

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Dpto. de Química e Ing. Química



Trabajo de Diploma

*Título: Evaluación del proceso de generación de vapor de la
Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro.*

Autora: Arianna Álvarez Ramos

Tutores: MSc. Ena Hernández López

MSc. Carlos Alberto González Hernández

Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química

Matanzas, 2015

Declaración de Autoridad

Mediante este documento, declaro ser la única autora del trabajo de diploma que se presenta y tiene como título: “Evaluación del proceso de generación de vapor de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro”. De esta manera, autorizo a la Universidad de Matanzas a que haga uso del mismo para desarrollar futuras investigaciones científicas.

Firma del Estudiante: _____

Fecha: _____

Nota de aceptación

Presidente del tribunal _____

Firma _____

Miembro del tribunal _____

Firma _____

Miembro del tribunal _____

Firma _____

Ciudad _____

Fecha _____

Pensamiento

En tiempos científicos sólo deben existir universidades científicas.

José Martí

Dedicatoria

Dedico este trabajo de diploma a mis padres que me han brindado todo su cariño y apoyo incondicional, a mi hermano y abuelos que siempre han estado ahí cuando los he necesitado.

Agradecimientos

Agradezco:

A mis tutores Ena y Carlos que hicieron posible la realización de este trabajo.

A mis padres por esforzarse tanto durante todos mis años como estudiante.

A mis abuelos y hermano por su preocupación.

A todas las personas del Grupo de Ingeniería de la EPEP - Centro que me acogieron como una trabajadora más, en especial a Mariela y Liz Beatriz.

A los profesores del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Matanzas que intervinieron en mi formación como ingeniera, entre ellos se encuentran:

Santiago Díaz

Jesús Luis Orosco

Leivy Montes de Oca

Yamilé Martínez Ochoa

Agustín Benítez Hernández

Yoney López Hervis

Alicia López

Mario Yll Lavin

Roberto Triana

Alejandro Díaz Linares

A todas mis amistades que no dejaron de apoyarme, especialmente a:

Yaremis Vega

Dayneris Muñoz

Rachel Bayate

Leonardo Hernández

Alejandro Bañal

En general, mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me brindaron su apoyo durante los últimos cinco años.

A todos Muchas Gracias...

Resumen

El presente trabajo de diploma se realiza en la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro, en el mismo se evalúa el proceso de generación de vapor para lo cual se realizan mediciones a las variables: temperaturas del agua de alimentación y de los gases de salida, presión de vapor y flujos de gas y de vapor, las cuales fueron procesadas estadísticamente debido a la gran dispersión de las datas de valores. Los balances de masa y de energía en los generadores de vapor uno y dos, demostraron que la pérdida más influyente es la energía perdida debido al agua formada por la combustión del hidrógeno del combustible. Los generadores de vapor son evaluados mediante el método indirecto o de pérdidas obteniendo como resultado valores de eficiencia para los mismos de 75%. A partir de la aplicación del método directo de evaluación de la eficiencia, se determinó que los generadores de vapor trabajan al 50% de su capacidad. El error calculado a partir de las mediciones realizadas y las determinaciones del flujo de vapor mediante los balances de masa y de energía es de 17% y 22% en el generador de vapor uno y de 14% en el dos, lo cual se corrobora con los cálculos realizados a partir de los valores puntuales.

Abstract

The present research work was made in the Perforation and Extraction of Petroleum Company. The objective is to evaluate the process of vapour's generation. To do this evaluation measuring for the variable such as: temperatures of the water of feeding and of the exit gases, vapour's pressure, flow of gas and flow of vapour were made. These variables were processed statistically due to the great dispersion of the data of values. The balance of mass of energy on the generators of vapour one and two, prove that the most influence lost, is the lost of energy due to the water that was obtained by the combustion of the hydrogen of the fuel. The generators are evaluated through the indirect method, obtaining as a result values of efficiency in a 75 percent. Once we applied the direct method of evaluation, we obtained that the generators of vapour work at 50 percent of its capacity. The mistake was calculated in two different ways. The results were 17 percent and 22 percent in the generator one and 14 percent in generator two. These values were confirmed with the calculation made through the exact values.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo # 1: Análisis bibliográfico.....	4
1.1 Generadores de vapor.	4
1.1.1 Características generales de los generadores de vapor.....	4
1.1.2 Sistemas básicos de un generador de vapor.....	6
1.1.3 Componentes principales del generador de vapor.	8
1.1.4 Clasificación de los generadores de vapor.	8
1.1.5 Combustión.....	15
1.1.6 Aire en exceso.	16
1.1.7 Balance de energía.....	17
1.1.8 Eficiencia de los generadores de vapor.....	17
1.2 Flujómetros de vapor.	19
1.2.1 Medidores de placa orificio.	23
1.3 Conclusiones parciales.	25
Capítulo # 2: Materiales y métodos.....	26
2.1. Descripción General del Proceso de generación de vapor de la EPEP – Centro.....	27
2.1.1 Sistema de alimentación de agua.....	28
2.1.2 Sistema de alimentación de combustible.....	28
2.1.3 Sistema de Residuales.	29
2.1.4 Sistema de Condensado.....	29
2.1.5 Distribución de vapor.....	30
2.2 Situación actual de la estación de generación de vapor según la inspección de control tecnológico.	30
2.3 Mediciones necesarias para la evaluación de los generadores de vapor.	31
2.4 Análisis estadístico de la calidad de las variables medidas.	32

2.5 Balance de masa y energía en los generadores de vapor.	33
2.6 Determinación de la eficiencia de los generadores de vapor por el método indirecto.	36
2.7 Cálculo del flujo de vapor por el método directo.	38
2.8 Medición de Flujo de Vapor en la Sala de Calderas de la Planta de Procesamiento de Crudo.	38
2.9 Técnicas de evaluación y estimación de riesgos en el proceso de generación de vapor.	39
Capítulo # 3: Análisis de los resultados.....	40
3.1 Realización de mediciones necesarias para la evaluación de los generadores de vapor uno y dos.....	40
3.2 Análisis estadístico de las mediciones realizadas.....	41
3.2.1 Análisis de la normalidad de las variables.	41
3.2.2 Análisis estadístico de las variables en los generadores de vapor. ...	43
3.2.3 Ajuste estadístico de las mediciones realizadas en los generadores de vapor.....	43
3.3 Balance de masa y energía en los generadores de vapor.	49
3.4 Determinación del flujo de vapor.....	52
3.4.1 Determinación del flujo de vapor a partir de valores puntuales.	53
3.5 Análisis de riesgo.....	54
3.6 Conclusiones parciales.	56
Conclusiones.....	57
Recomendaciones.....	58
Bibliografía	59
Anexos	65

Introducción

La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP- Centro) se encuentra ubicada en la Finca “La Cachurra”, poblado de Guásimas, municipio de Cárdenas, en la provincia de Matanzas. Tiene como principal función la de entregar y recibir los diferentes tipos de hidrocarburos por oleoductos y transporte terrestre realizando el bombeo a la Empresa Comercializadora de Combustibles en Matanzas. En el caso del petróleo crudo, es un líquido muy viscoso, el cual para trasladarlo requiere de un calentamiento previo, que se logra mediante el proceso de generación de vapor, el que permite trasladar el vapor por las líneas hacia los diferentes consumidores que lo necesitan.

La obtención del vapor se realiza mediante generadores de vapor. Esta generación de vapor está acompañada de procesos de transferencia de calor, mediante los cuales el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de fase. (Borroto y Rubio, 2007)

El vapor producido por los generadores de vapor es utilizado en la generación de energía mecánica, eléctrica y para la alimentación a equipos de proceso, por lo que este equipo es un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las industrias.

Se han desarrollado estudios en la estación de generación de vapor de la Planta de Procesamiento de Crudo de la empresa. De Diego, (2013) en su tesis de maestría evaluó todos los generadores y detectó los fallos existentes. Los resultados de esta evaluación demuestran que las deficiencias más comunes en los generadores de vapor de la Planta de Procesamiento de Crudo, son la permanencia en un generador de los tapones en el quemador, los ventiladores secundarios no se corresponden con estos generadores de vapor (excepto el del generador de vapor uno) y la regulación en la combustión es inapropiada. Se realizaron propuestas que mejoran el funcionamiento del generador uno, ante la deficiencia mencionada. El resultado obtenido fue el aumento de la eficiencia lo cual se logró gracias al aumento del consumo de combustible y el estricto control en la combustión.

A pesar de los resultados obtenidos se continúan presentando problemas para lograr un flujo de vapor que satisfaga las necesidades tecnológicas.

En el proceso de generación de vapor de la empresa se instalaron flujómetros de vapor de presión diferencial de placa orificio, los cuales de forma automatizada brindan el valor real del vapor producido por cada uno de los generadores de vapor. Esto es algo novedoso en la EPEP - Centro por lo que con este trabajo se quiere determinar el flujo de vapor entregado por los generadores de vapor mediante las evaluaciones de los mismos y por las lecturas realizadas a los flujómetros.

Por lo tanto se ha planteado el problema científico siguiente:

Problema:

¿Existirá correspondencia entre las mediciones realizadas a los flujómetros de vapor y las determinaciones del mismo a partir de los balances de masa y energía?

Hipótesis:

Si se realizan las mediciones de vapor a los flujómetros instalados y a partir de balances de masa y de energía se determinan los flujos que entregan los generadores de vapor, se podrá determinar la correspondencia entre ambos.

Objetivo general

Evaluar del proceso de generación de vapor de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro.

Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar el proceso de generación de vapor de la Planta de Procesamiento de Crudo de la EPEP - Centro.
- ✓ Realizar la evaluación a los generadores de vapor, a partir de los balances de masa y de energía, utilizando los métodos directo e indirecto.
- ✓ Analizar el comportamiento estadístico y operacional de las variables medidas.
- ✓ Comparar el flujo de vapor medido con los resultados obtenidos en la evaluación.
- ✓ Valorar la seguridad de la instalación a partir de un análisis de riesgo.

Capítulo # 1: Análisis bibliográfico.

En el presente capítulo se aborda el tema de los generadores de vapor. Se realiza una breve explicación acerca de su principio de funcionamiento, sus características y sus diferentes clasificaciones haciendo énfasis en la disposición del fluido en los tubos que es la más conocida. Son analizados temas como la combustión, el combustible utilizado para la misma y el coeficiente de exceso de aire que son aspectos imprescindibles para determinar la eficiencia de los generadores de vapor aplicando los métodos directo e indirecto. Se realiza una búsqueda bibliográfica acerca de los flujómetros de vapor de presión diferencial enfatizando en los de placa orificio.

1.1 Generadores de vapor.

1.1.1 Características generales de los generadores de vapor.

El generador de vapor, como su nombre lo indica, tiene la función de producir vapor para ser utilizado en la generación de energía mecánica, 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. Por ello se ha llegado a plantear que el generador de vapor es el corazón de toda industria moderna. (Andrade, 2011)

Autores como Pons, (2008) plantean que el generador de vapor es un conjunto de equipos, los principales son el horno, la caldera y los quemadores; los auxiliares son las bombas de alimentación de agua y combustible, los sopladores y precalentadores de aire, los ventiladores para el tiro inducido, los recalentadores o sobrecalentadores de vapor, los sopladores de hollín para limpiar las superficies de transferencia de calor y los separadores para evitar que el vapor producido arrastre espuma; los elementos accesorios los constituyen las columnas y los niveles de agua y las válvulas de extracción, de seguridad y de no retorno. Mientras que Andrade, (2011) expone que el generador de vapor es un equipo de gran complejidad, es un intercambiador de calor altamente especializado, en el cual se transfiere al agua, el calor desprendido por la combustión, para formar el vapor. Lo componen diferentes partes, algunas de las cuales tienen funciones

específicas, imprescindibles para su 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.

El vapor es generado a través de una transferencia de energía en la cual, el fluido originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de fase. La transferencia de calor se efectúa mediante un proceso de combustión que ocurre en el interior de la caldera, elevando progresivamente su presión y temperatura. La presión, no puede aumentar de manera desmesurada, debe permanecer constante por lo que se controla mediante el escape de gases de combustión, y la salida del vapor formado. Debido a que la presión del vapor generado dentro de las calderas es muy grande, estas están construidas con metales altamente resistentes a presiones altas, como el acero laminado. (Altamirano, 2013)

Los generadores de vapor se utilizan a muy diferentes presiones y temperaturas, con grandes variaciones de carga y distintos sistemas de combustión. Los diseñadores y fabricantes aplican los principios de transferencia térmica al diseño de sistemas de generadores de vapor, pero deben también tener amplia formación técnica en mecánica de fluidos, metalurgia, resistencia de materiales, quemadores, controles y dispositivos de seguridad para este sistema. (Andrade, 2011)

A los generadores de vapor se le exige mantener una presión de trabajo constante por la gran diversidad de caudales de consumo en la industria, por lo cual debe ser capaz de:

- a) Aportar energía calorífica suficiente en la combustión del combustible con el aire.
- b) Desde el punto de vista de seguridad, el nivel de agua en el generador debe estar controlado y mantenido dentro de los límites seguros.
- c) Es necesario garantizar una llama segura en la combustión.

d) El sistema de control debe ser seguro en la puesta en marcha, en la operación y en la parada del generador de vapor. (Ferrusca, 2013)

Después de caracterizar al generador de vapor, la autora de este trabajo concluye que este es un equipo complejo en el que se entremezclan fenómenos de reacciones químicas, transferencia de calor, hidrodinámica del agua y de la mezcla agua - vapor, flujo de gases y resistencia de materiales, el cual requiere de mantenimiento, cuidado extremo y el conocimiento profundo de sus características.

1.1.2 Sistemas básicos de un generador de vapor.

1.1.2.1 Sistema de aire – gases.

El sistema de aire – gases es propio del generador de vapor, tiene como finalidad suministrar y controlar el aire en óptimas condiciones para la realización de una buena combustión en el horno del generador, de la misma manera, facilitar la expulsión de los gases de la combustión a la atmósfera.

Este sistema está constituido principalmente de ductos, ya sea para conducir aire o gases, compuertas, ventiladores de suministro, ventiladores de recirculación y precalentadores de aire. Los componentes del sistema aire – gases son (Ferrusca, 2013):

Componentes del sistema aire – gases:

- ❖ Ventiladores de tiro forzado
- ❖ Ventilador recirculador de gases
- ❖ Calentador de aire – vapor
- ❖ Precalentador de aire regenerativo
- ❖ Ventiladores de enfriamiento para detectores de flama

1.1.2.2 Sistema de gas combustible a quemadores.

El encendido de quemadores con gas natural en el generador de vapor y la obtención de una combustión eficiente, obedece en gran parte a que el mismo sea suministrado a determinados valores de presión y flujo, así como un adecuado flujo de aire para la combustión. Sin embargo por ser el gas natural un combustible

de fácil ignición, requiere de mayor cuidado por parte del personal encargado de su manejo y conducción que otros combustibles. El gas combustible para quemadores es distribuido a los generadores de vapor, mediante arreglos de tuberías y equipos. Los componentes del sistema combustible a quemadores son (Ferrusca, 2013):

Componentes del sistema combustible a quemadores:

- ❖ Depurador
- ❖ Válvulas de control de presión
- ❖ Transmisores de presión gas y quemadores
- ❖ Medidor de flujo
- ❖ Quemadores
- ❖ Válvulas de gas a quemador
- ❖ Sistema de gas

1.1.2.3 Sistema de agua de alimentación.

Su función consiste en proporcionar por medio de bombas, al agua de alimentación la presión necesaria para que pueda circular a través de los calentadores de alta presión y el economizador y llegar con una presión suficiente al domo del generador venciendo la presión existente en el mismo, manteniendo su nivel y alimentando a la caldera del agua necesaria para la generación de vapor. Los componentes del sistema de agua de alimentación son (Ferrusca, 2013):

Componentes del sistema de agua de alimentación:

- ❖ Deaerador
- ❖ Calentador
- ❖ Economizador
- ❖ Bombas de agua de alimentación
- ❖ Variadores de velocidad
- ❖ Válvulas de recirculación
- ❖ Válvulas de descarga de bombas de agua de alimentación

1.1.3 Componentes principales del generador de vapor.

Horno.

El horno está destinado a producir en su interior los gases calientes, producto de la combustión. (Pons, 2008)

Los hornos de cámara, como su nombre lo indica, están constituidos por una cámara donde se quema el combustible. Estos pueden operar con combustibles líquidos, gaseosos o sólidos, presentan una alta eficiencia, por utilizar el modo de combustión a la llama que es el más efectivo de todos. En los hornos de cámara es recomendable que exista un sistema automático para la detección de la combustión y su encendido automático en caso de fallos. (Andrade, 2011)

Caldera.

Es una máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor y donde ocurre la transferencia de calor. (Thomasset, 2011)

Quemadores.

Pons, (2008) plantea que los quemadores son los dispositivos adecuados para introducir el combustible al horno.

Mientras que Andrade, (2011) dice que los quemadores son los dispositivos destinados a lograr el mezclado del combustible y el aire, de manera tal, que se logre formar una llama estable en el tiempo, y eficiente en cuanto a la combustión. La finalidad de un equipo de combustión es el desarrollo de una reacción química. Todo proceso de preparación del combustible, y el que se ha desarrollado de manera interna en el quemador, tiene por objeto el conseguir que esta reacción de oxidación tenga lugar de la manera más perfecta; para poder lograrlo la química elemental dice que, además de manejar la proporción adecuada de combustible y de aire, hay que conseguir la perfecta unión entre ambos.

1.1.4 Clasificación de los generadores de vapor.

No existe criterio único para la clasificación de los generadores de vapor, dada la gran diversidad de tipos, formas y variantes; sin embargo, existen varios índices que pueden ser tomados como base de clasificación. (Pons, 2008)

1.1.4.1 Clasificación de acuerdo a la circulación de los fluidos dentro de los tubos.

Varios autores como Altamirano, (2013); Meza *et al.*, (2013); López, (2012); Pons, (2008) y Rubio, (2000) coinciden que los generadores se clasifican de acuerdo a la circulación de los fluidos dentro de los tubos en acuotubulares y pirotubulares.

a) Generadores acuotubulares

Por dentro de tubos circula el agua y la mezcla de agua - vapor. Por fuera, generalmente en flujo cruzado, intercambian calor los humos productos de la combustión, (ver anexo 1). En este tipo de generador además, el horno está conformado por paredes de tubos de agua. En ellas el intercambio es básicamente por radiación desde la llama. (Altamirano, 2013)

Meza *et al.*, (2013) expone que en este tipo de generador es el agua o fluido térmico que se pretende calentar, la que circula por el interior de los tubos que conforman la cámara de combustión y que están inmersos entre los gases o llamas producidas por la combustión. El vapor o agua caliente se genera dentro de estos tubos. Alcanzan capacidades que van desde 1000 lb/h (454.54 Kg/h) hasta 500000 lb/h (227272 Kg/h) son más utilizadas para grandes producciones de vapor.

