

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL
VAPOREN LÍNEA FASE II**

ANGEL LEONARDO RIVEROS FIGUEREDO

GUSTAVO ANDRES QUINAYAS RAMOS



FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D. C.

DICIEMBRE

2012

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN LÍNEA FASE II

ANGEL LEONARDO RIVEROS FIGUEREDO

GUSTAVO ANDRES QUINAYAS RAMOS

Proyecto de Investigación para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

Ing. JORGE RENE SILVA LAROTTA



FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D. C.

ENERO

2013



- 1. PROBLEMÁTICA**
- 2. JUSTIFICACION**
- 3. OBJETIVOS**
 - 3.1. Objetivo general**
 - 3.2. Objetivos específicos**
- 4. MARCO REFERENCIAL**
 - 4.1. Proceso de evaporación**
 - 4.2. Generadores de vapor**
 - 4.2.1. Clasificación de las calderas**
 - 4.3. Agua para calderas**
 - 4.4. Ebullición general**
 - 4.4.1. Ebullición en placa plana**
 - 4.4.2. Flujo crítico**
 - 4.4.3. Ebullición en tubos internos**
 - 4.5. Calidad de vapor**
 - 4.6. Arrastre de agua en el vapor en calderas piro tubulares**
 - 4.7. La entalpia**
 - 4.8. Calorimetría**
 - 4.8.1. Calorimetría a volumen constante**
 - 4.8.2. Calorimetría a presión constante**
 - 4.8.3. Clasificación de los calorímetros**
 - 4.8.4. Calorímetros para medir la calidad de vapor**
- 5. METODOLOGIA**
 - 5.1. Caracterización**
 - 5.1.1. Procedimiento**
 - 5.1.2. Resultado de caracterización con calorímetro de barril**
 - 5.2. Diseño, construcción e instalación de prototipo de adición de calor**
 - 5.2.1. Procedimiento de toma de datos para la determinación de calidad de vapor con calorímetro de adición de calor**
 - 5.2.2. Prueba de tiempo de respuesta del sistema al aumento de corriente en la resistencia**
 - 5.2.3. Resultado de toma de datos con calorímetro de adición de calor**
 - 5.3. Pruebas iniciales con calorímetro de adición de calor**
 - 5.3.1. Prueba de determinación de intervalo de corriente en el que se presenta la variación de temperatura**
 - 5.3.2. Procedimiento final de toma de datos con prototipo de adición de calor**
- 6. REVISION DE DATOS**



- 6.1. Tabla de propiedades del vapor a 89° C
 - 6.2. Flujo másico en el prototipo
 - 6.3. Cálculo de calidad
 - 7. DISEÑO DE EXPERIMENTOS
 - 7.1. Análisis descriptivo
 - 7.2. Modelos de regresión y análisis de varianza
 - 7.2.1. Resumen por niveles de corriente
 - 7.2.2. Resumen por niveles de temperatura
 - 7.2.3. Análisis de varianza
 - 7.3. Tamaño de la muestra
 - 8. ANALISIS DE DATOS
 - 8.1. Pérdida del vapor a lo largo del prototipo
 - 8.2. Salto de temperatura y falta de sensibilidad en los equipos
 - 8.3. Entalpía utilizada para el cálculo de calidad de vapor
 - 8.4. Variación de presión de trabajo de la caldera
 - 9. CONCLUSIONES
- REFERENCIAS



INTRODUCCION

Con una necesidad creciente de energía y un aumento en los costos de los combustibles es imprescindible la optimización y regulación de los procesos de transformación de energía. Es por ello que a lo largo de la historia, el hombre se ha empeñado en regular y optimizar dichos procesos. Muchos de estos esfuerzos se han dirigido a campos de producción energética entre los cuales se encuentra la generación de vapor.

El diseño y construcción de un prototipo para la medición de la calidad de vapor en línea, tiene como fin medir la calidad del vapor y es estrictamente necesario tener una referencia o punto de comparación en cuanto a porcentaje de calidad se refiere. Es por ello que se decide realizar una caracterización del vapor producido con un calorímetro experimental en la caldera los laboratorios de ingeniería en la ciudad de Bogotá.

Desde el año 2007 el grupo de investigación Desarrollo Tecnológico y Calidad “Detecal”, adscrito al Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Libre, formuló el subproyecto de investigación denominado “Medidor de calidad de vapor en línea” dentro del eje temático en uso racional de energía (URE), previa valoración de antecedentes industriales nacionales e internacionales, en los que no se reportaba tal aplicación, que resulta importante para la evaluación y control del consumo energético de procesos industriales con transferencia de calor por condensación directa o indirecta.

El proyecto fue planteado en el 2008 por estudiantes de ingeniería mecánica en el cual se expone la hipótesis de poder medir la calidad en un proceso de generación de vapor instantáneamente. Basándose en la anterior argumentación se formularon diferentes alternativas con las cuales se construyeron tres prototipos que fueron probados en la línea de vapor de los laboratorios de la Universidad Libre [2].

El proyecto de investigación fue desarrollado en el laboratorio de instalaciones térmicas, usando como principal herramienta la caldera piro tubular, la cual tiene una capacidad 6.3 BHP y según el fabricante una presión de trabajo normal de 70 Psi. En el transcurso del proyecto se ha hecho evidente que la caldera en la condiciones actuales de trabajo es incapaz de mantener la presión con un flujo constante de vapor a aperturas de válvula superiores al 50%, esta condición afecta notablemente los resultados de las pruebas realizadas para la caracterización de la calidad con el procedimiento tradicional de calorímetro de barril, lo que provocó un aumento considerablemente en el número de pruebas necesarias para obtener una medición confiable de la calidad con los calorímetros tradicionales.



Tomando como referencia los primeros estudios realizados por estudiantes en el 2008, se realizan pruebas iniciales con diferentes aperturas de válvula, obteniendo resultados poco satisfactorios. Desde entonces se han realizado diferentes variaciones teniendo en cuenta la mejor combinación en los resultados obtenidos.

Debido a las pocas pruebas realizadas por el grupo de investigación anterior, se logra una confiabilidad inferior al 50 %, porcentaje insuficiente para darle validez al diseño propuesto, por esto se hace necesario aumentar el número de pruebas hasta alcanzar un nivel de confiabilidad superior.

El arreglo geométrico reducido de la línea de vapor junto con la composición de su flujo hace difícil la medición del mismo, así como también determinar la cantidad de masa, aspectos de vital importancia para la determinación de la calidad de vapor.

Al final se llega a un procedimiento de medición con resultados satisfactorios y constantes de los cuales se basa el análisis y desenlace de la investigación.



1. PROBLEMATICA

La demanda creciente de energía y el aumento en los costos de los combustibles hace que cada vez sea más importante la optimización y regulación de los procesos de transformación de energía, por ello a lo largo del tiempo diversos entes privados y gubernamentales se han empeñado en regular y optimizar dichos procesos. Estos esfuerzos se han dirigido a muchos campos de la ciencia que involucran la generación de energía, y uno de estos campos es la utilización del vapor de agua.

Dentro de la generación de vapor se evalúan variables determinantes como la presión, la temperatura y la entalpia entre otras, las cuales caracterizan este proceso y son de notable importancia para el mismo, no obstante otra variable de crítica importancia para esta investigación es la denominada calidad del vapor.

La calidad es un término que se utiliza para conocer la proporción de la mezcla de líquido y vapor saturado de una manera apropiada y se define como la razón entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla.

Diferentes países como china y estados unidos han dedicado a evaluar alternativas que permitan un control eficiente y confiable de la calidad del vapor en los diferentes procesos, teniendo como principio de medición diferentes modelos teóricos y prácticos. Históricamente, la calorimetría se ha utilizado en la medición de la calidad del vapor, pero su lenta capacidad de respuesta (sistema térmico) y sus pocas aplicaciones los convierte en una opción de baja confiabilidad y aceptación.

En la industria mundial actual procesos que involucran generación de vapor y condicionalmente calidad de vapor han involucrado en el control de la calidad de vapor, ultrasonido [1] y sensores con señales de microondas adelantos que son de poco conocimiento y baja divulgación mundial. La mayor aplicación se encuentra a nivel de laboratorio debido a que su uso en la industria se encuentra restringido y no permite realizar una medición continua. Por el momento, la industria es la principal referencia y corresponde a la experiencia del personal involucrado en el diseño, construcción y operación de calderas.

El diseño y construcción de un prototipo para la medición de la calidad de vapor en línea tiene como fin medir la calidad del vapor producido por la caldera. Y es estrictamente necesario tener una referencia o punto de comparación en cuanto a porcentaje de calidad se refiere. Es por ello que se decide realizar una caracterización del vapor producido por la caldera y posteriormente implementar el prototipo construido para determinar la calidad de vapor en línea.



PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN LÍNEA

Los métodos de medición de calidad de vapor en línea presentan pérdidas considerables de energía durante las mediciones, son de difícil fabricación y de baja confiabilidad, lo cual representa un problema para la selección del método de medición a utilizar en el prototipo.



2. JUSTIFICACION

El vapor como instrumento de generación de energía para la producción de trabajo es de vital importancia en la industria colombiana por lo que se debe tener en cuenta el costo de la cantidad de energía que se emplea como el de la que se produce mediante monitoreo en las instalaciones dando de esta manera un uso más racional de los recursos y de la energía que se posee.

Ya que el vapor no es un flujo fácil de medir se debe diseñar un instrumento específico para la medida de este y no adoptar otros de diferentes fluidos.

Del conocimiento del flujo de vapor se puede abstraer lo siguiente:

- Obtención del conocimiento del uso del vapor y del costo lo cual es vital en la eficiencia y/o construcción de una planta.
- Indicar la rata de flujo en condiciones máximas de operación de la planta
- Determinación del deterioro de una planta durante el tiempo con lo cual se puede programar el cambio o limpieza de esta.
- Demanda de Vapor o tendencias a cambios en la demanda
- Establecimiento de los picos de vapor en tiempos determinados
- Identificación de secciones o puntos de la planta de mayor consumo de vapor
- Eficiencia de energía (Consumo de Vapor – Equipo – Planta).



3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general.

- Realizar la validación del prototipo diseñado en etapas anteriores de la investigación a nivel de laboratorio.

3.2. Objetivos específicos.

- Construir el prototipo de medición de calidad de vapor en línea de acuerdo a la información suministrada por el equipo de investigación anterior.
- Realizar el diseño experimental del proyecto
- obtener un nivel de confiabilidad superior al 95% para el prototipo de medición.



4. MARCO REFERENCIAL

Debido a que la propuesta de proyecto es la continuación de una investigación iniciada en años anteriores nuestra tesis teórica se basa únicamente en la primera fase del proyecto iniciada en el 2008 por los estudiantes Gersson Freddy Torres Baquero, Wilfredy Martínez Suarez de ingeniería mecánica de la facultad de ingeniería mecánica de la universidad libre [2].

4.1. Proceso de evaporización

En principio se calienta determinada cantidad de agua, aplicando calor de forma constante dentro de un cilindro con un pistón móvil con peso w , como se muestra en la figura 1, la temperatura aumenta, mientras la presión se mantiene constante, si se continúa aplicando calor, se logra que la temperatura del sistema aumente hasta que la presión del vapor sea igual a la presión de la atmósfera más la presión del pistón.

En el segundo recipiente el agua y el vapor están saturados, si se añade más calor y el líquido que se encuentra en estado de saturación comenzara a evaporarse es decir que continua el proceso de evaporación a temperatura constante hasta que queda solo vapor en el tercer recipiente de izquierda a derecha figura 1. Si se continúa adicionando calor se provocara que la temperatura del vapor se incremente a presión constante a esta fase del vapor se llama vapor sobrecalentado.

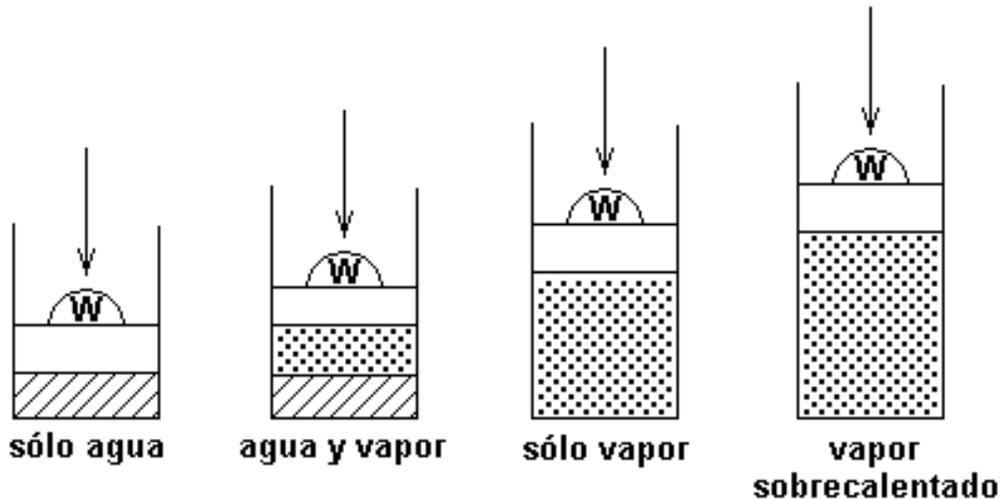


Figura 1. Proceso de evaporación a presión constante.

