



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

INGENIERÍA MECÁNICA

“Diseño y adaptación de un medidor de flujo tipo codo para el ciclo Rankine del Laboratorio de Térmica y Fluidos”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

CARLA RUÍZ ROJAS

ASESOR:

M. en C. Jorge Vázquez Cervantes

Ciudad
Nezahualcóyotl, Edo.
de México 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

AGRADECIMIENTOS.	4
OBJETIVOS.	6
INRODUCCION.	7
NOMENCLATURA.	9
RELACIÓN DE FIGURAS Y TABLAS.	11
Capítulo 1 <i>Conceptos y necesidades del proyecto.</i>	14
1.1 Propiedades del vapor de agua.	15
1.1.1 Presión.	15
1.1.2 Temperatura.	16
1.1.3 Volumen específico.	17
1.1.4 Densidad.	19
1.1.5 Energía interna.	22
1.1.6 Calor específico y Capacidad Calorífica.	24
1.1.7 Entalpia.	27
1.1.8 Entropía.	29
1.1.9 Flujo Másico.	31
1.2 Importancia de la medición del flujo másico.	32
1.3 Aplicaciones del vapor de agua.	32
1.4 Primera ley de la termodinámica.	37
1.5 Mediciones de flujo en el laboratorio de máquinas térmicas.	38
1.6 Requerimiento de medición del flujo de vapor para equipos de laboratorio.	42
1.7 Aplicaciones de medidores tipo codo.	44
Capítulo 2 Principio de funcionamiento.	46
2.1 Descripción de los medidores tipo codo.	47
2.2 Características.	48
2.3 Materiales de fabricación.	50
2.4 Ecuaciones empleadas.	51
2.5 Necesidad de medir el flujo másico de vapor para calcular las características térmicas de la turbina de vapor	54

Capítulo 3 Aplicación del medidor tipo codo.	57
3.1 Coeficiente de calibración.	61
3.2 Ecuaciones a emplear.	62
3.3 Formas de calibración.	64
3.4 Normas de calibración.	66
3.5 Propiedades de materiales usados en el medidor.	64
Capítulo 4 Resultados obtenidos.	77
Registro de la medición diferencial.	78
Equivalente de la presión diferencial.	81
Registro de volumen de condensado en unidad de tiempo.	82
Comparación entre la presión diferencial y el volumen del condensado.	83
Obtención y aplicación del coeficiente de calibración.	84
Calibración del medidor tipo codo.	85
Tabla comparativa.	89
Conclusiones.	90
Anexos.	91
Bibliografía.	103

AGRADECIMIENTOS:

A mis padres:

Por ser mi ejemplo a seguir, mi inspiración, demostrarme que la honradez y la lealtad es lo más importante en la vida, por apoyarme en todos los momentos que lo he necesitado, por no dejarme rendir, por regañarme, por cuidarme, por todo eso y mucho más, muchas gracias a ustedes, los amo. 😊

A mi hermanita:

Por cuidarme, ser mi paño de lágrimas, por prestarme todo tu closet, tus accesorios, tus perfumes, tus pinturas, por apoyarme, porque siempre te he admirado y me has enseñado qué camino seguir, te amo. 😊

A mis amigos:

Por ser esas personas que se vuelven familia, por escucharme y ayudarme en lo personal y en lo académico, por los consejos, porque algunos problemas se resuelven solo con una charla y una cerveza, también los amo. 😊

A mis profesores:

Los admiro demasiado por la paciencia que tienen al momento de transmitir conocimientos, por los consejos establecidos, por ser ingenieros respetables, muchas gracias por ayudarme a formarme en la ingeniería y como persona.

OBJETIVOS.

Objetivo General

Diseñar y adaptar un accesorio tipo codo para obtener la medición de flujo en la tubería de vapor de alimentación hacia una turbina.

Objetivos particulares

Que los alumnos del laboratorio de Térmica y Fluidos conozcan un medidor de flujo diferente a los que están instalados en los equipos de laboratorio L2.

Que la realización del medidor de flujo tipo codo sea más económica comparada con el tubo Venturi.

Realizar la calibración del nuevo instrumento.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas que manejan vapor requieren por necesidad contar con instrumentos que apoyen al control de flujo, temperatura y presión, siendo las propiedades medibles con instrumentos como son: rotámetros, placas de orificio, y tubos de Venturi para flujo másico o volumétrico, termómetros de varilla con termopozo, termopares y bimetálicos para la temperatura, manómetros de carátula, diferenciales y piezométricos para la presión, entre otros.

La aplicación y selección de cada instrumento de medición depende principalmente de las condiciones y disposición físicas del lugar donde será colocado, considerando además el grado de precisión requerido.

En la industria la necesidad de medir el flujo másico es algo fundamental ya sea por seguridad, eficiencia o costos, y la FES Aragón no es la excepción, aunque aquí la necesidad de la Universidad es el conocimiento de que el estudiante pueda emplear y conocer diferentes flujómetros. En L2 casi todas las maquinas térmicas cuentan con un medidor de flujo para la presión, ya sea rotámetro en su mayoría, placa de orificio y hasta un tubo Venturi en una de ellas, el ciclo Rankine carecía de dicho medidor de flujo, así nace la idea de realizar una tesis teórico-práctica con un flujómetro diferente en laboratorio, un medidor de flujo tipo codo.

