

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTROMECAÁNICO PARA
MEDIR LA CALIDAD DEL VAPOR DE AGUA GENERADO EN CALDERAS.**

JONATHAN CARVAJAL MUÑOZ

JESUS IGNACIO VEGA RAMIREZ

ANDRÉS NORMAN HENAO GRANJA

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTROMECAÁNICO PARA
MEDIR LA CALIDAD DEL VAPOR DE AGUA GENERADO EN CALDERAS.**

Proyecto para optar al Título de Ingeniero Mecánico

JONATHAN CARVAJAL MUÑOZ

JESUS IGNACIO VEGA RAMIREZ

ANDRÉS NORMAN HENAO GRANJA

Asesor

CHRISTIAN ANDRÉS GONZÁLEZ SALAZAR

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Calderas JCT, que con su apoyo incondicional y la confianza puesta en nosotros durante todo el proceso, quienes hicieron que cada una de las etapas del proyecto fuera un aprendizaje invaluable para nuestra carrera.

A todos los docentes con los cuales compartimos durante toda la carrera de ingeniería mecánica, los cuales con su conocimiento y ética profesional logran hoy en estas dos personas plasmar la cultura del conocimiento bajo una estricta disciplina y dedicación.

A todos los compañeros de aula, con quienes logramos compartir tantas experiencias y con los cuales hoy podemos compartir esta alegría.

A nuestras familias, las cuales han sido las bases fundamentales del apoyo para sacar adelante nuestras carreras, con mucho esfuerzo y dedicación.

ÍNDICE GENERAL

Introducción.....	10
Abstract.....	12
1.Estado del arte.....	13
2. Objetivos.....	16
2.1 Objetivo General.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. Marco Teórico.....	17
3.1 Calderas.....	17
3.1.1Calderas pirotubulares.....	17
3.1.2Calderas acuatubulares.....	19
3.1.3 Especificaciones técnicas.....	21
3.2Fundamentos físicos básicos.....	23
3.2.1Fuerza.....	23
3.2.2 Potencia.....	23
3.2.3 Aceleración.....	23
3.2.4 Presión.....	24
3.2.5 Altitud.....	25

3.2.6	Temperatura.....	25
3.2.7	Caudal.....	25
3.3	Conceptos básicos.....	26
3.3.1	Aire y vapor de agua.....	26
3.3.2	Humedad de saturación.....	27
3.3.3	Humedad absoluta.....	27
3.3.4	Humedad relativa.....	29
3.4	Procesos termodinámicos.....	30
3.5	Medición de temperatura.....	33
3.5.1	Termómetros.....	34
3.5.1.1	Termómetro de contacto.....	34
3.5.1.1.2	Termómetros bimetalicos.....	35
3.6	Válvulas.....	36
3.6.1	Válvulas de bola.....	37
3.7	Calidad de vapor.....	38
3.7.1	Vapor saturado.....	39
3.7.2	Vapor sobrecalentado.....	40
3.8	Dimensionamiento de tuberías.....	42
3.9	Calorímetro.....	43

4. Etapa de diseño.....	45
4.1 Cálculo del diámetro de la tubería.....	46
4.2 Dimensionamiento y fabricación de la tobera.....	50
4.3 Diseño y cálculo de la placa orificio.....	53
4.3.1 cálculo mecánico y geometría de las placas de orificio.....	58
4.4 Selección del aislante térmico.....	62
4.5 Dimensionamiento y material de la cubierta del prototipo.....	64
4.6 Especificaciones técnicas del proceso de producción de vapor en una caldera.....	65
4.7 Selección de la instrumentación.....	67
4.8 Evaluación del calorímetro mediante prueba en planta.....	69
4.9 Procedimiento de medición de la calidad de vapor.....	72
4.10 Análisis de resultados y conclusiones de la prueba en planta.....	74
4.11 Recursos.....	75
5. Conclusiones.....	76
6. Bibliografía.....	77

Cronograma de trabajo

Anexos

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1: Tipos de calorímetros.....	14
Imagen 2: Calorímetro Isoperibólico.....	15
Imagen 3: Estructura general de una caldera pirotubular.....	19
Imagen 4: Estructura general de una caldera acuatubular.....	21
Imagen 5: Contenido de vapor de agua en el aire.....	26
Imagen 6: Carta de Molier para humedad.....	28
Imagen 7: Termómetro bimetalico.....	35
Imagen 8: Válvula de bola.....	37
Imagen 9: Tobera para toma de muestras.....	51
Imagen 10: Tobera construida.....	51
Imagen 11: Diseño de la placa orificio.....	58
Imagen 12: Especificaciones técnicas de la lana mineral.....	62
Imagen 13: Diseño de la caja cubierta.....	64
Imagen 14: Diagrama del calorímetro de estrangulación a diseñar.....	68
Imagen 15: Montaje del equipo para la prueba del calorímetro.....	70
Imagen 16: Recolección de datos (Prueba de campo).....	71
Imagen 17: Grafica estadística de la prueba de campo.....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas del vapor saturado.....	40
Tabla 2: Desventajas del vapor sobrecalentado.....	41
Tabla 3: Caída de presión de los accesorios.....	47
Tabla 4: Dimensiones de la tobera para toma de muestras.....	50
Tabla 5: Valores de K y K1.....	59
Tabla 6: Relación presión de vapor vs temperatura.....	67
Tabla 7: Tabla de los datos ambientales y cliente al cual se realizó medición.....	69
Tabla 8: Lista de recursos técnicos.....	75

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ecuación de White- Colebrook.....	46
Ecuación 2: Viscosidad Cinemática.....	47
Ecuación 3: Perdida de carga máxima.....	48
Ecuación 4: Factor K.....	49
Ecuación 5: Relación de diámetros.....	53
Ecuación 6: Calculo de la velocidad en una tubería.....	54
Ecuación 7: Calculo del área de la tubería.....	54
Ecuación 8: Número de Reynolds.....	55
Ecuación 9: Ecuación de Stolz.....	56
Ecuación 10: Tensión máxima.....	58
Ecuación 11: Diferencia de presión en la placa orificio.....	59
Ecuación 12: Espesor necesario de la placa orificio.....	60
Ecuación 13: Deflexión máxima.....	61

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial y el crecimiento industrial que se ha alcanzado y que ha permitido tanto suplir las necesidades básicas como mejorar la calidad de vida de la sociedad contemporánea, ha generado un consumo desmesurado de los recursos energéticos y un deterioro paulatino del medio ambiente, lo cual reduce el bienestar y el nivel de vida de la población.

Si bien es cierto que debemos producir energía para fabricar productos, también lo es la necesidad de hacer uso eficiente de la misma para conservar los recursos no renovables y reducir el impacto ambiental. De allí la importancia de emprender programas de análisis y diagnóstico energético que le permita al sector industrial conocer su proceso, de qué manera y con qué eficiencia se consume la energía en su planta y la calidad del proceso, en donde vale la pena nombrar la gran variedad de empresas encargadas en la implementación y diseño de equipos de transferencia de calor que en este caso sería CalderasJCTS.A, la cual se destaca como una empresa líder en el mercado de fabricación y mantenimiento de calderas. Dentro de sus servicios, ofrece mediciones para realizar análisis del proceso, su calidad y eficiencia, con el fin de que las empresas dedicadas al sector industria cumplan con sus programas de gestión de calidad y mejora en la eficiencia de cada proceso.

Actualmente Calderas JCT, no cuenta con un equipo que ayude a determinar la calidad del vapor que producen sus máquinas, un equipo que se hace necesario debido a la exigencia de sus clientes y el compromiso de JCT con estos.

Este proyecto pretende asistir al Departamento de Servicios Externos de Calderas JCT, en el diseño y fabricación de un calorímetro que supla con las necesidades de sus clientes. los cuales requierendiagnosticar la calidad de vapor en sus procesos industriales, por exigencias tanto ambientales como de calidad del

producto final. Es así como calderas JCT vio la oportunidad de ofrecer al mercado este servicio extra como un plus al de su actual portafolio de productos.

Como ganancia medioambiental, este diagnóstico permitirá que los procesos termodinámicos de los diferentes ciclos térmicos industriales sean más eficientes y menos contaminantes, generando así un ahorro energético que se traduce en disminución de las materias primas y por ende de los procesos de explotación de los recursos energéticos cada vez menos disponibles.

ABSTRACT

To determine the quality of the steam produced for a boiler, a throttling calorimeter will be installed in the steam line. The assembly includes a pipe that is mounted in the steam line which has holes that are in opposite direction to the vapor flow in this manner, the steam enters by suction through the holes to the first stage of the calorimeter which is measured the pressure and temperature of the vapor by means of a pressure transmitter calibrated 0-300 PSI and PT-100 (thermocouple), 0-200 ° C, both with 4-20 mA output.

In the second stage of the calorimeter, there is a hole where the throttle plate is made of steam, causing overheating of this, passing through the hole. The third stage of the calorimeter, that is after the orifice plate, the pressure and temperature of the steam expanded is measured again, by means of a calibrated pressure transmitter 0-20 PSI and PT-100 (thermocouple), 0 -200 ° C, both with 4-20 mA output. All these signals are taken to a data acquisition module (PLC), which allows the calculation per minute of steam quality. It should be noted that the calorimeter and piping should be insulated to not distort the measurement process, it must be adiabatic.

1. ESTADO DEL ARTE

El **calorímetro** es un instrumento que sirve para medir las cantidades de calor suministrado o recibidas por los cuerpos, es decir, sirve para determinar el calor específico de un cuerpo, así como para medir las cantidades de calor que liberan o absorben los cuerpos. Un calorímetro de estrangulación sería todo aquel que causa una gran reducción del caudal inicial de entrada de vapores saturados, dando lugar así a vapores cuya temperatura y presión pueden medirse y a su vez determinar sus propiedades, como puede ser el calorímetro de carpenter de uso común, el calorímetro de estrangulación de Ellison, el calorímetro de estrangulación de construcción casera, el calorímetro separador, calorímetro combinado o el calorímetro eléctrico.