El proceso de evaporación del agua o el vapor se produce mediante un proceso de transferencia de calor o adición de calor del proceso de combustión que ocurre en el interior de la caldera, elevando de esta manera la presión y la temperatura.

4.2. Generadores de vapor

Los generadores de vapor como calderas, son recipientes que trabajan a presión para transferir calor de la combustión a un fluido, siendo la forma más común para la conversión del agua a vapor.

Las fuentes de calor más utilizadas en la combustión son: el carbón, los combustibles líquidos, los gases y los sólidos entre estos últimos están la cascarilla del arroz, el papel, la madera, etc. Pero también son usados como fuentes de calor las resistencias eléctricas y los gases calientes de procesos industriales.

4.2.1. Clasificación de las calderas

Las calderas se clasifican según:

- ❖ Presión y temperatura de trabajo: De baja presión (15-60 psi), de media presión (60-150 psi) y de alta presión (150-250 psi).

- ❖ Tipo y forma de quemar combustible: Por el tipo de combustible se encuentran los sólidos (Carbón, bagazo, cascarilla de arroz, aserrín, basura, otros), líquidos (crudo de castilla, Fuel oil, ACPM, kerosén) y gaseosos (gas natural, gas propano GLP, gas butano).

- ❖ Por la forma de quemar combustible: Calderas de carbón tipo quemador (carbón pulverizado, parrillas estáticas en lecho fluidizado), de combustible líquido tipo quemador (presión mecánica de baja y alta presión de atomización) y de combustible gaseoso tipo quemador (gas premezclado con mezcla en boquilla atmosféricos).



- ❖ Por el paso de humos: Calderas acuotubulares, en donde el agua circula dentro de los tubos y Calderas pirotubulares en donde el agua circula fuera de los tubos.

4.3. Agua para calderas

El agua de alimentación para las calderas es muy importante porque de esta depende su funcionamiento. Se debe tener en cuenta todo lo relacionado con sus impurezas y sus componentes que influyen en la generación de vapor, tales como:

- Sólidos suspendidos: Estos son material insoluble orgánico como las arcillas, precipitados de fosfato y calcio. En su mayoría material orgánico como los aceites, grasas suspendidas y microorganismos, estos sólidos tapan las tuberías, ocasionan depósitos y generan espumas e impurezas en el vapor.
- Sólidos disueltos: Estos ocasionan arrastre de impurezas en el vapor y producen espumas.
- Dureza: La dureza del agua está determinada por las sales de calcio y magnesio. Estas sales forman incrustaciones en las superficies de transferencia de calor en las calderas.
- Alcalinidad: En las calderas el agua debe mantener un pH de 10-11.5, y mantener suficiente calcita para que la sílice este en forma soluble. La alta alcalinidad cáustica produce espuma, corrosión en metales y condensados.
- Gases disueltos: Entre los gases disueltos se encuentra CO₂ el cual produce corrosión, el O₂ disuelto corroe economizadores, sobre calentadores y sistemas de retorno de condensado.
- Hierro: Produce depósitos que generan fallas en los tubos de la caldera.

En la utilización de agua para calderas se presentan problemas y están divididos en dos grupos:



- Problemas de corrosión: Para que este aparezca, es necesario que exista presencia de agua en forma líquida, el vapor seco con presencia de oxígeno no es corrosivo, pero los condensados formados en las líneas o procesos son muy corrosivos. Otro problema de corrosión frecuente es por una reacción electroquímica, en la que una corriente circula debido a una diferencia de potencial existente en la superficie metálica.
- Problemas de incrustación: La formación de incrustaciones en el interior de las calderas suelen verse con mayor frecuencia que lo estimado conveniente, el origen de las incrustaciones está dado por las sales presentes en las aguas de aporte a los generadores de vapor, las incrustaciones formadas son inconvenientes debido a que poseen una conductividad térmica muy baja y se forman con mucha rapidez en los puntos de mayor transferencia de calor, por esta razón las calderas requieren más calor para la generación de vapor que las calderas de paredes limpias; estas incrustaciones a su vez se acumulan y producen rupturas de los tubos y desgarros generando grandes perjuicios.

4.4. Ebullición general

La Ebullición es el proceso mediante el cual un fluido cambia su fase líquida a través de la adición de calor. Para entender el fenómeno de la Ebullición se abordarán los siguientes temas:

- Ebullición en placa plana.
- Flujo crítico.
- Ebullición en tubos internos.

4.4.1. Ebullición en placa plana

Considérese un líquido que se superpone sobre una placa a la que se le aumenta progresivamente la temperatura. Al principio el líquido se calienta por convección natural sin cambio de fase, visualice figura 2.



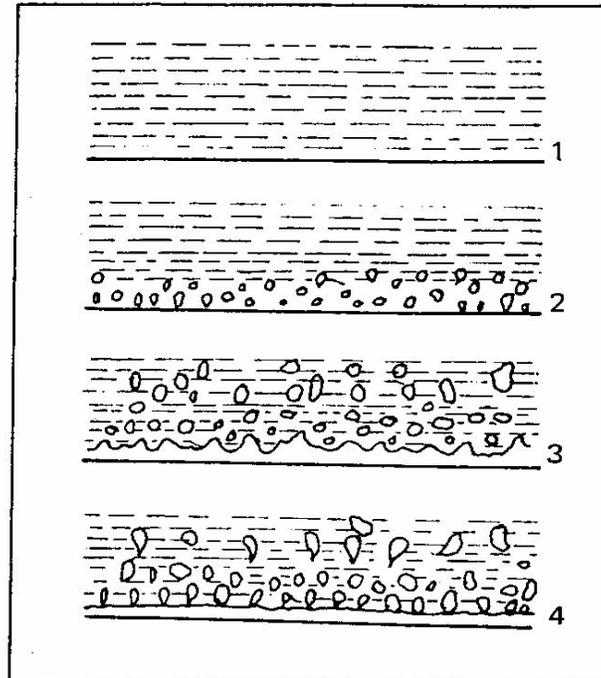


Figura 2. Ebullición en placa plana

En una segunda fase, las burbujas de vapor aparecen alrededor de los “núcleos” que pueden ser impurezas sólidas o gaseosas contenidas en el líquido, o bien las rugosidades más o menos acentuadas de la pared: se trata de la ebullición franca. La capa límite se vuelve muy turbulenta y se deduce que esta configuración aumenta significativamente la transferencia térmica.

Si se aumenta más la temperatura de la placa, la fase líquida ya no se puede alimentar más por la pared porque se forma una película de vapor en sus proximidades, se trata del fenómeno del “flujo crítico”. Pasado este punto, la transferencia térmica desciende rápidamente debido a la resistencia introducida por la película gaseosa, poco conductora.

Por último, el espesor de la película se estabiliza y las burbujas de la interface se forman y la masa es fluida.

4.4.2. Flujo Crítico

El flujo crítico o densidad crítica de flujo desempeña una función fundamental en las operaciones industriales. Este fenómeno es debido a la temperatura de la pared y a la densidad de flujo que depende del medio exterior (presión del sitio).

Este fenómeno se presenta en todos los problemas de ebullición, independiente cual sea su configuración geométrica de transferencia de calor; tubos placas, etc.

4.4.3. Ebullición en tubos internos

Se limita este tema al caso de un tubo vertical sometido a una densidad de flujo uniforme, y recorrido por un fluido de abajo hacia arriba. La figura 3 define:

- Los diferentes regímenes de circulación.
- Los regímenes de transferencia térmica.

Estos se expresan mediante una evolución de las temperaturas del líquido:

- a) En la parte inferior del tubo (zona A), se presenta el caso clásico de convección forzada entre una pared y un líquido; siendo uniforme la densidad de flujo, la diferencia de temperatura entre la pared y el líquido es constante.
- b) A continuación (zona B) aparecen burbujas en la pared, aun cuando el líquido este todavía por debajo de su temperatura de ebullición es. Esto se debe a sobrecalentamientos locales por el contacto del fluido y la pared, se trata de la ebullición subsaturada.
- c) Durante la ebullición saturada o franca (zona C y D) el fluido permanece a su temperatura de ebullición; la turbulencia creada por las burbujas incrementa los intercambios térmicos, y así disminuye la diferencia de temperatura entre el fluido y la pared.
- d) En las zonas E y F, se comprueba la presencia de una película líquida alrededor de la pared, el fluido está constituido por pequeñas gotas líquidas dispersas dentro de un medio esencialmente gaseoso, la transferencia térmica sigue siendo excelente.
- e) En la zona G, desaparece la película líquida, la pared queda en contacto con el vapor y la transferencia térmica desciende bruscamente; de ahí resulta un incremento súbito de la temperatura de la pared, lo que representa un grave peligro para el material. Las gotas líquidas conservan su temperatura de ebullición es pero el vapor se eleva muy por encima de dicha temperatura.



- f) Finalmente, al haber desaparecido todo el liquido (zona H), se vuelve a estar en el caso clásico de la convección forzada entre una pared y un vapor seco.

En el hogar de una caldera industrial de gran potencia, evidentemente se busca elevadas densidades de flujo a fin de lograr economía en las superficies de cambio. Por consiguiente, es importante limitarse a las zonas de A a F; luego, nunca se obtendrá vapor seco. A continuación, el fluido se dirige a un “separador”. La fase líquida se recicla. Por lo que respecta al vapor, si es que se debe sobrecalentar, se le envía a un sobre calentador donde es menor la densidad de flujo.

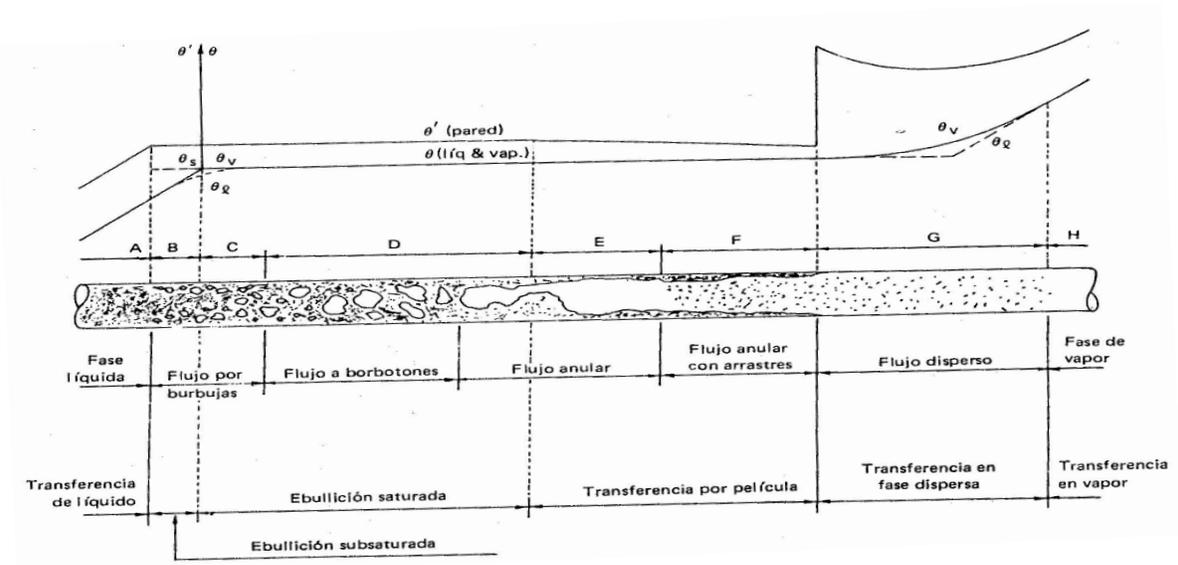


Figura 3. Ebullición tubos internos

4.5. Calidad de vapor

Durante un proceso de evaporación, una sustancia existe como parte líquida y como parte vapor. La calidad x es un término que se utiliza para conocer la proporción de la mezcla de líquido y vapor saturado de una manera apropiada y se define como la razón entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla donde:

$$X = \frac{m_{vapor}}{m_{total}}$$

$$m_{total} = m_{liquid} + m_{vapor} = m_f + m_g$$

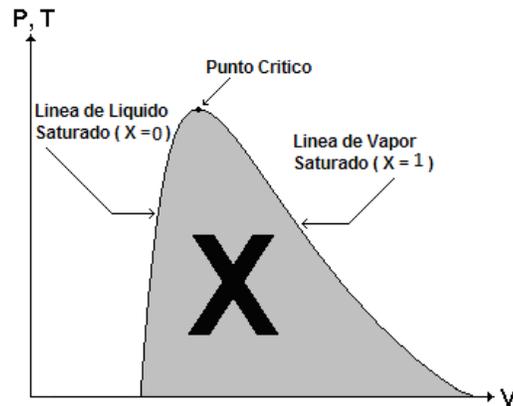


Figura 4. Calidad de vapor

La calidad o título de vapor sólo tiene importancia para mezclas saturadas. Su valor se encuentra entre 0 y 1. La calidad de un sistema compuesto por líquido saturado es 0 y la calidad de un sistema compuesto por vapor saturado es 1 (ver figura 4).