Pueden operar con cualquier tipo de combustible, ya que presentan una gran flexibilidad para el diseño de sus hornos. La generación de vapor sobrecalentado en estos generadores de vapor también es fácil y, por lo general lo suministran en dicho estado. (Borroto *et al.*, 2007)

En los generadores de vapor acuotubulares, no es aconsejable su funcionamiento con salinidad en el agua, en la mayoría de los diseños. (Diwoker. al, 1996)

b) Generadores pirotubulares

En este tipo de generador el humo caliente procedente del horno circula por el interior de los tubos, hasta salir por la chimenea, (ver anexo 2). El calor liberado en el proceso de combustión es transferido a través de las paredes de los tubos al agua que los rodea, quedando todo el conjunto encerrado dentro de una envolvente. (Altamirano, 2013)

El combustible se quema en el horno, donde comienza el proceso de transferencia de calor por radiación, y a los gases resultantes, se les hace circular a través de los fluses que constituyen el haz tubular del generador de vapor, y donde tiene lugar el intercambio de calor por convección. (Thomasset, 2011)

A través de este recorrido, el humo, cede gran parte de su calor al agua, vaporizándose parte de esta y acumulándose en la parte superior del cuerpo del generador en forma de vapor saturado. Esta vaporización parcial del agua es la que provoca el aumento de la presión del interior del recipiente y su visualización en el manómetro.

Su rendimiento global esperado a lo largo de su vida útil no supera el 65% en el mejor de los casos. (Altamirano, 2013)

Presentan generalmente una baja eficiencia (70 – 88%) debido a la alta temperatura de los gases a la salida, aunque en los últimos años se ha elevado alcanzándose en algunos casos valores por encima de 90%. (Figueredo, 2014)

Este tipo de generadores se adaptan bien a los servicios de recuperación de calor. (Rodríguez, 2010)

Según Altamirano, (2013), por su diseño no admiten presiones de trabajo elevadas; son de construcción sencilla y no se utilizan para elevadas producciones de vapor.

Las unidades convencionales generalmente emplean de 2 a 4 pasos para incrementar la superficie de área expuesta a los gases calientes y por lo tanto, incrementar la eficiencia. Las capacidades máximas de producción de vapor de las unidades pirotubulares han sido extendidas a 69,000 lb/h (31363 Kg/h). (Meza *et al.*, 2013)

Después de analizar las características de los generadores acuatubulares y pirotubulares la autora del presente trabajo plantea que para la selección de uno de los mismos solo hay que tener en cuenta las necesidades de la empresa en la cual va a ser instalado dicho generador de vapor.

1.1.4.2 Clasificación de acuerdo a la presión de trabajo.

- a) Generadores de baja presión

Generadores que producen vapor, hasta 1.08 MPa.

b) Generadores de media presión

Producen vapor aproximadamente desde 1.08 hasta 4.02 MPa.

c) Generadores de alta presión

Trabajan con presiones mayores que 4.02 MPa.

La clasificación de los generadores de vapor de baja, media y alta presión es una opinión que comparten Altamirano, (2013) y Pons, (2008), donde los de baja presión se usan generalmente para fines de calentamiento y los de media y alta presión se destinan a la generación de vapor para plantas de fuerza, aunque existen plantas de fuerza con generadores con presiones de 1.08 MPa.

1.1.4.3 Clasificación de acuerdo al combustible utilizado.

a) Generadores de combustibles gaseosos

Utilizan gas natural, aire propanado o gas obtenido en gasificadores. Generalmente los quemadores de gas trabajan con muy baja presión, por lo que es común que tengan sistemas de reducción de presión importantes.

En el caso de tener asociado un gasificador que suministre un gas muy particular se utilizan cámaras torsionales a fin de aumentar el tiempo de permanencia del combustible en el horno. (Altamirano, 2013)

Es importante lograr una buena mezcla de aire - gas.

Con los combustibles gaseosos el riesgo de explosiones por acumulación de combustible no quemado es grande, por lo que es sumamente importante establecer las medidas de seguridad adecuadas. La posición de los quemadores de gas es similar a la de los quemadores que utilizan combustibles líquidos. Es común utilizar quemadores duales, que permitan el uso de uno u otro combustible, dependiendo de su disponibilidad y costo. La emisividad de las llamas de estos combustibles es diferente, por lo que el intercambio por radiación resultará distinto según el combustible utilizado, lo mismo ocurre con la temperatura de los gases a la salida del horno del generador de vapor. Son factores que hay que tener en cuenta, ya que modifican los resultados obtenidos en el equipo. De cualquier manera el petróleo y el gas natural son de los combustibles más fácilmente intercambiables. (Altamirano, 2013)

El gas natural es el combustible gaseoso más simple para quemar porque requiere poca preparación y se mezcla rápidamente con el aire suministrado. Los generadores de vapor industriales generalmente usan quemadores de baja presión. Es un combustible más limpio que el petróleo, puesto que emite muy pocos contaminantes al medio ambiente. (Meza *et al.*, 2013)

De Diego, (2013) plantea que el panorama energético nacional e internacional en los años recientes está afrontando un gran desafío debido a las restricciones ambientales en la utilización de los combustibles fósiles y a las constantes alzas en los precios de los derivados del petróleo. Consecuentemente, el uso del gas natural como combustible limpio y con precios competitivos ha venido aumentando en los sectores industrial, comercial, doméstico y vehicular.

b) Generadores de combustibles líquidos

Se fabrican generadores de vapor de todo tipo y tamaño que utilizan combustibles líquidos. Requieren de instalaciones de almacenaje y tanques de servicio, de elementos de precalentamiento y de sistemas de bombeo y transporte.

Los combustibles de aceite generalmente requieren algún tipo de tratamiento previo de calentamiento, debido a su alta viscosidad a temperatura ambiente y deben ser atomizados antes de la mezcla con el aire de combustión. Tienen elevado grado de contaminación con respecto a los gaseosos. (Meza *et al.*, 2013)

En unidades grandes es común arrancar con un combustible de baja viscosidad y luego pasar a utilizar uno más viscoso. Los quemadores que utilizan combustibles líquidos se instalan generalmente horizontales. Hay algún tipo de quemadores de ángulo regulable para poder variar el intercambio por radiación en el horno. (Altamirano, 2013)

Altamirano, (2013) y Pons, (2008) consideran que la turbulencia del aire que entra al quemador es importante para obtener una correcta combustión y un largo de llama apropiado, de tal manera que no se dañen las paredes del generador o las paredes de los tubos de agua y al mismo tiempo asegure una combustión completa. Para esto es fundamental el dimensionamiento correcto del tamaño del horno.

c) Generadores de combustibles sólidos

Los combustibles sólidos utilizados son muy variados: Bagazo (residuo de la molienda de la caña de azúcar), madera, turba (es un carbón natural de formación reciente que se caracteriza por su alto porcentaje de humedad), etc. (Pons, 2008) Cada combustible sólido requiere de una tecnología apropiada para poder quemarlos de la mejor manera. El diseño del horno para estos combustibles es sumamente complejo, teniendo que considerar el ingreso de aire suficiente y su correcta mezcla con el combustible, la permanencia de las partículas en el horno para quemarse completamente y la disposición de las cenizas entre otros factores. En general resultan hornos de mayor volumen que los utilizados en generadores de vapor de combustibles líquidos y gaseosos. Los combustibles polvorientos, finamente molidos se inyectan en el horno mediante toberas apropiadas. En países desarrollados se utilizan generadores de vapor que queman los residuos sólidos urbanos. (Altamirano, 2013)

1.1.4.4 Clasificación de acuerdo a la circulación del agua.

a) Generadores de circulación natural

La circulación del agua y de la mezcla agua - vapor ocurre naturalmente debido a la diferencia de densidades entre el agua más fría y la mezcla de agua- vapor. Implica entonces tener un circuito cerrado por donde circula el agua y una diferencia de altura apreciable entre las partes altas y bajas del equipo. Los generadores pequeños, los de potencia mediana y una buena parte de los grandes generadores de vapor son de circulación natural. (Altamirano, 2013)

b) Generadores de circulación asistida

En este caso la circulación natural en los tubos del generador es complementada por bombas instaladas en el circuito. También el generador consiste en un circuito cerrado, pero permite construcciones más compactas incluso con tubos inclinados. Se utiliza en aquellos casos en que la diferencia entre las densidades del fluido frío y del caliente no es demasiado grande, típicamente para presiones superiores a los 140 - 160 bar. Brindan una respuesta más rápida ante variaciones en la demanda de vapor que los de circulación natural, pero las bombas trabajan con agua caliente y a altas presiones, son más costosas y requieren elevados costos

por mantenimiento. En general se debe instalar un sistema de respaldo para evitar la parada del generador de vapor por la salida de servicio de la bomba. (Altamirano, 2013)

c) Generadores de circulación forzada

Este tipo de generadores tiene una concepción distinta, se trata de un circuito abierto y no cerrado. La bomba impulsa el agua a través de una primera superficie de intercambio donde se precalienta, luego pasa a un segundo intercambiador donde se vaporiza y luego, en algunos casos, pasa a un tercer intercambiador donde se sobrecalienta. A diferencia de las anteriores no hay una masa de agua circulando sin vaporizarse, la bomba entrega toda el agua que se vaporiza. No hace falta resaltar la importancia de la bomba en este diseño, un paro de la bomba implica un paro del generador de vapor. (Altamirano, 2013)

Los autores López, (2012); Andrade, (2011); Pons, (2008) y Altamirano, (2013) tienen la misma opinión respecto a la clasificación de los generadores de vapor en cuanto al combustible utilizado y a la circulación del agua dentro de los mismos, pero en este último aspecto López, (2012); Andrade, (2011) y Pons, (2008) no tienen en cuenta la circulación asistida.

1.1.4.5 Clasificación de acuerdo al tipo de tiro.

a) Generadores de tiro forzado

Son aquellos en los que el ventilador que es el encargado de aportar el aire necesario para la combustión, está situado en la entrada, introduce el aire al generador, y por tanto son de horno presurizado.

b) Generadores de tiro inducido

Son los que teniendo el ventilador a la salida aspiran los gases de la combustión y los envían a la chimenea, siendo por tanto de horno en depresión.

c) Generadores de tiro equilibrado

Es cuando coexisten ambos ventiladores, haciéndose que el horno trabaje un poco en depresión para evitar escapes de gases. (Ferrusca, 2013)

En la EPEP – Centro los generadores de vapor utilizados son piro-tubulares ya que cumplen con los intereses de la empresa y son más ventajosos desde el punto de vista de costo, mantenimiento y limpieza. La circulación del agua es natural, trabajan a baja presión y son de tiro forzado. El combustible utilizado es el gas natural, el mismo proviene de ENER GAS con una presión manométrica de 9 Kgf/cm² (1 MPa de presión absoluta).

1.1.5 Combustión.

La combustión es un proceso químico complejo mediante el cual ciertos elementos y compuestos contenidos en alto grado en los combustibles, se combinan con el oxígeno para formar fundamentalmente óxidos. En general, teniendo en cuenta de que casi siempre el oxígeno lo suministra el aire, se puede representar el proceso de combustión de la forma siguiente (Pons, 2008):



La combustión es sin duda alguna, uno de los componentes más importantes en la operación de los generadores de vapor. Es por eso que es de vital importancia, garantizar un buen proceso de combustión donde se logre aprovechar la mayor cantidad de energía, lo que se llama en un concepto actualmente muy usado como la eficiencia energética. (Rojas et al., 2014)

Pons, (2008) plantea que desde el punto de vista tanto termodinámico como cinético, la combustión es un fenómeno químico complejo, pues involucra una complicada serie de reacciones químicas que forman productos intermediarios y que, al final, produce gases de composición relativamente simple.

La metodología del cálculo de la eficiencia y el rendimiento productivo de un generador de vapor se basa en el análisis exhaustivo de la combustión y el tipo de combustible que se emplea en la misma. La combustión no es más que una reacción química que libera calor y esta es posible cuando hay una mezcla aire - combustible. Cuando la mezcla aire - combustible es teórica, o sea, que la combustión es completa, recibe el nombre de mezcla estequiométrica. (de Diego, 2013)

Ferrusca, (2013) plantea que el objetivo de una buena combustión es liberar todo el calor, minimizando las pérdidas por combustión imperfecta y aire innecesario, es decir, que mientras más completa y limpia es la combustión, mayor es el calor producido y aprovechado y menor es la contaminación del aire.

En un trabajo realizado por Skvaril *et al.*, (2014) se hicieron medidas experimentales para demostrar la variabilidad de los parámetros que intervienen en la combustión. La experimentación involucra una determinación de temperatura de los gases de la combustión y de la concentración de sus componentes, es decir, O₂, CO₂, CO y NO_x.

1.1.6 Aire en exceso.

En los procesos industriales de combustión se utiliza aire en exceso para tratar de asegurar la combustión completa del combustible. Un control apropiado del porcentaje de aire en exceso mantiene la eficiencia de la combustión en un valor óptimo; el nivel apropiado del porcentaje de aire en exceso depende del tipo de combustible usado, del tipo de horno, etc. (Pons, 2008)

Borroto y Rubio, (2007) plantean que el coeficiente de exceso de aire suministrado al horno, caracteriza el grado de perfección de la organización del proceso de combustión en las condiciones reales con respecto a las ideales. Los valores del coeficiente de exceso de aire oscilan entre 1.05 – 1.4.

De manera general Figueredo, (2014) expone que los valores están en el siguiente rango:

- Para combustibles sólidos $\alpha=1.15-1.4$
- Para combustibles líquidos $\alpha=1.05-1.15$
- Para combustibles gaseosos $\alpha=1.05-1.1$

El defecto de aire se detecta por la aparición de monóxido de carbono (CO); en combustibles líquidos y sólidos, también puede aparecer carbono (C). Estos productos son factores que influyen directamente en la eficiencia del generador de vapor. (de Diego, 2013)

1.1.7 Balance de energía.

Según Jaimovich, (2009) y Díaz, (2010), el objetivo de un análisis térmico o balance de energía, es obtener la determinación de las variables que posteriormente permitan conocer sobre qué aspectos hay que trabajar para lograr una utilización racional de la energía.

El punto de partida para toda medición térmica es el balance energético del equipo a medir. (Lapido, 1998 y Vidal, 2010)

El balance de energía puede plantearse de la manera siguiente:

Energía que ingresa al sistema = Energía que sale del sistema.

La termodinámica enseña que para un proceso con flujo y estado estable se tiene:

$$\sum Q = \sum H_{salida} - \sum H_{entrada}$$

Donde:

$\sum Q$, es la energía neta, (J)

$\sum H_{salida}$, es la energía total que se entrega, (J)

$\sum H_{entrada}$, es la energía total que se recibe, (J)

Es decir, si se identifican las energías involucradas en la medición que se realiza, se plantea correctamente la ecuación y se identifican cuáles serán las variables relevantes que deberán ser medidas, los resultados reflejarán las condiciones reales de trabajo de la instalación. (de Diego, 2013)

Luego de analizar el balance de energía la autora de este trabajo plantea que el mismo es una herramienta a utilizar en la evaluación de los generadores de vapor ya que permite determinar las variables necesarias para la determinación de la eficiencia de los mismos.

1.1.8 Eficiencia de los generadores de vapor.

La eficiencia de un generador de vapor es una función que depende fundamentalmente de su diseño, aunque es necesario tener en cuenta su forma de operación y la carga de combustible. Para una adecuada operación es necesario (Pons, 2008):

- a) Limitar y controlar el por ciento de exceso de aire.
- b) Minimizar el combustible no quemado.
- c) Minimizar la combustión incompleta.
- d) Mantener limpias las superficies de transferencia de calor.

La importancia de conocer la eficiencia con la que operan los generadores de vapor, radica en evaluar el grado de aprovechamiento de la energía del combustible para producir vapor. Además, se pueden cuantificar las cantidades de calor que ingresan y egresan al generador. (Golato *et al.*, 2008)

Para la determinación de la eficiencia de un generador de vapor pueden ser aplicadas varias metodologías.

Kohan, (2000); Rein, (2007) y Jaimovich, (2009) coinciden que en el método directo, la eficiencia de un generador de vapor se define como la relación entre la energía aprovechada en la transformación del agua en vapor, y la energía suministrada por el combustible.

Según Borroto y Rubio, (2007) el método directo se basa en relacionar directamente la producción del generador de vapor con el consumo y determinar la eficiencia como el porcentaje que representa el calor útil (producción) del calor disponible (consumo).

El método indirecto denominado también método de las pérdidas, se basa en tabular las pérdidas. (Kohan, 2000 y Balwant ,2009)

Este método requiere medir la concentración de los componentes de los gases de combustión, efectuar un análisis del combustible y medir su caudal. Requiere además, el cálculo de las pérdidas, posibilitando el incremento de la eficiencia mediante la reducción de las pérdidas identificables. Su desventaja radica en la necesidad de recopilar una gran diversidad de datos experimentales y de efectuar laboriosos cálculos posteriores. En el mercado, se hallan disponibles diversos simuladores para determinar el rendimiento de generadores de vapor, pero generalmente presentan inconvenientes, tales como elevados costos y la necesidad de información que es difícil de obtener en la industria. (ICIDCA, 2004)

La eficiencia se calcula restándole a 100 al valor de la sumatoria de las pérdidas de calor.

A partir de ensayos de mediciones de las características de operación de los generadores de vapor, se evaluó la eficiencia de generación de vapor en tres unidades que utilizan diferentes combustibles:

- 1) Bagazo.
- 2) Gas natural.
- 3) Bagazo y gas natural simultáneamente (caldera mixta). (Golato *et al.*, 2008)

Como resultado se obtuvo que el generador más eficiente fue el que utilizaba como combustible gas natural, arrojando un valor de 74.4%.

Meza *et al.*, (2013) plantea que la eficiencia de los generadores de vapor que funcionan con petróleo es mayor que las que lo hacen con gas natural. En sus estudios realizados en Bogotá, Colombia obtuvo como resultado que las eficiencias a condiciones de operación normales fueron: gas natural (78,1%), petróleo # 2 (82,9%) y petróleo # 6 (82,3%) a similares condiciones ambientales. Lo que equivale a una disminución de aproximadamente 4,5% de eficiencia usando gas natural comparado con el petróleo.

1.2 Flujómetros de vapor.

El funcionamiento del flujómetro moderno es basado en la integración electrónica. El análisis teórico es confirmado por los resultados experimentales. (Dadić, 2013)

En la actualidad la medición del flujo es la variable más importante en la operación de una planta, sin esta medida el balance de materia, el control de calidad y la operación misma de un proceso continuo serían casi imposibles de realizar. Existen muchos métodos confiables para la medición de flujo, uno de los más comunes es el que se basa en la medición de las caídas de presión causadas por la inserción en la línea de flujo, de algún mecanismo que reduce la sección; al pasar el fluido a través de la reducción aumenta su velocidad y su energía cinética. Los medidores de caudal por diferencia de presión ocasionan una pérdida permanente de presión, inferior a la ocasionada por la restricción, la cual, en caso de ser necesario, debe ser compensada para retornar a las condiciones originales del sistema. (Castaño, 2009)

Coincidiendo con lo anteriormente expuesto Rivas *et al.*, (2008) plantea sobre los medidores de presión diferencial, que los mismos presentan una reducción de la sección de paso del fluido, provocando que este aumente su velocidad, lo que origina un aumento de su energía cinética y por consiguiente, su presión tiende a disminuir en una proporción equivalente, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía, creando una diferencia de presión estática entre las secciones aguas arriba y aguas abajo del medidor.