Se realizó una investigación en diferentes libros ingenieriles y artículos de internet, para la explicación de los cuatro capítulos desarrollados en el “Diseño y adaptación de un medidor de flujo tipo codo para el ciclo Rankine del Laboratorio de Térmica y Fluidos” en Facultad de Estudios Superiores- Aragón, UNAM, en donde la construcción del flujómetro tuvo un cierto costo, el cual se justifica más adelante. De acuerdo a esto, el objetivo de este trabajo es obtener un medidor de flujo confiable y económico que pueda aplicarse al sistema de vapor con que se cuenta aprovechando la diferencia de presiones que se presenta en la desviación de un codo. Un objetivo específico para el desarrollo es presentar el método de calibración.

En la presente tesis se explican los conceptos básicos, el principio de funcionamiento, la aplicación del medidor, las normas de calibración, las formulas necesarias para los cálculos que se realicen en las prácticas y la aplicación de la solución, para que el alumno pueda manipular, conocer y entender dicho flujómetro, además de brindarle la experiencia de conocer el instrumento de una manera física.

Para conseguir lo antes expuesto se realizaron cuatro capítulos los cuales son complementarios uno entre otro, donde se conoce, explica o retoman conceptos básicos, otras maneras de calibración y la aplicación de un nuevo sistema de medición diferencial en la FES-Aragón, un “Diseño y adaptación de un medidor de flujo tipo codo para el ciclo Rankine del laboratorio de térmica y fluidos”.

Primer capítulo: Se encuentra una recopilación de conceptos básicos como la presión, temperatura y el flujo másico, que en general fueron las tres variables más difíciles de trabajar en la construcción práctica del medidor de flujo tipo codo en el laboratorio de máquinas térmicas de FES Aragón, pero dado que la ingeniería es muy versátil es necesario complementar estos tres conceptos con otros, pues son necesarios como explicación y argumento de dicho flujómetro.

Segundo capítulo: Se menciona únicamente el medidor de flujo tipo codo, y su funcionamiento de una manera teórica, dando así los argumentos necesarios para poder realizar físicamente el medidor, no sin antes tomar en cuenta, sus características, la descripción del flujómetro y las fórmulas necesarias para poder desarrollar más adelante una inducción matemática que nos lleve a un coeficiente de calibración.

Tercer capítulo: Denominado “aplicación del medidor tipo codo”, se encuentran las ecuaciones que serán requeridas para el desarrollo matemático del flujómetro, la forma de calibración física y teórica, y también una síntesis basada en imágenes en la cual se explica la experimentación y construcción física del flujómetro, donde se tuvieron que cambiar materiales dada que la simulación conceptual no fue suficiente comparada con la física, la elección del material para la visualización en el medidor diferencial tuvo un problema al comprarse una manguera de silicón que por sus propiedades físicas era la mejor opción, pero en la parte del agarre fue poco práctica además de peligrosa para el estudiante si se decidía dejarla. El problema fue resuelto con un par de placas de acrílico (3/4”) la cual se ranuro y coloco de una manera segura en el lugar de la manguera así se pudo apreciar y experimentar pruebas para la medición diferencial que proporciona el medidor de flujo tipo codo.

Cuarto capítulo: La aplicación de la solución en el medidor de flujo tipo codo depende de los registros obtenidos en pruebas que se realizaron con el flujómetro, las cuales solamente fueron dos antes de la reparación remedial del ciclo Rankine, en dichas pruebas se tomó el volumen del condensado en unidad de tiempo, el coeficiente de calibración, además de incluir tablas comparativas sobre las mediciones diferenciales y demás variables.

NOMENCLATURA

Índices	
Literal	Símbolo
Área.	<i>A</i>
Volumen.	<i>V</i>
Flujo Másico.	<i>m</i>
Temperatura.	<i>T</i>
Longitud.	<i>L</i>
Volumen Específico.	<i>v</i>
Masa.	<i>m</i>
Velocidad	<i>v</i>
Peso	<i>w</i>
Calor	<i>Q</i>
Caudal	<i>Q</i>
Trabajo	<i>W</i>
Fuerza	<i>F</i>
Energía Interna	<i>U</i>
Energía	<i>E</i>
Capacidad calorífica	<i>c</i>
Presión	<i>p</i>
Coefficiente	<i>C</i>
Entalpia	<i>H</i>
Entropía	<i>S</i>
Diámetro	<i>D</i>
Altura	<i>h</i>
Radio Interno	<i>r</i>
Radio Externo	<i>R</i>
Gravedad	<i>g</i>

Subíndices.	
Literal.	Símbolo.
Relativa.	<i>r</i>
Absoluta.	<i>a</i>
Suelo seco.	<i>ss</i>
Suelo.	<i>s</i>
Adiabático.	<i>ad</i>
Final.	<i>f</i>
Inicial.	<i>i</i>
Real.	<i>r</i>
Descarga.	<i>D</i>
Codo.	<i>c</i>
Teórico.	<i>t</i>
Modelado.	<i>m</i>
Atmosférica.	<i>atm</i>
Manométrico.	<i>man</i>
Local.	<i>L</i>

Letras Griegas	
Densidad	ρ
Diferencial	∂

RELACIÓN DE FIGURAS Y TABLAS

CAPITULO UNO

FIGURAS

Figura 1.01. Relación entre los términos de la presión. (HOLMAN, 1975)

Figura 1.02 Diagrama Presión Temperatura. (Cegel, 2019)

Figura 1.03 Volumen específico. (California, 2008)

Figura 1.04 Densímetro. (instrumentos de medicion)

Figura 1.05 Capacidad calorífica. (QuimiTube, 2003)

Figura 1.06 Diagrama entropía. (Comunicaciones, 2011-2019)

Figura 1.07 Faster Flow. (Scientific, 2019)

Figura 1.08 Flujo Másico. (QUIMICA, s.f.)