En la mezcla de vapor saturado y de líquido saturado suele desconocerse la masa de cada fase. En consecuencia, las dos fases están homogéneas. En este caso las propiedades de esta “mezcla” serán las propiedades promedio de la mezcla saturada de líquido-vapor considerada. Esto se ejemplifica a continuación:

Si se considera un tanque que contiene una mezcla saturada de líquido-vapor. El volumen ocupado por el líquido saturado es V_f , y el volumen que tiene el vapor saturado es V_g . El volumen total, V , es la suma de ambos:

$$V = V_f + V_g$$

$$V = m v \rightarrow m_t v_{av} = m_f v_f + m_g v_g$$

$$m_f = m_t - m_g \rightarrow m_t v_{av} = (m_t - m_g) v_f + m_g v_g$$

Al dividir entre m_t , se obtiene

$$v_{av} = (1-x)v_f + xv_g$$



Puesto que $x = \text{mg/mt}$. Esta relación puede expresarse como

$$v_{av} = v_f + xv_{fg} \quad (m^3 / kg)$$

Donde $v_{fg} = v_g - v_f$. Al despejar la calidad, se obtiene

$$x = \frac{v_{av} - v_f}{v_{fg}}$$

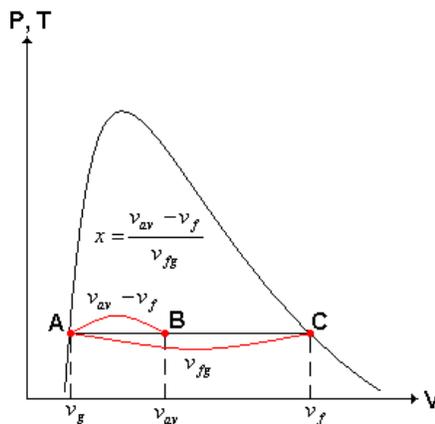


Figura 5. Estados de líquido-mezcla-vapor saturado

Con base a esta ecuación la calidad se relaciona con las distancias horizontales en un diagrama $P-v$ o $T-v$. A una temperatura y presión determinada, el numerador de la ecuación anterior es la distancia entre el estado real y el estado líquido saturado, y el denominador es la longitud de la línea horizontal completa que conecta los estados del líquido saturado, y vapor saturado figura 5.

El análisis que acaba de exponerse también es válido tanto para la energía interna y la entalpía con los siguientes resultados:

$$u_{av} = u_f + xu_{fg} \quad (kJ/kg)$$

$$h_{av} = h_f + xh_{fg} \quad (kJ/kg)$$

Por último todos los estados de mezcla saturados se localizan bajo la curva de saturación, y para analizar mezclas saturadas todo lo que se necesita son datos del líquido saturado o de vapor saturado en el caso del agua.



4.6. Arrastre de agua en el vapor en calderas pirotubulares

En las calderas pirotubulares hay calidad de vapor debido al nivel del agua y a la velocidad de desprendimiento del vapor figura 6, la rata de evaporación para que exista calidad debe estar entre el siguiente rango:

30-50 mm/seg. Existe arrastre de vapor en el agua.

Mayor de 60 mm/seg. Hay arrastre de agua en el vapor.

La relación de la cantidad de vapor generada por segundo y el área del plano del agua da este factor. Entre menor sea su número, las partículas de agua se separan del vapor y se produce vapor seco. En las calderas pirotubulares este factor es casi 3 veces mayor, lo que significa menor oportunidad de separación de vapor y las gotas de agua.

En eventos de incrementos de carga, la caldera experimentará una reducción de presión, lo que significa que la densidad del vapor se reducirá y aún a altas ratas de generación de vapor, producirá progresivamente vapor húmedo de la caldera.

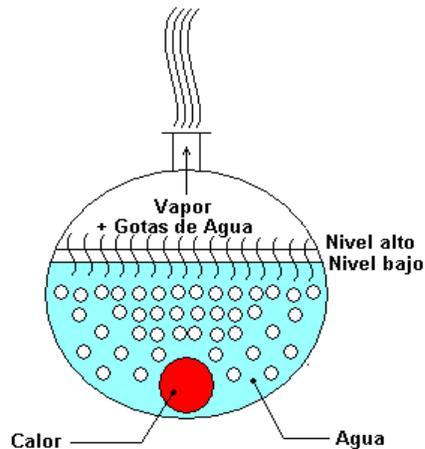


Figura 6. Arrastre de vapor en calderas pirotubulares.

Otra razón que ocasiona el arrastre, es debido a las ebulliciones extremadamente rápidas, casi explosivas en el agua en las superficies de calentamiento, también puede producirse por causa de la espuma, cuando las burbujas de vapor suben de las superficies de calentamiento, forman una capa de espuma sobre la superficie del agua. La espuma puede llenar el espacio del vapor a tal grado que parte de ella entra a los tubos conductores de vapor.

4.7. La entalpía

La Entalpía es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que éste puede intercambiar con su entorno. Por ejemplo, en una reacción química a presión constante, el cambio de entalpía del sistema es el calor absorbido o desprendido en la reacción. En un cambio de fase, por ejemplo de líquido a gas, el cambio de entalpía del sistema es el calor latente, en este caso el de vaporización. En un simple cambio de temperatura, el cambio de entalpía por cada grado de variación corresponde a la capacidad calorífica del sistema a presión constante. El término de entalpía fue acuñado por el físico

Alemán Rudolf J.E. Clausius en 1850. Matemáticamente, la entalpía H es igual a $U + pV$, donde U es la energía interna, p es la presión y V es el volumen. H se mide en julios.

$$H = U + pV$$

Cuando un sistema pasa desde unas condiciones iniciales hasta otras finales, se mide el cambio de entalpía (ΔH).

$$\Delta H = H_f - H_i$$

La entalpía recibe diferentes denominaciones según el proceso, así:

Entalpía de reacción, entalpía de formación, entalpía de combustión, entalpía de disolución, entalpía de enlace, etc.

La entalpía de formación se define como la variación de la entalpía que tiene lugar cuando se forma un compuesto a partir de sus elementos estables a una presión dada y a una presión estándar de referencia específica.

Esta variación de entalpía es igual a la energía liberada o absorbida durante el proceso de formación, se determina recurriendo a medidas experimentales o utilizando métodos de termodinámica estadística.



4.8. Calorimetría

La calorimetría es una técnica en la que, mediante algún tipo de dispositivo o sensor térmico se detecta el gradiente de calor y a su vez temperatura, respecto a una fuente térmica o foco calorífico dando lugar a procesos físico-químicos en el que se liberan y absorben calor (exotérmico, endotérmico), generando cambio de estados de la materia.

Hay dos tipos de calorimetría:

- Calorimetría a volumen constante.
- Calorimetría a presión constante.

4.8.1. Calorimetría a volumen constante

No existe trabajo en la calorimetría a volumen constante, por lo que el calor medido es igual al cambio de energía del sistema:

$$Q = C_v \Delta t = \Delta U$$

Donde:

ΔU = cambio de energía interna.

C_v = Capacidad calorífica a volumen constante.

Δt = Cambio de temperatura.

Q = Calor

La presión no se mantiene constante, el calor medido no representa el cambio de entalpía.



4.8.2. Calorimetría a presión constante

El calor medido es igual al cambio en la energía interna del sistema menos el trabajo realizado:

$$q = \Delta U - w$$

Como la presión se mantiene constante, el calor medido representa el cambio de entalpía.

$$q = \Delta H = H_{final} - H_{inicial}$$

4.8.3. Clasificación de los calorímetros

- Según el principio de medida:
 - ✓ Compensación del efecto térmico por transición de fase.
 - ✓ Compensación del efecto térmico por efecto termoeléctrico.
 - ✓ Medida de diferencia de temperatura (ΔT) local.
 - ✓ Medida del ΔT como función del tiempo.

- Según el modo de operación:
 - ✓ Isotérmico
 - ✓ Adiabático
 - ✓ Barrido de temperatura del entorno
 - ✓ De barrido de temperatura adiabático

- Según el principio de construcción:
 - ✓ Calorímetro simple
 - ✓ De células gemelas



4.8.4. Calorímetros para medir la calidad de vapor

A continuación se encuentran los dispositivos utilizados con mayor frecuencia en la medición de la calidad de vapor, aunque su mayor aplicación se encuentra a nivel de laboratorio debido a que su uso en la industria se encuentra restringido dado que no permiten realizar una medición continua. Por el momento en la industria la principal referencia corresponde a la experiencia del personal involucrado en el diseño, construcción y operación de calderas tabla 1.

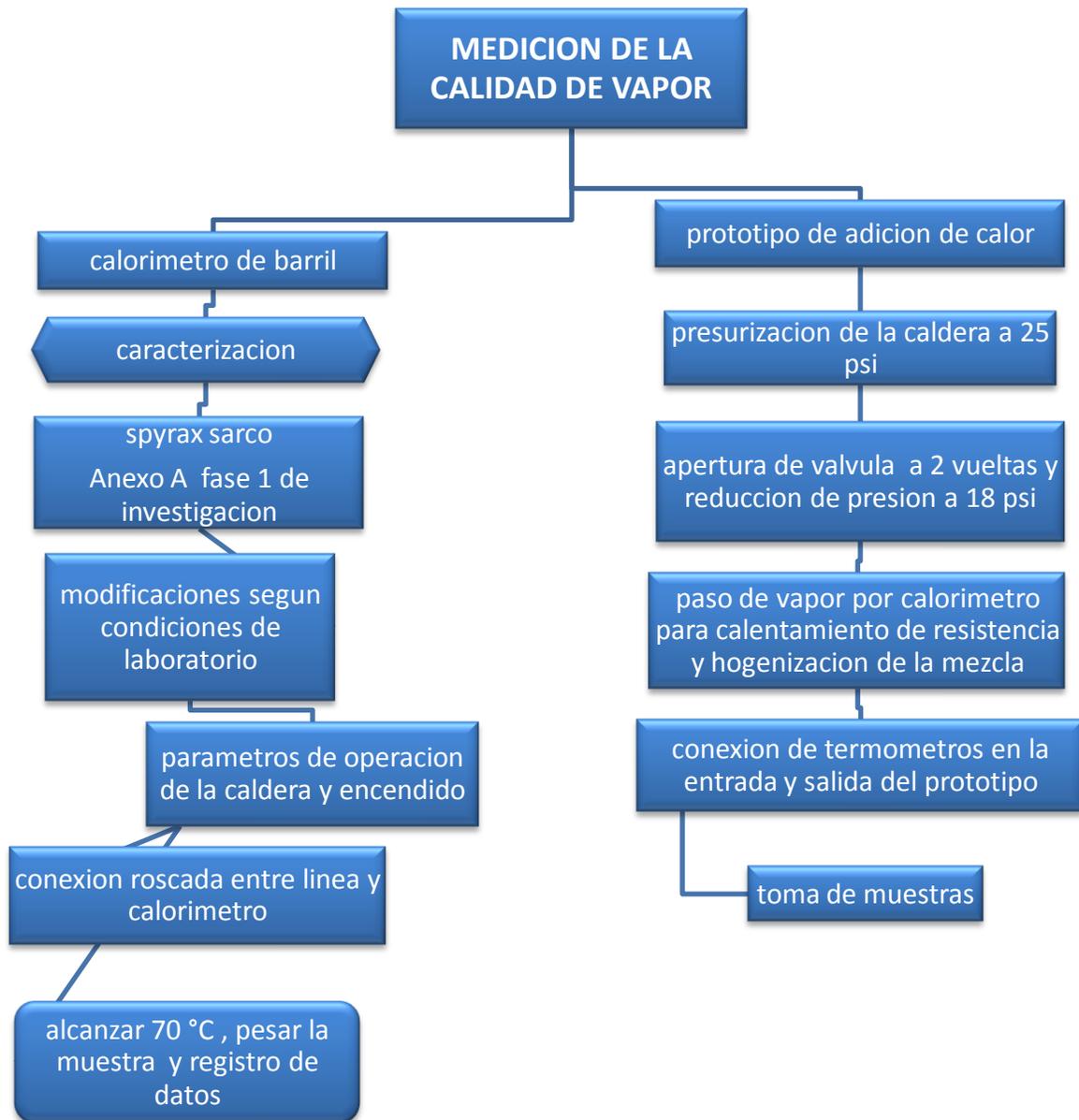
Dispositivo	Principio de operación	Limitantes
Calorímetro de estrangulación	Caída de presión producida por un orificio de diámetro muy pequeño que produce un recalentamiento del vapor sin que realice trabajo con lo que se pueden obtener las lecturas de la temperatura del vapor antes y después del calorímetro conociendo así sus entalpías.	Contenido de humedad del vapor es muy alto, puede resultar imposible sobrecalentar el vapor por estrangulamiento.
Calorímetro de separación	Proceso mecánico que permite cambiar la dirección del vapor húmedo de entrada a través de una serie de ángulos obtusos. Mientras el vapor viaja a través de estos ángulos, la inercia de las gotitas de agua les impide seguir los cambios en dirección del vapor y provoca la caída del vapor dentro de la cámara de colección.	Los calorímetros “separadores” no pueden separar todo lo que hay de condensado y un poco se va en el vapor seco.
Calorímetro combinado	Combina el principio de caída de presión y de cambio de dirección de separación de gotas de agua por inercia.	Medición con poca exactitud.
Calorímetro de Barril	Este calorímetro trabaja con un peso inicial de líquido y una muestra de vapor extraída de la línea, los cálculos de la calidad se hacen por volumen específico.	Se necesitan cierta cantidad de pruebas para lograr una medida confiable.