El alto precio de los flujómetros ultrasónicos y electromagnéticos existentes en el mercado y su difícil adquisición, estimuló a desarrollar los medidores de presión diferencial siempre que cumplieran con los siguientes requisitos:

- ✓ Lo más barato posible: poca disponibilidad de recurso monetario.
- ✓ De fácil construcción e instalación: escasos talleres con equipamientos especializados.
- ✓ Introducir la menor pérdida permanente posible.
- ✓ De poco mantenimiento.
- ✓ De fácil lectura: personal con bajo nivel de escolaridad.
- ✓ No utilizar la corriente eléctrica: producto a las frecuentes interrupciones y a las descargas eléctricas. (Díaz, 2012)

La diferencia de presión de antes y después, es medida de manera mecánica o electrónica. A mayor diferencia de presión mayor es el caudal. (López, 2011)

Entre los principales tipos de medidores de presión diferencial se pueden destacar los siguientes:

- ❖ Placas orificio: Consiste en una placa perforada instalada en la tubería. (Carbonó de la Rosa, 2010 y Huang, 2013)
- ❖ Tubo Venturi: Permite la medición de caudales 60% superiores a los de placa orificio en las mismas condiciones de servicio, posee gran precisión y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos. Su costo es elevado. (Carbonó de la Rosa, 2010)

Posee tres partes fundamentales: a) una sección de entrada cónica convergente en la que la sección transversal disminuye, lo que se traduce en un aumento de la velocidad del fluido y una disminución de la presión; b) una sección cilíndrica en la

que se sitúa la toma de baja presión, y donde la velocidad del fluido se mantiene prácticamente constante, y c) una tercera sección de salida cónica divergente en la que la sección transversal aumenta, disminuyendo la velocidad y aumentando la presión. La incorporación de esta sección de salida permite una recuperación de la mayor parte de la presión diferencial producida y, por tanto, un ahorro de energía. (Gutiérrez, 1999)

- ❖ Toberas: La tobera presenta una entrada curvada que se prolonga en un cuello cilíndrico, siendo el coeficiente de descarga similar al del tubo Venturi. Sin embargo, la caída de presión es del mismo orden que en el de placa orificio, para el mismo caudal y con el mismo tamaño de tubería. (Gutiérrez,1999)
- ❖ Tubo Pitot: El tubo Pitot es quizás la forma más antigua de medir la presión diferencial y también de conocer la velocidad de circulación de un fluido en una tubería. En su forma más sencilla, es un pequeño tubo con la entrada orientada en contra del sentido de la corriente del fluido. La velocidad del fluido en la entrada del tubo se hace nula, al ser un punto de estancamiento, convirtiendo su energía cinética en energía de presión, lo que da lugar a un aumento de presión dentro del tubo de Pitot. (Gutiérrez,1999)
- ❖ Tubo Annubar: El tubo Annubar es una innovación del tubo Pitot. Es un tubo exterior, situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería, y dos tubos interiores. El tubo exterior presenta cuatro orificios en la cara aguas arriba de la corriente, que se utilizan para interpolar los perfiles de velocidad y realizar un promedio, y otro orificio en el centro del tubo pero en la cara aguas abajo de la corriente. (Gutiérrez,1999)
- ❖ Medidores de área variable: Funcionan sobre la base de mantener una presión constante permitiendo aumentar el área eficaz de flujo con el caudal. (Carbonó de la Rosa, 2010)
- ❖ Medidores de placa: El principio de funcionamiento del medidor de placa es la resistencia al avance de la corriente, se basa en una placa circular que se mantiene en el centro de la tubería por medio de una barra normal al

flujo. Teniendo en cuenta que la aceleración del fluido en el espacio anular entre la placa y la tubería crea una presión reducida sobre la cara aguas abajo de la placa, la fuerza ejercida por el fluido sobre la placa será la diferencia entre las presiones sobre las superficies aguas arriba y aguas abajo de la placa, la cual tiende a mover la placa en la dirección del flujo. (Gutiérrez,1999)

Se estima que actualmente, al menos un 75% de los medidores industriales en uso son dispositivos de presión diferencial, destacándose dentro de los más utilizados la placa orificio. (García, 2001)

Autores como Gutiérrez, (1999); García, (2001) y Carbonó de la Rosa, (2010) plantean que los medidores de presión diferencial tienen las ventajas y desventajas siguientes:

Ventajas:

- Su sencillez de construcción, no incluyendo partes móviles.
- Su funcionamiento se comprende con facilidad.
- No son caros si se instalan en grandes tuberías y se comparan con otros medidores.
- Pueden utilizarse para la mayoría de los fluidos.
- Hay abundantes publicaciones sobre sus diferentes usos.

Desventajas:

- La amplitud del campo de medida es menor que para la mayoría de los otros tipos de medidores.
- Pueden producir pérdidas de carga significativas.
- La señal de salida no es lineal con el caudal.
- La precisión suele ser menor que la de medidores más modernos, especialmente si como es habitual, el medidor se entrega sin calibrar.

Como parte de la automatización e incremento de la eficiencia energética de los generadores de vapor de la empresa EPEP- Centro fueron instalados flujómetros de vapor presión diferencial con placa orificio a la salida de los generadores de vapor uno dos y tres (ver anexo 3).

Después de conocidas las características generales de los medidores de presión diferencial se puede concluir que los mismos son muy ventajosos por su facilidad de instalación y montaje y por su bajo costo de adquisición.

1.2.1 Medidores de placa orificio.

La placa de orificio consiste en una placa perforada que se instala en la tubería. El orificio de la placa, puede ser: concéntrico, excéntrico o segmentado (ver anexo 3). La placa incorpora normalmente un pequeño orificio de purga, con el fin de evitar arrastres de sólidos o gases que pueda llevar el fluido. (García, 2001 y Huang, 2013)

Cuando dicha placa se coloca en forma concéntrica dentro de una tubería, esta provoca que el flujo se contraiga de repente conforme se aproxima al orificio y después se expande al diámetro total de la tubería. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta y la rápida velocidad del flujo resulta en una disminución de presión hacia abajo desde el orificio. (Sánchez *et al.*, 2007)

El valor del coeficiente de descarga depende de la ubicación de las ramificaciones de presión, igualmente es afectado por las variaciones en la geometría de la orilla del orificio.

La concéntrica se utiliza para líquidos y la excéntrica para los gases donde los cambios de presión implican condensación, cuando los fluidos contienen un alto porcentaje de gases disueltos.

Según Sánchez *et al.*, (2007), la gran ventaja de la placa orificio en comparación con los otros elementos primarios de medición, es que debido a la pequeña cantidad de material y al tiempo relativamente corto de maquinado que se requiere en su manufactura, su costo llega a ser comparativamente más bajo, es fácilmente reproducible, fácil de instalar y desmontar y se consigue un alto grado de exactitud. Además, no retiene muchas partículas suspendidas en el orificio.

Las mayores desventajas de este medidor son su capacidad limitada y la pérdida de carga ocasionada tanto por los residuos del fluido como por las pérdidas de energía que se producen cuando se forman vórtices a la salida del orificio. (Castaño, 2009)

El uso de la placa orificio es inadecuado en la medición de fluidos con sólidos en suspensión pues estas partículas se pueden acumular en la entrada de la placa. El comportamiento en su uso con fluidos viscosos es errático pues la placa se calcula para una temperatura y una viscosidad dada y produce las mayores pérdidas de presión en comparación con los otros elementos primarios de medición. (Sánchez *et al.*, 2007)

Entre los diversos perfiles de orificio que se utilizan, se pueden destacar los siguientes: de cantos vivos, de cuarto de círculo y de entrada cónica. El más utilizado es el de cantos vivos, aunque también se usan las placas de cuarto de círculo y las de entrada cónica, especialmente cuando el fluido es viscoso. Para captar la presión diferencial que origina la placa de orificio es necesario conectar dos tomas, una en la parte anterior y otra en la parte posterior de la placa. Las disposiciones de las tomas, pueden ser: en las bridas, en la vena contraída y en la tubería. (Díaz, 2012)

Las tomas en la brida se usan para tamaños de tubería de 2 pulgadas (50,8 mm) o superiores. En la vena contraída la toma antes de la placa se sitúa a 1 pulgada (25,4mm) de distancia de esta, mientras que la toma posterior se debe situar en el punto de mínima presión, donde la vena alcanza su diámetro más pequeño. Las tomas en la tubería se sitúan en diámetros entre 2½ y 8 pulgadas y a una distancia igual a D (diámetro) y D/2 respectivamente, antes y después de la placa de orificio. (Díaz, 2012)

Los medidores de placa orificio han sido aceptados por muchos años como un estándar en la medida de flujo de fluidos y son casi exclusivos para medidas de gas industrial y vapor. Son utilizados para pequeños o grandes volúmenes de fluido que pueden ser medidos con un alto grado de exactitud, a rangos de presión menores que la presión atmosférica o mayores que 5000 psi (34.47 MPa) y rangos de temperatura menor que 0°F (-17.77°C) o mayores que 200°F (93.33°C). (Proaño *et al.*, 2013)

1.3 Conclusiones parciales.

1. Los generadores de vapor que se analizan en este trabajo se clasifican como pirotubulares, de baja presión, de combustibles gaseosos, de circulación natural y de tiro forzado. Su eficiencia se encuentra entre 70 y 88 %.
2. El coeficiente de exceso de aire para gas natural, oscila entre 1.05 y 1.10 el mismo depende del tipo de combustible, construcción del horno y sistema de combustión.
3. Existen muchos métodos confiables para la medición de flujo, uno de los más comunes es el que se basa en la medición de las caídas de presión.
4. Los medidores de presión diferencial de placa orificio son de bajo costo económico, fácilmente reproducible, fáciles de instalar y desmontar y consiguen un alto grado de exactitud.

Capítulo # 2: Materiales y métodos.

En el presente capítulo se realiza la caracterización del proceso de generación de vapor de la Planta de Procesamiento de Crudo de la EPEP - Centro y se muestra la metodología para la evaluación de los generadores de vapor uno y dos. Además, se dejan plasmados los métodos, ecuaciones y procedimientos aplicados en la investigación.

En la figura 2.1 se muestra un esquema mediante el cual se facilita la comprensión de la investigación en curso.

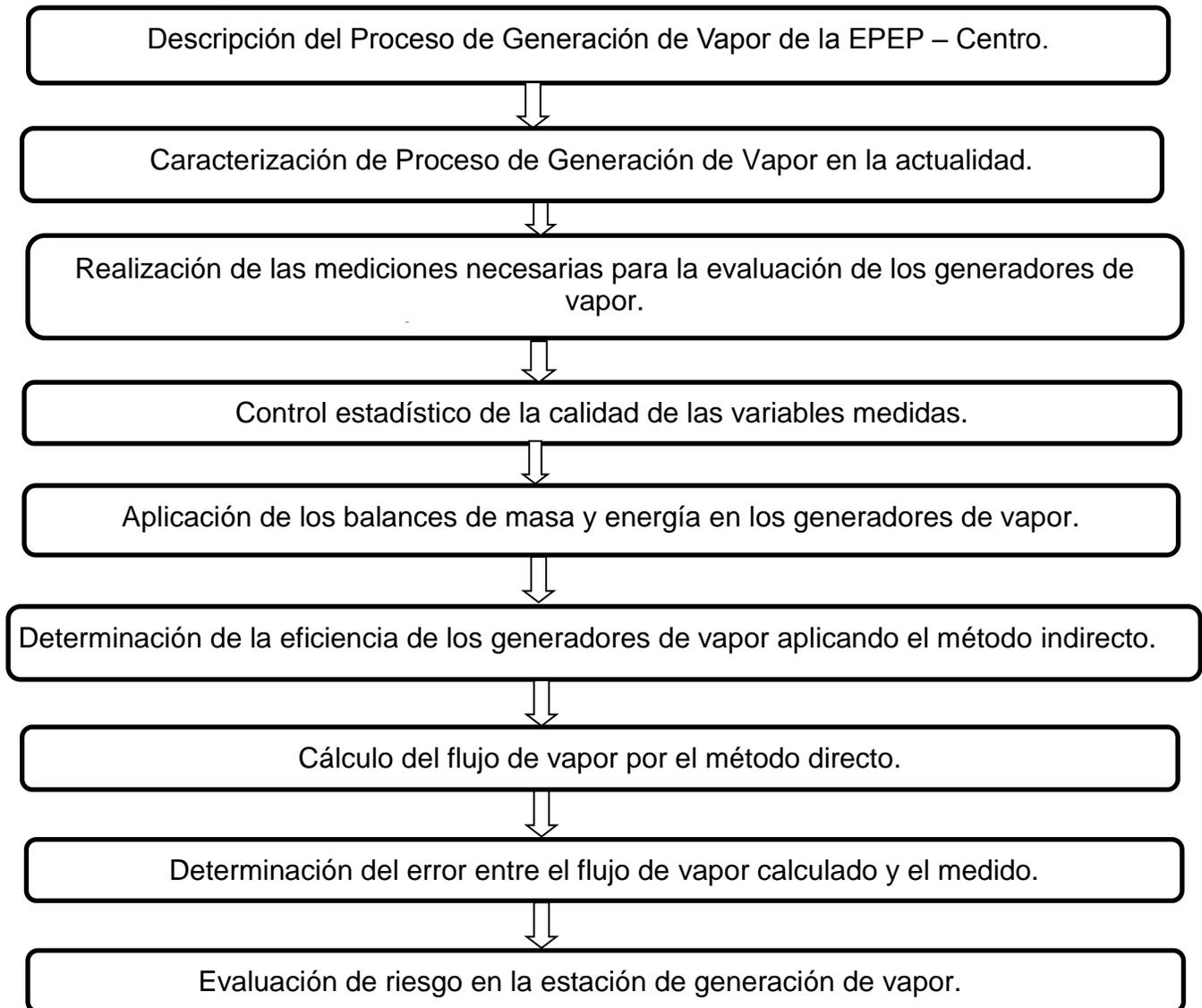


Figura 2.1. Esquema metodológico para el análisis de los generadores de vapor.

2.1. Descripción General del Proceso de generación de vapor de la EPEP – Centro.

La Sala de Calderas de la Planta de Procesamiento de Crudo de la EPEP - Centro tiene la responsabilidad de generar todo el vapor necesario para el proceso de tratamiento del crudo (ver figura 2.2). La misma cuenta con cinco generadores de vapor del tipo pirotubulares, cada uno trabaja con una presión nominal de 1 MPa (10 atm) y una capacidad de generación de 10 000 kg / h (10 t/h), de ellos deben encontrarse cuatro en operación y uno a la espera. Cada generador tiene dos quemadores, uno que trabaja con gas y otro con petróleo (boquilla rotatoria).

Estos equipos están dotados de todo el equipamiento auxiliar necesario para su explotación, como son: ventiladores secundarios y primarios, distribuidores, válvulas de seguridad, válvulas de extracción de fondo y de superficie, niveles visuales de agua, trampas de vapor, sistemas para el tratamiento interno del agua en la caldera, toma muestras de agua, instrumentos de medición de presión y temperatura, etc. (de Diego, 2013)

De Diego, (2013) expone que cada generador posee una pizarra eléctrica mediante la cual se opera la misma y tiene señales lumínicas que indican: pizarra energizada, bajo nivel de agua, extra bajo nivel de agua, fallo de llama, etc. Además poseen una alarma sonora que acciona ante determinados fallos en la misma. También tienen un selector para el régimen de trabajo de la caldera ya sea bajo o alto fuego y un selector para el régimen de trabajo del generador ya sea con gas o petróleo como combustible. Tienen una salida de vapor que entra a un colector general situado dentro de la Sala de Calderas de donde se distribuye el vapor hacia todas las partes del proceso de la Planta de Procesamiento de Crudos que tiene una demanda tecnológica de 25 t/h.

En la tabla 2.1 se observan las características de los generadores de vapor.

Tabla 2.1: Principales parámetros de diseño de los generadores de vapor.

Equipo: Generador de Vapor			
Tipo. Pirotubular			
Características:		Dimensión	U/M
Capacidad de generación		10 000	kg/h
Presión de trabajo nominal		1	MPa
Temperatura del vapor		183	⁰ C
Temperatura del agua de alimentar		50-80	⁰ C
Temperatura de los gases		235	⁰ C
Tipo de Combustible	Petróleo	720	m ³ /h
	Gas baja presión	650-720	m ³ /h
Eficiencia		87	%

Fuente: de Diego, (2013)

2.1.1 Sistema de alimentación de agua.

El agua cruda procedente de los pozos profundos es bombeada hacia el tanque de recepción, de aquí se bombea hacia los suavizadores donde se realiza un tratamiento al agua basado en el principio químico de intercambio de iones. El agua entra a los suavizadores con la Dureza Total máxima de 300 ppm (partes por millón) y sale por la parte inferior con dureza total 0 - 4 ppm hacia el tanque de agua tratada, de este tanque se bombea automáticamente hacia el desareador, desde donde se transporta hasta la succión de la bomba de alimentar de cada generador. (Rivero, 2011)

2.1.2 Sistema de alimentación de combustible.

En esta instalación existen dos variantes de alimentación de combustible a los generadores de vapor:

- Crudo Nacional Ligerio.⁰ API (14.7-14.9), BSW menor o igual a 2 %.
- Gas procedente de ENERGAS. (Rivero, 2011)

2.1.2.1 Alimentación con Crudo Nacional en casos eventuales.

El combustible llega por pailas a la instalación y se descargan en el descargadero habilitado para los generadores de vapor, es enviado hacia los tanques de almacenamiento, de ahí pasan hacia dos tanques de consumo los cuales están provistos de serpentines para el calentamiento del combustible, indicadores de

nivel, termómetros y drenajes. De aquí va a la bomba de combustible la cual se encarga de pasarlo por los calentadores de vapor y entregarlo a la succión de las bombas de combustibles del quemador de cada generador. Antes de cada equipo de bombeo, están los filtros, encargados de retener las suciedades que traiga el combustible, evitando las obstrucciones. (Rivero, 2011)

2.1.2.2 Alimentación con Gas.

El gas proveniente de ENER GAS con una presión de 0.9 MPa (9 atm) pasa por una válvula reguladora de acción neumática que la reduce hasta 0.5 – 0.7 MPa (5 - 7 atm) va al separador de arrastre el cual elimina las partículas de agua. Su salida se incorpora a la electroválvula de gas y de este al tren de gas de cada generador que está compuesto por una serie de válvulas, instrumentos y accesorios, que suministran de forma regulada y con un máximo de seguridad el gas procedente del separador hasta los quemadores de las calderas. (Rivero, 2011)

Tabla 2.2: Composición del gas natural.

Componentes	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	nC ₄ H ₁₀	iC ₄ H ₁₀	nC ₅ H ₁₂	iC ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₇ H ₁₆
%	86,54	3,80	1,90	0,43	0,31	0,06	0,14	0,06	0,057

Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Sistema de Residuales.

Todos los residuales líquidos de la Sala de Calderas y Planta de Tratamiento de Agua van a una cisterna fundida, a un nivel inferior al terreno, ubicada en la Planta de Agua, de ahí se succionan con una bomba centrífuga y se envían al separador desde donde se bombea para el Sistema de Tratamiento de Residuales de la Planta de Procesamiento de Crudo. (Rivero, 2011)

2.1.4 Sistema de Condensado.

Parte del condensado de los distribuidores y consumidores es drenado a través de trampas de vapor, otra parte es evacuada por el sistema de residuales, y la mayor parte se recupera y es reciclado a la planta de tratamiento de agua. Después se mezcla con el agua suavizada y se alimenta a los generadores. (Rivero, 2011).

2.1.5 Distribución de vapor.

Existe dentro de la sala de calderas un distribuidor de vapor (colector), formado por una tubería, cerrada en los extremos y aislada térmicamente a la que están conectadas las líneas de salida de vapor de las calderas. (Rivero, 2011).