Figura 1.09 Horno de vapor para esterilización. (Pardell, 2001)

Figura 1.10 Sistema de calentamiento con calor al vacío. (TLV, 2019)

Figura 1.11 Impulso de un motor. (TLV, 2019)

Figura 1.12 Máquina de vapor. (Slope, 2015)

Figura 1.13 Automatización en calderas. (Control, 2004)

Figura 1.14 Vapor para la limpieza. (Sil, 2015)

Figura 1.15 Humidificadores con vapor. (Sil, 2015)

Figura 1.16 Calor y trabajo. (Cedròn, Landa, & Robles, 2017)

Figura 1.17 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.18 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.19 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.20 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.21 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.22 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.23 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.24 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.25 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.26 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.27 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.28 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.29 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.30 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.31 Tabla Uno. Creación propia.

Figura 1.32 Rotámetros. (WebMeMarketing, 2015)

Figura 1.33 Placa de orificio. (Chassan Jalloul, 2015)

Figura 1.34 Tubo Venturi. (Ecuador, 2010)

Figura 1.35 Medidor del agua y partes. (Solinst, s.f.)

Figura 1.36 Bosquejo Codo. (calmansys, 2019)

TABLAS

Tabla uno. Ejemplos de aplicación de medidores de flujo en L2. Creación propia.

CAPITULO 2

FIGURAS

Figura 2.01 Dibujo Elbow Flow Meter. (Home, 2015)

Figura 2.02 Rosca cónica. (Industrieprodukte, 2015)

Figura 2.03 Rosca paralela. (Industrieprodukte, 2015)

Figura 2.04 Materiales de codos. Creación propia.

Figura 2.05 Visión interna de una turbina de Vapor. (SIEMENS, 2019)

Figura 2.06 Dibujo de Rotámetro. (UNEXPO, 2009)

Figura 2.07 Dibujo de placa de orificio. (Tecnicos, 2018)

Figura 2.08 Dibujo de tubo de Venturi. (Tecnicos, 2018)

TABLAS

Tabla dos. Comparación de los materiales utilizados. Creación propia.

CAPITULO TRES

FIGURAS

Figura 3.01 Codo. Creación propia.

Figura 3.02 Codo y nipple. Creación propia.

Figura 3.03 Manguera de Silicón. (ozono, 2018)

Figura 3.04 Prueba Manguera. Creación propia.

Figura 3.05 Placa de acrílico. Creación propia.

Figura 3.06 Placa de acrílico 2. Creación propia.

Figura 3.07 Figura ranura. Creación propia.

Figura 3.08 Ranura y pulidor. Creación propia.

Figura 3.09 Perforaciones. Creación propia.

Figura 3.10 Medidor tipo codo. Creación propia.

Figura 3.11 Medidor tipo codo 2. Creación propia.

Figura 3.12 Manguera. (ozono, 2018)

Figura 3.13 Anticongelante. (Euromaster, 2005)

Figura 3.14 Acrílico. (MORALES, s.f.)

Figura 3.15 Mercurio. (Minerales, 2009)

Figura 3.16 Hierro. (10, 2019)

Figura 3.17 Tubo de cobre. (Ecuador, 2010)

Figura 3.18 Bronce. (Minerales, 2009)

Figura 3.19 Tornillos. (Ingemecánica, s.f.)

CAPITULO CUATRO

FIGURAS

Figura 4.01 Columna de mercurio. Creación propia.

Figura 4.02 Columna de agua. Creación propia.

Figura 4.03 Medidor de flujo tipo codo. Creación propia.

Figura 4.04 Caudal con coeficiente de descarga Hg. Creación propia.

Figura 4.05 Caudal con coeficiente de descarga H₂O. Creación propia.

Figura 4.06 Caudal teórico Hg. Creación propia.

Figura 4.07 Caudal teórico H₂O. Creación propia.

TABLAS

Tablas tres. Conversión de columna de agua a columna de mercurio. Creación propia.

Tabla cuatro. Registro de Cargas. Creación propia.

Tabla cinco. Comparación de sustancias. Creación propia.

Tabla seis. Comparación en diferencia de alturas. Creación propia.

Tabla siete. Cargas. Creación propia.

Tabla ocho. Q_m Hg. Creación propia.

Tabla nueve. Q_m H₂O. Creación propia.

Tabla diez. Q_t Hg. Creación propia.

Tabla once. Q_t H₂O. Creación propia.

.Tabla doce. Datos del sistema columna de Mercurio. Creación propia.

Tabla trece. Datos del sistema columna de Agua. Creación propia.

ANEXO A.

Tabla catorce. Inversión. Creación propia.

Tabla quince. Comparativa de gastos. Creación propia.

Tabla dieciséis. Obtención del coeficiente de descarga. Creación propia.

CAPITULO I. *Conceptos y Necesidades del proyecto*

Se requiere un medidor de flujo para medir la cantidad de vapor que circula por los conductos del ciclo Rankine en el Laboratorio de Térmica y Fluidos de la FES Aragón de la UNAM. La medición del flujo es empleada para poder realizar el cálculo de potencia, entalpías y obtención de diagramas para mostrar la línea Williams de la relación entre cantidad de vapor suministrado, trabajo desarrollado y potencia obtenida, en cuestión de las prácticas que se llevan a cabo con el equipo mencionado.

Este capítulo hace mención de los conceptos básicos indispensables que se deben conocer para la explicación, funcionamiento y construcción de un medidor de flujo tipo codo, teniendo en cuenta que todas estas definiciones hacen posible el desarrollo teórico-práctico del medidor diferencial.