Tabla 1. Calorímetros para medir la calidad de vapor.



5. METODOLOGIA

Para la evaluación de los parámetros de generación y transporte de vapor se tuvieron en cuenta solamente las condiciones de operación de la caldera tales como: presión, temperatura del vapor, tubería de la línea de transporte y el sitio donde se tomaron las pruebas de calidad. No intervinieron en este estudio parámetros como: el agua, el combustible utilizado, el mantenimiento ni el estado actual de operación de la caldera, ni la eficiencia de ésta en la producción de vapor [2].



Para la medición del flujo producido por la caldera se utilizó una placa orificio en acero inoxidable que se construyó bajo las indicaciones de la norma ISO 5167 [3].

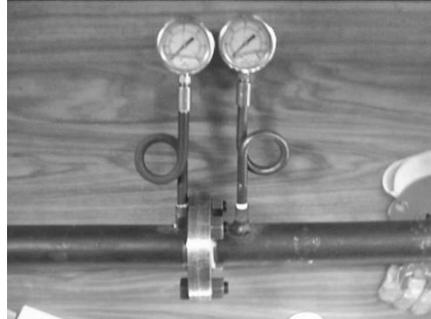


Figura 8. Esquema general de la placa orificio con manómetros

Fuente: Autores de la investigación (Fase1) [2]

La manera en que se dispuso la tubería dentro del laboratorio de la universidad y algunas consideraciones específicas sobre la manera en que se desarrollaron los procedimientos de toma de muestras se consignan del siguiente modo:

5.1. Caracterización

Con el fin de tener un punto de referencia de las condiciones de operación de la caldera que permita la comparación de la calidad de vapor, fue necesario realizar una caracterización de la calidad de la caldera usando como método de medición el calorímetro de barril.

5.1.1. Procedimiento

- Para la operación de la caldera se usó el procedimiento de operación consignado en la tesis Rehabilitación de la Caldera [4], en el cual se especifican los rangos máximos de operación, el encendido, el combustible y la seguridad industrial respectiva para este procedimiento.
- Aunque se desarrolla el procedimiento de SpyraSarco [5] para la medición de la calidad, este se modificó según las condiciones del laboratorio con el fin de poseer más repeticiones de éste procedimiento y así tener una alta precisión para la toma de las muestras.

- Como primera medida se encendió la caldera, una vez que ya estaba lista a la presión de toma de datos, se abrió la llave y se esperó a que saliera todo el condensado que tenían los tubos, esto con el fin de no alterar los datos de la calidad, ya que éste condensado era producto de los paros de la caldera.
- Se usó una conexión roscada entre el calorímetro y la derivación.
- Se esperó a que la temperatura subiera mientras se agitaba el calorímetro en forma circular, después de esto se pesó la muestra, si la temperatura era superior de 343 K se esperaba a que se estabilizara en este valor, que es el valor que se tomó como referencia para todo el procedimiento.

En el documento base [2] la calidad promedio de vapor de la caldera pirótubular de la Universidad Libre es de 82%,

El procedimiento para la medición de la calidad de vapor por calorímetro de barril fue obtenido del anexo A del proyecto de grado base para esta investigación [2].

El calorímetro usado para la medición fue construido por el anterior grupo de investigación y para la actual investigación se recuperó, se modificó con un nuevo aislante térmico. Sus características se encuentran en el proyecto de grado base para esta investigación [2].

Durante las pruebas realizadas con el calorímetro de barril para la medición de la calidad del vapor de la caldera de la universidad libre se han usado tres puntos de apertura en la válvula de la línea de vapor: 2 vueltas, 3 vueltas y totalmente abierta (ver anexo 1).

5.1.2. Resultado de caracterización con calorímetro de barril

Se realizaron pruebas anteriores para poder determinar los parámetros de toma de datos ver anexo 1

- Las pruebas se realizaron a una presión de trabajo de la caldera de 18 psi.
- La toma de datos se hizo a una única apertura de válvula de 2 vueltas



PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN LÍNEA

- Se decidió aumentar el tiempo de exposición del agua contenida en el calorímetro con el vapor proveniente de la derivación de la línea principal de vapor, con el fin de obtener más condensado y una temperatura T2 mas alta (70°C aprox.)

A continuación se presentan los resultados de las pruebas:

#	T1	T2	W1(g)	W2(g)	W3(g)	W4(g)	W5(g)	%calidad(18psi)
1	19	75	217,5	443,7	226,2	470,2	252,7	83,78443905
2	22	71	218,2	443,5	225,3	466,6	248,4	85,01561812
3	22	68	218,4	445,1	226,7	467	248,6	85,12728141
4	22	70	217,8	443,8	226	467,2	249,4	86,14189344
5	22	74	218,1	444	225,9	468,2	250,1	88,98451624
6	22	68	218,7	445,8	227,1	466,8	248,1	86,11983296
7	20	65	218,9	445	226,1	466	247,1	85,12646553
8	22	51	219,2	443,6	224,4	456,7	237,5	84,8006926
9	21	32	219,4	446,3	226,9	451,1	231,7	83,59152728
10	22	39	219,7	445,6	225,9	453	233,3	84,71335804
11	22	51	219,5	445,6	226,1	458,6	239,1	84,22890538
12	22	67	219,8	445,3	225,5	466,8	247	85,15242974
13	22	55	219,7	445,4	225,7	460,8	241,1	83,08979656
14	22	68	220,3	447,6	227,3	470,3	250	83,20736524
15	22	65	220	447,6	227,6	467,7	247,7	87,57770317

Tabla 2. Datos obtenidos con calorímetro de barril posteriores a reparaciones de laboratorio

El comportamiento de los resultados de las nuevas pruebas es menos fluctuante que los resultados anteriores. El promedio de la calidad de los resultados mostrados en la tabla anterior es de 85.1%. Se decide tomar este resultado como referencia para la comparación de los resultados con el prototipo de adición de calor.

W1: Peso del calorímetro de barril, corcho y termómetro

W2: W1 con el contenido de agua (250 ml de agua a temperatura ambiente)

W3: W2 – W1

W4: W2 mas el condensado de vapor

W5: W4 – W1



T1: Temperatura del agua ambiente

T2: temperatura del agua dentro del calorímetro luego de la exposición a la línea de vapor.

5.2. Diseño, construcción e instalación de prototipo de adición de calor

Este prototipo de adición de calor, tiene un principio de operación basado en una resistencia eléctrica

El prototipo de adición de calor se construyó siguiendo los diseños y especificaciones del proyecto de grado base para esta investigación [2].

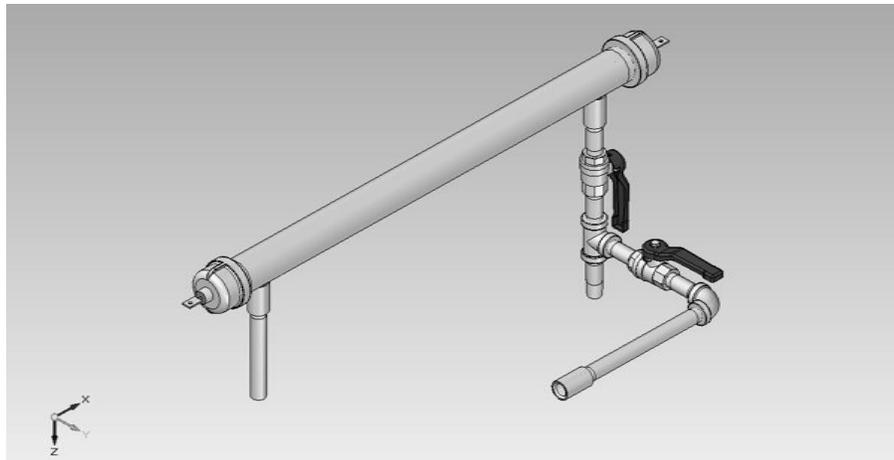


Figura 9. Modelamiento del Prototipo de Adición de Calor

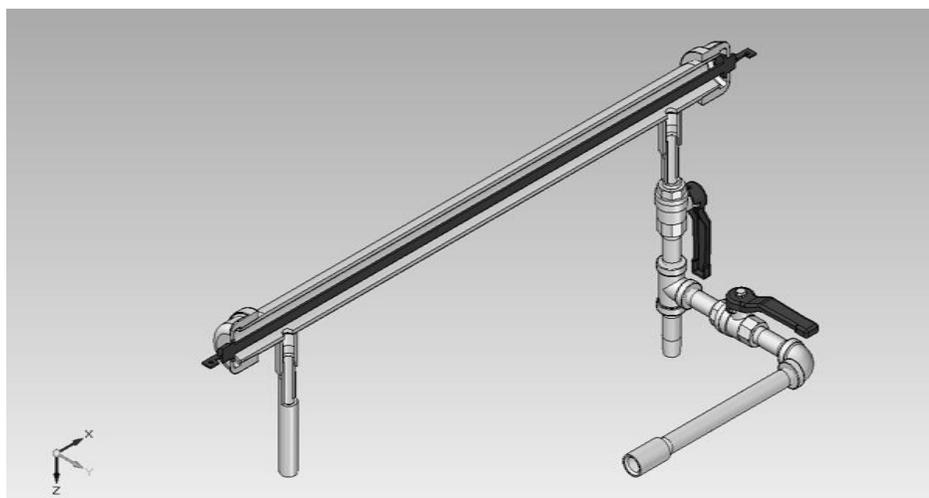


Figura 10. Colocación de la resistencia en el prototipo

En la construcción se usaron los siguientes materiales:

Cantidad	Ítem
1	resistencia eléctrica de 500W y 26,5 Ω
1	tubo de acero galvanizado 1"
2	tapas de acero galvanizadas de 1"
2	válvulas de globo de 1/4"
4	niples de tubo de acero galvanizado de 1/4"
1	lana de vidrio de 2"
1	dimmer de 600 w
1	bombillo de 150 w
2	termómetros de -10 a 110°C

Tabla 3. Materiales para la construcción del prototipo

Aunque se instaló la placa orificio para la medición del flujo de vapor en la línea principal, se decide no realizar la medición del flujo pues se considera que este no afecta el análisis del comportamiento del prototipo de adición de calor.

Para la medición de temperatura se decide usar termómetros de -10 a 110°C

5.2.1. Procedimiento de toma de datos para la determinación de calidad con calorímetro de adición de calor

El procedimiento para la toma de datos se realiza con base en el procedimiento de toma de datos del proyecto de grado base para esta investigación [2] pero se realizan algunas modificaciones. El procedimiento de toma de datos es el siguiente:

- 1) Se presurizo la caldera hasta 25 psi.
- 2) Se abrió la válvula de bola a 2 vueltas hasta que la presión se estabiliza a 18 psi, Esta válvula determino el flujo másico así que las pruebas hicieron a una sola apertura de la válvula.
- 3) Se espero a que el vapor circulara por el prototipo para precalentar la resistencia y homogenizar el sistema.