A continuación se muestran en la imagen 1 algunos de los calorímetros que se encuentran en el mercado:

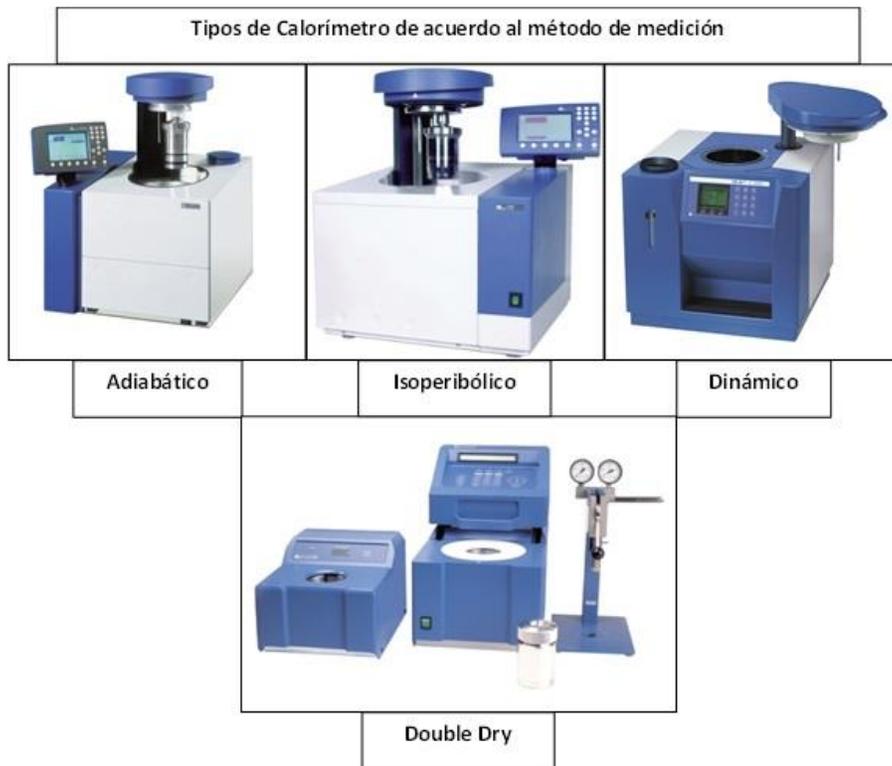


Imagen 1: Tipos de calorímetros

Fuente:

Tomó I: Un estudio de los sistemas termodinámicos, Manuel Zamora Carranza

CALORÍMETRO ADIABÁTICO

Se construyen de tal forma que no permiten intercambio de calor entre la celda y los alrededores, por lo tanto se emplean materiales aislantes para mantener aislado el sistema y relacionar el calor generado con la diferencia de temperatura que produce. En estos se presenta un control estricto en la temperatura de los alrededores, lo que hace necesario el uso de adecuados controles electrónicos

que mantengan constante el gradiente de temperatura.

CALORÍMETRO ISOPERIBÓLICO

Un calorímetro isoperibólico mantiene constante la temperatura de los alrededores mediante el uso de un termostato, mientras que la temperatura del sistema de medida puede variar con el tiempo.

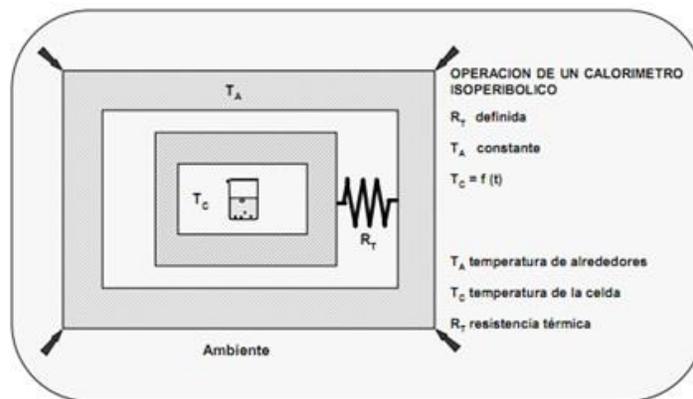


Imagen 2: Calorímetro Isoperibólico

Fuente: Termo I: un estudio de los sistemas termodinámicos, Manuel Zamora Carranza

CALORÍMETRO DOUBLE DRY

Muchos calorímetros utilizan el principio de carga dual, en el cual una absorbe mientras que la segunda actúa como temperatura de referencia. El sensor de temperatura registra la diferencia entre las temperaturas de las dos cargas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y fabricar dispositivo electromecánico para medir la calidad del vapor de agua generado en calderas.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Calcular el diámetro de la tubería
- Dimensionar y fabricar de la tobera
- Diseñar y calcular de la placa orificio
- Seleccionar la geometría del prototipo
- Seleccionar el aislante térmico
- Realizar procedimiento para instalación del calorímetro
- Realizar pruebas de Campo del prototipo
- Desarrollar los planos mecánicos y eléctricos que permitan tener un referente para diseñar el sistema.

3. MARCO TEORICO

3.1. CALDERAS

Las Calderas son intercambiadores de calor utilizados para calentar agua o generar vapor mediante la transferencia de calor desde los gases calientes productos de la combustión de un combustible sólido, líquido o gaseoso, hacia otro fluido, usualmente agua que al generar vapor alcanza presiones superiores a la atmosférica.

Otras calderas desarrollan el mismo principio de funcionamiento, pero en lugar de agua es otro fluido el que recibe el calor, como el caso de las de aceite térmico como por ejemplo el Dowtherm, el cual tiene la propiedad de alcanzar temperaturas altas a presiones (comparadas con las de vapor de agua) muy bajas.

Aunque existen numerosos diseños y patentes de fabricación de calderas, cada una de las cuales puede tener características propias, las calderas se pueden clasificar en dos grandes grupos; calderas pirotubulares y acuotubulares, algunas de cuyas características se indican a continuación

3.1.1 Calderas pirotubulares

Se denominan pirotubulares por ser los gases calientes procedentes de la combustión de un combustible, los que circulan por el interior de tubos cuyo exterior esta bañado por el agua de la caldera. El combustible se quema en un hogar, en donde tiene lugar la transmisión de calor por radiación, y los gases resultantes, se les hace circular a través de los tubos que constituyen el haz

tubular de la caldera, y donde tiene lugar el intercambio de calor por conducción y convección. Según sea una o varias las veces que los gases pasan a través del haz tubular, se tienen las calderas de uno o de varios pasos. Las calderas pirotubulares o de tubos de humo son generalmente cilíndricas, horizontales o verticales y se componen de un tubo mayor y otros tubos más pequeños (de 2" a 4" usualmente) de acero que se encuentran a su alrededor. La combustión se realiza generalmente en la parte frontal de la caldera. Los gases calientes circulan por un "tubo mayor" y dependiendo del número de pasos se devuelven por los otros tubos hasta salir por la chimenea.

Al calentarse los tubos por efecto de la convección forzada de los gases, se inicia un proceso de calentamiento del agua que esta por fuera de los tubos, y al llegar esta a su temperatura de saturación, se empieza a evaporar. Al seguir suministrando calor se puede aumentar la presión de vapor hasta el punto de ajuste admitido o calibrado.

Manejan presiones de operación de 0-300 PSIG, producen vapor húmedo y de calidad alta.

Ventajas:

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

Inconvenientes:

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

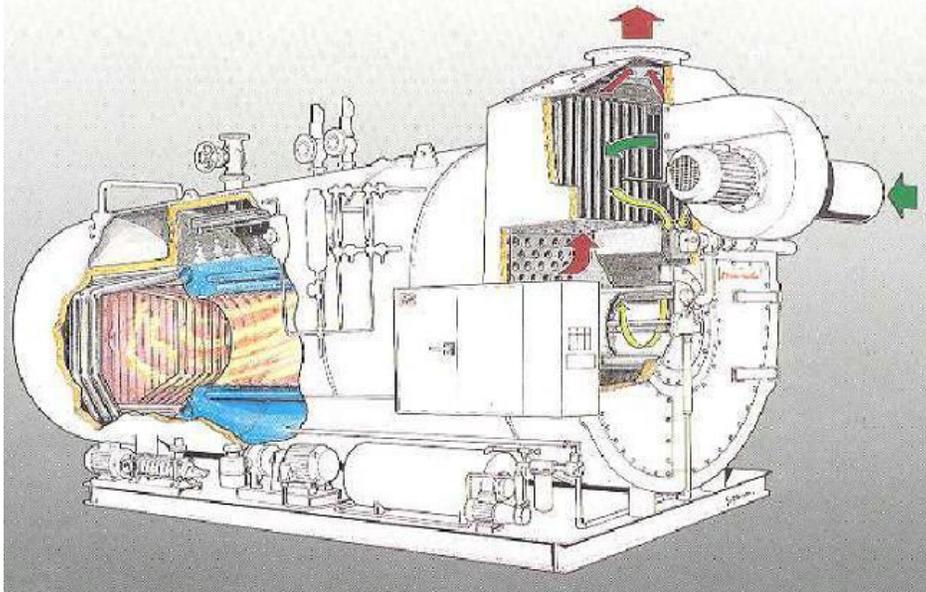


Imagen3: Estructura general de una caldera pirotubular.

Fuente: La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases
Escrito por W. H. Severns

3.1.2. Calderas acuatubulares

En estas calderas, al contrario de lo que ocurre en las pirotubulares, es el agua el que circula por el interior de tubos que conforman un circuito cerrado a través del calderín o calderines que constituye la superficie de intercambio de calor de la caldera. Adicionalmente, pueden estar dotadas de otros elementos de intercambio de calor, como pueden ser el sobrecalentador, recalentador, economizador, etc.

Estas calderas, constan de un hogar configurado por tubos de agua, tubos y refractario, o solamente refractario, en el cual se produce la combustión del combustible y constituyendo la zona de radiación de la caldera.

Desde dicho hogar, los gases calientes resultantes de la combustión son conducidos a través del circuito de la caldera, configurado este por paneles de tubos y constituyendo la zona de convección de la caldera. Finalmente, los gases son enviados a la atmósfera a través de la chimenea.

El combustible utilizado puede ser sólido (carbón), líquido (aceite combustible) o gaseoso (Por ejemplo: Gas natural). Pero generalmente utiliza combustible sólido o al menos una mezcla con combustible líquido.

Las calderas acuatubulares manejan presiones de operación de 0-2200 PSIG con temperaturas de vapor que varían desde la saturación hasta 540 °C.

Ventajas:

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

Inconvenientes:

- Mayor tamaño y peso, mayor costo.
- Debe ser alimentada con agua de gran pureza.
- Equipos adicionales para el control de contaminación en especial cuando queman carbón.