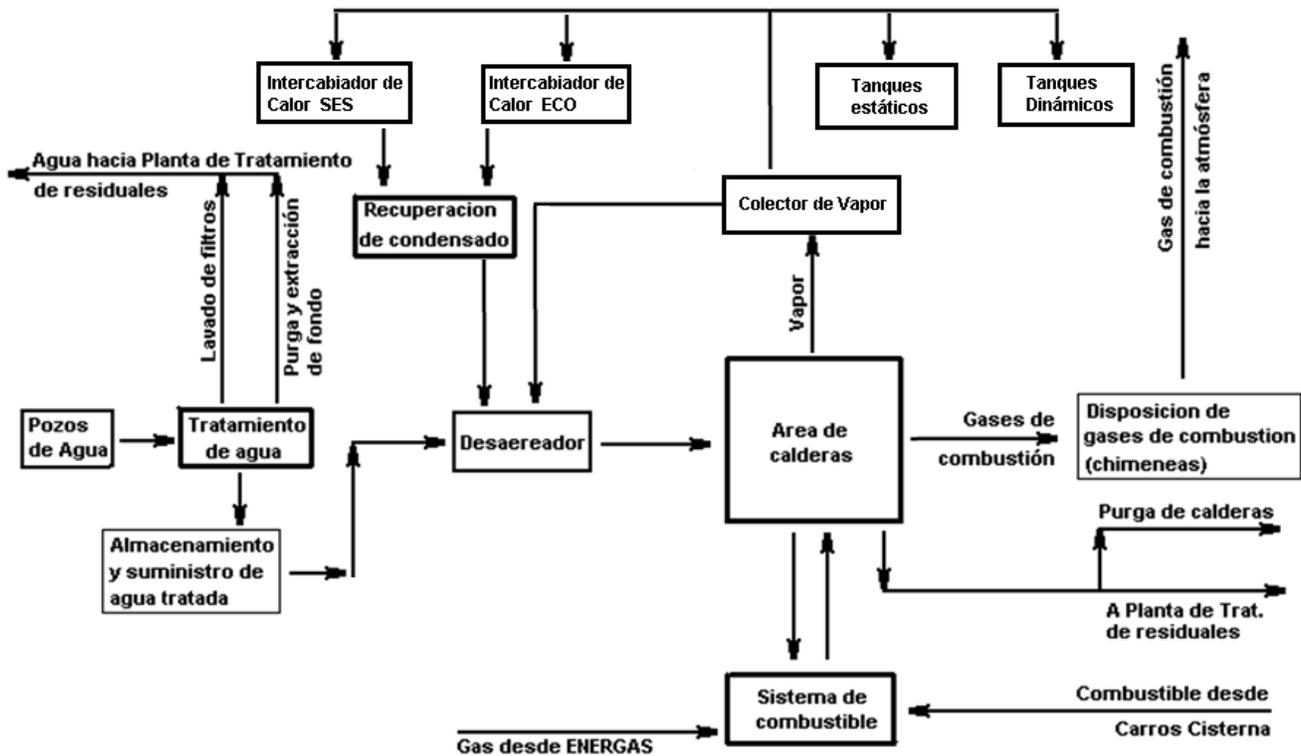


Figura 2.2. Diagrama de Bloque del Sistema de Generación de Vapor de la Planta de Procesamiento de Crudo.

2.2 Situación actual de la estación de generación de vapor según la inspección de control tecnológico.

- Se encuentra el generador de vapor tres fuera de servicio por mantenimiento.
- Está pendiente el montaje de los flujómetros de vapor en la salida de los generadores de vapor cuatro y cinco.
- No puede evaluarse la calidad de la combustión por continuar roto el analizador de gases.

- Las válvulas de vapor de los generadores tienen deficiencias.
- Las bombas de agua están en mal estado técnico con salideros y el generador de vapor uno cuenta con una sola bomba de agua de alimentación.
- De forma general se aprecia corrosión en líneas, sistemas de drenajes y planta de agua actual.
- Se encuentra en buen estado técnico el aislamiento de las tuberías.
- Para la evaluación del producto de tratamiento interno resulta fundamental conocer los resultados de pH en los distintos puntos de muestreo, pero no hay metro pH, ni papel indicador.

2.3 Mediciones necesarias para la evaluación de los generadores de vapor.

La realización de las mediciones es fundamental para los balances de masa y energía que se desarrollarán para posteriormente realizar la evaluación de los generadores de vapor. En la estación de generación de vapor de la Planta de Procesamiento de Crudo de la EPEP - Centro se tomaron las siguientes variables de proceso:

- Ta: Temperatura del Agua de Alimentación (°C).
- Tg: Temperatura de la salida de los gases (°C).
- Pv: Presión de vapor (atm).
- Fg: Flujo de Gas Natural (m³/h).
- Fv: Flujo de vapor (t/h).

Estas variables fueron medidas durante un total de 17 días desde las nueve de la mañana hasta las dos de la tarde con un intervalo de 15 minutos. Al generador de vapor dos se le realizaron las mediciones desde el día 27 de abril hasta el 10 de mayo del 2015 y al generador de vapor uno, desde el 7 hasta el 12 de mayo por dificultades técnicas del flujómetro instalado y se comenzó a medir después de solucionado el problema.

2.4 Análisis estadístico de la calidad de las variables medidas.

Para el trabajo con las mediciones realizadas a los generadores de vapor que se analizan en el presente trabajo, se hace imprescindible la realización de un análisis estadístico detallado a cada una de las variables con las que se trabaja, con el objetivo de conocer si las medias de las mismas son significativas y pueden ser utilizadas en los cálculos posteriores.

Se realiza la prueba de normalidad mediante la cual se conoce si los valores mantienen una distribución normal. De esta manera los coeficientes de asimetría y curtosis deben permanecer entre -2 y 2, el coeficiente de variabilidad debe ser menor que 12% y el histograma de frecuencia debe tener forma de curva gaussiana para evidenciar la normalidad de las variables.

Fue utilizado el software Statgraphic Plus versión 5.0 para el desarrollo de esta prueba, con el fin de conocer si las variabilidades obtenidas en cada medición, implican un cambio significativo.

Se aplicó la Norma Cubana 92 – 21: 2014, encargada de los procedimientos para evaluar la anormalidad de los resultados de las observaciones, utilizando el método de desviación típica desconocida, donde para una serie ordenada de los resultados de las observaciones de una variable aleatoria continua se calcula la media muestral:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{ec. 2.1}$$

Y la desviación típica muestral:

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2\right)} \quad \text{ec. 2.2}$$

Para evaluar si x_n o x_1 es anormal o no y tomar una decisión sobre su exclusión o inclusión en la composición de la muestra, se halla el valor del estadígrafo:

$$t_n = \frac{x_n - \bar{X}}{s} \quad \text{ec. 2.3}$$

$$t_1 = \frac{\bar{X} - x_1}{s} \quad \text{ec. 2.4}$$

El resultado obtenido se compara con su valor límite h que se localiza en la tabla 3 de la norma para cuando la muestra es mayor que 20, el caso que se analiza tiene un nivel de significación (α) de 0.05.

Si $t_n \geq h$ ($t_i \geq h$), se dice que el resultado de la observación que se sospecha anormal es anormal y debe ser excluido, en el caso contrario se considera normal y no se excluye.

2.5 Balance de masa y energía en los generadores de vapor.

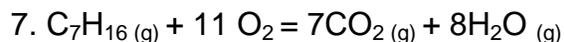
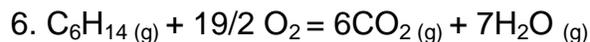
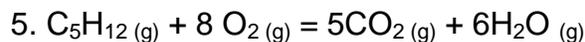
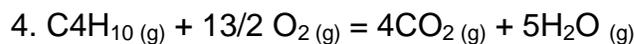
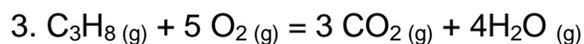
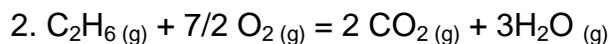
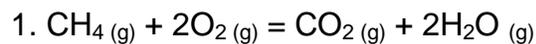
Para desarrollar los balances de masa y energía fueron procesados los datos mediante la utilización de una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel donde fueron programadas todas las ecuaciones de los balances, de esta manera los resultados obtenidos lograron una mayor exactitud.

Los balances de masa se realizaron aplicando la ley de conservación de la masa, la cual plantea que la masa que se acumula es igual a la masa del compuesto que entra, menos la del que sale, más la que se genera, menos la que se consume. Como el sistema se considera estacionario la masa que se acumula es cero.

$$m_{\text{entra}} - m_{\text{sale}} + m_{\text{genera}} - m_{\text{consume}} = m_{\text{acumula}} \quad \text{ec. 2.5}$$

Se conoce la composición y el flujo volumétrico del gas natural. Se considera 100% de conversión y de rendimiento y 10% de exceso de aire.

Las reacciones químicas que se producen durante la combustión de dicho combustible son:



Para determinar el flujo molar total se aplicó la ecuación de los gases ideales y posteriormente las cantidades de sustancias molares de cada gas.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{ec. 2.6}$$

Donde:

P - Presión de entrada de los gases. (kPa)

V - Volumen del gas. (m³)

N - Flujo total. (kmol/h)

R - Constante de los gases ideales. (82.06 cm³ *atm/mol*K)

T - Temperatura de entrada de los gases. (K)

$$n_c(i) = F \cdot x(i) \quad \text{ec. 2.7}$$

$n_c(i)$ - cantidad de sustancia de cada componentes que entra con el combustible (gas) (kmol/h)

$x(i)$ – composición molar de cada componente que entra con el combustible (gas).

F - Flujo total de gas (kmol/h)

El exceso de aire seco (AS) es igual al exceso de dióxigeno porque el dióxigeno constituye el 21% de la composición del aire seco.

Exceso Aire Seco = Exceso O₂, porque el O₂ tiene una proporción definida y conocida en el aire seco.

Reactivos limitantes (RL): CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ y C₅H₁₂

Reactivo en exceso: O₂ (g)

$$\% \text{Exceso O}_2 = \frac{O_2 \text{alimentado} - O_2 \text{teórico}}{O_2 \text{teórico}} \cdot 100 \quad \text{ec. 2.8}$$

Esta ecuación se utiliza para calcular el O₂ alimentado que se despeja de la misma:

$$O_2 \text{alimentado} = \% \text{Exceso O}_2 \cdot O_2 \text{teórico} + O_2 \text{teórico} \quad \text{ec. 2.9}$$

$$O_2 \text{teórico} = O_2 \text{estequiométrico} - O_2 \text{ que acompaña al RL} \quad \text{ec. 2.10}$$

Como con el reactivo limitante no entra O₂, entonces:

$$O_2 \text{teórico} = O_2 \text{estequiométrico} \quad \text{ec. 2.11}$$

$$O_2 \text{estequiométrico} = \sum (\text{RI alimentado} \cdot \text{Relación estequiométrica}) \quad \text{ec. 2.12}$$

$$O_2 \text{estequiométrico} = \left(n_{\text{CH}_4 \text{entra}} \cdot \frac{2O_2}{1\text{CH}_4} \right) + \left(n_{\text{C}_2\text{H}_6 \text{entra}} \cdot \frac{3.5O_2}{1\text{C}_2\text{H}_6} \right) + \left(n_{\text{C}_3\text{H}_8 \text{entra}} \cdot \frac{5O_2}{1\text{C}_3\text{H}_8} \right) + \left(n_{\text{C}_4\text{H}_{10} \text{entra}} \cdot \frac{6.5O_2}{1\text{C}_4\text{H}_{10}} \right) + \left(n_{\text{C}_5\text{H}_{12} \text{entra}} \cdot \frac{8O_2}{1\text{C}_5\text{H}_{12}} \right) \quad \text{ec. 2.13}$$

$$\text{kmol AS} = \text{kmol O}_2 \text{ alimentado} \cdot \frac{100 \text{ kmol AS}}{21 \text{ kmol O}_2} \quad \text{ec. 2.14}$$

Para determinar la cantidad de agua que entra se necesitan los Kg de aire seco (AS).

$$\text{kg AS} = \text{kmol AS} \cdot M(\text{AS}) \quad \text{ec. 2.15}$$

Con $T_a = 306 \text{ K}$ y saturación relativa de $Y_R = 55\%$ se determina la saturación en la carta psicrométrica. (Figura B.10. Perry, 1985)

Se obtiene $Y = 0,07 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg AS}$

$$n(\text{H}_2\text{O})_{\text{entra}} = \frac{Y \cdot \text{kg AS}}{M(\text{H}_2\text{O})} \quad \text{ec. 2.16}$$

$$\text{kg AH} = \text{kg AS} \cdot (1 + Y) \quad \text{ec. 2.17}$$

$$n(\text{N}_2)_{\text{entra}} = \text{O}_2 \text{ alimentado} \cdot \frac{79 \text{ kmol N}_2}{21 \text{ kmol O}_2} \quad \text{ec. 2.18}$$

De esta manera se puede afirmar que el N_2 entra con el gas natural y con el aire seco, por lo tanto:

$$n(\text{N}_2)_{\text{total}} = n(\text{N}_2)_{\text{gas natural}} + n(\text{N}_2)_{\text{aire seco}} \quad \text{ec. 2.19}$$

Reaccionante consumido

$$n(\text{O}_2)_{\text{cons}} = \sum (\text{Rl consumido} \cdot \text{Relación estequiométrica}) \quad \text{ec. 2.20}$$

$$n(\text{O}_2)_{\text{cons}} = \left(n_{\text{CH}_4 \text{ cons}} \cdot \frac{2\text{O}_2}{1\text{CH}_4} \right) + \left(n_{\text{C}_2\text{H}_6 \text{ cons}} \cdot \frac{3.5\text{O}_2}{1\text{C}_2\text{H}_6} \right) + \left(n_{\text{C}_3\text{H}_8 \text{ cons}} \cdot \frac{5\text{O}_2}{1\text{C}_3\text{H}_8} \right) +$$

$$\left(n_{\text{C}_4\text{H}_{10} \text{ cons}} \cdot \frac{6.5\text{O}_2}{1\text{C}_4\text{H}_{10}} \right) + \left(n_{\text{C}_5\text{H}_{12} \text{ cons}} \cdot \frac{8\text{O}_2}{1\text{C}_5\text{H}_{12}} \right) \quad \text{ec. 2.21}$$

Productos generados

$$n(\text{CO}_2)_{\text{genera}} = \sum (\text{Rl consumido} \cdot \text{Relación estequiométrica}) \quad \text{ec. 2.22}$$

$$n(\text{CO}_2)_{\text{genera}} = \left(n_{\text{CH}_4 \text{ cons}} \cdot \frac{1\text{CO}_2}{1\text{CH}_4} \right) + \left(n_{\text{C}_2\text{H}_6 \text{ cons}} \cdot \frac{2\text{CO}_2}{1\text{C}_2\text{H}_6} \right) + \left(n_{\text{C}_3\text{H}_8 \text{ cons}} \cdot \frac{3\text{CO}_2}{1\text{C}_3\text{H}_8} \right) +$$

$$\left(n_{\text{C}_4\text{H}_{10} \text{ cons}} \cdot \frac{4\text{CO}_2}{1\text{C}_4\text{H}_{10}} \right) + \left(n_{\text{C}_5\text{H}_{12} \text{ cons}} \cdot \frac{5\text{CO}_2}{1\text{C}_5\text{H}_{12}} \right) \quad \text{ec. 2.23}$$

$$n(\text{H}_2\text{O})_{\text{genera}} = \sum (\text{Rl consumido} \cdot \text{Relación estequiométrica}) \quad \text{ec. 2.24}$$

$$n(\text{H}_2\text{O})_{\text{genera}} = \left(n_{\text{CH}_4 \text{ cons}} \cdot \frac{2\text{H}_2\text{O}}{1\text{CH}_4} \right) + \left(n_{\text{C}_2\text{H}_6 \text{ cons}} \cdot \frac{3\text{H}_2\text{O}}{1\text{C}_2\text{H}_6} \right) + \left(n_{\text{C}_3\text{H}_8 \text{ cons}} \cdot \frac{4\text{H}_2\text{O}}{1\text{C}_3\text{H}_8} \right) +$$

$$\left(n_{\text{C}_4\text{H}_{10} \text{ cons}} \cdot \frac{5\text{H}_2\text{O}}{1\text{C}_4\text{H}_{10}} \right) + \left(n_{\text{C}_5\text{H}_{12} \text{ cons}} \cdot \frac{6\text{H}_2\text{O}}{1\text{C}_5\text{H}_{12}} \right) \quad \text{ec. 2.25}$$

2.6 Determinación de la eficiencia de los generadores de vapor por el método indirecto.

El método indirecto se basa en el cálculo de las pérdidas térmicas expresadas en porcentaje del calor disponible y posteriormente la determinación de forma indirecta de la eficiencia de los generadores de vapor.

Pons, (2008) de forma general plantea 8 pérdidas térmicas.

$$n = 100 - \sum q_{pi} \quad \text{ec. 2.26}$$

$$q_{pi} = \frac{Q_p}{Q_d} \cdot 100 \quad \text{ec. 2.27}$$

$$Q_p = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad \text{ec. 2.28}$$

$$Q_d = PCI + Q_{FC} + Q_a + Q_v \quad \text{ec. 2.29}$$

Dónde:

q_{pi} - Calor disponible perdido (%)

Q_p - Pérdidas de energía por diferentes conceptos.

Q_2 - Energía perdida debido a la humedad del combustible (kJ/kg de combustible).

Q_3 - Energía perdida debido al agua formada por la combustión del hidrógeno del combustible (kJ/kg de combustible).

Q_4 - Energía perdida debido al agua del aire (kJ/kg de combustible).

Q_5 - Energía perdida debido a los productos gaseosos secos (kJ/kg de combustible).

Q_6 - Energía perdida debido a la combustión incompleta (kJ/kg de combustible).

Q_7 - Energía perdida debido al carbono no quemado (kJ/kg de combustible).

Q_8 - Energía perdida debido a radiación, convección y conducción en las paredes del horno, al hidrógeno y los hidrocarburos que no reaccionan, etcétera (kJ/kg de combustible).

Solo son consideradas Q_3 , Q_4 y Q_5 , las restantes son despreciables.

Q_d - Calor disponible (kJ/kg de combustible).

PCI - Poder calórico inferior del combustible (kJ/m³).

Q_{FC} - Calor físico del combustible.

Q_a - Calor físico del aire cuando es calentado antes del calentador de aire.

Q_v - Calor que llega al generador de vapor con el vapor de atomización.

Según Pons, (2008):

$$Q_3 = m (H_2O) \cdot (H_{VC} - H_{LC}) \quad \text{ec. 2.30}$$

Donde:

$m (H_2O)$ - Agua formada en la reacción de combustión por kilogramo de combustible quemado.

H_{VC} - Entalpía específica del vapor de agua producido.

H_{LC} - Entalpía específica del agua suministrada al equipo para producir vapor de agua.

Vopat y Skrostzki, (1986) exponen que si t_g es la temperatura de salida de los gases por la chimenea y t_c la temperatura de entrada del combustible ambas temperaturas expresadas en °C y $(H_{VC} - H_{LC})$ en kJ/kg:

Para $t_g > 302^\circ\text{C}$

$$(H_{VC} - H_{LC}) = 4.1867 \cdot (583.33 + 0.5 \cdot t_g - t_c) \quad \text{ec. 2.31}$$

Para $t_g < 302^\circ\text{C}$

$$(H_{VC} - H_{LC}) = 4.1867 \cdot (595.4 + 0.46 \cdot t_g - t_c) \quad \text{ec. 2.32}$$

$$Q_4 = W_{AV} \cdot 1.926 \cdot (t_g - t_a) \quad \text{ec. 2.33}$$

Donde:

W_{AV} - Cantidad de kilogramos de aguas que contiene el aire por kilogramo de combustible utilizado.

$$Q_5 = W_{GS} \cdot \overline{C_{PGS}} \cdot (t_g - t_a) \quad \text{ec. 2.34}$$

Donde:

W_{GS} : Número de kilogramos de productos gaseosos secos por kilogramo de combustible quemado.