- 4) Se instalaron los termómetros en los agujeros hechos a los nipples de ¼" y esperamos a que se estabilizaran a la temperatura para tomar la temperatura de referencia.
- 5) conectamos la resistencia con el dimmer en su posición mínima de flujo de corriente eléctrica, y se comenzó a aumentar el flujo de corriente eléctrica hasta que se notaron los cambios en el vapor, se continuó y se detuvo la toma de datos hasta que el vapor aumentó un grado en su temperatura.

5.2.2. Prueba de tiempo de respuesta del sistema al aumento de corriente en la resistencia

Para determinar el tiempo de respuesta del sistema a la variación de corriente se realizó una prueba que consistió en poner en marcha el procedimiento de toma de datos hasta conectar la resistencia. Luego de ello se lleva a la resistencia a la máxima potencia posible, aumentando al máximo la corriente en el sistema (1,08 A.) y tomar la temperatura en el termómetro 2 en intervalos de 20 segundos hasta que la temperatura se estabilice. De esta manera se conocerá el tiempo que toma el sistema en estabilizarse luego de un cambio en la corriente. Del desarrollo de la prueba anteriormente descrita se obtuvo como resultado la siguiente Figura:

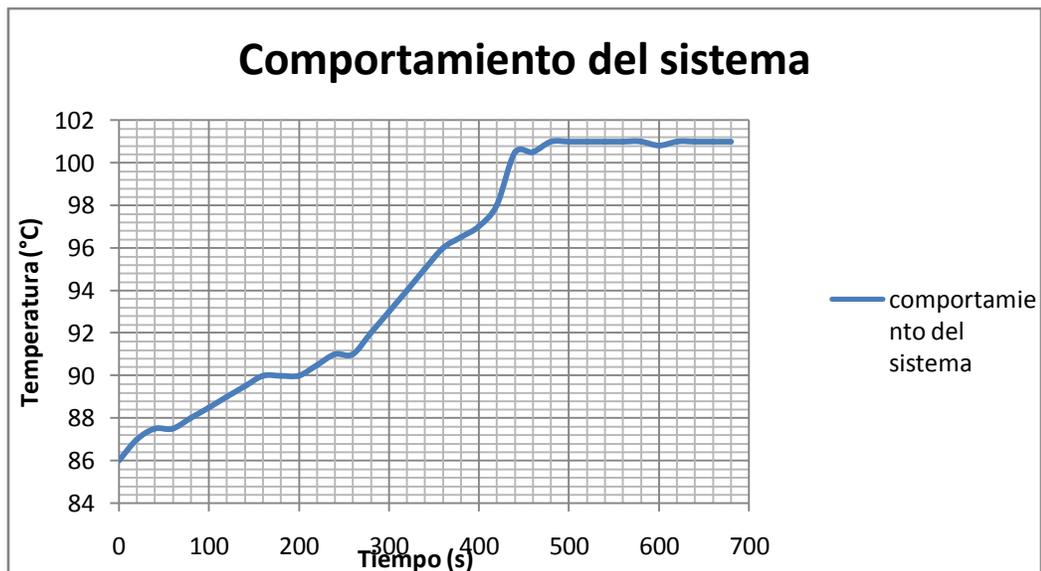


Figura10. Comportamiento del sistema

De la prueba realizada se define que el tiempo de estabilización del sistema luego de la variación de corriente es de 420 segundos (7 min).

5.2.3. Resultados de toma de datos con calorímetro de adición de calor

En el proyecto de grado base para esta investigación se obtenía una respuesta de cambio de temperatura a 0.55 A. por lo que se decidió realizar las pruebas en un intervalo de corriente de 0 a 0.55 A. con una variación de 0.05 A. a continuación se muestra el promedio de los datos obtenidos con el intervalo de corriente de 0 a 0,55 A:

FECHA	N° de pruebas	Tomas de Muestras	Corriente(A)	T1	T2	Tiempo(m)
17/10/2012	promedio	1	0.20	91	88	3
		2	0,22	91	88	5
		3	0.25	91	88	5
		4	0.30	91	88	6
		5	0.35	91	89	8
		6	0.40	92	89	10
		7	0.45	92	89	10
		8	0.50	91	89	10
		9	0.55	90	90	10
		10	0.6	90	90	10

Tabla 4. Datos obtenidos con prototipo de adición de calor a diferentes intensidades de corriente

5.3. Pruebas iniciales con prototipo de adición de calor

Al cabo de algunas pruebas se hace notable que con este intervalo de corriente no se presentaba el cambio de temperatura esperado. También se cuestiona el tiempo de respuesta del sistema a la variación de corriente en la resistencia. Por lo anterior se propone realizar dos pruebas que permitan determinar el tiempo de respuesta del sistema y el intervalo de corriente en el que se presenta la variación esperada

5.3.1. Prueba de determinación de intervalo de corriente en el que se presenta la variación de temperatura.



La prueba para determinar el intervalo de corriente en el que se presentó el salto en la temperatura esperado de 1°C consistió en realizar el procedimiento de toma de datos hasta conectar la resistencia, luego de ello se incrementó la corriente en intervalos de 0.1 A. hasta la máxima corriente posible. De esta manera se identificó el intervalo de corriente en el que el sistema comenzó a calentarse hasta que llegó a una variación de 1°C con respecto a la temperatura del punto de referencia.

Del desarrollo de la prueba anteriormente descrita se obtuvo la siguiente Figura:

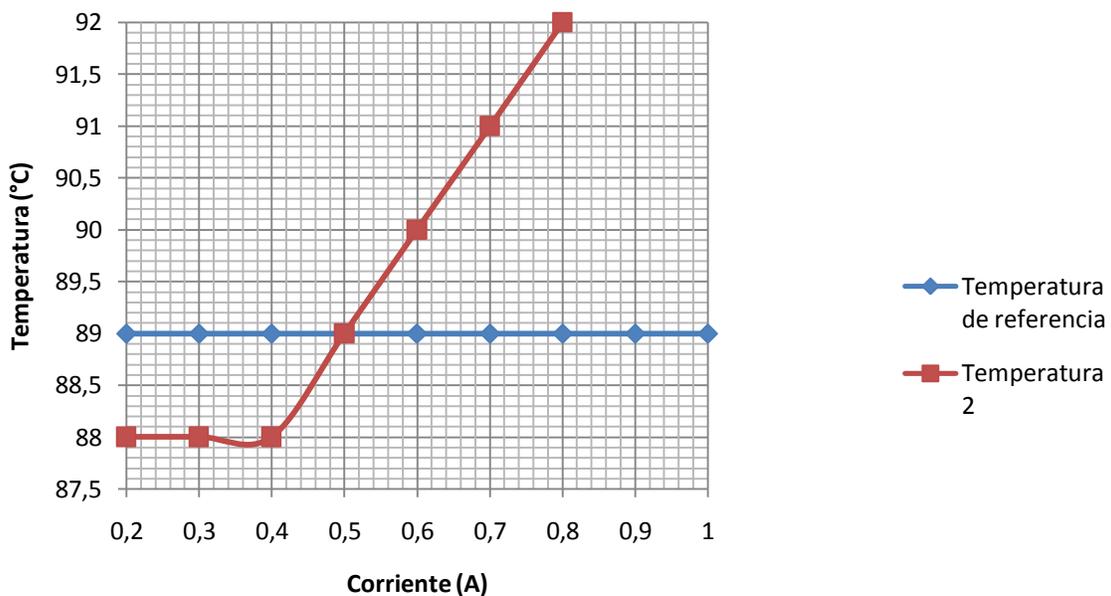


Figura 11. Intervalo de corriente en el que se presenta variación de temperatura

De la prueba realizada se define que el aumento de temperatura comienza en 0.4 A. y culmina en 0.7 A. con un aumento de temperatura de 1°C en la temperatura 2 con respecto a la temperatura de referencia.

5.3.2. Procedimiento final de toma de datos con prototipo de adición de calor

De las dos pruebas anteriormente descritas se define el tiempo entre aumentos de corriente de 7 minutos y el intervalo de corriente en el que se presenta el aumento de temperatura de 1°C con respecto a la temperatura de referencia.



Como conclusión a los análisis anteriores se modifica el procedimiento de toma de datos



Figura 12. Procedimiento de toma de datos final

- 1) Se presuriza la caldera hasta 25 psi.
- 2) Se abre la válvula de bola a 2 vueltas hasta que la presión se estabilice a 18 psi, Esta válvula determina el flujo másico así que las pruebas que se muestran a continuación se hicieron a una sola apertura de la válvula.
- 3) Se espera a que el vapor circule por el prototipo para precalentar la resistencia y homogenizar el sistema.
- 4) Se instalan los termómetros en los agujeros hechos a los niples de $\frac{1}{4}$ " y esperamos a que se estabilice la temperatura para tomar la temperatura de referencia.
- 5) conectar la resistencia con el dimmer en su posición mínima de flujo de corriente eléctrica, y se comienza a aumentar el flujo de corriente eléctrica desde 0.4 A. hasta que se noten los cambios en el vapor, se continúa y se detiene la toma de datos hasta que el vapor aumente un grado en su temperatura en 0.7 A. el aumento de corriente se realiza en intervalos de 0.05 A. con un espacio de tiempo de 7 minutos entre cada aumento de corriente.

6. REVISIÓN DE DATOS

6.1. Tabla de propiedades del vapor a 89 °C

La siguiente tabla muestra las propiedades del vapor a 89°C:

Inputs	Saturation Temperature	
Output	<input checked="" type="radio"/> Single Value <input type="radio"/> Table	
Saturation Temperature	89	°C
	Calculate	Reset Print
Pressure	-0.338287	bar gauge
Specific Enthalpy of Water (h_f)	372763	J/kg
Specific Enthalpy of Evaporation (h_{fg})	2.28527E06	J/kg
Specific Enthalpy of Steam (h_g)	2.65803E06	J/kg
Density of Steam	0.408602	kg/m ³
Specific Volume of Steam (v_g)	2.44737	m ³ /kg
Specific Entropy of Water (s_f)	1181.00	J/kg K
Specific Entropy of Evaporation (s_{fg})	6310.28	J/kg K
Specific Entropy of Steam (s_g)	7491.28	J/kg K
Specific Heat of Steam (c_v)	1503.16	J/kg K
Specific Heat of Steam (c_p)	2008.10	J/kg K
Speed of sound	466.934	m/s
Dynamic Viscosity of Steam	1.18944E-05	Pa s
Isentropic Coefficient (k)	1.31962	
Compressibility Factor of Steam	0.988322	

Tabla 5. Propiedades de vapor a 89 °C

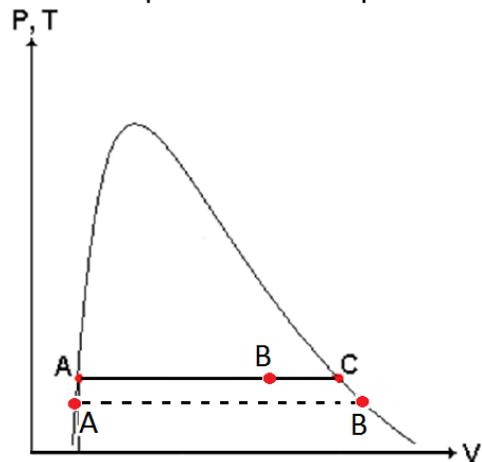


Figura 13. Isoterma de estado del vapor a 89°C



1 <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-tables/saturated-steam>

6.2. Flujo másico en el prototipo

Para el cálculo de calidad es necesario conocer el flujo másico que pasa a través del prototipo, el cual se halló tomando muestras con bolsas resellables

Se pesan las bolsas vacías en una balanza analítica (masa 1), se ponen en la salida del prototipo y se deja circular vapor hasta llenar la bolsa (masa 2). Se toma el tiempo de llenado y el condensado obtenido:

#	masa 1(g)	masa 2(g)	condensado(g)	tiempo(s)	flujo kg/s	Lb/h
1	10,444	13,25	2,806	2,48	0,00113145	9,00018691
2	10,57	13,515	2,945	2,58	0,00114147	9,0798916
3	10,523	13,386	2,863	2,5	0,0011452	9,10956211
4	10,448	13,47	3,022	2,63	0,00114905	9,14018717
5	10,62	13,52	2,9	2,55	0,00113725	9,04632336
6	10,55	13,119	2,569	2,48	0,00103589	8,24004916
7	10,55	13,62	3,07	2,55	0,00120392	9,57665388
8	10,5	13,22	2,72	2,37	0,00114768	9,12928942
9	10,53	13,4	2,87	2,51	0,00114343	9,09548254
10	10,51	13,37	2,86	2,5	0,001144	9,10001664
11	10,49	13,45	2,96	2,59	0,00114286	9,09094844

Tabla 6. Medición de flujo de vapor

El promedio de flujo másico obtenido es de 0.001183 kg/s.