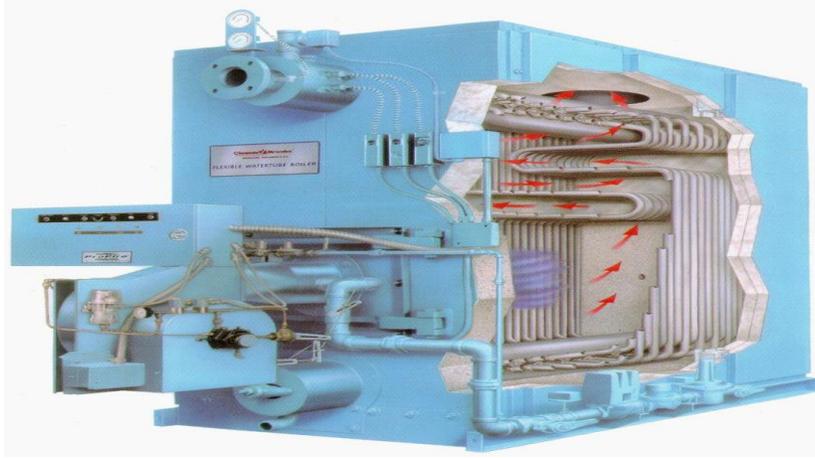


Imagen4. Estructura general de una caldera acuotubular:

Fuente: <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/calderas>

3.1.3 Especificaciones técnicas

Potencia útil (BHP), Potencia térmica, eficiencia útil.

La potencia útil (P_u) de una caldera que aparece en la placa del equipo, en BHP (BoilerHorsePower), es equivalente a la calculada termodinámicamente mediante la primera ley, despreciando energías: potenciales y cinéticas como:

$$q_v = m_v (h_v - h_a).$$

Dónde:

q_v : Potencia útil teórica (bajo la cual está diseñada la caldera)

m_v : flujo másico de vapor (producción máxima de vapor de una caldera a unas condiciones de operación particulares).

h_v = Entalpía del vapor a la presión o temperatura de saturación

ha = Entalpía del agua de alimentación a su temperatura de entrada.

La potencia térmica (PT) es la potencia aportada por el combustible, lo que es lo mismo que la cantidad de combustible consumido en un determinado tiempo (Qc) multiplicado por el poder calorífico del mismo. (Poder Calorífico Inferior: PCI). Es decir:

$$PT = QcPCI$$

La eficiencia térmica, η_u (llamada también: rendimiento térmico, bajo el método directo) de la caldera es la relación entre la potencia útil y la potencia térmica aportada en la combustión por el combustible.

$$\eta_u = Pu / PT$$

Equivalencias de unidades:

1 KW = 3412 BTU/h, 1BHP = 9.81 KW, 1BTU = 1.055 KJ

1Gal (US)= 3.785 litros, 1m³= 1000 litros, 1 psi = 6.89 Kpa

3.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS BÁSICOS

3.2.1 FUERZA [F]

Es aquella necesaria para mover un cuerpo con una masa determinada, imprimiéndole una aceleración en la dirección del movimiento.

$$F = m \cdot a$$

3.2.2 POTENCIA [P]

Es el trabajo realizado en la unidad de tiempo. Se emplea para estudios de rendimientos y análisis económicos de instalaciones.

$$P = \frac{\text{Trabajo(j)}}{\text{tiempo(s)}}$$

Limitaciones:

Bajos torques alcanzados

Bajo rendimiento en comparación con el hidráulico.

Baja erogación de potencia.

3.2.3 ACELERACIÓN [A]

Es la variación de la velocidad en la unidad de tiempo.

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

3.2.4 Presión [p]

Es la relación de la fuerza actuante sobre la unidad de superficie.

$$P = \frac{F}{A}$$

- **Presión relativa**

Es la que resulta de tomar como presión de referencia la presión absoluta atmosférica. Es la indicada en los manómetros y empleada para calcular la fuerza de cilindros o actuadores neumáticos. Medida sobre la presión atmosférica.

- **Presión absoluta**

Resulta de tomar como presión de referencia al vacío absoluto.

- **Presión atmosférica**

Se origina debido al peso de las capas de aire que rodean a la tierra y depende de la densidad de la atmósfera y de la altura, por lo tanto no tiene un valor constante.

La variación de la presión con respecto a la altitud corresponde a:

$$P = P_0 * e^{-\frac{g \cdot h}{R \cdot T}}$$

Dónde:

R= Constante Universal de los gases ideales (286.9 J/ kg°K)

T= Temperatura del lugar en ° K

g= Gravedad (9.8 m / s²)

P= Presión barométrica del lugar en bar

Po= Presión estándar (101.3 Kpa)

h= Altura sobre el nivel del mar en m.

3.2.5 ALTITUD

Parámetro que determina la densidad del aire, puesto que a mayor altura sobre el nivel del mar el aire se torna menos denso y la presión atmosférica disminuye. La altitud influye en la determinación y selección del equipo de compresión, pues debe aumentarse 2.5% por cada 1000 pies de altura.

3.2.6 TEMPERATURA [T]

Parámetro que mide el nivel térmico.

- **Temperatura absoluta:** Es aquella que toma como cero (0) de la escala, el 0 absoluto de temperatura correspondiente a -273 C.

3.2.7 CAUDAL [Q]

También es llamado gasto de fluido, es el volumen de fluido que pasa por una sección normal de tubería por unidad de tiempo.

$$Q = \frac{Vol}{t}$$

3.3 CONCEPTOS BÁSICOS.

3.3.1 AIRE Y VAPOR DE AGUA

La aptitud del aire atmosférico para retener vapor de agua, está relacionada con la presión y la temperatura ambiente, en especial de la temperatura, admitiendo más vapor de agua a medida que aumenta su temperatura o disminuye su presión e inversamente podría retener menor cantidad de agua a medida que disminuye su temperatura o aumenta su presión (condensación, la cual sucede cuando el nivel de absorción es sobrepasado).

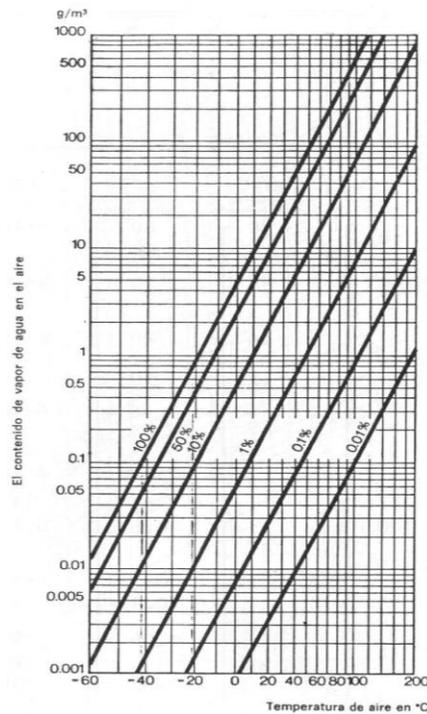


Imagen5: Contenido de vapor de agua en el aire

Fuente: Tratado de Física experimental y aplicada y de meteorología, A Ganot

3.3.2 HUMEDAD DE SATURACIÓN [X_s]

Es la máxima cantidad de vapor de agua que admite un kilogramo de aire seco, a una temperatura y presión determinadas.

$$X_s = \frac{0.622P_a}{P - P_a}$$

p_a = presión del vapor de agua a la temperatura considerada.

P =

3.3.3 HUMEDAD ABSOLUTA [X]

Es el contenido real de vapor de agua por unidad de volumen. Es el peso de vapor de agua existente en 1kg de aire seco, en cualquier condición de presión y temperatura. (*Ver Imagen 3*)

X = Kg. de vapor de agua/Kg. de aire seco

$$X = \frac{0.622P_v}{P_t - P_v}$$

p_v = presión de vapor.

p_t = presión total.

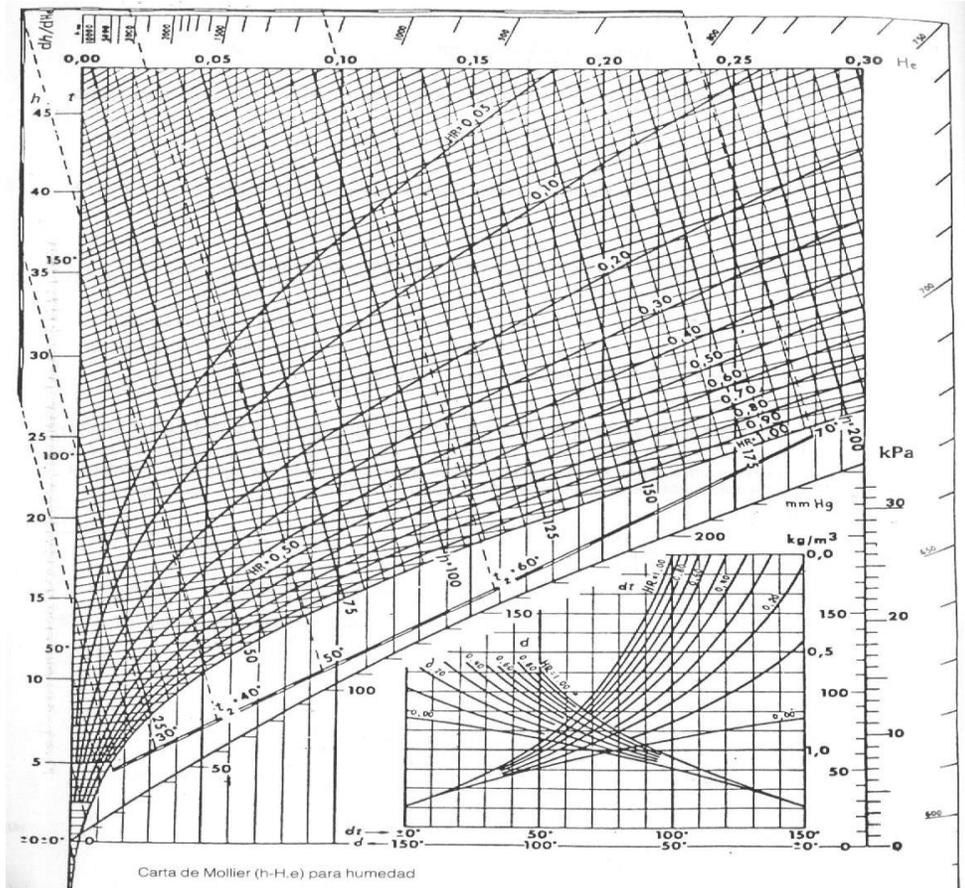


Imagen6: Carta de Molier para humedad.
 Fuente: American Society of Mechanical Engineers

3.3.4 HUMEDAD RELATIVA [Xr]

Grado de saturación en %, es la relación entre la humedad absoluta existente en un aire y la humedad absoluta máxima que podría contener si estuviera saturado.

p_{vs} = presión de vapor saturado.

$$X_r = \left(\frac{X}{X_s} \right) * 100 = \frac{0.622 P_{vs}}{P_t - P_{vs}} * 100$$

La humedad relativa del 100% indica que hay presencia de un aire saturado, es decir, que ya no admite más humedad. 0% indica que el aire está totalmente exento de humedad. El % permite conocer el grado de saturación.