1.1 PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA.

Las propiedades del agua son necesarias para saber los distintos cambios que tiene dicha sustancia en sus diferentes estados, dado que al ser una sustancia universal conocer sus propiedades resulta muy importante para el proyecto “Diseño y adaptación de un medidor de flujo tipo codo para el ciclo Rankine del Laboratorio de Térmica y Fluidos” en FES- Aragón.

1.1.1 Presión.

“La presión se define como la componente normal de la fuerza ejercida por el fluido por unidad de área de los límites. La presión queda definida solo para un elemento de área suficientemente grande de tal forma que el fluido puede ser tratado como un continuo; así,

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow \Delta A'} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1)$$

en donde ΔA es el área mínima para la cual el fluido se comporta como un continuo. En general se presenta comportamiento de continuo cuando la distancia media recorrida por una molécula entre choques es pequeña al compararla con la dimensión de los límites; en este caso, a un lado del elemento del área ΔA .

La presión total ejercida sobre una superficie límite se llama presión absoluta. La presión ejercida por la atmósfera sobre una pared se llama la presión atmosférica y varía con el lugar y la elevación sobre la superficie de la tierra. La presión atmosférica es el resultado del peso del aire en un lugar particular. La presión manométrica denota la diferencia entre la absoluta y la atmosférica en un sistema particular y normalmente se mide con un instrumento que tiene como referencia la presión atmosférica. (Figura 1.01) El vacío representa la cantidad en que la presión atmosférica excede a la presión absoluta de un sistema. El término vacío es sinónimo del término presión manométrica negativa. De estas definiciones se aprecia que la presión absoluta no puede ser negativa y que el vacío no puede ser mayor que la presión atmosférica local. Los diferentes términos de la presión se ilustran en la siguiente imagen.” (HOLMAN, 1975)

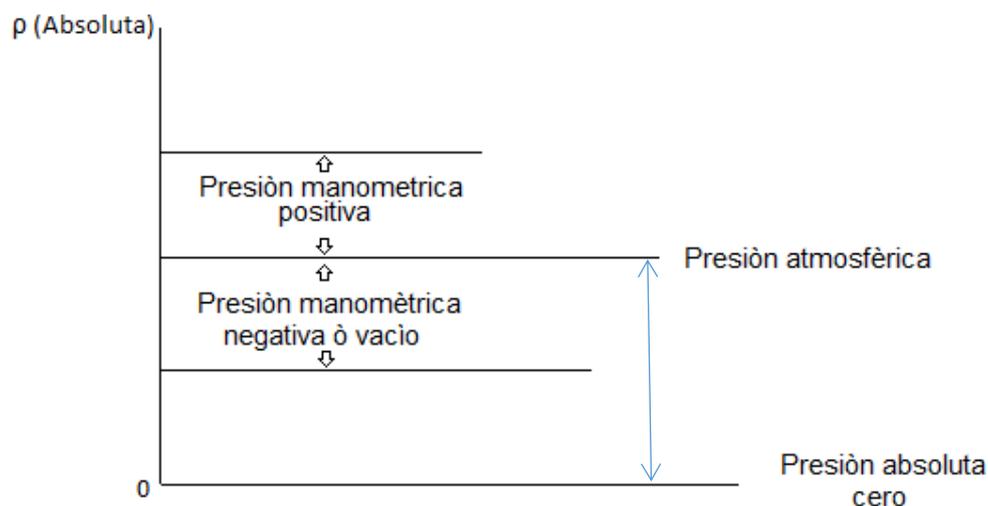


Figura 1.01 Relación entre los términos de la presión. (HOLMAN, 1975)

1.1.2 Temperatura.

La temperatura es un indicador o índice de que existe calor en movimiento. El calor como energía fluye de un lugar a cierta temperatura hacia otro que se encuentra a menor temperatura.

La indicación de un termómetro es la temperatura de todos los sistemas termodinámicos que están en equilibrio con él.

El empleo de un termómetro permite verificar que en el transcurso de un cambio de fase de un cuerpo curvo o sustancia curva la temperatura permanece invariable sin importar las proporciones de las dos fases presentes, este hecho permite establecer estados de referencia llamados puntos fijos. Es conveniente escoger como termómetro aquellos sistemas termodinámicos en el que una propiedad varía y la otra permanece constante a la propiedad variable se le llama propiedades termométricas

Con el propósito de construir un termómetro se aprovecha la propiedad de dilatación que tiene el mercurio, consideramos la masa Hg dada, contenida en un núcleo de vidrio. Observamos que cuando este sistema está en contacto térmico con otro la longitud de la columna de Hg aumenta cuando la temperatura del vidrio termodinámico se incrementa.

Se define la temperatura T en función de la longitud L:

$$T = aL + b \rightarrow y = mx + b \quad (2)$$

Donde la pendiente "a" y la ordenada al origen "b" se puede determinar arbitrariamente dos puntos fijos a algo interesante es asignar el valor de cero "a+b" y determinar "a" en términos de un solo punto fijo. (Cervantes, 2014)

"En la escala internacional, se asigna el numero 0 a la temperatura de congelación del agua, y el numero 100 a su temperatura de ebullición (a la presión atmosférica normal). El espacio entre las dos marcas se divide en 100 partes iguales llamadas grados; en consecuencia, un termómetro calibrado se llama termómetro centígrado.

"Sin embargo ahora se llama termómetro Celsius en honor al científico que sugirió dicha escala, el astrónomo sueco Anders Celsius"

Existen otras dos escalas, la americana que es Fahrenheit en donde la temperatura de congelación es de 32 y de ebullición de 212 y la escala Kelvin no se calibra en función de puntos de congelación ni de ebullición del agua sino en términos de la energía misma. El número 0 se asigna a la mínima temperatura posible, el 0 absoluto en el cual una sustancia no tiene ninguna energía cinética que ceder.