Las dimensiones del prototipo se presentan en la siguiente tabla:

Variable	magnitud (m)
diámetro interno de prototipo	0,0245
diámetro de resistencia	0,008
longitud de prototipo	0,413

Tabla 11. Dimensiones del prototipo



variable	magnitud	Unidades
longitud de prototipo	0,413	M
volumen de prototipo	0,000188	m ³
flujo másico	0,00113838	kg/s
densidad a 89°C	0,4086	kg/m ³

Tabla 7. Dimensiones del prototipo

Para calcular la velocidad del flujo por el prototipo se considera que:

$$\frac{\dot{m}}{\rho a_{89^{\circ}C}} = Q$$

$$V * A = Q$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico

Q = caudal o flujo volumétrico

A = área de flujo

V = velocidad del flujo

ρ = densidad del vapor a 89°C¹

La velocidad promedio del flujo en el prototipo es de 6,12042808 m/s.

De la velocidad se calcula el tiempo que le toma a la masa en atravesar el prototipo:

$$V = \frac{X}{t}$$

$$t = \frac{X}{V}$$

¹ <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-tables/saturated-steam>



$$\frac{0,413}{6,12042808} = 0.0675 \text{ s}$$

El tiempo que tarda la masa en recorrer el prototipo es de 0.0675 segundos.

6.3. Cálculo de calidad:

El principio teórico del prototipo de adición de calor consiste en calcular la calidad del vapor a partir de la cantidad de flujo de calor necesario para llevar el vapor hasta el punto de saturación. Dicha energía es calculada con la corriente que pasa por la resistencia eléctrica, la resistencia en Ω y el tiempo de calentamiento del vapor que sería el tiempo que tarda el vapor en recorrer el prototipo:

$$\dot{Q} = \dot{m} h_{fg} = I R^2$$

Donde:

\dot{Q} Es el flujo de calor en el prototipo

\dot{m} = flujo másico

I = la corriente del sistema al momento del salto de temperatura

R = la resistencia en Ω de la resistencia eléctrica

Al analizar la Figura de presión/temperatura-volumen se encuentra que la entalpia h_{fg} corresponde a la energía adquirida desde el punto de líquido saturado hasta el punto de vapor saturado, y con la ecuación de flujo de calor solo se obtiene la energía adquirida por el vapor desde su punto de calidad X hasta el punto de vapor saturado, punto en el que el vapor alcanza la calidad de 1:



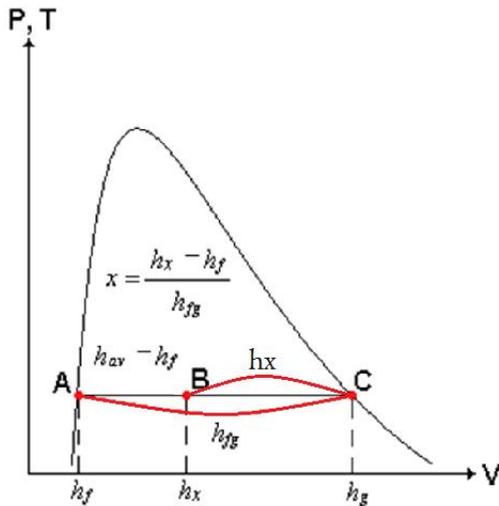


Figura 13. Entalpías en curva isoterma

Por lo anterior se modifica la ecuación del cálculo de calidad de vapor para el prototipo de adición de calor sustituyendo en la ecuación h_{fg} por h_x :

$$\overset{o}{Q} = \overset{o}{m} h_x = I R^2$$

De los datos tomados en el laboratorio se muestra a continuación una tabla con el promedio de temperaturas obtenidas:

Toma	Corriente(A)	T1(°C)	T2(°C)	Tiempo(m)
1	0	89	87,3482759	0
2	0,4	89	88,2068966	7
3	0,45	89	88,8035714	14
4	0,5	89	89,5517241	21
5	0,55	89	90	28
6	0,6	89	90,362069	35
7	0,65	89	90,8103448	42
8	0,7	89	91,0517241	49

Tabla8. Promedios de variaciones de corriente

La temperatura T1, la cual es la temperatura de referencia y temperatura de entrada del vapor al prototipo se mantiene a lo largo de las pruebas en 89°C y el salto de temperatura culmina en 91°C medida en T2 con una corriente de 0,7 A. en la resistencia. El tiempo total de cada prueba es de 49 minutos.



Con lo dicho anteriormente se calcula la calidad promedio del vapor de la caldera usando la ecuación descrita con anterioridad y teniendo en cuenta que:

$$X = \frac{h_x - h_f}{h_{fg}}$$

Corriente	Voltaje	Ohmios	Flujo de masa
0,2	8,6	43	0,00113838
0,3	9,88	32,93333333	0,00113838
0,4	11,15	27,875	0,00113838
0,5	12,1	24,2	0,00113838
0,6	13,6	22,66666667	0,00113838
0,7	14,9	21,2857143	0,00113838
0,8	16,1	20,125	0,00113838
0,9	19,42	21,57777778	0,00113838
	hfg 89°	2280,6	
	hf 89°	372,716	

Tabla 9. Propiedades del vapor

Calidad

hx	x	Calidad %
278,603931	0,87783744	87,7837442

7. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

7.1. Análisis descriptivo

En una primera exploración de los datos se evidencia dos factores, el primero la intensidad de corriente que es introducido al sistema, el segundo factor es la temperatura de dos puntos diferentes del sistema. Se decide hacer una exploración a través de un Boxplot conjunto de la temperatura 1 y temperatura 2.



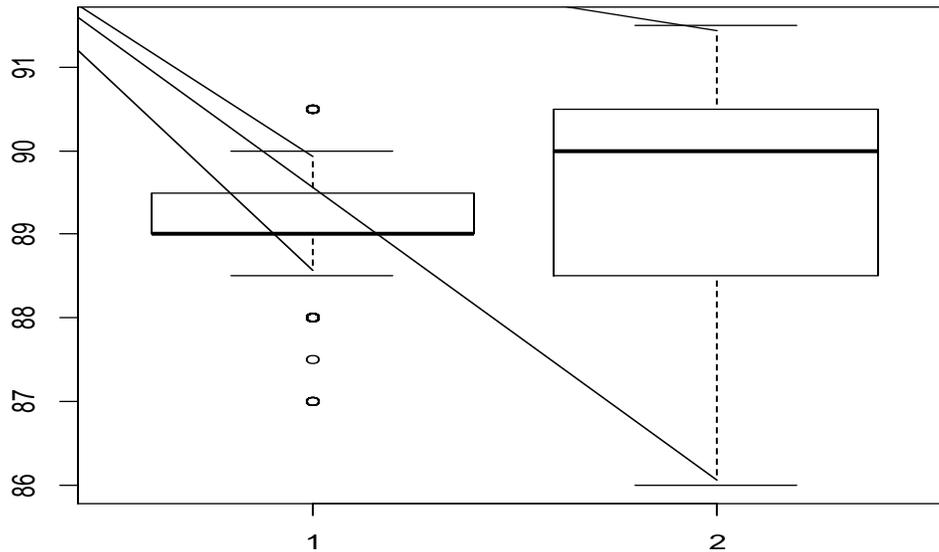


Figura 14. Boxplot temperatura 1 y temperatura 2.

Esta exploración gráfica muestra en primer lugar que para la temperatura 1, los datos se concentran más que para la temperatura 2, pero existen datos extremos en dicha variable (3 por debajo y 1 por encima). Para el gráfico de la temperatura 2 existe una mayor dispersión que la temperatura 1. El gráfico no muestra una diferencia significativa entre las medias, para la Temperatura 1 la media se ubica sobre 89 °C, mientras que para la Temperatura 2 la media se ubica casi sobre los 90.

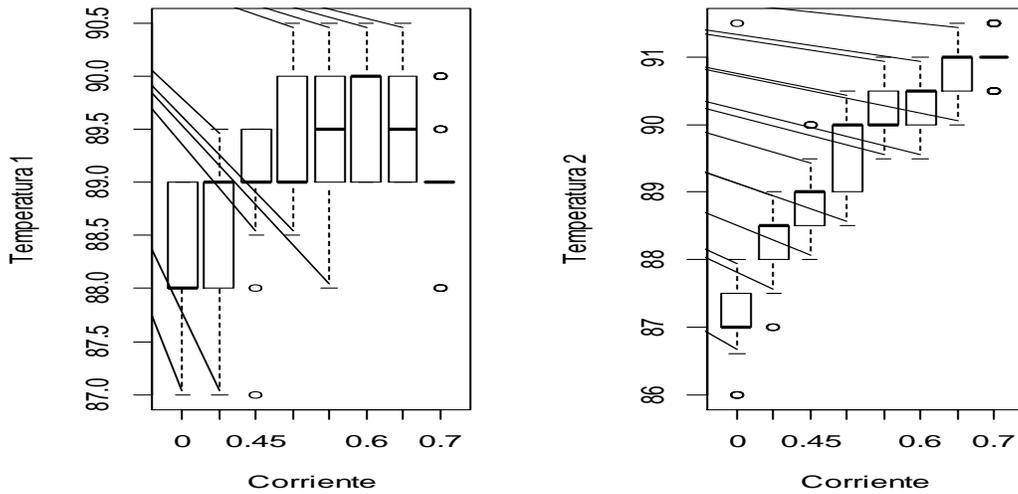


Figura15. Boxplot Temperatura1 vs Corriente y temperatura2 vs Corriente.

En los Gráficos Boxplot de Temperatura 1 y 2 vs corriente podemos ver que para la temperatura 1 hay picos de estabilidad, es decir, a partir de 0.45 Amperios la temperatura parece estabilizarse en un rango de 89 a 90.5 °C, mientras que la Temperatura 2 se eleva constantemente de principio a final. A diferencia del primer gráfico, por amperaje la Temperatura 2 muestra menor varianza (la varianza intra grupos es menor que la varianza intergrupos), mientras que para la Temperatura 1 hay una mayor varianza intra grupos pero una varianza inter grupos pequeña.

7.2. Modelos de regresión y análisis de varianza

7.2.1. Resumen por niveles de corriente

Corriente	Réplicas por nivel	promedios	Diferencia entre promedio del tratamiento y promedio general
0	50	87,751	-1,579
0,4	50	88,425	-0,905
0,45	50	88,945	-0,385
0,5	50	89,490	0,160
0,55	50	89,805	0,475
0,6	50	90,033	0,703
0,65	50	90,140	0,810
0,7	50	90,055	0,725

Tabla 10. Resumen por niveles de corriente



7.2.2. Resumen por niveles de temperatura

	promedios	Diferencia entre promedio del bloque y promedio general
Corriente	0,48125	-88,849
Media(T1)	89,122	-0,208
Media(T2)	89,539	0,209
general	89,3305	0,000

Tabla 11. Resumen por niveles de temperatura.

7.2.3. Análisis de varianza

FUENTE	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medio	Estadístico F	p-valor
Corriente	7	538,7648	76,9664	177,663215	1,4625E-157
Temperaturas	1	34,7778	34,7778	80,2783521	2,3014E-18
Error	791	342,673	0,433215171		
Total	799	916,2158			

Tabla 12. Análisis de varianza

En el análisis de varianza se puede apreciar que tanto para el tratamiento (intensidad de corriente), como para los bloques (temperaturas), son significativos para el modelo. Los p-valor o valores del modelo tanto para los tratamientos como para los bloques en la hora de postular las hipótesis:

$$H_0: T_1 = T_2 = 0 \text{ vs } H_a: T_i \neq 0 \text{ para algú } i = 1, 2$$

$$H_0: C_0 = C_{0,4} = \dots = C_7 = 0 \text{ vs } H_a: C_i \neq 0 \text{ para algú } i = 0, 0.4, \dots, 0.7$$

Indican que se rechaza la hipótesis nula, tanto para las corrientes como para las temperaturas existe alguna que es significativa para el modelo para un nivel de significancia $\alpha=0.05$.