3.4 PROCESOS TERMODINÁMICOS

Aunque son diversas las clases de transformaciones termodinámicas, se plantearán solo los conceptos necesarios para comprender los fenómenos que se producen en la utilización del aire comprimido.

Proceso Isobárico:

Al aumentar el volumen puede producirse un desplazamiento y por lo tanto un trabajo. Es un proceso interiormente reversible (cuasi estático, si no hay flujo), de una sustancia pura, durante el cual la presión permanece constante.

$$W = p \cdot \Delta V$$

Proceso Isotérmico:

Es un proceso a temperatura constante interiormente reversible (cuasi estático, si no hay flujo), de una sustancia pura. Todo el calor producido se disipa y la transformación sigue la ley de Mariotte.

$$P \cdot V = \text{constante}$$

Proceso adiabático:

Se designa como proceso adiabático a aquel en el cual el sistema (generalmente, un fluido que realiza un trabajo) no intercambia calor con su entorno. Un proceso adiabático que es además reversible se conoce como proceso isentrópico. El término adiabático hace referencia a elementos que impiden la transferencia de calor con el entorno. Una pared aislada se aproxima bastante a un límite adiabático. Otro ejemplo es la temperatura adiabática de una llama, que es la temperatura que podría alcanzar una llama si no hubiera pérdida de calor hacia el

entorno. En climatización los procesos de humectación (aporte de vapor de agua) son adiabáticos, puesto que no hay transferencia de calor, a pesar de que se consiga variar la temperatura del aire y su humedad relativa.

Durante un proceso adiabático, la energía interna del fluido que realiza el trabajo debe necesariamente decrecer.

Es decir, que en este tipo de procesos se tiene que $Q = 0$. Que de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, tenemos que:

$$Q = \Delta U + W$$

Como $Q = 0$, entonces, $\Delta U = -W$.

Esto quiere decir, que para un gas contenido en un cilindro provisto de un pistón, cuyas paredes no permiten la transferencia de calor al exterior, la variación de energía interna es igual al trabajo, ya sea realizado por el sistema o sobre el sistema.

Proceso Isocórico:

Un proceso isocórico, también llamado proceso isométrico o isovolumétrico es un proceso termodinámico en el cual el volumen permanece constante; $\Delta V = 0$. Esto implica que el proceso no realiza trabajo presión-volumen, ya que éste se define como:

$$\Delta W = P\Delta V$$

Donde P es la presión (el trabajo es positivo, ya que es ejercido por el sistema).

Aplicando la primera ley de la termodinámica, podemos deducir que Q, el cambio de la energía interna del sistema es:

$$Q = \Delta U$$

Para un proceso isocórico: es decir, todo el calor que transfiramos al sistema quedará a su energía interna.

3.5MEDICIÓN DE TEMPERATURA

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales.

Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador, registrador o controlador necesarios; es importante señalar que es esencial una comprensión clara de los distintos métodos de medida con sus ventajas y desventajas propias para lograr una selección óptima del sistema más adecuado.

Los instrumentos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y entre los cuales figuran:

- a) Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (Sólidos, líquidos o gases);
- b) Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia);
- c) Variación de resistencia de un semiconductor (termistores);
- d) F.E.M creada en la unión de los dos metales distintos (Termopares);
- e) Intensidad de la radiación emitida por el cuerpo (Pirómetros de radiación);
- f) Otros fenómenos utilizados en laboratorios (Velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal...)

Conociendo las manifestaciones de un cuerpo con algún objeto de medición, se podrá identificar la temperatura del mismo. El instrumento para medir la temperatura de un cuerpo se llama termómetro.

Los termómetros necesitan un determinado tiempo en el lugar que se desea medir la temperatura para que logre dar el valor más acertado y la temperatura del ambiente no debe influir mucho en el termómetro para que no varíe mucho el resultado.

3.5.1 TERMÓMETROS

Hay dos clasificaciones de termómetros:

Termómetro de contacto: son los que el elemento está en contacto íntimo o colocado dentro del mismo ambiente que el cuerpo cuya temperatura se quiere conocer.

Termómetros sin contacto: funcionan midiendo algún parámetro a distancia del cuerpo:

- **Pirómetros de radiación**
- **Pirómetros de absorción-emisión**
- **Termómetros de radiación infrarroja**

3.5.1.1 Termómetro de contacto

Lo normal es que posean un elemento que varíe con la temperatura y que esa variación se refleje en una escala graduada directamente en las unidades correspondientes.

-Midiendo la altura de la columna de un líquido dentro de un tubo capilar (termómetro de columna)

-Midiendo la presión de un gas confinado a un recipiente cerrado (termómetros a presión de gases).

-Midiendo la presión de vapor de un líquido confinado a un recipiente cerrado (termómetros a presión de vapor de líquido).

Para la aplicación del calorímetro diseñado se selecciono el termómetro bimetálico por las características que a continuación se nombran:

3.5.1.1.2 Termómetros bimetálicos

Los termómetros bimetálicos son muy frecuentes por su simplicidad y larga vida útil. Son suficientemente precisos para la mayoría de las aplicaciones domésticas donde no es necesaria una gran exactitud. Un puntero indicador se monta en uno de los extremos de una lámina bimetálica arrollada en espiral y el otro extremo de la lámina se fija al cuerpo del instrumento. Cuando cambia la temperatura, la deformación de la lámina tiende a enrollar y desenrollar la espiral produciendo el movimiento del puntero. Una escala calibrada en grados de temperatura detrás del puntero completa el instrumento.



Imagen 7:Termómetro bimetálico

Fuente: http://www.wika.com.ar/55_es_es.WIKA

3.6 VÁLVULAS

En un sistema de control de dos posiciones las válvulas son el control final y estas pueden ser del tipo convencional y tradicional. También cubren una buena parte de los sistemas de control de modulación. Sin embargo, en años recientes algunos sistemas con especificaciones muy estrictas, han requerido del desarrollo de tipos especiales de válvulas, de control, así como de activadores y otros accesorios. Este desarrollo ha recibido la influencia de las demandas en: características dinámicas de un sistema, condiciones de corrosión, erosión, ruido y costos.

Existe variedad de tipos de válvulas según su aplicación, tales como:

- a) Válvula de tapón excéntrico.
- b) Válvula de compuerta
- c) Válvula mariposa.
- d) Válvula de Aguja
- e) Válvula Anular
- f) Válvula de Diafragma
- g) Válvula de Globo

El tipo de válvula seleccionada para este proyecto, son las válvulas tipo bola, ya que para aplicaciones de vapor son las más adecuadas por permitir un cierre y apertura total, lo que evita hacer aperturas parciales que generan golpe de ariete.

3.6.1 VÁLVULAS DE BOLA

En esta válvula, una bola con una perforación diametral que se gira 90° para alinear su perforación con la línea, o bien se coloca en ángulo recto con respecto a la línea, para cerrar la válvula. La acción de cerrado se logra con el apoyo de la superficie pulida de la esfera contra anillo de material plástico o elastómero.



Imagen 8: Válvula de bola

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/bola-tek/valvulas-bola-3-elementos-21299-673181.html>

3.7 CALIDAD DE VAPOR [x]

La calidad o título de vapor es el porcentaje en masa de vapor en una mezcla líquido-vapor y suele denotarse con la letra x:

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_l}$$

Cuando se habla de la calidad del vapor es la cantidad de agua que contiene el mismo, como sabemos proviene del agua, el agua es calentada a alta temperatura dentro de un recipiente cerrado, la presión del agua se eleva por la concentración de energía donde no se permite que se libere ningún tipo de líquido – gas. Cuando utilizamos el vapor es muy importante tenerlo libre de agua como fluido de calentamiento, es de recordar que el agua puede transferir hasta un btu/libra en vez de el vapor que puede transmitir entre 970 y 1050 btu/libra.

La calidad de vapor es inherente a la ausencia de agua durante su conducción para su uso en las líneas de vapor industriales ejemplo una turbina de vapor para generación de energía en ausencia de agua garantiza la operación óptima de la misma evitando así que haya erosión de los alavés y de las carcasas por la densidad tan alta que tiene el agua y las velocidades tan altas que se tiene en este tipo de elemento, otro ejemplo es un intercambiador de calor para aire calentado con vapor a través de una superficie metálica, el vapor en mayor calidad es decir sin agua que no transporte agua en la línea tenemos una mayor tasa de transferencia térmica por libra-masa de vapor por hora calentando determinado volumen de aire, otra aplicación del vapor de alta calidad sería un autoclave de esterilización en los hospitales, utilizados para los laboratorios quirúrgicos, estos requieren de vapor de uso no industrial ya que es un vapor de grado clínico pero es importante que el vapor que tenga buena calidad en ausencia de agua evite

que los instrumentos quirúrgicos sean contaminados con soda caustica, visosfita, o trifosfato sódico que son los agentes químicos para el tratamiento químico del agua en las calderas y nos podrían causar algunas dificultades en el instrumental quirúrgico; igualmente en la calidad del vapor podemos hacer alusión a la conservación de las redes de conducción o transmisión de vapor, igualmente que las redes de condensados, si tenemos agua en altas cantidades dentro de una red de vapor nos puede causar golpes de ariete que por la repercusiones que tiene la vibración que genera destruyen las redes además que erosiona los asientos de las válvulas, destruyen las roscas, daña las juntas bridadas o juntas con empaquetadura, por eso tan importante determinar la buena calidad del vapor para tener un proceso que sea óptimo, eficiente y que se conserve a largo plazo.

La calidad del vapor viene directamente relacionado al control del nivel de agua, el diseño correcto de una caldera y el volumen de vapor contenido dentro del domo de la misma es decir del diámetro total del recipiente a presión con que se conforma las calderas se debe tener destinado como área de producción de vapor como mínimo un 20 %, así garantizamos buena área de liberación del vapor sobre el nivel del agua de conducción con bajas velocidades hacia la flauta o conductos de salida de la caldera. Teniendo un volumen de agua determinado, un volumen de domo de vapor ya bien desarrollado por cálculos e ingeniería, tenemos una calidad del vapor a la salida de la caldera, obteniendo finalmente que al momento de ser exigida una caldera a su 100 % de la capacidad producción.

3.7.1 VAPOR SATURADO

El vapor saturado se presenta a presiones y temperaturas en las cuales el vapor (gas) y el agua (líquido) pueden coexistir juntos.