La temperatura se relaciona con el movimiento aleatorio de los átomos y las moléculas de una sustancia. En forma más específica, La temperatura es proporcional a la energía cinética de “traslación” promedio del movimiento molecular (el que lleva la molécula de un lugar a otro). Las moléculas también pueden girar o vibrar con su energía cinética de rotación y vibración correspondiente, aunque tales movimientos no afectan directamente la temperatura.” (Hewitt, 2007) En el siguiente diagrama se puede apreciar los cambios de fase.

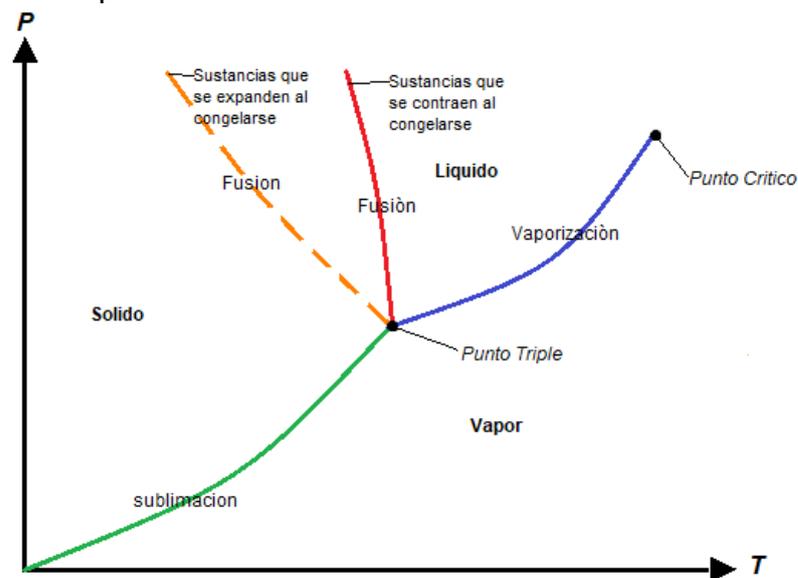


Figura 1.02, Diagrama presión- temperatura. (Cegel, 2019)

1.1.3 Volumen Específico

“El volumen específico es una propiedad intensiva característica de cada elemento o material. Se define matemáticamente como la relación entre el volumen ocupado por una determinada cantidad de materia (un kilogramo o un gramo); en otras palabras, es el recíproco de la densidad.

La densidad señala cuánto pesa 1 ml, de materia (líquida, sólida, gaseosa, o una mezcla homogénea o heterogénea), mientras que el volumen específico se refiere al volumen que ocupa 1 g (o 1 kg) de la misma. Así, conociendo la densidad de una sustancia, basta con calcular el recíproco para determinar su volumen específico. (Figura 1.03)

¿A qué alude la palabra “específico”? Cuando una propiedad cualquiera se dice que es específica significa que viene expresada en función de la masa, lo que permite su transformación de una propiedad extensiva (que depende de la masa) a una intensiva (continua en todos los puntos del sistema).

El volumen específico (v) es el volumen ocupado por unidad de masa de un material. Es la inversa de la densidad. A las propiedades que no dependen de la cantidad de materia se las llama "Propiedades Intensivas". Dentro de estas están también por ejemplo el punto de ebullición, el brillo, el color, la dureza y el punto de fusión:" (Glosarios, 2018)

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

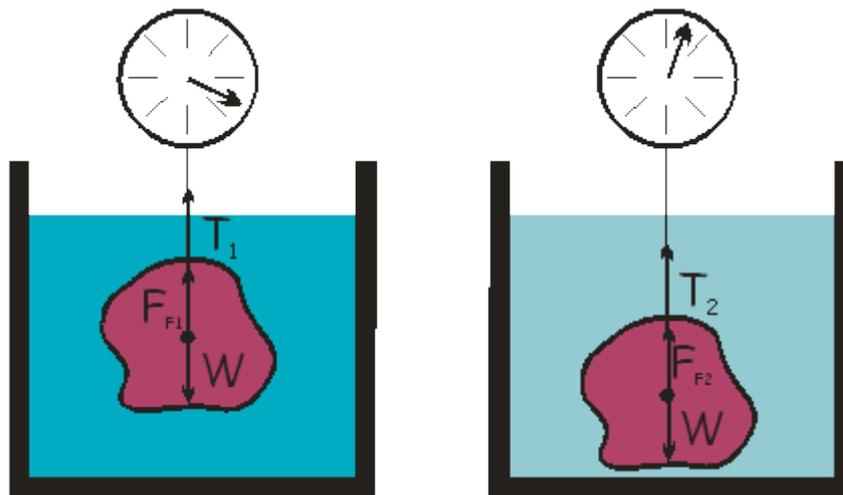


Figura 1.03, Volumen específico. (California, 2008)

1.1.4 Densidad

“En física y química, la densidad (símbolo ρ) es una magnitud vectorial referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Si un cuerpo no tiene una distribución uniforme de la masa en todos sus puntos la densidad alrededor de un punto puede diferir de la densidad media. Si se considera una sucesión pequeños volúmenes decrecientes ΔV_k (convergiendo hacia un volumen muy pequeño) y estén centrados alrededor de un punto, siendo Δm_k la masa contenida en cada uno de los volúmenes anteriores, la densidad en el punto común a todos esos volúmenes.

TIPOS DE DENSIDAD.

Absoluta.

La densidad o densidad absoluta es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. Su unidad en el Sistema Internacional es kilogramo por metro cúbico (kg/m^3), aunque frecuentemente también es expresada en g/cm^3 . La densidad es una magnitud intensiva.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Siendo ρ , la densidad; m , la masa; y V , el volumen de la sustancia.