7.3. Tamaño de la muestra

Debe recordarse que el la potencia en la prueba es el nivel de confiabilidad que tiene la prueba de no cometer el error tipo II es decir:

$$Potencia = \Pr(\text{Rechazar } H_0 | H_0 \text{ es falsa})$$

Se pretende dar a la prueba una potencia del 95% de confiabilidad de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{n \sum \tau_i^2}{a \sigma^2}$$

Donde τ_i es la diferencia de cada tratamiento con respecto a la media general, n es el número de réplicas necesarias es cada tratamiento y σ^2 es la varianza del general de datos. Otra forma de ver esta realización es a través de una prueba F no centrada, donde se obtiene el área bajo la curva de una curva F con un nivel de no centralidad dado en este caso por manera recursiva a n. Obsérvese la siguiente tabla donde se arroja la información requerida:

corriente	Promedios	Diferencia entre promedio del tratamiento y promedio general	Diferencia al cuadrado
0	87,751	-1,5795	2,49482025
0,4	88,425	-0,9055	0,81993025
0,45	88,945	-0,3855	0,14861025
0,5	89,49	0,1595	0,02544025
0,55	89,805	0,4745	0,22515025
0,6	90,033	0,7025	0,49350625
0,65	90,14	0,8095	0,65529025
0,7	90,055	0,7245	0,52490025

Suma τ_i	5,387648
σ^2	1,14670313

Tabla 13. Determinación de variables para ecuación de muestra



Para lo cual se obtiene la siguiente tabla:

n	Grados de Libertad del error	Estadístico F	λ	Potencia
5	32	2,312741187	2,93648802	0,1588606
10	72	2,139655516	5,872976039	0,336195
20	152	2,070310664	11,74595208	0,6749068
30	232	2,049195201	17,61892812	0,8756219
40	312	2,038976387	23,49190416	0,9603678
50	392	2,032949413	29,3648802	0,9890282

Tabla 14. Potencias

La tabla indica que eran suficientes 40 repeticiones por tratamiento que da un total de 320 datos en total, (incluso con un valor de 39 se ajusta sobre el 95% de confiabilidad), con las 50 repeticiones por tratamiento obtenemos una confiabilidad del 98.9% de confiabilidad de no cometer el error tipo II.

Pruebas sobre la temperatura

Se había especificado que el objetivo principal de este trabajo era aceptar o rechazar la hipótesis sobre la diferencia significativa entre los niveles de temperatura. Para este procedimiento realizaremos las pruebas de Duncan y Tukey para contrastar esta hipótesis:

PRUEBA DE TUKEY

Study:

HSD Test for Y

Mean Square Error: 0.2440561

Temperatura, means

Y std.err replication

T1 89.122 0.03440202 400

T2 89.539 0.06587333 400

alpha: 0.05 ; Df Error: 784

Critical Value of Studentized Range: 2.776093



PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN LÍNEA

Honestly Significant Difference: 0.06857233

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a T2 89.54

b T1 89.12

Esta prueba corrida en el software de libre distribución **R** muestra que si hay una muestra significativa entre las dos temperaturas.

Study:

Duncan's new multiple range test

for Y

Mean Square Error: 0.2440561

Temperatura, means

Y std.err replication

T1 89.122 0.03440202 400

T2 89.539 0.06587333 400

alpha: 0.05 ; Df Error: 784

Critical Range

2

0.06857233

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a T2 89.54

b T1 89.12

Error en lgroup : argumento de tipo inválido

La prueba de Duncan confirma lo encontrado en la prueba de Tukey, si hay una diferencia significativa entre las medias de la temperatura.



8. ANALISIS DE DATOS

Durante el proceso de toma de datos y de análisis de los mismos se identifican algunos problemas que afectan de manera drástica y directa el comportamiento del prototipo de adición de calor. A continuación se describen los problemas encontrados:

8.1. Pérdida de temperatura del vapor a lo largo del prototipo

Durante la toma de temperaturas de referencia en el prototipo se descubre una caída en la temperatura de entre 1 y 2°C entre la toma de temperatura a la entrada del prototipo (T1) y la temperatura de salida del prototipo (T2), lo anterior resulta muy importante ya que según la teoría, entre el punto de líquido saturado y el punto de vapor saturado, espacio en el que el vapor tendría una calidad X entre 0 y 1, se debe tener una curva isoterma a una presión definida, o, una presión constante a una temperatura definida:

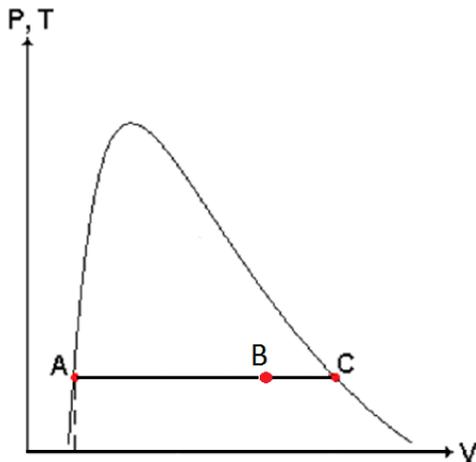


Figura 16. Estado ideal del vapor

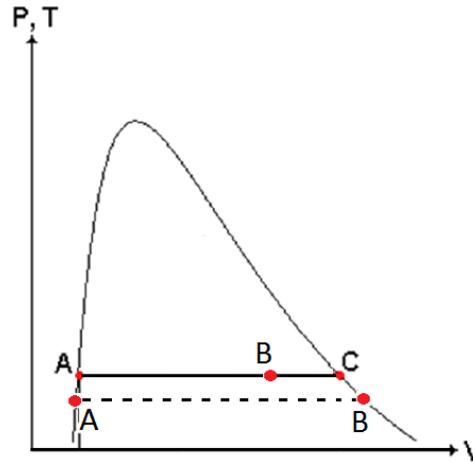


Figura 17. Estado real del vapor

En la Figura el punto A es el punto de líquido saturado, el punto B es el punto de calidad X del vapor y el punto C es el punto de vapor saturado y la recta A, B, C es la isoterma del vapor.

En el prototipo no se conserva dicha isoterma, ello reflejado en la caída de temperatura entre la entrada y la salida del prototipo. Esto implica que, como se muestra en la Figura, el vapor luego de ingresar al prototipo cambie de estado y se mueva a una nueva isoterma con una temperatura y presión diferentes a las



condiciones de operación de la caldera. Este cambio en el vapor es producto de una posible caída de presión en el vapor por rozamiento en la tubería. Lo anterior puede verificarse realizando un análisis de caída de presión por rozamiento en tubería de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2} + z_2 + hl \quad [3]$$

Donde

$$z_1 = z_2 = 0$$

$$V_1 = V_2$$

Y hl La pérdidas por fricción en la tubería.

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = hl$$

$$hl = f \frac{LV^2}{D2g}$$

Donde:

f = Factor de fricción Hallado en el diagrama MOODY

L = longitud de la tubería

V= velocidad del fluido (ya calculada anteriormente)

D= Diámetro de la tubería (25,4 mm)

Para determinar el factor de fricción es necesario conocer el número de Reynolds, para el cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V * D}{\nu}$$

Donde:

ν = viscosidad cinemática del fluido, la cual se obtiene dividiendo la viscosidad dinámica sobre la densidad (obtenido de la Figura de propiedades del vapor a 89°C)

$$V = 6,12 \text{ m/s}$$



$$D=0,0254m$$

$$\nu= 2,91e-5Pa.s$$

$$Re = \frac{6,12 * 0,0254}{2,91e - 5} = 7098$$

$$f = \frac{64}{7098} = 0,00901$$

$$hl = 0,0091 \frac{0,413 * 6,12^2}{0,0254 * 2 * 9,81} = 0,282m$$

$$P1 - P2 = hl * \gamma$$

$$\gamma = \rho * g$$

$$0,4086 * 9,81 = 4,0083 \frac{N}{m^3}$$

$$\Delta P = 0,282 * 4,0083$$

$$\Delta P = 1,132Pa$$

8.2. Salto de temperatura y falta de sensibilidad en equipos

Un salto en la temperatura del vapor en el prototipo implica que ya se ha alcanzado el sobrecalentamiento del vapor, y dado que el vapor sobrecalentado tiene 2 grados de libertad, resulta necesario el conocimiento de la presión y la temperatura en el punto de sobrecalentamiento para calcular la entalpia del vapor, la cual es necesaria para calcular la calidad del vapor.

Durante el procedimiento de toma de datos propuesto por el anterior grupo de investigación en el proyecto de grado base para esta investigación [1], se plantea la finalización de cada prueba con un salto en la temperatura de 1°C en la salida del prototipo. Este salto en la temperatura tiene como inconveniente que el vapor ya ha adquirido una cantidad de energía superior a la necesaria para llevarlo al punto de vapor saturado, energía que no se conoce e induce un error en el cálculo de la entalpia como se muestra en la Figura:



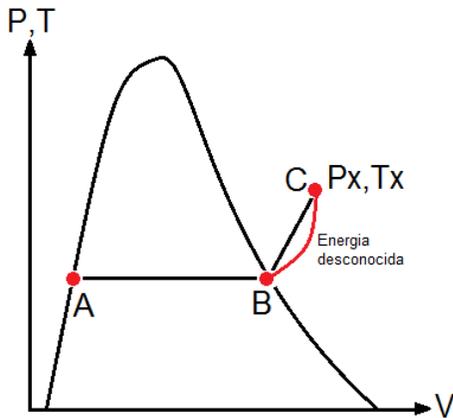


Figura 18. Energía desconocida

De lo anterior se propone buscar el mínimo salto de temperatura posible con el fin de disminuir al máximo la energía suministrada al vapor luego de que este pase el punto de vapor saturado. Esto puede lograrse usando herramientas más precisas y sensibles tanto para la medición de la temperatura, como para la variación de la corriente.

8.3. Entalpia utilizada para el cálculo de calidad de vapor

Para el método utilizado en el cálculo de la entalpia de trabajo se hizo un análisis de la ecuación postulada por la investigación en la fase 1 ya que en dicha investigación se postula un rango de energía adquirida como h_{fg} , el cual no es válido, siendo h_{fg} la entalpia desde el punto de líquido saturado hasta el punto de vapor saturado y la energía adquirida corresponde a la entalpia desde el punto de calidad X hasta el punto de vapor saturado

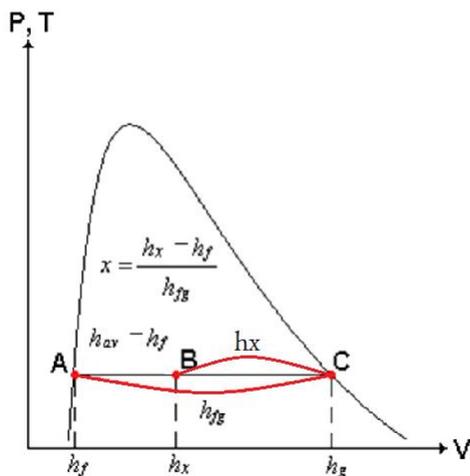


Figura 19. Entalpias en curva isoterma

Sin embargo, al analizar más detalladamente el cálculo de la calidad se cuestiona el uso de la entalpía h_x como la energía que posee el vapor en el punto de calidad X, ya que para los cálculos de calidad se debe considerar la energía del vapor desde el punto de líquido saturado hasta el punto de calidad X y no la energía necesaria para llevar dicho vapor a vapor saturado:

Energía adicionada para llevar el vapor de calidad X a Vapor saturado:

$$h_x = \frac{I R^2 t}{m}$$

La entalpía del vapor a la calidad X es:

$$h_{1x} = h_{fg} - h_x$$

Lo anterior implica el cambio en la ecuación de cálculo de calidad de vapor de la siguiente manera

$$X = \frac{(h_{fg} - h_x) - h_f}{h_{fg}}$$

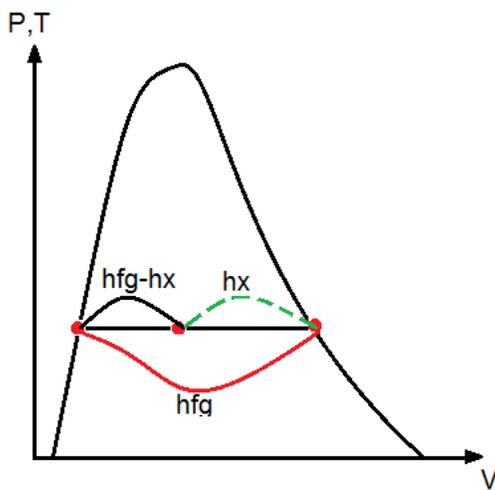


Figura20. Entalpías del vapor producido.

8.4. Variación de presión de trabajo de la caldera

Cada una de las pruebas realizadas tenía una duración de 49 minutos dividida en intervalos de 7 minutos por cada variación de corriente, debido a la demanda de agua de la caldera durante este tiempo, se presenta alimentación de agua cuando el nivel alcanza el nivel más bajo permitido por el sistema de control de la caldera. Dicha alimentación de agua se presenta aproximadamente cada 12 minutos. Debido a que el agua de alimentación de la caldera se encuentra a temperatura ambiente se presenta un choque térmico que genera una caída en la presión de trabajo de la caldera de 3psi. La presión y el nivel de agua en la caldera afectan directamente la calidad del vapor producido, por lo cual el vapor varía su calidad en ciclos de 12 minutos en respuesta a la variación de presión que se presenta. Estas variaciones ya descritas no permiten obtener una medición real y confiable de la calidad del vapor producido al instante.