VENTAJAS DEL VAPOR SATURADO	
Propiedad	Ventaja
Calentamiento equilibrado a través de la transferencia de calor latente y Rapidez	Mejora la productividad y la calidad del producto
La presión puede controlar la temperatura	La temperatura puede establecerse rápida y precisamente
Elevado coeficiente de transferencia de calor	Área de transferencia de calor requerida es menor, permitiendo la reducción del costo inicial del equipo
Se origina del agua	Limpio, seguro y de bajo costo

Tabla 1: Ventajas del vapor saturado
Fuente: Manuales internos calderas JCT

3.7.2 VAPOR SOBREALENTADO

El vapor sobreaquecido se crea por el sobreaquecimiento del vapor saturado o húmedo para alcanzar una temperatura mayor a la de saturación.

Esto quiere decir que es un vapor que contiene mayor temperatura y menor densidad que el vapor saturado en una misma presión. El vapor sobreaquecido es usado principalmente para el movimiento-impulso de aplicaciones como lo son las turbinas, y normalmente no es usado para las aplicaciones de transferencia de calor.

DESVENTAJAS DEL VAPOR SOBRECALENTADO	
Propiedad	Desventaja
Bajo coeficiente de transferencia de calor.	Reduce la productividad.
	Se requiere una superficie mayor para la transferencia de calor.
Temperatura variable aún a una presión constante.	El vapor sobrecalentado requiere mantener una velocidad elevada, de lo contrario la temperatura disminuirá ya que se perderá el calor del sistema
Calor sensible utilizado para la transferencia de calor.	Las caídas de temperatura pueden tener un impacto negativo en la calidad del producto.
La temperatura podría ser extremadamente elevada	Se podrían requerir materiales más fuertes para la construcción de equipos, requiriendo un mayor costo inicial.

Imagen2:Desventajas del vapor sobrecalentado

Fuente: Manuales internos calderas JCT

3.8 DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS

La mayoría de las conducciones de vapor son de acero o acero sin galvanizar. Puesto que la velocidad de corrosión aumenta mucho a partir de una humedad relativa del 50%, este valor no debe sobrepasarse nunca. Con humedades altas, las conducciones sin galvanizar se van oxidando con el transcurso del tiempo. Las láminas de óxido se desprenden y se trasladan hasta los puntos de toma. El resultado es, por ejemplo, taponamiento de los accesorios, defectos en los sistemas de gobierno y paro de producción.

La ecuación de White- Colebrook, juega un papel muy importante en el cálculo de tuberías ya que permite encontrar tanto las caídas de presión como el diámetro de la tubería, y es válida tanto para flujo laminar como turbulento.

Sobredimensionar las tuberías significa que:

- Las tuberías serán más caras de lo necesario.
- Se formará un mayor volumen de condensado a causa de las mayores pérdidas de calor.
- La calidad de vapor y posterior entrega de calor será más pobre, debida al mayor volumen de condensado que se forma.
- Los costes de instalación serán mayores.

Subdimensionar las tuberías significa que:

- La velocidad del vapor y la caída de presión serán mayores, generando una presión inferior a la que se requiere en el punto de utilización.
- El volumen de vapor será insuficiente en el punto de utilización.
- Habrá un mayor riesgo de erosión, golpe de ariete y ruidos, a causa del aumento de velocidad.

3.9 CALORÍMETRO

Es un aparato utilizado para determinar el calor específico de un cuerpo, así como para medir las cantidades de calor que liberan o absorben los cuerpos.

Calorímetros comúnmente usados

- Dry load calorimeter
- El microcalorímetro
- Calorímetro de flujo
- Calorímetro de estrangulación

Otros tipos de calorímetros

- Calorímetro adiabático (Ver páginas 14 y 15)
- Calorímetro de cambio de estado

Los calorímetros tienen como finalidad lograr no solo solucionar un problema específico que se tenga en la calidad de vapor, si no, el poder determinar sus propiedades para mantenerlas en rangos estables que no alteren el funcionamiento de equipos periféricos como lo es mantener el buen estado de la tubería, accesorios e instrumentación instalada en el sistema, en donde es conducido el vapor para la gran diversidad de aplicaciones en las que se utiliza.

Los calorímetros se clasifican como; **combinados:** en los casos pocos comunes en que el contenido de humedad es muy alto en el que el vapor de la cámara de separación puede conservar cierta humedad alterando los muestreos para la obtención de calidad de vapor. **Eléctrico:** Este tipo de calorímetro hace referencia al vapor que proviene de la tobera toma muestras, que puede hacerse pasar por un tipo rodeado de elementos eléctricos de calefacción, a los que se aplica una potencia eléctrica suficiente para obtener vapor sobrecalentado a la salida del

tubo. **Barril:** como su palabra lo dice comprende un barril o tanque de agua de peso y temperatura conocidos. El vapor proveniente de la tobera de toma muestras, se introduce en el agua donde se condensa, midiéndose el peso final de agua junto con su temperatura.

Para efectos de este proyecto, se decidió diseñar un calorímetro de estrangulación, ya que este es el más versátil de todos, pues los materiales para su conformación son de fácil consecución y además al fluido mediante el proceso de estrangulación se le es posible aplicar la ecuación de la conservación de la energía. La estrangulación causa normalmente una gran reducción del caudal. Así la energía cinética antes del dispositivo de estrangulación es muy baja y resulta por lo general despreciable. Durante la estrangulación del fluido, hay un aumento de velocidad y por lo tanto de energía cinética. No obstante, esta energía cinética desaparece a poca distancia del punto en que se produce la restricción.

4. ETAPA DE DISEÑO

En este segmento del trabajo se definirán cada uno de los elementos que conformaran el calorímetro, de acuerdo a una práctica o trabajo de campo realizado con el prototipo propuesto.

Pasos definidos para la etapa de diseño:

1. Cálculo del diámetro de la tubería
2. Dimensionamiento y fabricación de la tobera
3. Diseño y cálculo de la placa orificio
4. Selección de la geometría
5. Selección del aislante térmico
6. Instalación del calorímetro
7. Pruebas de Campo del prototipo

4.1 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

Para calcular el diámetro de la tubería, se conoce el fluido a transportar, el caudal a mover, la geometría del ducto, la longitud y su rugosidad, pero no su diámetro.

Por lo que se requiere utilizar la ecuación de White- Colebrook, que a su vez también tiene como únicas incógnitas, el diámetro y el factor de fricción.

Esta ecuación se debe resolver mediante *iteraciones*:

$$\frac{1}{\sqrt{KD^5}} = -2 \log 10 \left[\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\frac{4Q}{\pi * D * v} \sqrt{KD^5}} \right]$$

Ecuación 1: Ecuación de White- Colebrook

En la que K

$$K = hf * \frac{\pi^2 g}{8 * L * Q^2}$$

Para efectos del ejercicio, o práctica analizada en la empresa que más adelante se describe en el trabajo de campo, se tienen los siguientes datos:

- ✓ Presión de trabajo: 180 PSI \approx 12.41 bar
- ✓ Temperatura promedio: 205,48 °F \approx 96.38° C
- ✓ Fuerza gravitacional (g) : 9,81m/s²
- ✓ Rugosidad (ε): 0.05 mm (Ver anexo 8)

- ✓ Potencia de la caldera. 250 BHP, donde 1 BHP= 34.5 litros/ hora, es decir, el flujo másico es igual a 8625 L/h ≈8.63m³/h (Q)
- ✓ Longitud de la tubería (L), además se sustituye el accesorio por un número determinado de metros de tubería que producen el mismo efecto: 7.6 m (Ver anexo 7)

CANTIDAD	ACCESORIO	LONGITUD EQUIVALENTE EN METROS	TOTAL
1	Válvula de bola 1/2"	0,2 m	0,2 m
4	Codo 90° 1/2"	0,8 m	3,2 m
4	Tee 1/2"	0,8 m	3,2 m
1	Tubería lineal 1/2"	1,0 m	1,0 m
Total equivalencia en metros (ver anexos 2 y 7)			7,6 m

Tabla 3: Accesorios que ocasionan caída de presión los cuales componen el calorímetro.

El vapor a 12.41 bar y 96.38°C tiene una densidad de 6.125 kg/m³ y una viscosidad dinámica de 0,015cP (valores obtenidos por tablas, ver anexos).

La viscosidad cinemática está dada por la ecuación 2:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Ecuación 2: Viscosidad Cinemática

Desarrollando la ecuación se tiene:

← Con formato: Izquierda

$$v = \frac{0.015 * 10^3}{6.125} = 2.497 \text{ cSt}$$

La pérdida de carga máxima admitida es de 1 bar, es decir, la presión a la entrada del calorímetro con respecto a la presión de salida, es admisible solo una caída de presión de 14.5 PSI, la cual esta expresada en metros de columna de vapor, en las condiciones de esta aplicación es:

$$hf = \frac{1 * 10^5}{9,81 * 6,125} = 1.664 \text{ mcv}$$

Ecuación 3: Perdida de carga máxima

Calculando el factor K, se tiene:

$$K = 1.664 * \frac{\pi^2 * 9.81 * 3600^2}{8 * 7.6 * 8.63^2} = 46,1 \text{ mcv}$$

Ecuación 4: factor K

Ya que se obtuvieron todos los datos necesarios para resolver la ecuación, se tiene que:

$$\frac{1}{\sqrt{46,1D^5}} = -2 \log_{10} \left[\frac{0.05/D}{3,7} + \frac{2,51}{\frac{4(8,63)}{\pi * D * 2,497 * 3600} \sqrt{46,1D^5}} \right]$$

$$0.147D^5 = -2 \log_{10} \left[0.013D + \frac{2,51}{8,299^{-3} D^5} \right]$$

$$0.147D^5 = [-604.9 D^5]$$

$$\frac{604.9}{0.147} = 41.14\text{mm} = D_i$$

Según la ecuación resuelta por método de iteraciones, se determina que el diámetro interior de la tubería debe ser de 41.1 mm, esto equivale a una tubería comercial de 1-1/4" (Ver anexo 9). Es importante reconocer que las iteraciones son aproximaciones basadas en supuestos, el ejercicio se hizo con datos de una aplicación en particular, donde el caudal dado por la potencia de la caldera, puede cambiar para otras aplicaciones, además se debe considerar que todo el caudal de la línea de generación de vapor donde se instalará el calorímetro no pasa a través de esta línea, solo pasa una muestra debido a que el equipo se instala en paralelo con la línea de vapor.