$\overline{C_{PGS}}$ - Capacidad calorífica promedio entre t_a y t_g para los productos gaseosos secos. (1 kJ/kg · °C)

Pankrátov, plantea que el valor calórico del combustible se determina a partir de la siguiente expresión:

$$PCI = 108H_2 + 234H_2S + 358CH_4 + 638C_2H_4 + 913C_3H_8 + 1135C_4H_8 + 1187C_4H_{10} + 1461C_5H_{12} + 1403(C_6H_{14} + C_7H_{16}) \quad \text{ec. 2.35}$$

2.7 Cálculo del flujo de vapor por el método directo.

El método directo relaciona de forma directa la eficiencia del generador con la producción de vapor.

Se pretende calcular el flujo de vapor generado mediante este método a partir de la eficiencia determinada por el método indirecto.

$$\eta = \frac{mv \cdot \Delta H}{\beta \cdot VC} \quad \text{ec. 2.36}$$

De la ec. 2.36 se despeja mv.

$$mv = \frac{\eta \cdot \beta \cdot VC}{\Delta H} \quad \text{ec. 2.37}$$

$$\Delta H = H_f - H_i \quad \text{ec. 2.38}$$

Donde:

η - Eficiencia (%).

mv - Flujo de vapor generado (kg/h).

H_i - Entalpía del agua alimentación (kJ/kg) (Tabla 1. Keenan, Joseph H., 1988).

H_f - Entalpía del vapor saturado (kJ/kg) (Tabla 2. Keenan, Joseph H., 1988).

VC - Valor calórico del combustible (kJ/m³).

β - Consumo de combustible (m³/h).

2.8 Medición de Flujo de Vapor en la Sala de Calderas de la Planta de Procesamiento de Crudo.

Con el objetivo de garantizar las mediciones del flujo de vapor obtenido en la Sala de Calderas de la Planta de Procesamiento de Crudo de la EPEP – Centro se midió el flujo de vapor en la sala de control cada 15 minutos simultáneamente con el resto de las variables medidas.

Para conocer el fundamento teórico en que se basa la metodología programada en el software que permite el registro de la variable, se consulta la Norma Internacional ISO 5167, que es la encargada de la Medición del caudal de fluidos mediante dispositivos de presión diferencial intercalados en conductos en carga de sección transversal circular.

Para el cálculo de flujo de vapor por presión diferencial, se emplean ecuaciones que dependen de una serie de coeficientes empíricos: coeficiente de descarga,

coeficiente de expansión; los cuales corrigen la medición de flujo en función de las propiedades físicas, condiciones de diseño del flujómetro, régimen de flujo, etc.

En la programación del cálculo de flujo de vapor se utilizaron las ecuaciones de las propiedades físicas del vapor y además los parámetros: relación de diámetros, coeficiente de descarga y coeficiente de expansión.

Haciendo uso de las ecuaciones que se muestran en el anexo 8 se confeccionó el programa de cálculo de flujo de vapor, partiendo de la dependencia que presenta el coeficiente de descarga con respecto al número de Reynolds, que a su vez es función del flujo real de vapor medido, creando un proceso iterativo de cálculo.

2.9 Técnicas de evaluación y estimación de riesgos en el proceso de generación de vapor.

La evaluación de los diversos riesgos potenciales existentes en una determinada instalación se lleva a cabo modernamente mediante la aplicación de un conjunto de metodologías específicas, cada vez más extendidas; dicha evaluación, también denominada análisis de riesgos.

La técnica del análisis HAZOP, también conocido como análisis de riesgo y operabilidad, se utiliza para la identificación, evaluación cualitativa y prevención del riesgo potencial y de los problemas de operación derivados del funcionamiento incorrecto de un sistema técnico, lo cual se fundamenta en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones normales de operación y diseño suelen conducir a un fallo del sistema, que puede provocar desde una parada del proceso hasta un accidente mayor de graves consecuencias.

Capítulo # 3: Análisis de los resultados.

En el presente capítulo se realiza el análisis de los resultados siguiendo la secuencia del esquema metodológico expuesto en el capítulo 2.

3.1 Realización de mediciones necesarias para la evaluación de los generadores de vapor uno y dos.

Los generadores de vapor uno y dos fueron evaluados al ser únicos que tenían instalados los flujómetros de vapor, el generador tres estaba fuera de servicio por mantenimiento.

El análisis realizado a las mediciones realizadas determinó que:

- ❖ La temperatura del agua de alimentación a los generadores de vapor uno y dos es estable, la media para ambos generadores oscila entre 83,27 y 83,46°C por lo que es despreciable su variación. Esta es ligeramente superior al rango recomendado por el fabricante que es 50 – 80°C.
- ❖ La temperatura de los gases de salida en el generador número dos muestra valores superiores, en alrededor de 20°C, a lo requerido que es 235°C. En el caso del generador uno, supera el valor requerido en 30°C siendo aproximadamente de 265°C. De manera general, estas altas temperaturas de los gases de salida demuestran las pérdidas energéticas de ambos generadores de vapor lo que está asociado a suciedad en la superficie de transferencia de calor. Estos valores reflejan temperaturas inferiores a las existentes en la evaluación realizada por Figueredo, (2014).
- ❖ La presión de trabajo de los generadores de vapor uno y dos tuvo un comportamiento inestable que lo confirma el análisis estadístico. Arrojó una media de 0.8 MPa (8 atm) siendo la misma cercana a lo establecido por el fabricante que es de 1 MPa (10 atm). Según Ferrusca, (2013) esta variable es de vital importancia en el funcionamiento correcto del proceso y está ligada a la estabilidad de otras variables que inciden en el mismo.

- ❖ La variable flujo de gas consumido tiene un comportamiento bastante estable. En el generador uno muestra valores inferiores a los reportados por de Diego, (2013) y en el caso del generador dos los valores son superiores a los obtenidos por Figueredo, (2014).
- ❖ Los generadores de vapor están diseñados para producir 10 t/h y en las condiciones actuales ambos generadores producen aproximadamente 5 t/h, lo que significa que están trabajando a la mitad de su capacidad siendo este valor superior a los obtenidos en la evaluación realizada por Figueredo, (2014).

3.2 Análisis estadístico de las mediciones realizadas.

Las mediciones fueron realizadas en un período de 17 días con un intervalo de 15 minutos desde las nueve de la mañana hasta las dos de la tarde.

La valoración se hace por generador de vapor.

3.2.1 Análisis de la normalidad de las variables.

Los requisitos para que una data de valores cumpla con una distribución normal son que los coeficientes de asimetría, curtosis y variación se encuentren en el rango establecido, entre -2 y 2 para los dos primeros ya que de lo contrario se indica un alejamiento significativo de la normalidad y el coeficiente de variación debe ser menor que el 12%, de no ser así los valores estarían muy dispersos y la media de los mismos no sería significativa.

En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los resultados obtenidos al analizar la normalidad de las variables medidas en los generadores de vapor que se analizan. En el generador de vapor uno, las variables temperatura del agua de alimentación, flujo de gas y flujo de vapor cumplen con todos los requisitos exceptuando el coeficiente de variabilidad para el flujo de vapor, que está muy por encima de lo establecido. Las variables temperatura de salida de los gases y presión de vapor tienen los coeficientes con valores alterados excepto el coeficiente de curtosis de la presión de vapor y el coeficiente de variabilidad de la temperatura de salida de los gases.

Tabla 3.1: Prueba de normalidad a las variables del generador de vapor uno.

Variable	Coefficiente de asimetría	Coefficiente de curtosis	Coefficiente de variación (%)
Temperatura agua alimentación	2,086	0,089	3,7
Temperatura gases de salida	-12,37	28,0	2,9
Presión de vapor	-4,753	-0,087	14,4
Flujo de gas	-0,714	1,769	6
Flujo de vapor	1,429	-1,938	23,7

Fuente: Elaboración propia

En el generador de vapor dos solo la variable flujo de gas coincide con el rango normado, la temperatura del agua de alimentación y de salida de los gases solo cumplen con el valor del coeficiente de variabilidad y la presión y flujo de vapor incumplen en todos los parámetros.

Tabla 3.2: Prueba de normalidad a las variables del generador de vapor dos.

Variable	Coefficiente de asimetría	Coefficiente de curtosis	Coefficiente de variación (%)
Temperatura agua alimentación	3,214	10,281	4,7
Temperatura gases de salida	-33,747	96,114	6,6
Presión de vapor	-15,140	24,583	17,6
Flujo de gas	1,149	0,209	5,9
Flujo de vapor	-18,828	63,96	16,1

Fuente: Elaboración propia

Debido a estos resultados, la realización de los balances de masa y energía posteriores exige un análisis detallado de cada una de las variables medidas para establecer el procedimiento a seguir con la data de valores.

3.2.2 Análisis estadístico de las variables en los generadores de vapor.

A la variable flujo de gas del generador de vapor dos se les realizó la prueba de normalidad, reportando un valor de probabilidad de 0.0002, por ser menor que 0.01 no se puede rechazar la idea de que esta variable proviene de una distribución normal con un 99% de confiabilidad, lo cual queda evidenciado por el histograma de frecuencia en forma de curva gaussiana.

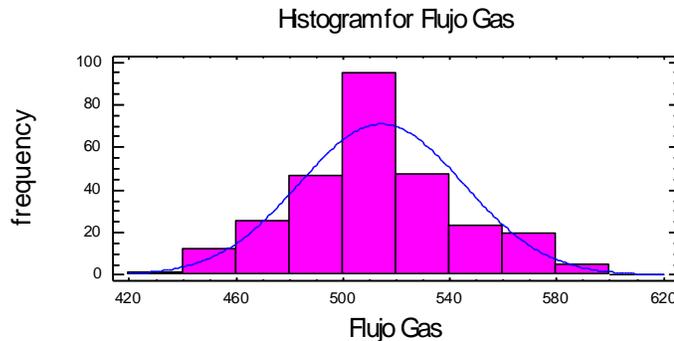


Figura 3.1 Histograma de frecuencia del flujo de gas.

Fuente: Elaboración propia

El resto de las variables no cumplen con una distribución normal y se requirió de un ajuste estadístico en el cual se eliminan los valores considerados anormales y de esta manera normalizar la data de valores.

3.2.3 Ajuste estadístico de las mediciones realizadas en los generadores de vapor.

Para lograr que las variables cumplan con una distribución normal se necesitó desechar los valores responsables de dicho comportamiento, para lo cual se aplicó la Norma Cubana 92 – 21: 2014, encargada de los procedimientos para evaluar la anormalidad de los resultados de las observaciones.

Después de eliminar los valores que afectan el comportamiento normal de las mediciones realizadas se repitió la prueba de normalidad, la cual evidenció que todos los coeficientes se encuentran en el rango establecido. De forma gráfica los histogramas de frecuencia evidencian el comportamiento normal de las variables. En los anexos 4 y 5 se observan los valores con los que realmente se trabajaron.

Generador de vapor uno:

Los valores de todas las variables del generador de vapor uno fueron divididos en dos grupos, debido a que la variable flujo de vapor cumple con los coeficientes de asimetría y curtosis pero el coeficiente de variabilidad es muy elevado, lo que significa que la media no es significativa ya que la muestra completa presenta un comportamiento bimodal. Se le realizó una prueba de normalidad a cada grupo de datos y de esta manera se trabajó con dos valores medios de cada variable, obteniendo en los cálculos dos valores de flujo de vapor.

Variable flujo de vapor:

Se agruparon los valores desde 3.63 hasta 5.92 logrando la normalidad ya que el valor de probabilidad es de 0,036 y al ser menor que 0.05 no se rechaza la idea de que el comportamiento es normal con un 95% de confiabilidad.

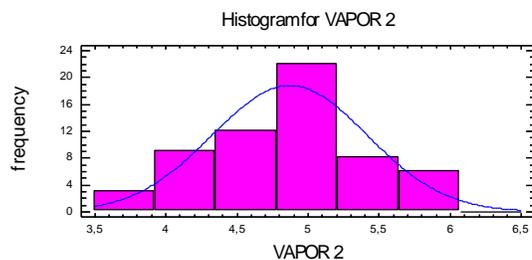


Figura 3.2 Histograma de frecuencia del flujo de vapor (v1).

Fuente: Elaboración propia

Los valores desde 6 hasta 9.24 conformaron un grupo de datos que al realizarles la prueba de normalidad se obtuvo que al ser el valor de probabilidad de 0.1, por lo que la variable tiene un comportamiento normal con un 90% de confianza.

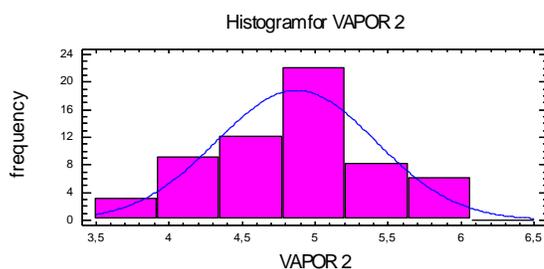


Figura 3.3 Histograma de frecuencia del flujo de vapor (v2).

Fuente: Elaboración propia

Al dividir las datas de valores de las variables temperatura del agua de alimentación, temperatura de salida de los gases, presión de vapor y flujo de gas, se logró el comportamiento normal de cada grupo de datos, los histogramas de frecuencia se observan en el anexo 6.

En la tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de normalidad realizada a los grupos de datos de cada variable del generador de vapor que se analiza.

Tabla 3.3: Prueba de normalidad del flujo de vapor.

Variable		Coeficiente de asimetría	Coeficiente de curtosis	Coeficiente de variación (%)
Flujo de vapor	1	1,152	-1,02	11,47
	2	-0,166	-0.186	11,19
Temperatura del Agua de alimentación	1	1,369	-0,249	4,2
	2	0,569	-1,564	3,0
Temperatura de salida de los gases	1	-1,722	-0,415	1,3
	2	-1,97	-0,76	2,28
Presión de vapor	1	-1,23	-1,452	5,4
	2	-1,788	-1,92	9,6
Flujo de gas	1	0,819	0,726	4,4
	2	0.15	0.377	7,22

Fuente: Elaboración propia

Generador de vapor dos:

A las variables temperatura del agua de alimentación, temperatura de salida de los gases, flujo de vapor y presión de vapor, después de eliminar los valores anormales fue necesario realizarle una segunda prueba de normalidad en la cual se obtuvieron valores de probabilidad de 0,0008, 0,00003 y 0 para los tres primeros, y al ser menores que 0.01 se evidencia el comportamiento normal de las variables para un 99% de confiabilidad, para el caso de la presión de vapor el

valor de la probabilidad es de 0,0174 y al ser menor que 0,1, cumple con una distribución normal para un 90% de confianza.

En la tabla 3.4 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de normalidad realizada a estas variables. Todos los histogramas tienen el mismo comportamiento, por lo que los de la temperatura de salida de los gases y el flujo y la presión de vapor se muestran en el anexo 7.

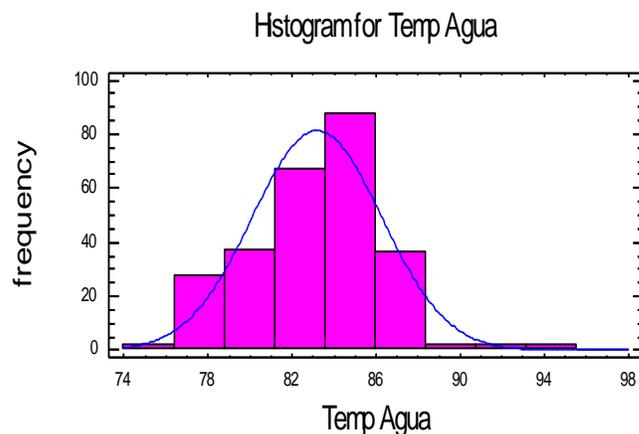


Figura 3.4 Histograma de frecuencia de la temperatura de agua de alimentación.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Prueba de normalidad a las variables temperatura del agua de alimentación, temperatura de salida de los gases, flujo de vapor y presión de vapor.

Variable	Coefficiente de asimetría	Coefficiente de curtosis	Coefficiente de variación (%)
Temperatura del agua de alimentación	0,44	1,91	3,7
Temperatura de los gases de salida	-1,823	-1,696	2,0
Presión de vapor	-2,047	0,056	2,74
Flujo de vapor	-1,918	1,581	7,4

Fuente: Elaboración propia

La dispersión de la data de valores de cada una de las variables medidas, en los generadores de vapor analizados, se demuestra en las figuras 3.5 y 3.6. En el eje de la derecha se observa la escala correspondiente a las variables flujo de vapor (t/h) y presión de vapor (atm) y a la izquierda, la de las variables flujo de gas (m³/h), temperatura del agua de alimentación (°C) y temperatura de salida de los gases (°C).

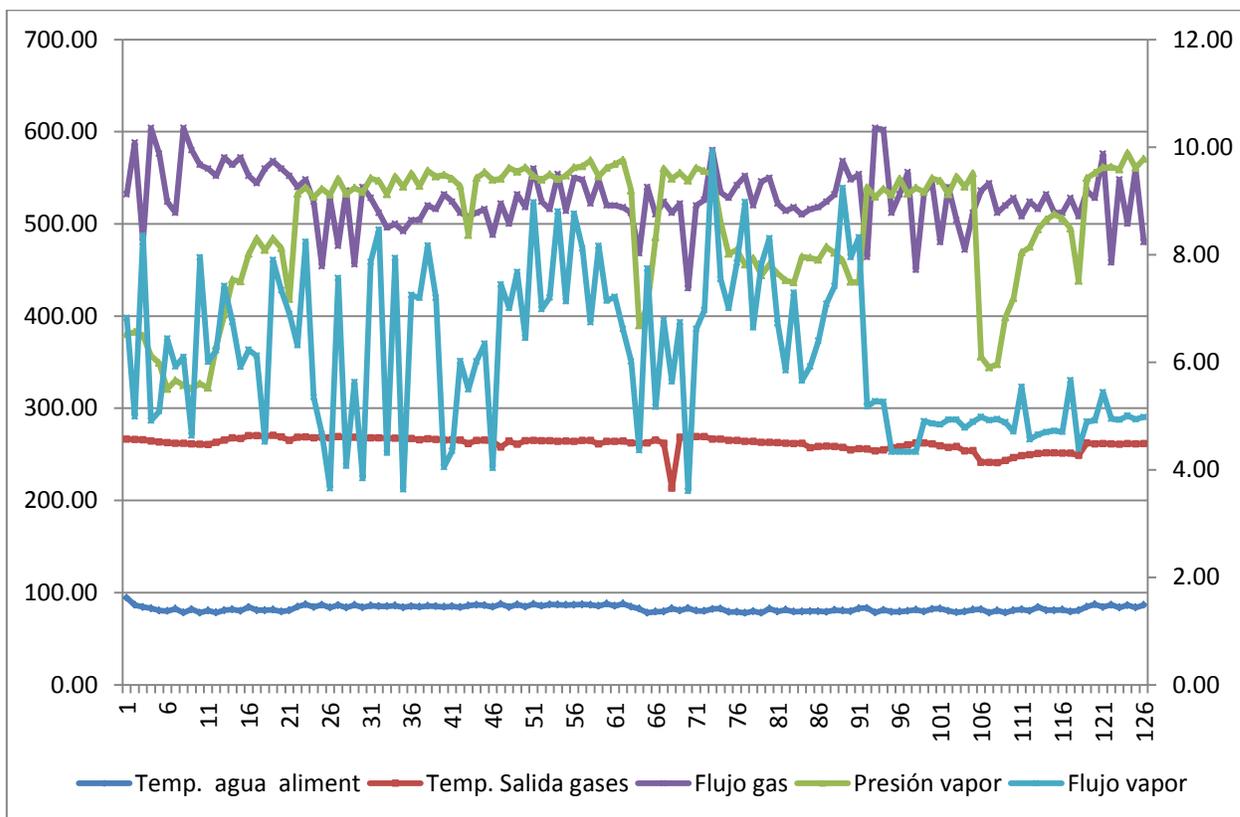


Figura 3.5 Comportamiento de las variables medidas en el generador de vapor uno.