Relativa

La densidad relativa de una sustancia es la relación existente entre su densidad y la de otra sustancia de referencia; en consecuencia, es una magnitud adimensional (sin unidades).

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (5)$$

donde ρ_r es la densidad relativa, ρ es la densidad de la sustancia, y ρ_0 es la densidad de referencia o absoluta.

Para los líquidos y los sólidos, la densidad de referencia habitual es la del agua líquida a la presión de 1 atm y la temperatura de 4 °C. En esas condiciones, la densidad absoluta del agua destilada es de 1000 kg/m^3 , es decir, 1 kg/dm^3 .

Para los gases, la densidad de referencia habitual es la del aire a la presión de 1 atm y la temperatura de 0 °C.

Media y puntual

Para un sistema homogéneo, la expresión masa/volumen puede aplicarse en cualquier región del sistema obteniendo siempre el mismo resultado.

Sin embargo, un sistema heterogéneo no presenta la misma densidad en partes diferentes. En este caso, hay que medir la “densidad media”, dividiendo la masa del objeto por su volumen o la “densidad puntual” que será distinta en cada punto, posición o porción “infinitesimal” del sistema, y que vendrá definida por:

$$\rho = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{m}{V} = \frac{dm}{dV} \quad (6)$$

Sin embargo debe tenerse que las hipótesis de la mecánica de medios continuos solo son válidas hasta escalas de 10^{-8} m, ya que a escalas atómicas la densidad no está bien definida. Por ejemplo el núcleo atómico es cerca de 10^{-13} m superior a la de la materia ordinaria. Es decir, a escala atómica la densidad dista mucho de ser uniforme, ya que los átomos están esencialmente vacíos, con prácticamente toda la masa concentrada en el núcleo atómico.

Aparente y real

La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales de constitución heterogénea, y entre ellos, los porosos como el suelo, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire u otra sustancia, de forma que la densidad total de un volumen del material es menor que la densidad del material poroso si se compactase. En el caso de un material mezclado con aire se tiene:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ap}}{V_{ap}} = \frac{m_r + m_{aire}}{V_r + V_{aire}} \quad (7)$$

La densidad aparente de un material no es una propiedad intrínseca del material y depende de su compactación. La densidad aparente del suelo (ρ_{ap}) se obtiene secando una muestra de suelo de un volumen conocido a 105°C hasta peso constante.

$$\rho_{ap} = \frac{w_{ss}}{V_s} \quad (8)$$

Donde:

w_{ss} , Peso de suelo seco a 105°C hasta peso constante.

V_s , Volumen original de la muestra de suelo.

Uno de los instrumentos más utilizados para medir la densidad de algunas sustancias es el densímetro, como se muestra a continuación:



Figura 1.04 Densímetro. (libre, s.f.)

La densidad puede obtenerse de forma indirecta y de forma directa. Para la obtención indirecta de la densidad, se miden la masa y el volumen por separado y posteriormente se calcula la densidad. La masa se mide habitualmente con una balanza, mientras que el volumen puede medirse determinando la forma del objeto y midiendo las dimensiones apropiadas o mediante el desplazamiento de un líquido, entre otros métodos. Los instrumentos más comunes para medir la densidad son:

- El densímetro, que permite la medida directa de la densidad de un líquido.
- El picnómetro, que permite la medida precisa de la densidad de sólidos, líquidos y gases (picnómetro de gas).
- La balanza hidrostática, que permite calcular densidades de sólidos.
- La balanza de Mohr (variante de balanza hidrostática), que permite la medida precisa de la densidad de líquidos.

Otra posibilidad para determinar las densidades de líquidos y gases es utilizar un instrumento digital basado en el principio del tubo en U oscilante. Cuya frecuencia de resonancia está determinada por los materiales contenidos, como la masa del diapason es determinante para la altura del sonido.” (Katterinne23, 2014)

1.1.5 Energía interna.

La energía interna es inherente al sistema termodinámico bajo análisis y se puede comprender en base a otras formas de energía que se describen a continuación.

“La energía potencial gravitacional se define como el trabajo necesario para elevar un peso a una altura determinada sobre un nivel particular de referencia. La energía cinética se evalúa al determinar el trabajo requerido para acelerar un cuerpo desde el estado de reposo hasta una cierta velocidad. De ello resulta:

$$F = ma = m \frac{dv}{dr} = m \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dr} = mv \frac{dv}{ds} \quad (9)$$

y

$$W = \int f * ds = \int mv dv = 1/2 mv^2 = K.E. \quad (10)$$

De igual manera, el potencial eléctrico se define como el trabajo para desplazar una carga en un campo eléctrico. En todos estos casos, el concepto de energía potencial se identifica con el trabajo. También, en los casos mencionados, la energía potencial es función del estado del sistema y no depende del proceso particular en consideración. Así, la energía cinética de un cuerpo no depende de la manera como este llegue al reposo ni aun de la dirección del vector velocidad; la energía potencial gravitacional no depende de la manera como se eleve un peso a un nivel determinado, sino solamente del valor de la elevación.