4.2 DIMENSIONAMIENTO Y FABRICACIÓN DE LA TOBERA

Según la ASME-*American Society of Mechanical Engineers* - Power Test Codes las toberas para muestreo de vapor resultaron de pruebas experimentales realizadas en los años 40. Resultante de esto se tiene la siguiente tabla de la imagen 2, en donde se selecciono (ver fila resaltada) la tobera que permite la muestra más indicada para esta aplicación.

Diámetro nominal de la tubería (pulgadas)	Diámetro interno de la tubería (pulgadas)	Número de orificios en la tobera	Diámetro de los orificios (pulgadas)	A	B	C	D	E
2	1,939	3	$\frac{1}{8}$	$1 \frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
4	3,826	6	$\frac{1}{8}$	$3 \frac{5}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$ o $\frac{3}{8}$
6	5,761	6	$\frac{1}{8}$	$5 \frac{1}{2}$	7	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$ o $\frac{3}{8}$
8	7,625	6	$\frac{1}{8}$	$7 \frac{1}{2}$	9	$\frac{5}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$ o $\frac{3}{8}$
10	9,75	6	$\frac{1}{8}$	$9 \frac{1}{2}$	11	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{3/4}$	$\frac{3}{8}$
12	11,75	7	$\frac{1}{8}$	$11 \frac{1}{2}$	13	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3/4}$	$\frac{3}{8}$

Tabla 4: Dimensiones de la tobera para toma de muestras, en pulgadas para tuberías de vapor.

Fuente: ASME Power Test Codes

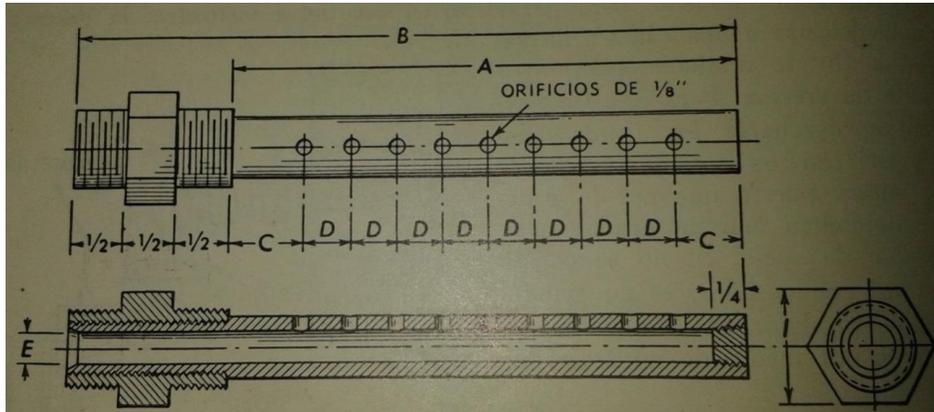


Imagen 9. Tobera para toma de muestras

Fuente: El laboratorio del ingeniero mecánico, Jesse Seymour doolittle, editorial hispano americana s.a, 1970

Para efectos de las pruebas de campo realizadas, se construyó una tobera toma muestra para tubería de 2", este diámetro es el más común en la salida de generación de vapor de las calderas que atiende la empresa Calderas J.C.T, pero de igual manera su fabricación o maquinado es fácil, y se pueden tener varios dispositivos de acuerdo a las tuberías que se encuentren durante la prestación de este servicio.



Imagen 10: Tobera construida.

La tobera se fabricó con orificios que van en dirección contraria a la del flujo de vapor, con esto se evita la condensación del vapor a la entrada del calorímetro, esta debe instalarse en la tubería de manera que sus orificios miren directamente en contra a la corriente de vapor. Siempre que sea posible, la ubicación de la tobera debe elegirse donde el vapor fluya en planos paralelos. Deben evitarse en lo posible las tuberías horizontales. Las tuberías verticales son más satisfactorias si la tobera se inserta a una distancia considerable de toda obstrucción en la tubería. Cuando la tubería pasa de la posición horizontal a la vertical, o viceversa, la tobera de muestras debe instalarse a una distancia considerable del punto de cambio de dirección.

4.3 DISEÑO Y CÁLCULO DE LA PLACA ORIFICIO

Para el cálculo de la placa de orificio se utilizó, la norma ISO 5167, para determinar la geometría y el método de empleo, es decir, las condiciones de funcionamiento e instalación de las placas de orificio.

Relación entre el diámetro del orificio de la placa y el diámetro interno de la tubería

$$\beta = \frac{d}{D}$$

Ecuación 5: Relación de diámetros

Según la norma ISO 5167-2, el diámetro d debe ser en todo los casos mayor o igual a 12,5 mm. La relación de diámetros $\beta = d/D$ es siempre mayor o igual a 0,10 y menor o igual a 0,75. El valor de la razón β debe ser seleccionada entre estos límites.

$$\beta = \frac{12.5mm}{41.1mm}$$

$$\beta = 0.304 \text{ (Cumple)}$$

Con base en los resultados en la mediciones se tiene que:

- Presión de trabajo (P): 12.41 bar \approx 180 PSI
- Temperatura (T): 205.48 °F \approx 96.38 ° C
- Caudal másico: (Q) 8.63 m³/h \approx 2.4 x 10⁻³ m³/s
- Densidad a la temperatura y presión antes mencionada(ρ): 6.125 kg/m³

- Viscosidad dinámica : 0.015 cP
- Viscosidad cinemática (ν) : 2.497 cst
- Diámetro interno de la tubería (D): 41.1mm \approx 0.0411m

Calculamos la velocidad

$$Q = u * A$$

Ecuación 6: Calculo de la velocidad en una tubería

Donde A= es el área de la tubería

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$A = \frac{3.1416 * 0.0411^2}{4}$$

$$A = 0.0322m^2$$

Ecuación 7: Calculo del área de la tubería

Entonces:

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

$$u = \frac{0.0322 m^2}{2.4 \times 10^{-3} m^3/s} u = 13.44 m/s$$

- Velocidad del fluido: (u): 13.44 m/s

Calculo del número de Reynolds

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

Ecuación 8: Número de Reynolds

$$Re = \frac{13.44 \frac{m}{s} * 0.0411m}{2.497 \text{ cst}}$$

$$Re = 0.221$$

En la práctica las condiciones reales se encuentran casi siempre en régimen turbulento. El régimen laminar únicamente se produce en ciertos casos muy particulares: líquidos muy viscosos, tubos capilares y/o velocidades muy bajas.

Si $Re < 2300$ se trata de flujo laminar

Si $Re > 2300$ se trata de flujo turbulento

Para este caso se tiene que el flujo es laminar, ya que la velocidad se considera que es baja, y la perforación de la placa orificio en esta práctica es tan pequeña, que se puede considerar que se comporta como un tubo capilar.

Calculo del coeficiente de descarga [Cd]:

Para determinar el coeficiente de descarga en placas de orificio, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
Cd = & 0.5961 + 0.0261 * \beta^2 - 0.216 * \beta^8 + 0.000521 * \left[\frac{10^6 * \beta}{Re} \right]^{0.7} \\
& + (0.0188 + 0.0063 * A) * \beta^{3.5} * \left[\frac{10^6}{Re} \right]^{0.3} \\
& + \left(0.043 + 0.08 * e^{-10*L1} - 0.123 * e^{-7*L2} * (1 - 0.114 * A) * \left[\frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right] \right. \\
& \left. - 0.031 * M2 - 0.8 * M2^{1.1} \right) * \beta^{1.3}
\end{aligned}$$

Ecuación 9: Ecuación de Stolz

Donde:

$\beta = \frac{d}{D}$: Es la relación de diámetros

Re : Es el número de Reynolds

Ao = Es el área del agujero de la placa orificio

$L1 = \frac{l1}{D}$: Es la relación que existe entre la distancia desde el plano de las tomas de presión aguas arriba hasta la cara aguas arriba de la placa de orificio y el diámetro de la tubería

$L2 = \frac{l2}{D}$: Es la relación que existe entre la distancia desde el plano de las tomas de presión aguas abajo hasta la cara aguas abajo de la placa de orificio y el diámetro de la tubería

En el caso que nos ocupa, las distancias $L1$ y $L2$ son cero, ya que se pretende determinar la pérdida de carga que se produce en la placa.

$$\begin{aligned}
Cd = & 0.5961 + 0.0261 * \beta^2 - 0.216 * \beta^8 + 0.000521 * \left[\frac{10^6 * \beta}{Re} \right]^{0.7} \\
& + (0.0188 + 0.0063 * Ao) * \beta^{3.5} * \left[\frac{10^6}{Re} \right]^{0.3}
\end{aligned}$$

$$Cd = 0.5961 + 0.0261 * (0.304)^2 - 0.216 * (0.304)^8 + 0.000521$$

$$* \left[\frac{10^6 * (0.304)}{0.221} \right]^{0.7} + (0.0188 + 0.0063 * 3.419\text{mm}^2) * (0.304)^{3.5}$$

$$* \left[\frac{10^6}{0.221} \right]^{0.3}$$

$$Cd = (0.6222 * 0.0924) - (0.216 * 7.294^{-5}) + 0.0000521 * 19812.39 + 0.0403$$

$$* 0.0154 * 99.23$$

$$Cd = 0.0569 + 0.000521 * 19812.39 + 0.0615$$

$$Cd = 10.439$$

4.3.1 CÁLCULO MECÁNICO Y GEOMETRÍA DE LAS PLACAS DE ORIFICIO

La parte de la placa dentro del conducto debe ser circular y concéntrica con el eje de la tubería. Las caras de la placa deben ser planas y paralelas entre si. Es necesario que el pandeo plástico y la deformación elástica de la placa no originen una desviación del eje que exceda en un 1% en condiciones de trabajo.

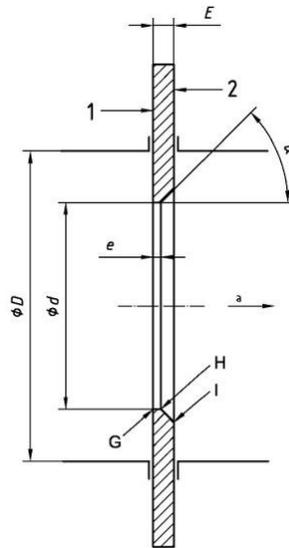


Imagen 11: Diseño de la placa orificio. Fuente: "Teoría de placas y láminas" de Stephen Timoshenko y S. Woinowsky-Krieger.