Fuente: Elaboración propia

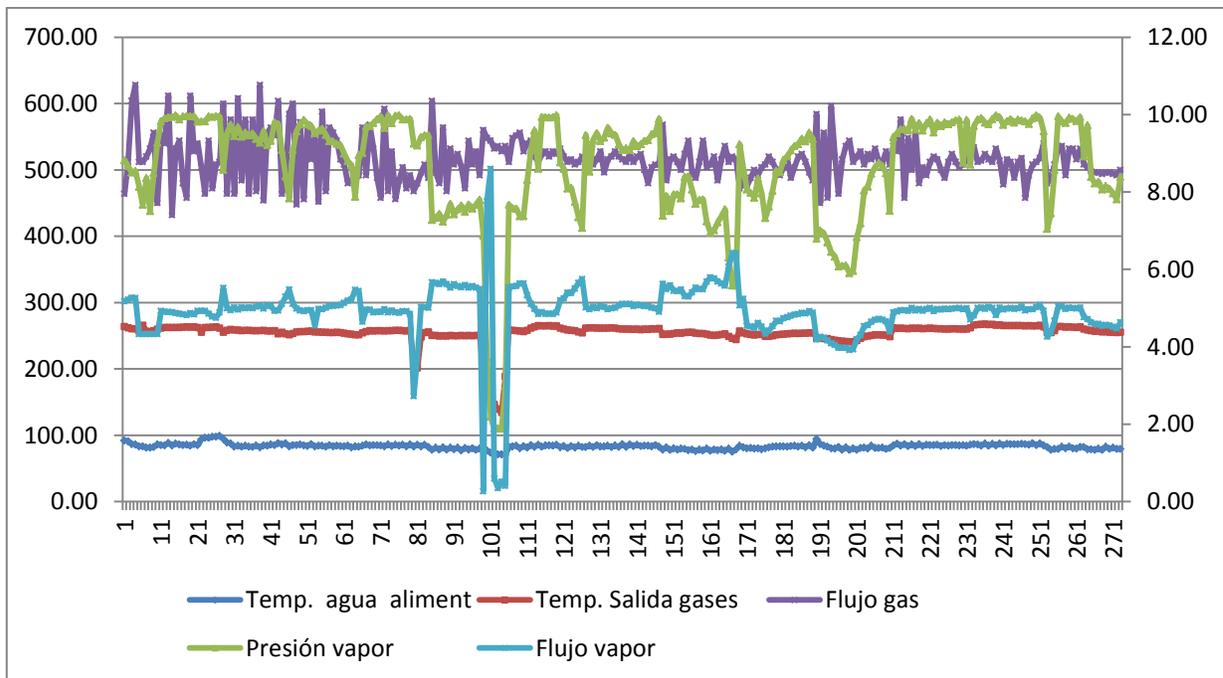


Figura 3.6 Comportamiento de las variables medidas en el generador de vapor dos.

Fuente: Elaboración propia

Ambas figuras demuestran que existe una dependencia entre las variables medidas, de forma tal que al disminuir la presión de vapor, siendo la misma, función de los equipos consumidores de vapor, disminuye la producción de vapor; a medida que la presión aumenta, la capacidad de evaporación disminuye porque se necesita incrementar más energía para elevar la temperatura de ebullición para el nuevo estado de equilibrio termodinámico. Es decir una variación de la presión de vapor trae consigo variaciones en la generación de vapor independientemente de que la temperatura del agua de alimentación se mantenga estable. Por lo tanto, las fluctuaciones que existen en el flujo de vapor medido es función de las condiciones operacionales de la planta con la entrada y salida puntual de equipos consumidores de vapor.

3.3 Balance de masa y energía en los generadores de vapor.

Los resultados del balance de masa son lógicos ya que no hay presencia de hidrocarburos ni de monóxido de carbono en los gases de salida. El compuesto que se genera en mayor proporción es el agua por la presencia de varios hidrocarburos en el gas natural. En las tablas 3.5 y 3.6 se observan los balances de masa para ambos generadores de vapor.

Tabla 3.5: Balance de masa en el generador de vapor uno.

Componentes (x)	composición	n entra (kmol)	n genera (kmol)	n consume (kmol)	n sale (Kmol)
Hexano (C ₆)	0,0006	0,034	-	0,034	-
Etano (C ₂)	0,0380	2,24	-	2,24	-
CO ₂	0,0653	3,86	61,89	-	65,75
Propano (C ₃)	0,0190	1,12	-	1,1232	-
I-Butano (IC ₄)	0,0031	0,18	-	0,18	-
N-Butano (NC ₄)	0,0043	0,25	-	0,25	-
H ₂ S	0,0000	-	-	-	-
I-Pentano (IC ₅)	0,0014	0,085	-	0,085	-
N-Pentano (NC ₅)	0,0006	0,034	-	0,034	-
Nitrógeno	0,0018	498,40	-	-	498,40
Metano (C ₁)	0,8654	51,23	-	51,23	-
C ₇	0,000572	0,033	-	0,033	-
O ₂	-	132,45	-	120,41	12,04
H ₂ O	-	71,13	117,12	-	188,25

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6: Balance de masa en el generador de vapor dos.

Componentes (x)	composición	n entra (Kmol)	ngenera (Kmol)	n consume (Kmol)	n sale (Kmol)
Hexano (C ₆)	0,0006	0,033	-	0,033	-
Etano (C ₂)	0,0380	2,19	-	2,19	-
CO ₂	0,0653	3,78	60,56	-	64,34
Propano (C ₃)	0,0190	1,09	-	1,09	-
I-Butano (IC ₄)	0,0031	0,18	-	0,18	-
N-Butano (NC ₄)	0,0043	0,24	-	0,24	-
H ₂ S	0,0000	-	-	-	-
I-Pentano (IC ₅)	0,0014	0,083	-	0,083	-
N-Pentano (NC ₅)	0,0006	0,033	-	0,033	-
Nitrógeno	0,0018	487,70	-	-	487,70
Metano (C ₁)	0,8654	50,13	-	50,13	-
C ₇	0,000572	0,033	-	0,033	-
O ₂	-	129,61	-	117,83	11,78
H ₂ O	-	69,60	114,60	-	184,21

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los balances de energía en los cuales están incluidos los balances de masa se pueden observar en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Pérdidas de energía en los generadores de vapor uno y dos.

Pérdidas	Generador de vapor 1		Generador de vapor 2
Q ₃ (kJ/kg de combustible)	5265,37	5251,56	5240,45
Q ₄ (kJ/kg de combustible)	463,99	456,16	449,85
Q ₅ (kJ/kg de combustible)	3469,55	3410,95	3363,76

Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas tienen el mismo comportamiento en ambos generadores de vapor, siendo la más influyente la energía perdida debido al agua formada por la combustión del hidrógeno del combustible, la intermedia, la energía perdida debido a los productos gaseosos secos y la de menor influencia es la energía perdida debido al agua del aire.

En el trabajo presentado por Figueredo, (2014) se obtuvo resultados diferentes ya que la pérdida más influyente fue la energía perdida debido a los productos gaseosos secos, pero las temperaturas de salida de los gases eran superiores.

La eficiencia de los generadores de vapor que se analizan se determinó por el método indirecto o de pérdidas, los resultados de este cálculo se exponen en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Eficiencia de los generadores de vapor uno y dos.

	Generador de vapor 1		Generador de vapor 2
Eficiencia (%)	74.76	74,98	75.16

Fuente: Elaboración propia

La eficiencia de ambos generadores de vapor tiene un comportamiento similar, y la ligera diferencia se debe a que el generador de vapor dos fue el último que fue sometido a mantenimiento general.

Estos valores son inferiores a lo establecido por Rivero, (2011) ya que el valor de eficiencia propuesto en el Reglamento Tecnológico de Calderas y Planta de Agua es de 87%.

Comparando los valores obtenidos con Figueredo, (2014) para el generador de vapor dos y de Diego, (2013) para el generador de vapor uno, se observa una gran disminución de los mismos, lo cual evidencia que ha empeorado el funcionamiento del proceso de generación de vapor de la empresa.

3.4 Determinación del flujo de vapor.

Los valores de flujo de vapor obtenidos mediante la evaluación de los generadores de vapor por el método directo se presentan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Vapor generado por los generadores de vapor uno y dos.

	Generador de vapor 1		Generador de vapor 2
Flujo de vapor calculado (t/h)	5.96	5.87	5.82
Flujo de vapor medido (t/h)	7.32	4.88	4.99
Error (%)	22	17	14

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos mediante los balances de masa y de energía evidencian que los generadores de vapor están trabajando ligeramente superior a la mitad de su capacidad, lo que significa que no satisface la demanda tecnológica.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, en el proceso de generación de vapor fueron instalados flujómetros de placa orificio a la salida de cada generador de vapor con el objetivo de cuantificar de manera automatizada el vapor generado.

Se ratifica con estos resultados que el generador de vapor dos tiene mayor estabilidad en la operación que el uno.

La diferencia entre los valores del flujo de vapor medido y el calculado está asociada a:

- a) Las inexactitudes en el montaje mecánico de los flujómetros de vapor de presión diferencial con placa orificio, donde las tomas de presión deben estar cubiertas de agua, según lo expuesto en la norma ISO – 5167, lo cual no se logró garantizar en su totalidad.
- b) Existencia de fluctuaciones bruscas de la presión de vapor, como consecuencia de la aleatoricidad en la apertura, regulación y cierre de cada uno de los consumidores de vapor de la Planta de Procesamiento de Crudo, esta situación provoca disminuciones bruscas de la presión de vapor

con la consiguiente sobre evaporación puntual por el efecto de vaporización instantánea al desplazar el punto de equilibrio. Estos niveles de sobre evaporación, en la mayoría de los casos son superiores a la capacidad de suministro de agua a los generadores de vapor, lo que provoca paradas de los mismos por bajo nivel.

- c) Características del suministro de agua de alimentación al generador de vapor, la cual no se realiza de forma continua, sino con arrancadas y paradas de la bomba, reponiendo grandes volúmenes de agua en cortos intervalos de tiempo, provocando un ligero subenfriamiento del agua en el generador de vapor, disminuyendo el flujo de vapor con la misma carga térmica.

3.4.1 Determinación del flujo de vapor a partir de valores puntuales.

Como vía de comprobación de la magnitud del error, se determinó el flujo de vapor con valores puntuales tomando aleatoriamente una medición diaria de cada uno de los generadores de vapor en estudio y el mismo se compara con el valor correspondiente valor de flujo de vapor medido. En las tablas 3.10 y 3.11 se muestran los resultados obtenidos, la simbología que se utiliza se corresponde con la declarada por variable medida en el capítulo 2.

Tabla 3.10: Variables medidas y flujo calculado en el generador de vapor uno.

Fecha	Ta (°C)	Tg (°C)	Pv (atm)	Fg (m ³ /h)	Fv medido (t/h)	Fv calculado (t/h)	% Error	Promedio %error
07/05/2015	94,39	266,52	6,52	532	6,82	6,12	11,5	15,5
08/05/2015	84,68	268,57	9,13	540	6,31	6,07	3,99	
09/05/2015	85,78	261,66	8,36	508	5,49	5,71	3,81	
10/05/2015	82,47	261,64	6,68	468	4,36	5,19	15,9	
11/05/2015	79,88	257,21	7,94	516	5,92	5,78	2,4	
12/05/2015	81,87	241,38	6,10	536	4,98	6,16	19,1	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11: Variables medidas y flujo calculado en el generador de vapor dos.

Fecha	Ta (oC)	Tg (oC)	Pv (atm)	Fg (m3/h)	Fv medido (t/h)	Fv calculado (t/h)	% Error	Promedio %error
27/04/2015	92,11	264,34	8,82	464	5,18	5,29	2	14,77
28/04/2015	94,10	255,42	9,82	504	4,93	5,80	15	
29/04/2015	85,31	253,74	9,09	600	5,11	6,84	25,2	
30/04/2015	83,33	251,52	7,87	484	5,47	5,50	0,5	
01/05/2015	77,97	250,63	7,27	604	5,67	6,82	16,8	
02/05/2015	82,33	258,91	7,67	512	5,53	5,78	4,3	
03/05/2015	82,67	261,53	9,31	528	5,05	5,96	15,2	
04/05/2015	78,19	252,05	7,38	568	5,63	6,41	12,1	
05/05/2015	84,22	257,50	9,23	472	5,07	5,31	4,5	
07/05/2015	80,85	251,49	8,65	532	4,70	6,18	23,9	
08/05/2015	84,68	262,17	9,42	536	4,89	6,04	19	
09/05/2015	85,78	262,40	8,70	520	4,71	5,88	19,8	
10/05/2015	82,47	254,82	7,04	480	4,26	5,62	24,1	

Fuente: Elaboración propia

Los valores de flujo de vapor obtenidos mediante de los balances de masa y de energía después de la aplicación de pruebas estadísticas a las datas de valores de cada una de las variables, difieren con respecto al valor del flujo de vapor medido, teniendo errores de 17% y 22% para el generador de vapor uno y 14% para el generador de vapor dos, esto se corrobora con los errores obtenidos en la determinación del mismo a partir valores puntuales, alcanzando valores de 15,5% y 14,77% para los generadores de vapor uno y dos respectivamente.

3.5 Análisis de riesgo.

En los generadores de vapor de la empresa se controlan diversas variables con el objetivo de evitar accidentes, entre ellas se encuentran el nivel de agua, la estabilidad de la llama, la temperatura de los gases. En la tabla 3.12 se muestra el análisis de riesgo mediante la técnica de HAZOP.

Tabla 3.12: Análisis de riesgos mediante HAZOP en los generadores de vapor.

Generador de vapor				Medidas a tomar	
Variable	Desviación	Causas posibles	Consecuencias	Medidas inmediatas	Medidas a largo plazo
Temperatura de salida de los gases.	Alta temperatura de salida de los gases.	Incrustaciones debido al mal tratamiento del agua de alimentación y en la superficie de calefacción por los componentes que no se quemaron en la combustión. Superficie de transferencia sucia. Desbalance en el suministro del combustible.	Contaminación en mayor proporción a la atmósfera.	Regular la combustión. Mejorar el tratamiento del agua de alimentación.	Limpiar la caldera. Realizar mantenimientos periódicos.
Nivel de agua en el generador de vapor.	Alto nivel del agua en el generador de vapor.	La bomba de agua de alimentación está rota.	Inundación del sistema de distribución de vapor.	Cambiar la bomba de agua de alimentación.	Realizar mantenimientos periódicos.
	Bajo nivel del agua en el generador de vapor.	La bomba de agua de alimentación tiene deficiencia, no es capaz de bombear la cantidad de agua para el vapor que se genera. Aumento brusco del consumo de vapor.	Ocurren averías en el equipo y esto trae consigo grandes escapes de vapor. No se produce el vapor necesario para el proceso.	Cambiar la bomba de agua de alimentación.	Realizar mantenimientos periódicos.
Presión de vapor	Aumento de la presión de vapor	Aumento del flujo de agua de alimentación. Problemas en la válvula de salida de vapor.	Explosión del generador de vapor.	Cambiar la bomba de agua de alimentación y la válvula de salida del vapor.	Realizar mantenimientos periódicos.
Control de la llama.	Fallo de la llama.	Desbalance en la regulación de la combustión.	Explosión del generador de vapor.	Regular la combustión.	-

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la aplicación de la técnica de HAZOP a los generadores de vapor, demuestra que las desviaciones que provocan más afectación tanto al proceso como a la salud de las personas y al medio ambiente son las elevadas el aumento de la presión de vapor y el fallo de la llama, trayendo como consecuencia explosiones del equipo.

3.6 Conclusiones parciales.

1. De las variables examinadas, la temperatura de salida de los gases es la que más se aleja de los valores establecidos.
2. El análisis estadístico realizado a las variables temperaturas del agua de alimentación y de los gases de salida, presión de vapor y flujos de gas y de vapor, demuestra que las mismas presentan un alejamiento significativo de la normalidad, lo que conllevó a su ajuste estadístico.
3. Las variables operacionales medidas reflejan inestabilidad en la operación, siendo la presión de vapor la variable que denota un comportamiento más marcado.
4. La energía perdida debido al agua formada por la combustión del hidrógeno del combustible, es la pérdida más influyente en los generadores de vapor analizados.
5. La evaluación de los generadores de vapor indicó un comportamiento similar entre ambos, la eficiencia de los mismos es inferior a la establecida.
6. Existe mayor correspondencia entre la determinación del flujo de vapor entregado por los generadores a partir de la medición directa y mediante los balances de masa y de energía en el generador de vapor dos (14% de error) que en el generador de vapor uno (17 - 22% de error).
7. Existe correspondencia entre la magnitud del error obtenido aplicando las técnicas estadísticas y el calculado con valores puntuales diarios, para la variable flujo de vapor.
8. La evaluación de riesgo a los generadores de vapor realizada mediante la técnica de HAZOP demostró que las desviaciones más alarmantes son la alta presión de vapor y el fallo de la llama trayendo como consecuencia explosiones del equipo.

Conclusiones

1. Existe correspondencia entre los resultados del flujo de vapor medido y el calculado a partir de los balances de masa y de energía, siendo mayor para el generador de vapor dos que para el uno, por lo que se confirma la hipótesis.
2. La generación de vapor está afectada tanto por la inestabilidad de la operación como por las deficiencias existentes en la instalación de los flujómetros.
3. El análisis estadístico realizado mediante el software Statgraphic Plus versión 5.0 permitió comprobar la significación de las mediciones realizadas.
4. La evaluación de los generadores de vapor indicó un comportamiento similar entre ambos, la eficiencia de los mismos es de 75%.
5. El flujo de vapor calculado refleja que los generadores de vapor analizados trabajan aproximadamente al 50% de su capacidad nominal.
6. La evaluación de riesgo a los generadores de vapor demostró que las desviaciones más alarmantes son la alta presión de vapor y el fallo de la llama.

Recomendaciones

1. Se recomienda la revisión de la metodología de cálculo para la determinación del flujo de vapor a partir de la presión diferencial con placa orificio, teniendo en cuenta los errores en la instalación y montaje.
2. Se propone prestar atención a la disciplina tecnológica en el área, dada las diferencias estadísticamente significativas de las variables analizadas.

