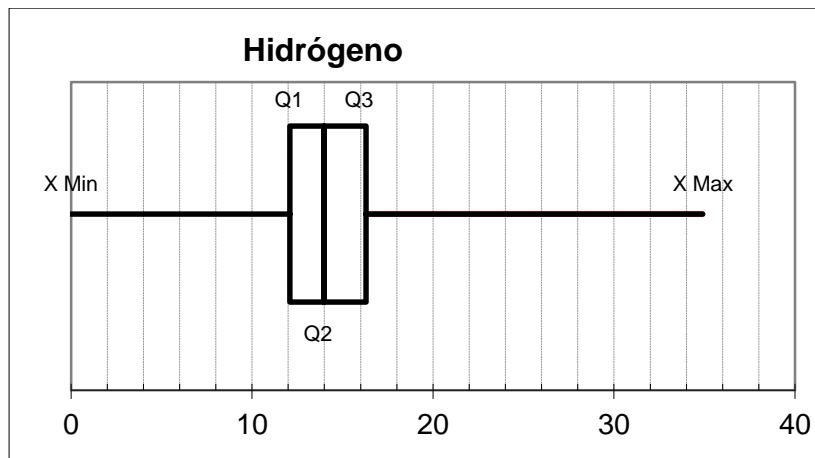
Nitrógeno

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	2,09	2,39	2,93	15,25



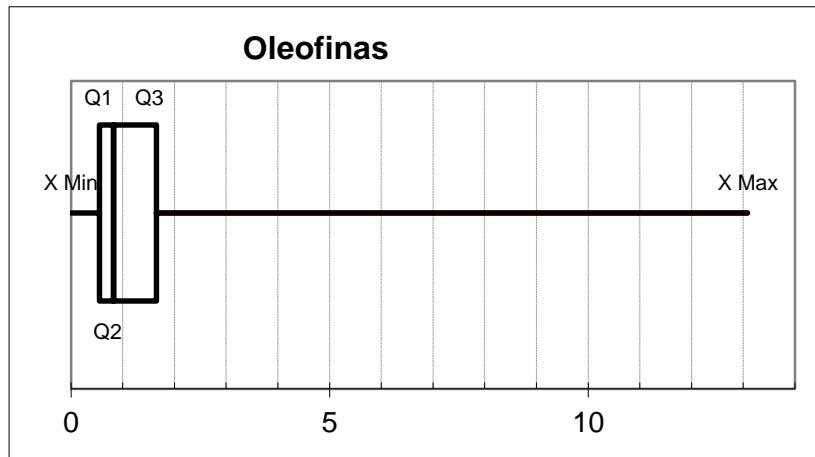
Hidrógeno

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	12,10	13,98	16,30	34,89



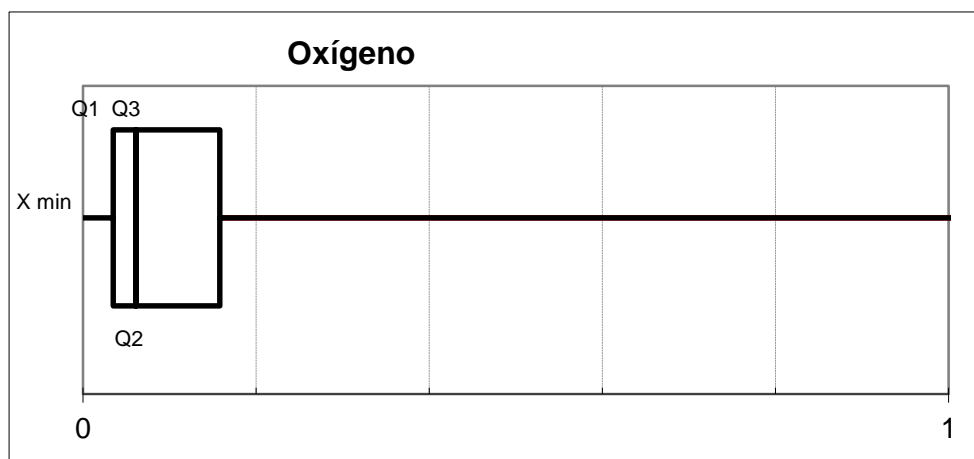
Oleofinas

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,55	0,82	1,65	13,08



Oxígeno

Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
0,00	0,03	0,06	0,16	6,60



Anexo B. Intervalo de confianza de las variables

Al eliminar los valores atípicos, se calculó el valor promedio y el intervalo de confianza a un valor de 95% para cada una de las variables identificadas, para el caso de la composición, debido a los desvíos no se calculó este valor, los valores principales para validar la simulación fueron:

Exceso de oxígeno

Variable	Valor
Tamaño muestra	215,00
Media	2,16
Desviación típica	0,11
Cuasi desviación	0,12
intervalo de confianza	95,00
1-Alfa	0,05
Margen de error	0,02
Intervalo de confianza	2,15
	2,18

Temperatura de aire de entrada

Variable	Valor
Tamaño muestra	182,00
Media	99,59
Desviación típica	1,40
Cuasi desviación	1,47
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	0,21
Intervalo de confianza	99,38
	99,81

Temperatura de los gases a la entrada al economizador

Variable	Valor
Tamaño muestra	184,00
Media	647,37
Desviación típica	8,65
Cuasi desviación	9,04
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	1,31
Intervalo de confianza	646,07
	648,68

Temperatura de los gases a la salida del economizador

Variable	Valor
Tamaño muestra	189,00
Media	525,89
Desviación típica	8,67
Cuasi desviación	9,05
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	1,29
Intervalo de confianza	524,60
	527,18

Temperatura de los gases de chimenea

Variable	Valor
Tamaño muestra	181,00
Media	347,37
Desviación típica	12,31
Cuasi desviación	12,86
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	1,87
Intervalo de confianza	345,50
	349,24

Temperatura del agua al economizador

Variable	Valor
Tamaño muestra	173,00
Media	266,48
Desviación típica	0,88
Cuasi desviación	0,92
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	0,14
Intervalo de confianza	266,34
	266,62

Temperatura del vapor generado

Variable	Valor
Tamaño muestra	188,00
Media	781,77
Desviación típica	2,20
Cuasi desviación	2,29
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	0,33
Intervalo de confianza	781,44
	782,09

Flujo de agua de alimentación

Variable	Valor
Tamaño muestra	182,00
Media	202,75
Desviación típica	9,49
Cuasi desviación	9,91
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	1,44
Intervalo de confianza	201,31
	204,19

Flujo de vapor producido

Variable	Valor
Tamaño muestra	186,00
Media	221,72
Desviación típica	10,41
Cuasi desviación	10,87
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	1,56
Intervalo de confianza	220,16
	223,28

Eficiencia

Variable	Valor
Tamaño muestra	183,00
Media	86,43
Desviación típica	0,37
Cuasi desviación	0,39
intervalo de confianza	0,95
1-Alfa	0,05
Margen de error	0,06
Intervalo de confianza	86,37
	86,48

Anexo C. Diagrama de los desvíos presentados en ECOPETROL S.A.

El diagrama que muestra los valores de entrada y los desvíos que generan los cambios en la composición del gas de entrada a las calderas se muestra en la figura