La tensión máxima corresponde a:

$$\sigma_{\text{máx}} = k * \frac{q \left(\frac{D}{2}\right)^2}{h^2}$$

Ecuación 10: Tensión máxima

Donde:

q es la carga en MPa

D es el diámetro del disco en mm

h es el espesor del disco en mm

$a = D/2$

ε : Es el modulo de Young en MPa, que para el acero es 210000 MPa

Los valores de k y k_1 , se pueden obtener en función de β , de la siguiente tabla:

0,80		0,67		0,50		0,33		0,25		0,20	
k	k_1	k	k_1	k	k_1	K	k_1	K	k_1	k	k_1
0,105	0,00199	0,259	0,0139	0,480	0,0575	0,657	0,130	0,710	0,162	0,730	0,175

Tabla: Valores de K y K_1

Fuente: Ciencia de los materiales, Wenceslao González, Héctor L. Mancini

Estas ecuaciones son válidas para un coeficiente de Poisson de:

$\nu = 0.50$ (Se saca de la tabla para el material AISI 316 según EN 10088-2)

La diferencia de presión que tiene que soportar la placa orificio se puede calcular a partir de los datos anteriores:

$$\Delta P = k * Q^2$$

Ecuación 11: Diferencia de presión en la placa orificio

Donde el factor K es $=46.1mC\nu$ (Calculado en la página 48)

$$\Delta P = 46.1 * (2,4x10^{-3})^2$$

$$\Delta P = 46.1 * 5,76x10^{-6}$$

$$\Delta P = 2,655 x 10^{-4}$$

$$\Delta P = 0.0002655 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\Delta P = 2,66 \times 10^{-10} MPa$$

Se utilizó un acero inoxidable, un AISI – 316, que corresponde a un acero grado 1.4401 según la norma UNE EN 10088-2, el límite elástico es de 220 MPa. Considerando un coeficiente de seguridad de 1,5 = γ

$$AISI 316 \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = 220/\gamma$$

$$AISI 316 \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = 220/1.5$$

$$AISI 316 \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = 146.66 MPa$$

El espesor necesario de placa sería:

$$h = \sqrt{k * \frac{q \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\sigma_{m\acute{a}x}}}$$

Ecuación 12: Espesor necesario de la placa orificio.

$$h = \sqrt{0.480 * \frac{2,66 \times 10^{-10} \left(\frac{41.1}{2}\right)^2}{146.66}}$$

$$h = 1.92^{-5} mm$$

Este espesor es cercano a cero (0), en la práctica se usa lámina de AISI 316 del menor espesor comercialmente encontrado, y teniendo en cuenta que la diferencia

de presión que tiene que soportar la placa orificio es de $2,66 \times 10^{-10} \text{ MPa}$ y que esta placa orificio solo se usa para el método de estrangulamiento, podemos usar el espesor de lamina que tengamos disponible en el taller de calderas J.C.T

Comercialmente esta lamina de AISI 316 se encuentra desde los 0.3mm hasta los 50.8 mm de espesor. Fuente: www.imporinox.com

La deflexión máxima para un espesor de 0.0000192 mm se puede calcular a partir de la ecuación 13 como se muestra a continuación:

$$\omega_{\text{máx}} = k1 * \frac{q (D/2)^4}{\varepsilon * h^3}$$

Ecuación 13: Deflexión máxima

$$\omega_{\text{máx}} = 0.0575 * \frac{2.66 \times 10^{-10} * (20.7)^4}{210.000 * (1.92 \times 10^{-5})^3}$$

$$\omega_{\text{máx}} = 0.0575 * \frac{2.66 \times 10^{-10} * 183603.68}{210.000 * 7.03 \times 10^{-15}}$$

$$\omega_{\text{máx}} = 0.0575 * \frac{4.88 \times 10^{-5}}{1.48 \times 10^{-9}}$$

$$\omega_{\text{máx}} = 1.897 \text{ mm}$$

4.4 SELECCIÓN DEL AISLANTE TERMICO

Durante el funcionamiento del calorímetro y demás equipos por donde circule el vapor, deben existir elementos que impidan la transferencia de calor con el entorno.

Para esta aplicación se seleccionó el aislante térmico de manta de lana mineral de roca, el cual también es utilizado en el sector industrial como material de aislamiento térmico de superficies planas, curvas o irregulares; como calderas, hornos, tanques, ductos, tuberías y cuerpos cilíndricos con diámetros nominales superiores a 4 pulgadas.

Se seleccionó este material ya que el ancho se ajusta perfectamente a la superficie o perímetro de la tubería donde se va a utilizar, sin permitir escapes o pérdidas de calor.

A continuación en la imagen 12 se muestran algunas características de este material:



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Densidad	De 60 a 140 kg/m ³ (3.75 a 8.75 lb/pie ³)
Temperatura de operación	Hasta 750°C (1382°F) en régimen continuo
Conductividad térmica	0.25 BTU.plg. / hr.pie ² °F a 75 °F
Dimensiones Ancho - largo y espesor	2 y 3 pies (0.61 m y 0.91m)±¼" 4, 6 y 8 pies (1.22,1.83 y 2.44m)±½" 1" a 6" con incrementos de ½"

Imagen 12: Especificaciones técnicas de la lana mineral.

Fuente: www.calorcol.com

VENTAJAS

- Es un material incombustible y resistente al fuego.
- Excelente absorción y aislamiento acústico.
- Gran capacidad para soportar picos de temperatura (-270°C a 750 °C).
- No corrosiva (Contenido de cloruros máximo de 1.457 p.p.m).
- Resistente a la humedad y la compresión.
- Amigable con el medio ambiente (PH Neutro, no contiene CFC ni HCFC).
- No representa peligro para la salud (No contiene asbesto).
- Fácil de manejar, ajustar e instalar.

4.5 DIMENSIONAMIENTO Y MATERIAL DE LA CUBIERTA DEL PROTOTIPO

La cubierta o caja contenedora del prototipo se fabricó en acero inoxidable AISI 316, en lámina calibre 16, con unas dimensiones de 541mm de alto x 311mm de ancho x 250mm de profundidad. (Ver anexos 3 y 4)

La caja cubierta está dada para que los materiales que componen el calorímetro en sí, queden dentro de esta, garantizando que el proceso sea adiabático.

Dicha caja contenedora no estará sometida a ningún tipo de esfuerzo, su construcción se realizó mediante proceso de doblado de la lámina, lo cual favorece a la hermeticidad, aunque no es determinante este factor, pues el equipo se instala en los cuartos de calderas que en este caso se encuentra bajo techo.

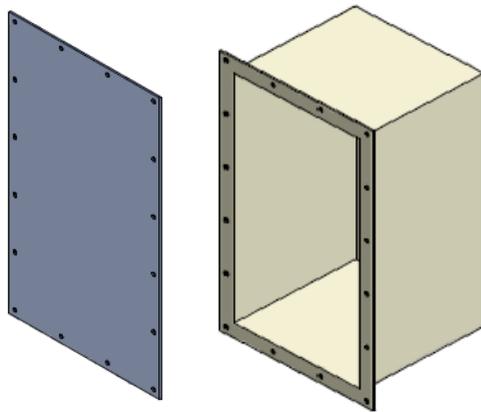


Imagen 13: Diseño de la caja cubierta

4.6 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR EN UNA CALDERA

Con el fin de que el proceso de generación de vapor cumpla con los requerimientos adecuados para determinar si su escala de calidad es alta o baja, se debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- Ubicación de la salida del vapor de la caldera, esta debe estar al lado opuesto del vértice del punto de ebullición del quemador.
- Ubicación del control de nivel de agua de la caldera de forma tal que la caldera no se inunde y se presenten arrastres de agua.
- Alimentación de agua a la caldera con control ON / OFF Vs control proporcional o modulante.
- Flauta al interior de la caldera para secar el vapor y evitar el arrastre de gotas.
- Red de vapor para el transporte del mismo a los usuarios con el dimensionamiento adecuado
- Aislamientos adecuados para las redes de tubería para vapor con el fin de que no se cree condensados internos y superficiales.
- Sistemas de trampeo de condensados en la red de vapor principal y redes secundarias. Tratamiento químico al agua interna de la caldera.
- Evitar la presencia de detergentes en el agua de alimentación de la caldera la cual forma espumas y causa arrastres en el vapor.
- Evitar la presencia de aceites y/o grasas en el agua de alimentación, los cuales con la soda saponifican en jabones que forman espumas, y causan arrastres de agua como gotas diminutas dando como resultado vapor húmedo.
- Evitar la presencia de azúcares y almidones en el agua, los cuales son generadores de espumas y por lo tanto causantes de arrastres o vapor húmedo.

- Incrementar la presión del vapor al máximo indicado en placa de la caldera ya que al subir la presión se aumenta la temperatura del mismo y se disminuye el volumen específico del vapor.

4.7 SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

La generación de vapor de agua se produce mediante la transferencia de calor del proceso de combustión que ocurre en el interior de la caldera hacia el agua, elevando de esta manera su temperatura y presión convirtiéndola finalmente en vapor saturado o sobrecalentado teniendo en cuenta su aplicación.

Con el objetivo de realizar muestreos de temperatura y presión con instrumentos altamente confiados tales como el transmisor de presión con un rango máximo de calibración de 300 psi y termocuplas con rango máximo de calibración 200 °C, aclarando que son rangos dirigidos al muestreo parcial de un vapor saturado que, al presentarse a altas presiones conserva aún mayores temperaturas haciéndose más seco y por consiguiente de alta calidad lo que llamamos vapor sobrecalentado con un factor de confiabilidad bastante amplio que finalmente es lo que interesa para el consumidor.

TABLA DE PRESIÓN DE VAPOR VS TEMPERATURA	
PRESION (PSI)	TEMPERATURA (°C)
40	131
60	145
80	156
100	164
120	172
140	178
160	184
180	190
200	194
220	199
240	203
260	207
280	211
300	214

Tabla 6: Relación presión de vapor vs temperatura

A continuación en la imagen 14 se muestra la instrumentación y el diseño del calorímetro de estrangulación que se pretende diseñar:

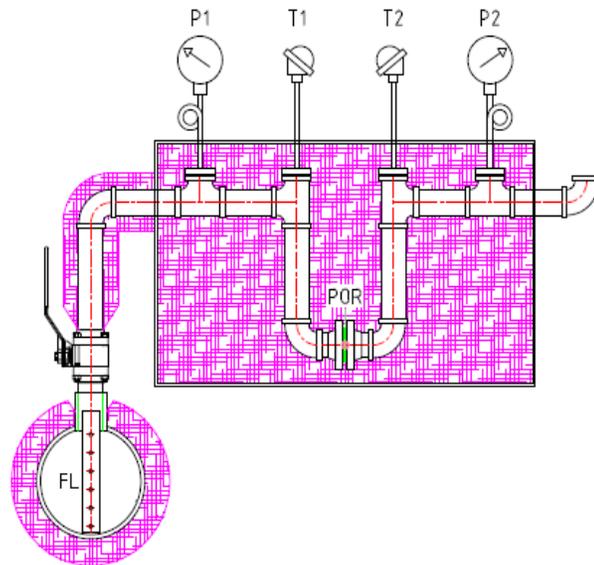


Imagen 14: Diagrama del calorímetro de estrangulación a diseñar

Rangos de operación. Que dependen de la demanda:

- P1: Transmisor de presión (vapor saturado). Rango 0 – 300 PSIG
- P2: Transmisor de presión (vapor sobrecalentado) .Rango 0 – 20 in H₂O
- T1: Termocupla (vapor saturado). Rango 0 – 200 °C
- T2: Termocupla (vapor sobrecalentado). Rango 0 – 200 °C
- POR: Placa Orificio para sobrecalentamiento del vapor. Diámetro de orificio 3/32"
- Flauta toma muestra (Tobera - dependiendo del diámetro se debe fabricar una diferente)

4.8 EVALUACIÓN DEL CALORÍMETRO MEDIANTE PRUEBA EN PLANTA

Dichas pruebas se realizaron en la empresa abajo mencionada, las condiciones ambientales no afectaron la medición, pues la tubería se encontraba aislada termicamente.