Bibliografía

1. Altamirano, Enrique. (2013). *Tipos de calderas*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil. [en línea]. [Consulta: 17 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://www.monografias.com/trabajos97/calderas-tipos/calderas-tipos2.shtml#ixzz3P7RuJByG>

2. Andrade Juárez, Gustavo (2011). *Metodología para la evaluación de la eficiencia de calderas en el Ingenio Cuatotolapan*. Veracruz, México. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias. Universidad Veracruzana. [en línea]. [Consulta: 25 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/30491/1/AndradeJuarez.pdf>

3. Balwant Yugesftwar, Andy (2009). *Establecer expresiones de pérdidas por calor sensible y rendimiento térmico en calderas pirotubulares aplicando métodos experimentales y técnicas de I. A.* Cienfuegos. Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.
4. Borroto Nordelo, Aníbal y Rubio González, Ángel (2007). *Combustión y Generación de Vapor*. Editorial Universo Sur Cienfuegos. 185 p.
5. Carbonó de la Rosa, Mario Eduardo y Aislant Antolinez, Iván Alonso (2010). *Diseño y construcción de un sensor de flujo tipo turbina para flujo no uniforme*. Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química. Bucaramanga. Escuela de Ingeniería y Administración. [en línea]. [Consulta: 19 de enero del 2015].

Disponible en:

http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/1039/1/digital_18503.pdf

6. Castaño Bautista, Rubén; De la Cruz Trinidad, Mariano Josué y Morales Cruz, Melchisedec (2009). *Diseño de sistema de control de fluidos*. Veracruz. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Mecánico electricista. Universidad Veracruzana. [en línea]. [Consulta: 19 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://148.226.12.104/bitstream/123456789/31412/1/rubencasta%C3%B1obautista.pdf>

7. Dadić, Martin (2013). *DC operation analysis of induction coil fluxmeters with integrating amplifiers*. [en línea]. [Consulta: 19 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224113001401>

8. Díaz, A 2010. *Propuesta de acoplamiento de la Empresa Niquerífera Ernesto Guevara a una industria OTEC*. Tesis de Diploma por el título de Ingeniero Mecánico, UMCC.

9. Díaz González, Víctor. (2012). *Desarrollo y aplicación de los flujómetros proporcionales en el acueducto del Sur*. Tesis en opción al título de Master en Ciencias de la Educación Superior. La Habana. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. [en línea]. [Consulta: 19 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://revistas.mes.edu.cu/greenstone/collect/repo/archives/D7120804/9110.dir/71208049110.pdf>

10. De Diego Almeida, Ruslán (2013). *Evaluación del Sistema de Generación de Vapor de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro*. La Habana. Tesis en opción al título de Máster en Instalaciones Energéticas y Nucleares. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas
11. Diwok, H. J.; Mattern, J; Hülmann, G (1996), Explosion in einem 150 MW-Schmelzkammerkessel, Technische Überwachung Bd. 37 Nr. 3 - März
12. Ferrusca Espinoza, Miguel Angel. *Pruebas de combustión de un generador de vapor* (2013). México. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias. Escuela Superior de ingeniería mecánica y eléctrica. [en línea]. [Consulta: 25 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/11455/1/20.pdf>

13. Figueredo Rodríguez, Tania (2014). *Evaluación de la Estación de Generación de Vapor de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro y propuestas de mejoras*. Matanzas. Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
14. G. Pankrátov, (1998). *Problemas de termo-tecnia*. Editorial < Mir> 1 Rizhskiper, 2,129820. Moscú, URSS I -110 p.
15. García Gutiérrez, Luís. (2001) *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado*. Centro Español de Metrología.
16. Golato, M. A.; Franck Colombes, F. J.; Correa, C. A., y Paz, D (2008). *Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor*. Tucumán, Argentina. [en línea]. [Consulta: 16 de enero del 2015].

Disponible en:

http://scholar.google.com/scholar?q=related:UxvwrrHZAoQJ:scholar.google.com/&hl=es&as_sdt=0,5

17. Gutiérrez, L. G. (1999). *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado*. Centro español de metrología. [en línea]. [Consulta: 19 de enero del 2015].

Disponible en:

http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/art2/pdf/teoria.pdf

18. Huang, Shanfang; Ma, Taiyi; Wang, Dong y Lin, Zonghu (2013). *Study on discharge coefficient of perforated orifices as a new kind of flowmeter*. [en línea]. [Consulta: 19 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177712003317>

19. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) (2004). *Manual del usuario*. Documento inédito. ICIDCA, La Habana, Cuba

20. Jaimovich (2009). *Generadores de Vapor*. [en línea]. [Consulta: 19 enero 2015].

Disponible en:

<http://materias.fi.uba.ar/6737/pdf/Cap18.pdf>

21. Lápido, Margarita (1998). *Incremento de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares por disminución de las pérdidas por calor sensible*. Cienfuegos. Tesis presentada en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Cienfuegos.

22. López, Carlos R (2012). *Descripción del funcionamiento del generador de vapor*. Venezuela. Instituto Universitario de Tecnología de Puerto Cabello. [en línea]. [Consulta: 19 enero 2015].

Disponible en:

<http://www.monografias.com/trabajos93/descripcion-del-funcionamiento-generador-vapor/descripcion-del-funcionamiento-generador>

23. López López, José Ramón (2011). *Calibración de instrumentos de medición de flujo para conductos cerrados*. Guatemala. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. [en línea]. [Consulta: 25 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/13/1169/1195/1213/7143.pdf>

24. Meza, Jair y Huertas, José (2013). *Evaluación del rendimiento de calderas convertidas a gas natural*. Bogotá. Universidad de los Andes. [en línea]. [Consulta: 25 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/9223922375161189C.08.04.01-4.pdf>

25. Norma Cubana 92-21. Procedimiento para evaluar la anomalía de los resultados de las observaciones.

26. Norma Internacional ISO 5167. Medición del caudal de fluidos mediante dispositivos de presión diferencial intercalados en conductos en carga de sección transversal circular.

27. Pons Hernández, Antonio (2008). *Termodinámica técnica para ingenieros químicos*. Tomo I. La Habana: Editorial Félix Varela. 1 - 581 p.
28. Proaño Menéndez, Jimmy Mijaíl; Tomala Aquino, Enrique Javier; Abril Chávez, Edinson Geovanny y Gallegos Orta, Ricardo (2013). *Teoría y práctica sobre medidores de orificio*. [en línea]. [Consulta: 19 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24498>

29. Rivero Taylor, Juan A. (2011). *Reglamento Tecnológico de Calderas y Planta de Agua*. 1-48 p.
30. Rodríguez, Jorge A (2010). *Ciclos de Vapor. En su: Introducción a la Termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*. Universidad Tecnológica Nacional. 369-428 p.
31. Rubio González, Ángel M (2000). *Generadores de vapor: funcionamiento y explotación*. Santa Clara, Cuba. 1-298 p.
32. Thomasset, Carlos W. (2011). *Pequeño Manual del Foguista*. [en línea]. [Consulta: 24 de enero del 2015].

Disponible en:

https://drive.google.com/file/d/0B035waRjqQd_b2ZjMVc2bi03dGs/edit?usp=sharig

33. Kohan, A. L (2000). *Manual de calderas*. Madrid, España
34. Rein, P (2007). *Cane Sugar Engineering*. Berlin Alemania
35. Rivas Alejandro y Sánchez Gorka, (2007). *Caudalímetros y Tubos de Pitot. Laboratorio de Mecánica de Fluidos*. Universidad de Navarra.
36. Perry, J (1985). *Manual del ingeniero químico*. Tomo I, 3ra ed. UTEHA, México.
37. Rojas Galvez, Brancen Andrés y Mazuera Dorado, Hector Andrés (2014). *Análisis, diagnóstico y propuesta de mejora de los principales componentes operacionales que afectan la eficiencia de la caldera Piro-tubular del laboratorio de vapor de la universidad Autónoma de Occidente*. Colombia. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Autónoma de Occidente. [en línea]. [Consulta: 25 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/7021/1/T05104.pdf>

38. Sánchez Vera, N. E.; Iskandar Ramírez, F. J. y Quintana Peralta, L. R. (2007). *Diseño e implementación de un módulo entrenador de procesos industriales con aplicación a las variables de nivel y caudal*. Guayaquil. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero electrónico. Universidad Politécnica Salesiana. [en línea]. [Consulta: 19 de enero del 2015].

Disponible en:

<http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2445/12/UPS-GT000029.pdf>

39. Skvaril, Jan; Avelin, Anders; Sandberg, Jan y Dahlquist, Erik (2014). *The experimental study of full-scale biomass-fired bubbling fluidized bed boiler*. School of Business Society and Engineering, Mälardalen University. [en línea]. [Consulta: 25 de enero del 2015].

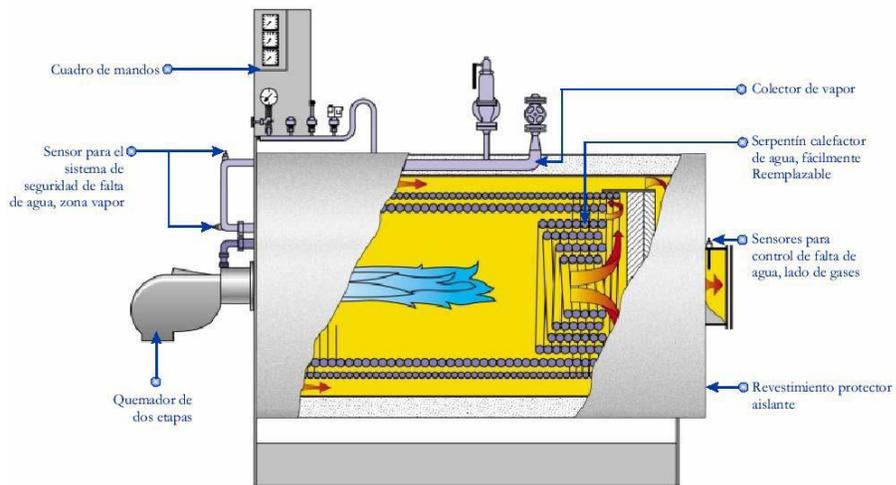
Disponible en:

www.sciencedirect.com

40. Vidal, David. (2010). *Determinación del factor de carga en las calderas pirotubulares en la ciudad de Cienfuegos*. Tesis presentada en opción del grado científico Máster en Eficiencia Energética de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Cienfuegos.
41. Vopat y B. Skrostzki (1986). *Power station engineering and economic*. 2da. Edición, Edición Revolucionaria, La Habana.

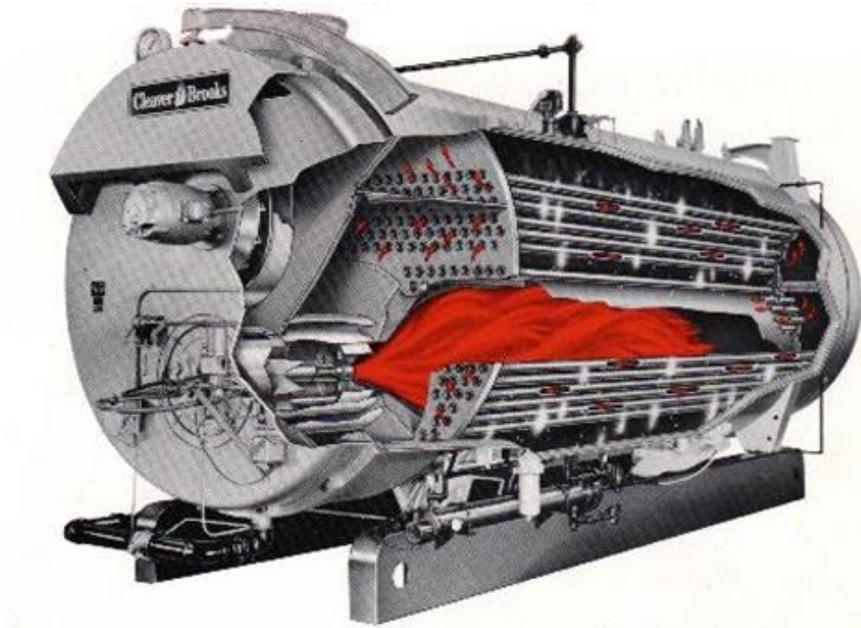
Anexos

Anexo 1. Sección de un generador de vapor según el principio de tubos de agua.



Fuente: López, 2012

Anexo 2. Generador de vapor pirotubular.



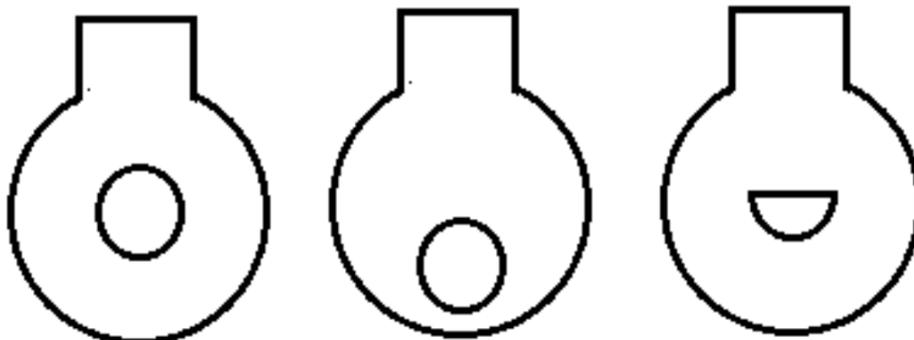
Fuente: de Diego, 2013

Anexo 3. Tipos de placas de orificio.

Concéntrica

Excéntrica

Segmentada



Fuente: Sánchez *et al.*, 2007

Anexo 4. Valores que cumplen con una distribución normal en el Generador de Vapor uno.

Temp. agua de alimentación (°C)	Temp. gases salida (°C)	Flujo de gas (m3/h)	Presión vapor (atm)	Flujo de vapor (ton/h)
86,51	266,52	8,08	588	4,99
82,95	265,81	9,13	604	4,91
80,5	262,69	9,25	576	5,09
82,45	261,96	9,07	512	5,92
81,87	260,85	9,22	580	4,63
80,15	260,69	9,11	572	5,91
80,85	262,95	9,13	560	4,52
84,23	265,57	9,24	524	5,35
86,71	267,74	9,16	454	4,66
83,75	270,12	9,12	528	3,65
83,73	270,41	8,36	536	4,07
86,52	270,77	8,32	456	5,63
83,97	268,81	8,01	540	3,84
85,26	265,15	7,96	496	4,31

83,94	268,57	7,94	492	3,63
84,55	268,77	8,14	532	4,05
85,22	269,27	9,07	524	4,35
85,78	267,96	9,22	508	5,49
84,46	267,93	9,11	488	4,03
82,47	267,52	9,24	468	4,36
79,3	267,05	9,16	510	5,17
82,74	265,9	9,12	512	5,64
83,04	266,25	8,04	430	3,6
81,33	265,09	8,47	514	5,85
79,43	265,29	8,65	510	5,66
79,88	264,28	8,75	516	5,92
83,25	260,85	8,67	464	5,18
78,2	264,78	8,48	604	5,27
81,23	265,17		602	5,26
79,21	264,68		512	4,33
79,36	264,83		532	4,33
80,25	264,12		556	4,33
81,36	265,07		450	4,33
79,41	265,08		534	4,9
82,32	261,18		544	4,86
82,64	263,95		480	4,84
80,12	263,96		540	4,93
78,56	264,25		504	4,93
79,48	262,5		472	4,78
81,3	262,48		512	4,89
81,87	262,08		536	4,98
78,06	268,66		544	4,92
80,44	269,07		512	4,94
78,21	269,21		520	4,88

80,92	266,58		528	4,71
81,66	266,6		508	5,54
80,15	265,19		524	4,56
84,25	265,03		516	4,65
80,85	264,08		532	4,7
80,85	264,02		512	4,72
81,36	262,96		512	4,7
79,48	262,96		528	5,66
80,74	262,57		508	4,39
84,68	261,68		536	4,89
87,22	258,45		528	4,92
84,23	258,83		576	5,44
86,71	258,63		458	4,95
83,75	257,62		548	4,93
86,31	254,75		500	5,01
83,73	256,25		560	4,94
86,52			480	4,98

Fuente: Elaboración propia

Temp. agua de alimentación (°C)	Temp. gases salida (°C)	Flujo de gas (m3/h)	Presión vapor (atm)	Flujo de vapor (ton/h)
94,39	266,52	9,6	532	6,82
84,38	265,81	9,45	480	8,35
79,92	262,69	9,52	524	6,44
78,19	261,96	9,42	604	6,1
78,06	260,85	9,45	564	7,95
80,44	260,69	9,51	560	6
78,21	262,95	9,27	552	6,22
80,92	265,57	9,56	572	7,42
81,66	267,74	9,45	564	6,74

84,25	270,12	7,53	552	6,23
80,85	270,41	8,01	544	6,12
81,36	270,77	8,3	568	7,9
79,48	268,81	8,3	560	7,34
80,74	265,15	8,12	552	6,89
84,68	268,57	7,17	540	6,31
87,22	268,77	9,42	548	8,24
86,31	269,27	9,53	476	7,56
85,91	267,96	9,41	528	7,87
85,17	267,93	9,61	512	8,46
85,85	267,52	9,54	500	7,93
85,29	267,05	9,62	504	7,25
84,42	265,9	9,46	504	7,19
85,48	266,9	9,39	520	8,16
85,15	266,25	9,49	516	7,19
86,8	265,09	9,4	512	6,01
86,26	265,29	9,47	516	6,34
87,6	257,98	9,62	522	7,44
84,26	264,28	9,64	500	7,01
87	260,85	9,41	532	7,67
84,7	264,78	9,68	518	6,45
87,63	265,17	9,19	560	8,97
85,48	264,68	9,55	524	6,98
87,12	264,83	9,49	516	7,2
86,92	264,12	8,61	554	8,8
86,57	264,29	7,04	514	7,13
86,66	263,98	8,09	550	8,76
87,08	265,07	7,81	548	8,11
86,71	265,08	7,93	522	6,74
85,56	261,18	7,61	548	8,16

88,01	263,95	7,82	520	7,14
85,44	263,96	7,65	520	7,21
87,86	264,25	7,48	518	6,61
84,58	262,5	7,9	512	6,01
78,07	262,48	9,6	540	7,74
79,43	262,08	8,03	524	6,78
80,51	268,66	7,89	522	6,74
80,38	269,07	7,49	520	6,61
80,06	269,21	7,49	526	6,97
82,27	266,58	9,25	580	9,92
82,55	266,6	9,37	534	7,55
78,92	265,19	8,14	528	7
79,15	265,03	9,13	542	7,84
78	264,08		552	8,98
79,79	264,02		520	6,64
77,96	262,96		546	7,83
82,65	262,96		550	8,3
79,49	262,57		522	6,72
79,27	261,68		518	7,29
79,86	258,45		518	6,4
79,12	258,83		524	7,08
80,95	258,63		532	7,42
80,35	257,62		568	9,24
79,86	254,75		548	7,95
82,91	256,25		554	8,32

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Valores que cumplen con una distribución normal en el Generador de Vapor dos.