9. CONCLUSIONES.

- La medición de calidad de vapor con el prototipo de adición de calor diseñado es confiable
- El vapor manifiesta una respuesta clara a la adición de calor suministrada, por lo tanto no se descarta la posibilidad de medición de calidad de vapor por medio de adición de calor
- Para obtener una medición confiable es necesario utilizar otros materiales y modificar a dimensiones menores la tubería de transporte de vapor al prototipo y de construcción del mismo.
- Para una medición óptima se deben poseer instrumentos de medición más precisos y de mayor sensibilidad.
- Es de gran importancia para estudios futuros tener en cuenta las modificaciones propuestas a las ecuaciones de cálculo de calidad de vapor con el modelo de adición de calor.
- Se debe implementar la línea de precalentamiento al tanque de agua de alimentación de la caldera con el fin de reducir el choque térmico y minimizar las variaciones de presión durante la operación de la caldera.



ANEXO

ANEXO 1

CARACTERIZACION

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos con el calorímetro de barril con cada una de las aperturas de válvula:

- Dos vueltas:

T1	T2	W1	W2	W3	W4	W5	%calidad
19	25	216,9	417,3	200,4	419,5	202,6	86,2018343
19	25,3	216,9	416,2	199,3	419,6	202,7	52,736359
19	26	216,9	417,45	200,55	420,81	203,91	62,0450629
20	26	231	463,5	232,5	464	233	510,671584
20	25,5	231	464,1	233,1	466,5	235,5	83,9592658
20	25,5	231	464,9	233,9	468,2	237,2	56,6591019
19	26	231	464,2	233,2	467,8	236,8	68,7837525
19	26,8	231	464	233	467	236	97,7484293
19	26	231	463,9	232,9	468,1	237,1	56,4384627
22	30	241,5	474,8	233,3	478,3	236,8	84,6343543
22	30	241,5	475,2	233,7	479,1	237,6	74,4460177
22	29	241,5	475,1	233,6	478,2	236,7	83,3533976
20	24	237,3	466,1	228,8	469,7	232,4	30,7287398
20	23	237,3	466,9	229,6	468,2	230,9	82,665435
20	26	237,3	465,5	228,2	468,8	231,5	61,4959721
20	23	237,3	472	234,7	475,9	238,6	16,6045967
20	26	237,3	469	231,7	473	235,7	48,7570657
20	32	237,3	467,2	229,9	473,4	236,1	68,3153602
24	28	241,6	473,8	232,2	476	234,4	63,2496241
24	29	241,6	471,9	230,3	474,7	233,1	61,3713253
24	28	241,6	471,6	230	472,1	230,5	331,386455
21	30	239,2	467,5	228,3	471,8	232,6	74,1533733
21	30	239,4	468,7	229,3	472,5	233,1	86,4918474
21	29	217,1	446,2	229,1	449,3	232,2	95,40823
21	30,5	217	446,3	229,3	450	233	95,2224083
22	30	217,5	446,3	228,8	449,9	232,4	79,9417933
22	31	217,5	447	229,5	451	233,5	81,630734
22	32	217,3	446,3	229	450,3	233	92,434176
22	31,5	217,6	446,4	228,8	450	232,4	98,2548488



PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN LÍNEA

22	34	217,7	446,7	229	451,4	233,7	95,1160491
17	24	215,5	445,3	229,8	448	232,5	95,3234991
18	22	216	446	230	448,3	232,3	57,9198975
18	25	216,2	446	229,8	449	232,8	84,2453088
18	26	216,5	446,3	229,8	449,2	232,7	102,917256
18	25	216,4	446,6	230,2	449,8	233,4	78,0729265
18	24	216,6	446,8	230,2	449	232,4	101,382959
18	26	216,9	446,9	230	450,8	233,9	72,2541732
18	25	216,5	445,7	229,2	449,2	232,7	69,5318246
18	24	216,2	447,3	231,1	449,5	233,3	101,847161
18	26	216,4	446,3	229,9	447,9	231,5	200,421316
							96,1205494

Tabla1. Datos obtenidos con calorímetro de barril con apertura de dos vueltas de válvula

Durante el análisis de las pruebas se presentan calidades de más de 100% en los resultados, a si como también calidades por debajo de 40%. la calidad tomando en cuenta estos datos es de 96,12%.

- Tres vueltas:

	T1	T2	W1	W2	W3	W4	W5	% calidad
1	19	35	216,9	417,2	200,3	422	205,1	110,9993906
2	19	34	216,9	417,3	200,4	421,7	204,8	113,7444864
3	19	38	216,9	417,1	200,2	420,6	203,7	190,8329656
4	20	24	231	464,8	233,8	467,7	236,7	43,63812704
5	20	27	231	465,8	234,8	469,5	238,5	67,2276355
6	19,5	29	231	464,1	233,1	469,6	238,6	59,74060086
7	25	26	241,5	475	233,5	477,5	236	0,692386896
8	24	26,8	241,5	474,2	232,7	479	237,5	8,851310177
9	24	26	241,5	474,5	233	482	240,5	-5,22074429
10	22	29	241,5	474,8	233,3	480,5	239	37,78034729
11	22	29	241,5	475,2	233,7	479,8	238,3	50,85259016
12	22	31	241,5	475,1	233,6	480,7	239,2	54,97503925
13	21	25	237,3	467	229,7	472,1	234,8	16,91066769
14	21	26	237,3	467,2	229,9	473,3	236	18,66678448
15	21	27	237,3	466,8	229,5	472,9	235,6	25,90912489
16	26	32	241,6	471,8	230,2	474,45	232,85	82,73378143



PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN LÍNEA

17	26	32	241,6	472	230,4	475,7	234,1	54,82242944
18	26	36	241,6	472,8	231,2	478,1	236,5	67,41868364
19	24	32	241,6	473,1	231,5	477,8	236,2	58,68442242
20	24	32	241,6	472,8	231,2	475	233,4	143,1611392
21	24	31	241,6	472,9	231,3	476,3	234,7	74,0339772
22	24	36	241,6	471,7	230,1	477,1	235,5	81,62285402
23	24	34	241,6	471,8	230,2	476,8	235,2	71,61213726
24	24	34	241,6	472	230,4	476,3	234,7	85,87437394

Tabla 2. Datos obtenidos con calorímetro de barril con apertura de tres vueltas de válvula

Con el aumento en la apertura de válvula se presentan con más frecuencia calidades muy por encima o por debajo del valor esperado, exactamente un 45.83%. la calidad obtenida con esta apertura de válvula teniendo en cuenta los resultados erróneos es 63.14%.

- Totalmente abierta:

	T1	T2	W1	W2	W3	W4	W5	%calidad
1	20	39	216,9	418,2	201,3	421,72	204,82	191,0379979
2	20	38	216,9	416,51	199,61	420,15	203,25	172,0794918
3	20	39	216,9	418,3	201,4	424,2	207,3	108,3990868
4	20	37	216,9	417,5	200,6	422,4	205,5	116,9619005
5	19,5	30,5	231	464,8	233,8	470,5	239,5	69,55318327
6	19,5	30	231	465,4	234,4	471,1	240,1	65,79780426
7	19,5	31	231	464,8	233,8	471,4	240,4	61,38069373
8	24	37	241,5	474	232,5	476,7	235,2	196,8647799
9	23	39	241,5	474	232,5	480,4	238,9	95,69601677
10	22	32	241,5	473	231,5	479,6	238,1	50,8861254
11	22	32	241,5	476,3	234,8	480,8	239,3	83,15408805
12	22	32	241,5	477,7	236,2	482,4	240,9	79,52680762
13	22	36	241,5	476,5	235	482,6	241,1	87,22323607
14	21	36	237,3	468,6	231,3	473,7	236,4	113,8175484
15	21	34	237,3	468,2	230,9	476,2	238,9	55,87762055
16	21	35	237,3	467,1	229,8	474	236,7	73,24523744
17	26	42	241,6	472,1	230,5	478,6	237	93,6459442
18	26	40	241,6	473	231,4	479,2	237,6	84,80283357



PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN LÍNEA

19	26	37	241,6	472,2	230,6	476,7	235,1	92,00524109
----	----	----	-------	-------	-------	-------	-------	-------------

Tabla 3 .Datos obtenidos con calorímetro de barril con apertura total válvula

Para esta apertura de válvula se reduce el porcentaje de resultados erróneos a 31%. La calidad teniendo en cuenta los resultados erróneos es de 99.57%.

Durante el desarrollo de las pruebas se detecta que la presión en la caldera desciende drásticamente cuando se hacían pruebas con aperturas de 3 vueltas y totalmente abierta, lo que afecta los valores de calidad obtenidos.

Los valores de la calidad del vapor obtenidos en las diferentes pruebas realizadas no presentan algún comportamiento evidente en relación a la apertura de válvula.

Se decide realizar nuevamente una medición de calidad de vapor con calorímetro de barril pero con algunas modificaciones en el procedimiento de toma de resultados, se procede a realizar nuevas pruebas usando como tiempo estándar de exposición del agua con el vapor 11 segundos. Al final se obtienen los siguientes resultados:

#	T1	T2	W1(g)	W2(g)	W3(g)	W4(g)	W5(g)	% calidad(25 psi)
1	18	76	215,2	450,5	235,3	477,4	262,2	88,43208745
2	19	70	217	452	235	474,8	257,8	90,7619629
3	18	74	216,5	449,5	233	474,2	257,7	92,01038021
4	18	62	217,3	452,5	235,2	471,6	254,3	92,30595108
5	18	59	217,8	453	235,2	471	253,2	90,58711047
6	18	68	217	454,5	237,5	478,5	261,5	84,54632373
7	18	72	217	453,3	236,3	477,9	260,9	89,82571295
8	18	68	217	450,7	233,7	473,7	256,7	87,05249752
9	18	68	218	450,7	232,7	473	255	89,64445377
10	18	66	218,3	449,5	231,2	471,5	253,2	85,99208373
11	18	70	218,5	451	232,5	474,5	256	88,64575356
12	19	71	218,3	452,3	234	476	257,7	88,63622883
13	19	68	218,2	454	235,8	476,7	258,5	87,23256115
14	18	69	218,4	447	228,6	471,5	253,1	81,15533044
15	18	68	217,6	451,1	233,5	474	256,4	87,38947966
16	18	68	218	450,5	232,5	472,6	254,6	90,45184593
17	18	71	218,5	449,5	231	475,5	257	80,59239611
18	18	67	218	451	233	474,2	256,2	83,85044066
19	19	67	218	450	232	473,8	255,8	79,27131137



20	18	68	218	450,4	232,4	474	256	84,08888466
----	----	----	-----	-------	-------	-----	-----	-------------

Tabla 4. Datos obtenidos con calorímetro de barril e implementación de modificaciones

El comportamiento de los resultados de las nuevas pruebas es menos fluctuante que los resultados anteriores. El promedio de la calidad de los resultados mostrados en la tabla anterior es de 87.12%. Se decide tomar este resultado como referencia para la comparación de los resultados con el prototipo de adición de calor.

Luego de la finalización de las pruebas anteriormente mostradas, se realiza una remodelación de la estructura del laboratorio de instalaciones térmicas de la universidad libre en el cual se vio afectado el funcionamiento de la caldera. Luego de la remodelación se hizo necesario el mantenimiento correctivo de algunos sub sistemas de la caldera:

- Bomba de alimentación de agua de la caldera
- Bomba de combustible del quemador
- Presuretrol
- Tanque de agua
- Tanque de combustible

El mantenimiento correctivo realizado a los subsistemas de la caldera cambió las condiciones de operación de la misma, lo cual hizo necesario una nueva caracterización del vapor producido.

Para la nueva caracterización de la caldera se tiene en cuenta que con el prototipo de adición de calor a ser validado se debe tener un flujo constante de vapor. Por lo tanto, para que el valor de calidad del vapor obtenido con el calorímetro de barril sea comparable con el valor de calidad de vapor obtenido en el prototipo de adición de calor, es necesario que durante las pruebas con calorímetro de barril se tenga un flujo constante de vapor.



10. REFERENCIAS

- [1] NEW METHOD OF STEAM QUALITY MEASUREMENT BASED ON ULTRASOUND Autor: SHEN, JOSEPH J.S., Año de publicación 1999, Fuente: Universidad Nacional (Base de Datos) – Buscador ENGINEERING VILLAGE
- [2] DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN LÍNEA (Gersson Freddy Torres Baquero, Wilfredy Martínez Suarez), Ingeniería Mecánica; Universidad Libre de Colombia. 2008.
- [3] Norma ISO 5167 Placas Orificio
- [4] TESIS REHABILITACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA CALDERA PARA LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD LIBRE, (Daniel hurtado). Ingeniería Mecánica; Universidad libre. 1998.
- [5] MÓDULOS PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE VAPOR SPYRAX SARCO (Spirax-Sarco Limited). Méjico 2011.