Razón Social:	Papeles & Corrugados Andina S.A.
Dirección:	Autopista norte km. 37 Alto de San Isidro – Sesquilé
Actividad Comercial:	Fabricación de Papel.
Teléfono:	(1) 578 – 10 – 81
Caldera Horizontal:	Termo Vapor
Combustible:	Carbón
Potencia:	250 BHP
Presión de trabajo:	180 PSI
Tipo de quemador:	Tornillo sin fin
Condiciones del Lugar	
Temperatura Ambiente:	24,3 °C
Porcentaje de Humedad:	50,4 %
Presión Barométrica:	563 mmHg.
Altura:	2515 m.s.n.m

Tabla 7: Tabla de los datos ambientales y cliente al cual se realizó medición



CONEXIÓN CON
LA TUBERÍA DE 2"

Imagen 15: Montaje del equipo para la prueba del calorímetro. Se observa la conexión con la tubería de 2" que es la que va hacia el proceso.

Durante las pruebas de campo se utilizó una manguera de coraza de $\frac{1}{2}$ " para conexión entre la flauta y la entrada al calorímetro, recubierta con cinta de fibra de vidrio, para garantizar que el proceso sea adiabático y tener mejor calidad en la recolección de datos.



Imagen 16: Recolección de datos (Prueba de campo)

4.9 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE VAPOR

Para determinar la calidad del vapor producido por la caldera, se instaló el calorímetro de estrangulación diseñado en la línea de vapor. El montaje incluye una flauta que se monta en la línea de vapor.

La Flauta tiene orificios que van en dirección contraria a la del flujo de vapor. De esta forma el vapor entra por succión a través de los orificios hacia la primera etapa del calorímetro, donde se mide la presión y la temperatura del vapor, por medio de un transmisor de presión de 0-300 PSI y una PT-100, de 0-200 °C, ambos con salida a 4-20 mA. En la segunda etapa del calorímetro, se tiene una placa orificio donde se realiza la estrangulación del vapor, lo que causa un sobrecalentamiento de este al pasar por el orificio. La tercera etapa del calorímetro, luego de la placa orificio, donde nuevamente se mide la presión y la temperatura del vapor expandido, por medio de un transmisor de presión de 0-20 PSI y una PT-100, de 0-200 °C, ambos con salida a 4-20 mA. Todas estas señales se llevaron a un módulo de adquisición de datos, lo que permite realizar el cálculo por minuto de la calidad de vapor. Cabe anotar que el calorímetro está aislado para no distorsionar la medición y el proceso debe ser adiabático.

RESULTADOS

En Papeles & Corrugados Andina S.A. se encuentra localizada una caldera de 250 BHP, para la cual se realizó la medición de calidad de vapor.

Para el día 28 de Enero de 2014 se consignan los registros en el anexo 9, la medición entre las 11:47 y las 12:48, tomando datos cada minuto.

Grafica calidad de vapor contra presión de vapor saturado para la caldera de 250 BHP de Papeles y Corrugados Andina S.A.

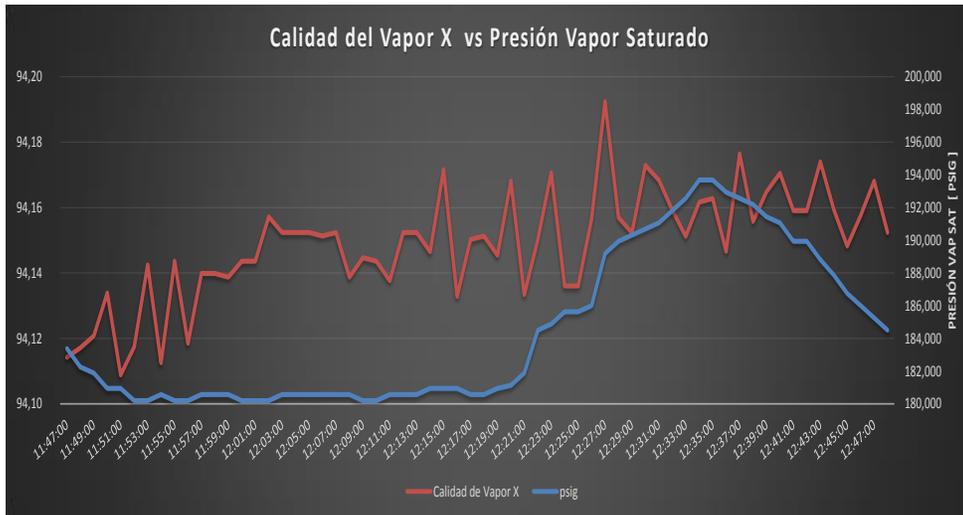


Imagen 17: Grafica estadística de la prueba de campo

4.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LA PRUEBA EN PLANTA

De acuerdo a la medición realizada el porcentaje promedio para la calidad de vapor fue de $X = 94,15 \%$, para la medición con la caldera en funcionamiento normal.

La calidad de vapor se encuentra en un intervalo de $94,11 \%$ y $94,19 \%$, mostrando así que el vapor suministrado por la caldera de 250 BHP de Papeles & Corrugados Andina S.A., tiene un contenido de humedad del 6% , lo cual no cumple con las condiciones necesarias para que el vapor sea de la calidad óptima para el proceso de la planta, ya que para que este cumpla con una calidad óptima el contenido de humedad debe ser inferior al 2% .

Esta calidad de vapor se traduce también en desperdicio de energía, es decir, que con una calidad de vapor del 100% y una presión de trabajo promedio de 179 Psi la entalpía del vapor es equivalente a $1197,895 \text{ BTU/lb}$ que es la energía que el vapor aporta al proceso, si la calidad del vapor disminuye a 94% como es el caso de esta caldera, la entalpía disminuye al $1147,18 \text{ BTU/lb}$, esto significa una pérdida de $50,175 \text{ BTU/lb}$ y teniendo un flujo de vapor promedio de 5490 lb/h , la energía no utilizada sería equivalente a $275.460,75 \text{ BTU/h}$, lo que significaría que al año se estaría perdiendo $\$13'985.901$ (precio del carbón a $180\$/\text{kg}$ poder calorífico de 13923 BTU/lb y tiempo de trabajo de 720 h/mes) o también significaría una pérdida de carbón del $3,9\%$.

4.11 RECURSOS

Humano

Estudiantes de Ingeniería Mecánica (3)

Ingeniero de instrumentación y control

Ingeniero Mecánico asesor

Técnico

MATERIALES	CANTIDAD	COSTO
Cajón en acero inoxidable	2	\$ 2.000.000
Tubería de 1"	2m	\$ 100.000
Placa orificio	1	\$ 500.000
Transmisor de presión	2	\$ 3.600.000
Termocupla (PT-100)	2	\$ 350.000
Regulador de voltaje	1	\$ 300.000
PLC	1	\$ 2.600.000
Convertidores de corriente	4	\$ 1.000.000
Cable	10m	\$ 100.000
Boquilla para entrada de vapor (flauta)	1	\$ 150.000
Mano de Obra		\$ 3.000.000
COSTO APROXIMADO		\$ 13.700.000

Tabla 8: Lista de recursos técnicos

5. CONCLUSIONES

- La calidad de vapor se encuentra en un intervalo de 94,11 % y 94,19 %, mostrando así que el vapor suministrado por la caldera de 250 BHP de Papeles & Corrugados Andina S.A., tiene un contenido de humedad del 6 %, lo cual no cumple con las condiciones necesarias para que el vapor sea de la calidad óptima para el proceso de la planta, ya que para que este cumpla con una calidad óptima el contenido de humedad debe ser inferior al 2 %.
- La Confiabilidad del equipo prima básicamente en la instrumentación, la cual desde fábrica viene con altos estándares de calidad relacionados a la calibración, además las variables a medir son ajustables desde el mismo instrumento como tal.
- Este calorímetro representa un gran ahorro económico para la empresa, pues el ahorro en combustible, en este caso carbón, puede ser de hasta 3.9%, que multiplicándolo por el precio por cada kilogramo y por la cantidad que se utiliza en un mes, resulta una cuantía significativa.
- Con la implementación de este calorímetro el tiempo en mano de obra es reducido, debido a que los técnicos e ingenieros no se verán en la obligación de realizar muestreos empíricos con grandes probabilidades de errores.
- El sistema de medición de calidad de vapor desarrollado, es adaptable a cualquier proceso industrial que utilice vapor de agua de alta calidad como fluido de trabajo.

6. BIBLIOGRAFIA

1. CREUS SOLE, ANTONIO. Instrumentación Industrial, editorial Marcombo, séptima edición, Barcelona España. 2007
2. BALCELLS, JOSEPH. Autómatas Programables, Primera edición, Alfaomega – Marcombo. 1998.
3. MUNSON, Bruce R., Donald F. Young. (1999) Fundamentos de mecánica de fluidos. Editorial Limusa, S.A. de C.V., grupo Noriega editores, Balderas 95, México D.F.
4. POPE, J.Edward. (2000) Soluciones practicas para el ingeniero mecánico. Editorial McGraw – Hill Interamericana editores, S.A. de C.V. México D.F.
5. MARKS, Lionel S. (1979) Manual del ingeniero mecánico de Marks. Unión tipográfica editorial hispano americana. Tomo 1. México.
6. YUNUS A. Çengel, Mecánica de fluidos, Fundamentos y aplicaciones, editorial McGraw