Temp. agua de alimentación (°C)	Temp. gases salida (°C)	Flujo de gas (m3/h)	Presión vapor (atm)	Flujo de vapor (ton/h)
75,37	243,26	464	8,82	4,97
76,29	243,38	512	9,27	4,97
76,64	244,24	524	9,52	4,97
76,85	244,69	523	9,74	4,97
76,97	245,68	512	9,44	4,98
76,99	245,95	512	9,68	4,98
77,14	246,15	520	9,43	4,98
77,15	246,17	532	9,53	4,98
77,54	246,29	556	9,46	4,98
77,65	247,14	450	9,51	4,98
77,86	248,36	552	9,37	4,98
77,96	248,67	540	9,27	4,98
77,97	248,78	580	9,57	4,98
77,98	249,21	432	9,21	4,99
78	249,21	532	9,32	4,99
78,06	249,45	544	9,08	4,99
78,07	249,72	480	9,09	4,99
78,19	249,79	458	9,57	4,99
78,19	249,93	572	9,76	5,00
78,21	250,03	528	9,74	5,00
78,35	250,05	540	9,71	5,00
78,38	250,16	504	9,52	5,00
78,42	250,19	464	9,58	5,00
78,49	250,25	544	9,63	5,00
78,5	250,3	472	9,48	5,00
78,61	250,47	508	9,31	5,00

78,68	250,47	512	9,30	5,00
78,72	250,48	600	9,25	5,00
78,78	250,63	464	9,21	5,00
78,92	250,63	576	8,99	5,00
78,97	250,65	464	8,95	5,00
79,15	250,73	576	9,01	5,00
79,24	250,73	484	9,69	5,00
79,27	250,86	576	9,70	5,01
79,3	251,14	464	9,78	5,01
79,43	251,28	576	9,65	5,01
79,43	251,33	468	9,77	5,01
79,48	251,4	512	9,25	5,01
79,49	251,41	454	9,20	5,01
79,5	251,43	556	9,42	5,01
79,79	251,44	564	9,46	5,02
79,8	251,49	552	9,47	5,02
79,91	251,52	574	9,09	5,02
79,92	251,53	464	9,59	5,02
79,95	251,8	492	8,60	5,02
80,04	252,05	584	9,35	5,02
80,06	252,13	576	9,52	5,02
80,1	252,25	448	9,31	5,03
80,15	252,27	572	9,40	5,03
80,24	252,31	456	9,66	5,03
80,31	252,33	568	9,51	5,03
80,38	252,42	516	9,48	5,04
80,44	252,48	548	9,23	5,04
80,49	252,68	452	9,08	5,04
80,5	252,69	578	9,13	5,04
80,51	252,72	468	9,08	5,05

80,67	252,89	564	9,31	5,05
80,7	252,91	556	9,18	5,05
80,7	252,93	544	9,23	5,05
80,74	253,13	516	9,32	5,05
80,83	253,19	508	9,34	5,05
80,85	253,27	480	9,49	5,05
80,85	253,35	484	9,52	5,06
80,91	253,45	484	9,47	5,06
80,92	253,46	492	9,23	5,07
80,94	253,64	564	8,92	5,07
81,22	253,74	492	9,07	5,07
81,26	253,75	568	9,19	5,07
81,29	253,98	532	9,23	5,08
81,29	254,02	488	9,38	5,08
81,32	254,07	458	9,30	5,08
81,33	254,09	586	9,53	5,09
81,36	254,16	468	9,37	5,10
81,38	254,19	528	9,42	5,11
81,61	254,39	456	9,52	5,11
81,66	254,42	484	9,62	5,11
81,67	254,66	504	9,63	5,11
81,67	254,68	472	9,58	5,11
81,78	254,71	492	9,61	5,14
81,79	254,76	468	9,78	5,18
81,8	254,79	480	9,58	5,19
81,86	254,79	496	9,77	5,20
81,87	254,82	508	9,53	5,22
82,02	254,86	488	9,79	5,22
82,07	255,02	588	9,70	5,24
82,09	255,02	496	9,75	5,25

82,17	255,05	480	9,71	5,26
82,27	255,21	564	9,79	5,27
82,27	255,28	468	9,73	5,30
82,29	255,29	532	9,79	5,30
82,33	255,39	508	9,76	5,31
82,37	255,42	524	9,57	5,33
82,44	255,45	504	9,78	5,39
82,45	255,46	472	8,92	5,40
82,47	255,48	544	9,72	5,41
82,5	255,48	508		5,44
82,51	255,54	528		5,44
82,51	255,65	492		5,45
82,55	255,66	560		5,47
82,59	255,71	548		5,48
82,62	255,77	544		5,48
82,65	255,79	532		5,49
82,67	255,83	536		5,49
82,69	255,9	528		5,49
82,72	255,95	536		5,49
82,74	256,04	512		5,51
82,77	256,46	548		5,52
82,83	256,53	552		5,53
82,84	256,55	556		5,53
82,84	256,61	528		5,53
82,88	256,67	540		5,53
82,91	256,7	544		5,53
82,92	257,07	520		5,54
82,92	257,17	512		5,56
82,93	257,2	524		5,57
82,95	257,29	528		5,57

83,04	257,34	520		5,57
83,17	257,38	528		5,58
83,2	257,39	524		5,59
83,21	257,47	532		5,6
83,22	257,48	520		5,62
83,23	257,5	512		5,62
83,28	257,5	516		5,62
83,32	257,62	508		5,63
83,33	257,72	512		5,64
83,34	257,74	520		5,64
83,41	257,75	512		5,64
83,41	257,78	520		5,65
83,49	257,8	508		5,65
83,51	257,81	516		5,67
83,51	257,84	528		5,69
83,52	257,88	496		5,69
83,53	257,9	516		5,69
83,65	257,95	520		
83,67	257,95	528		
83,68	257,96	520		
83,73	257,98	516		
83,73	257,98	512		
83,74	258,05	524		
83,75	258,12	512		
83,87	258,15	520		
83,92	258,17	524		
83,94	258,17	500		
83,97	258,19	480		
84	258,23	504		
84,03	258,26	508		

84,08	258,37	508		
84,09	258,45	568		
84,11	258,45	484		
84,12	258,54	516		
84,19	258,82	520		
84,19	258,87	512		
84,2	258,91	500		
84,22	258,99	524		
84,23	259,05	544		
84,25	259,45	496		
84,26	260,01	488		
84,26	260,02	512		
84,31	260,05	544		
84,31	260,06	504		
84,31	260,13	508		
84,33	260,15	520		
84,34	260,25	484		
84,36	260,26	516		
84,37	260,27	536		
84,38	260,31	512		
84,41	260,32	520		
84,42	260,33	516		
84,43	260,35	472		
84,43	260,37	484		
84,46	260,43	476		
84,47	260,44	488		
84,49	260,53	500		
84,55	260,54	492		
84,57	260,57	504		
84,58	260,58	508		

84,64	260,62	520		
84,67	260,73	512		
84,68	260,78	500		
84,7	260,82	492		
84,72	260,83	504		
84,74	260,85	516		
84,76	260,86	488		
84,78	261,13	504		
84,79	261,15	520		
84,94	261,17	524		
84,95	261,36	512		
85,05	261,43	496		
85,05	261,44	484		
85,06	261,51	584		
85,06	261,53	450		
85,07	261,55	556		
85,09	261,55	458		
85,12	261,59	572		
85,15	261,65	520		
85,17	261,66	464		
85,21	261,67	516		
85,22	261,71	536		
85,24	261,79	544		
85,26	261,8	512		
85,28	261,84	520		
85,29	261,86	528		
85,31	261,88	508		
85,44	262,04	524		
85,45	262,17	516		
85,48	262,28	532		

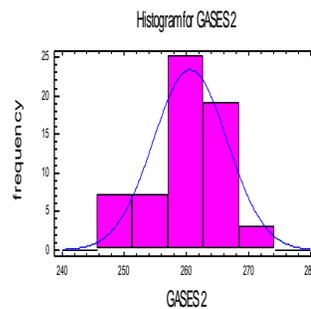
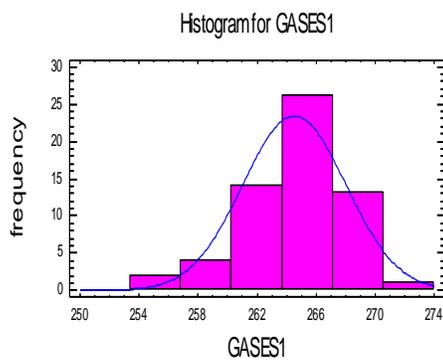
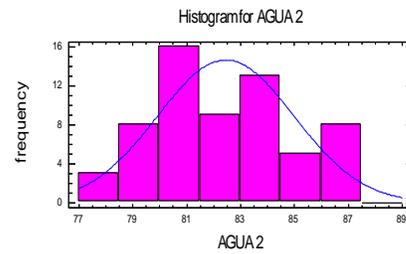
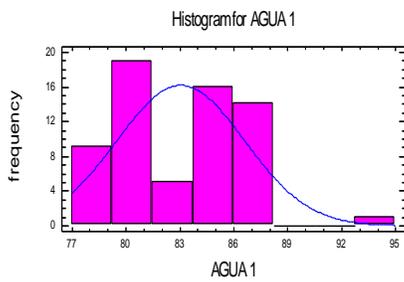
85,48	262,38	512		
85,49	262,38	512		
85,56	262,4	528		
85,62	262,48	508		
85,63	262,55	536		
85,78	262,56	528		
85,82	262,64	576		
85,85	262,71	458		
85,85	262,73	548		
85,86	262,76	500		
85,87	262,79	560		
85,91	262,82	480		
85,93	262,96	504		
85,96	263,06	492		
86,01	263,27	512		
86,14	263,3	520		
86,2	263,36	516		
86,22	263,42	500		
86,22	263,45	488		
86,24	263,46	512		
86,26	263,48	524		
86,31	263,51	512		
86,32	263,61	504		
86,35	263,86	508		
86,35	263,97	516		
86,36	264,21	520		
86,5	264,34	534		
86,51	264,77	512		
86,52	265,05	514		
86,57	265,1	524		

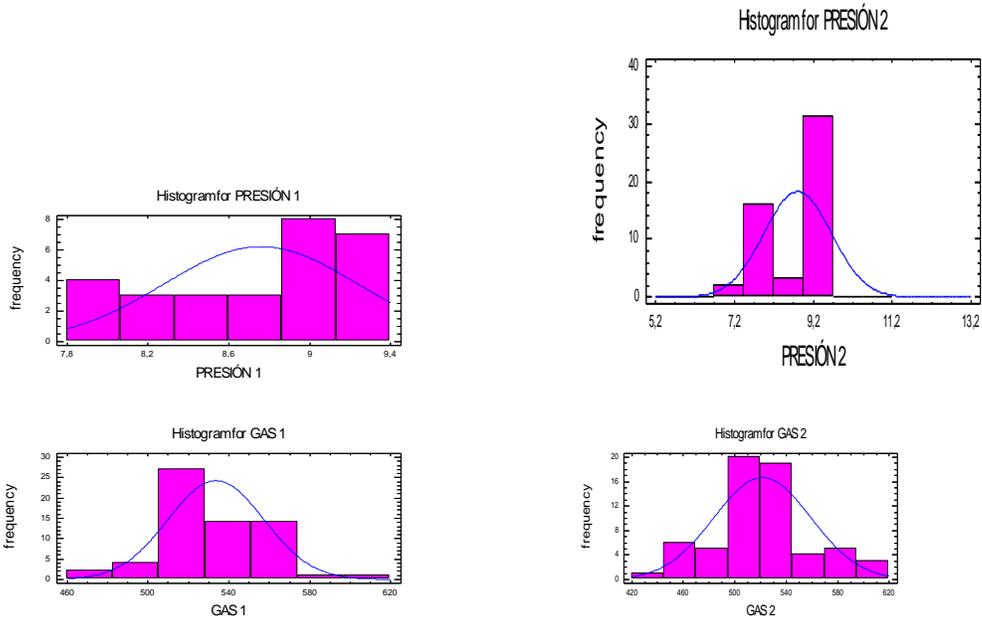
86,66	265,18	516		
86,71	265,18	512		
86,71	265,25	532		
86,71	265,31	514		
86,74	265,35	478		
86,8	265,42	516		
86,92	265,47	512		
86,94	265,62	488		
87	265,63	512		
87,08	265,63	518		
87,12	265,67	458		
87,22	265,73	492		
87,45	265,78	508		
87,6	265,95	512		
87,63	266,27	518		
87,8	266,33	540		
87,86	266,54	480		
87,99	267	488		
88,01	267,15	508		
88,33	267,28	536		
88,57	267,3	536		
89,15	267,74	492		
91,02		532		
92,11		532		
94,1		516		
94,39		532		
		508		
		504		
		498		
		496		

		496		
		494		
		496		
		496		
		494		
		492		
		500		

Fuente: Elaboración propia

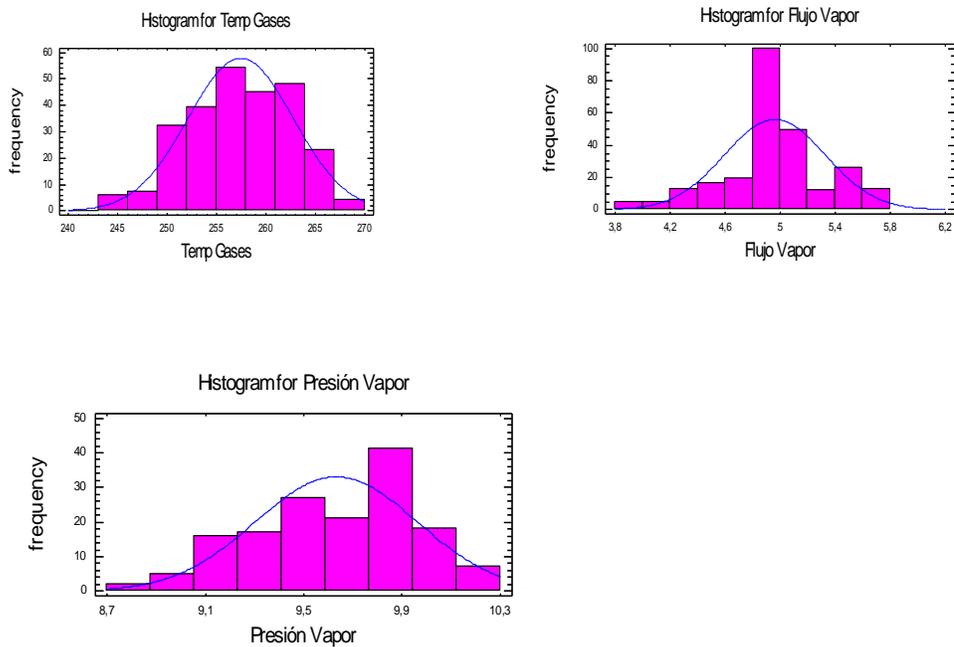
Anexo 6. Histogramas de frecuencia de las variables temperatura del agua de alimentación, temperatura de salida de los gases, presión de vapor y flujo de gas del generador de vapor uno.





Fuente: Elaboración propia

Anexo 7. Histograma de frecuencia de la temperatura de salida de los gases del, flujo de vapor y presión de vapor del generador de vapor dos.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 8. Metodología de cálculo del flujo de vapor por presión diferencial.

Para determinar el flujo de vapor se necesitó implementar, la ec. 1.

$$qm = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot P1} \quad \text{ec. 1}$$

$$qv = \frac{qm}{\rho} \quad \text{ec. 2}$$

$$qv = v \cdot A \quad \text{ec. 3}$$

$$v = \frac{qv}{A} \quad \text{ec. 4}$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{ec. 5}$$

Dónde:

q_m - flujo de vapor (Kg/s)

q_v - flujo de vapor (m^3/s)

d - diámetro tubería (m)

v - velocidad fluido (m/s)

ΔP - Diferencial presión (Pa)

β – relación de diámetros (adimensional)

$P1$ - Presión estática absoluta (Pa)

C - Coeficiente descarga (adimensional)

E - Factor de expansión(adimensional)

A – Área (m^2)

Relación de diámetros (β).

La relación entre los diámetros de la placa orificio y del interior de la tubería. Este es uno de los términos más importantes en el cálculo del flujo de vapor por presión diferencial y se emplea para la determinación de: el coeficiente de descarga, el coeficiente de aproximación de la velocidad y el coeficiente de expansión.

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{ec. 6}$$

d - Diámetro de la placa orificio (mm)

D – Diámetro interior de la tubería (mm)

Coficiente de descarga (C_d).

El coeficiente de descarga es la relación entre el flujo real con respecto al flujo teórico. El mismo se determina de forma experimental aplicando métodos de regresión numérica para condiciones de fronteras bien determinadas. La ecuación utilizada para el cálculo del mismo está en función del número de Reynolds, modificándose en dependencia del valor que presente éste; además, también depende de la relación de diámetros y del diámetro de la tubería.

$$C = 0.5961 + 0.0261 \cdot \beta^2 - 0.216 \cdot \beta^8 + 0.000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063 \cdot A) \cdot \beta^{3.5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.3} + (0.043 + 0.08 \cdot e^{-10 \cdot L_1} \cdot (1 - 0.11 \cdot A) \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.031 \cdot (M_2 - 0.8 \cdot M_2^{1.1})) \cdot \beta^{1.3} \quad \text{ec. 7}$$

La ec. 7 se aplica sólo cuando: las tomas del diferencial de presión son en Flange - Tapped; las placas orificio son concéntricas con la tubería; para diámetros de tuberías mayores de 50.8 mm (2") y menores de 1 m; con diámetro de la placa orificio mayores de 12.7 mm (0.5"); relaciones de diámetro (β) en el rango de 0.2 a 0.75 y valores del número de Reynolds mayores de 2520.

En la ec. 2.46, los términos L_1 , A y M_2 , se calculan por las siguientes ecuaciones:

$$L_1 = \frac{25.4}{D} \quad \text{ec. 8}$$

El diámetro tiene que estar en mm para ser utilizado en la ec. 7.

$$M_2 = \frac{2 \cdot L_2}{1 - \beta} \quad \text{ec. 9}$$

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0.8} \quad \text{ec. 10}$$

Re_D - número de Reynolds (adim)

Número de Reynolds (Re_D).

El número de Reynolds interviene en la ec. 7, como un parámetro de correlación, representando el cambio del coeficiente de descarga en la placa orificio respecto al diámetro de la tubería, el régimen de flujo, la densidad y la viscosidad del fluido.

$$Re_D = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad \text{ec. 11}$$

Se obtuvieron las siguientes ecuaciones gráficas con datos de vapor de agua saturado, para determinar las propiedades físicas densidad y viscosidad del vapor de agua en función de la temperatura y presión del fluido y poder así calcular el número de Reynolds:

$$\rho = 2 \cdot 10^{-8} \cdot T^{3.7285} \quad \text{ec. 12}$$

$$\mu = 9.1203 \cdot e^{0.0028 \cdot T} \quad \text{ec. 13}$$

$$\rho = 0.5883 \cdot P^{0.9421} \quad \text{ec. 14}$$

$$\mu = 11.937 \cdot P^{0.1033} \quad \text{ec. 15}$$

Dónde:

D - Diámetro (m)

V – velocidad (m/s)

T - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

P - Presión (10^5Pa)

μ - Viscosidad del vapor de agua ($10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$)

ρ - Densidad del vapor de agua (kg/m^3)

Factor de expansión (ϵ).

El factor de expansión surge producto de diversas investigaciones empíricas

$$\epsilon = 1 - (0.351 + 0.256 \cdot \beta^4 + 0.93 \cdot \beta^8) \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad \text{ec. 16}$$

ϵ - Factor de expansión (adim)

$\kappa \approx 1.3$ - exponente isoentrópico vapor de agua saturado

P1 y P2 - Presiones (Pa)

Metodología para el cálculo del flujo de vapor de forma automatizada a través de los medidores de flujo de presión diferencial de placa orificio.

1. Calcular β , ϵ , ρ , μ .
2. Asume $C_d = 0.63$. Calcula Q_m con C_d asumido.
4. Calcular v y, Re_D
5. Calcula C_d con β , Re_D y D
6. Se recalcula nuevamente el Q_m y se repite a partir del punto 4. Este proceso de iteración es realizado tres veces.