De acuerdo a la mecánica, se sabe que si el único trabajo hecho por un sistema es aquel que es independiente de la trayectoria, el sistema se denomina *conservativo*. Las fuerzas que actúan sobre dicho sistema se llaman *fuerzas conservativas*, la ecuación puede interpretarse como:

Trabajo hecho por las fuerzas conservativas = Trabajo hecho por las fuerzas no conservativas

Se ha especificado que la interacción con los alrededores se realiza únicamente en forma de trabajo, y de este trabajo se excluyen todas aquellas formas que pueden expresarse como cambios en funciones potenciales. En consecuencia, se habla del trabajo que, en efecto, se suministra al sistema por los alrededores o por algún mecanismo adyacente. Como resultado de este proceso el principio de la conservación de la energía permite la definición de una *función general de energía interna E*, tal como

$$E_{final} = E_{inicial} + \Delta E = W_{ad} \quad (11)$$

en donde W_{ad} se emplea para denotar el trabajo. El subíndice *ad* indica que el trabajo se hace en un proceso adiabático, es decir, en el cual no hay intercambio de calor entre el sistema y los alrededores, el calor no puede expresarse como una fuerza que actúa a través de una distancia. La ecuación puede anunciarse verbalmente así:

Ganancia en energía interna = Trabajo adiabático suministrado por todas las fuerzas que actúan sobre este último

Por experimentación se ha encontrado que el trabajo adiabático entre dos estados extremos es siempre el mismo, independientemente del proceso. Puede concluirse por tanto que la cantidad E es una propiedad y es una función solo del estado del sistema. La cantidad E se llama la energía interna del sistema.

La propiedad de un sistema como una función de estado, una función de punto o como una cantidad cuyo cambio entre dos estados extremos no depende de la trayectoria del proceso usado para efectuar el cambio. La cantidad E cumple esta definición, de tal manera que se le denomina propiedad del sistema. La definición de E en términos de trabajo adiabático no sirve para establecer una escala absoluta para la energía interna o nivel de referencia para la tabulación de las propiedades de las sustancias. Los niveles de referencia pueden asignarse arbitrariamente, como en el caso de los puntos de referencia para la escala internacional de temperatura; pero los valores absolutos de la función de energía interna solo pueden obtenerse en base a minuciosas consideraciones microscópicas. El aspecto importante es que existe una propiedad E y que su existencia es cuestión de evidencia experimental.

Se entra a considerar el efecto de la transferencia de calor en un sistema sometido a un proceso. El cambio en la energía interna es el mismo que antes ya que los estados extremos son los mismos, pero el trabajo se altera de acuerdo a la conservación de la energía por la cantidad de energía calorífica adicionada, Q . Así,

$$Q+W= W_{ad} \quad (12)$$

en donde la energía calorífica se define como positiva la que se agrega al sistema, y como negativa, la que el sistema entrega o descarta, se tiene:

$$Q+W = \Delta E \quad (13)$$

La ecuación tiene una sencilla interpretación física. Establece que la energía adicionada a los límites del sistema como resultado de fuerzas que actúan sobre los límites (trabajo) más todas las otras energías adicionadas a los límites (calor), se manifiestan como un incremento de la energía interna del sistema. Es decir:

Energía adicionada al sistema = Acumulación de energía en el sistema (HOLMAN, 1975)

1.1.6 Calor Específico

“Si una cantidad de calor $\partial'Q$ se adiciona a un sistema produciendo un cambio en la temperatura ∂T , el calor específico C se define como:

$$\partial'Q = C \partial T \quad (14)$$

Considérese un sistema termodinámico, en el cual los cambios de energía interna se presentan únicamente como cambios en la función de energía térmica interna U . Además, se supone que las únicas interacciones de trabajo con los alrededores son aquellas manifestadas por un cambio en el volumen del sistema. En este proceso debe suponerse que no intervienen otras formas de trabajo y que el volumen del sistema aumenta. Para este tipo de sistema puede escribirse la ecuación como:

$$\partial'Q + \partial'W = \partial U \quad (15)$$

$$\partial'Q - p \partial V = \partial U \quad (16)$$

en donde p es la presión del sistema. Entonces puede escribirse para el calor suministrado

$$\partial'Q = \partial U + p \partial V \quad (17)$$

Permítase ahora que el sistema sufra un proceso a volumen constante, de tal manera de que $dV=0$. Entonces puede escribirse para el calor específico a volumen constante y por unidad de masa

$$\partial'Q_r = c_r \partial T_r \quad (18)$$

o

$$\partial u_r = c_r \partial T_r \quad (19)$$

en donde los subíndices indican un cambio a volumen constante del sistema. Así el calor específico por unidad de masa se expresa como:

$$Q_r = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_r \quad (20)$$

Aunque la relación anterior se ha desarrollado para un sistema especial, esta ecuación se toma como la relación que define el calor específico a volumen constante. En este punto se aprecia una desviación de la vieja teoría calórica. El concepto moderno es el de tratar el calor específico como una propiedad del sistema, la cual puede expresarse en función de otras propiedades del sistema, tal como se escribió en la ecuación anterior.

Supóngase ahora que al sistema se le permite experimentar un proceso a presión constante. El calor transferido por unidad de masa se expresa como

$$\partial'Q_p = du_p + p dv_p \quad (21)$$

se define una nueva propiedad llamada entalpia por

$$h = u + pu \quad (22)$$

La diferencial de la entalpia es

$$dh = du + p dv + v dp \quad (23)$$

y, a presión constante,

$$dH_p = du_p + p dv_p \quad (24)$$

Así,

$$dQ_p = dH_p = c_p dT_p \quad (25)$$

y

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (26)$$

El calor específico a presión constante es en tal forma, una propiedad del sistema y puede definirse en función de otras propiedades, tal como se aprecia en dicha ecuación.

Las unidades dichas para el calor específico son Btu por libra masa-grado Fahrenheit, kilocalorías por kilogramo-grado centígrado y julios por kilogramo-grado centígrado." (Hartley, 1985)

Capacidad calorífica

Es cuando se le suministra cierta cantidad de calor **Q** a un cuerpo, esta cantidad de calor se refleja en un aumento de su temperatura que llamaremos **ΔT**. Una vez definido estos puntos podemos definir capacidad calorífica **C** como la relación entre el calor suministrado al cuerpo o la cantidad de energía necesaria para elevar en 1°C la temperatura del mismo.

Las unidades que utiliza el sistema internacional son:

$$\frac{\text{Joule}}{\text{K}}$$

A continuación se aprecia una ilustración de la capacidad calorífica:

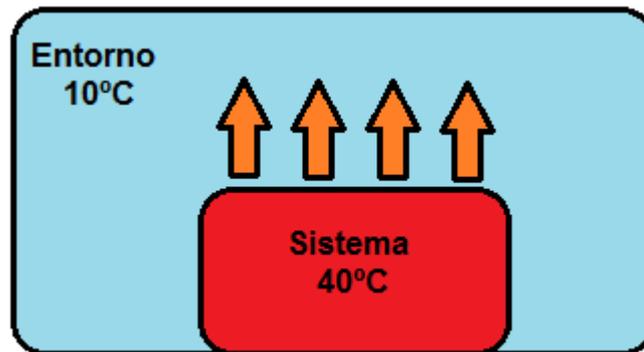


Figura 1.05, Capacidad Calorífica. (QuimiTube, 2003)

1.1.7 Entalpia.

“En el análisis de sistemas abiertos la combinación de las propiedades $U + pV$ se encuentra con frecuencia. Por conveniencia esta combinación de propiedades se define como entalpia y se le asigna el símbolo H :

$$H \equiv U + pV \quad (27)$$

Siguiendo la convención de usar letras mayúsculas para representar propiedades extensivas y minúsculas para la forma intensiva de las propiedades, la entalpia por unidad de masa se define por la ecuación

$$H \equiv u + Pv \quad (28)$$

La entalpia es una función continua de otras propiedades, y por consiguiente también es una propiedad. Debido a que es una propiedad, su valor puede determinarse para una simple sustancia compresible una vez que dos propiedades termodinámicas, intensivas independientes de la sustancia son conocidas, y la variación de entalpia es independiente de la trayectoria seguida entre los dos estados de equilibrio. Igual que la energía interna, la entalpia no puede ser medida de manera directa sino que debe ser referida a otras propiedades medibles.

La ecuación general para la variación en entalpía se deriva en forma similar a la utilizada para la energía interna.

$$dH = T ds + v dP \quad (29)$$

En este caso la entropía se considera como una función de la temperatura y de la presión, $s = s(T, P)$, y la diferencial ds es

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T dP \quad (30)$$

Sustituyendo esta expresión para ds en la ecuación (29) y reagrupando términos produce

$$dH = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + \left[T \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T + v\right] dP \quad (31)$$

Con la entalpía escrita como una función de T y P , la variación en la entalpía para una simple sustancia compresible

$$dH = c_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP \quad (32)$$

Una comparación de los coeficientes de dT y dP revela que:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{c_p}{T} \quad (33)$$

y

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = \left[T \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T + v\right] \quad (34)$$

Con la cuarta relación de Maxwell, la ecuación puede escribirse como:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right] \quad (35)$$

Combinando las diferentes ecuaciones expuestas y deducidas resulta una ecuación general para la variación de entropía para una simple sustancia compresible: (Z Black, 1985)

$$dH = c_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dP \quad (36)$$

1.1.8 Entropía.

“Es una magnitud física que, mediante cálculo, permite determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo. Es una función de estado de carácter extensivo y su valor, en un sistema aislado, crece en el transcurso de un proceso que se dé de forma natural. La entropía describe lo irreversible de los sistemas termodinámicos. La palabra *entropía* procede del griego (έντροπία) y significa evolución o transformación. Fue Rudolf Clausius quien le dio nombre y la desarrolló durante la década de 1850; y Ludwig Boltzmann, quien encontró en 1877 la manera de expresar matemáticamente este concepto, desde el punto de vista de la probabilidad.

La función termodinámica entropía es central para la segunda Ley de la Termodinámica. La entropía puede interpretarse como una medida de la distribución aleatoria de un sistema. Se dice que un sistema altamente distribuido al azar tiene alta entropía. Un sistema en una condición improbable tendrá una tendencia natural a reorganizarse a una condición más probable (similar a una distribución al azar), reorganización que dará como resultado un aumento de la entropía. La entropía alcanzará un máximo cuando el sistema se acerque al equilibrio, y entonces se alcanzará la configuración de mayor probabilidad.

Cero absoluto.

Solo se pueden calcular variaciones de entropía. Para calcular la entropía de un sistema, es necesario fijar la entropía del mismo en un estado determinado. La tercera ley de la termodinámica fija un estado estándar: para sistemas químicamente puros, sin defectos estructurales en la red cristalina, de densidad finita, la entropía es nula en el cero absoluto (0 K) o (-273.16°C).

Esta magnitud permite definir la segunda ley de la termodinámica, de la cual se deduce que un proceso tiende a darse de forma espontánea en un cierto sentido solamente.

Entropía y reversibilidad

La entropía global del sistema es la entropía del sistema considerado más la entropía de los alrededores. (Figura 1.06) También se puede decir que la variación de entropía del universo, para un proceso dado, es igual a su variación en el sistema más la de los alrededores:

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{entorno} \quad (37)$$

Si se trata de un proceso reversible, ΔS (universo) es cero, pues el calor que el sistema absorbe o desprende es igual al trabajo realizado. Pero esto es una situación ideal, ya que para que esto ocurra los procesos han de ser extraordinariamente lentos, y esta circunstancia no se da en la naturaleza.” (Katterinne23, 2014)

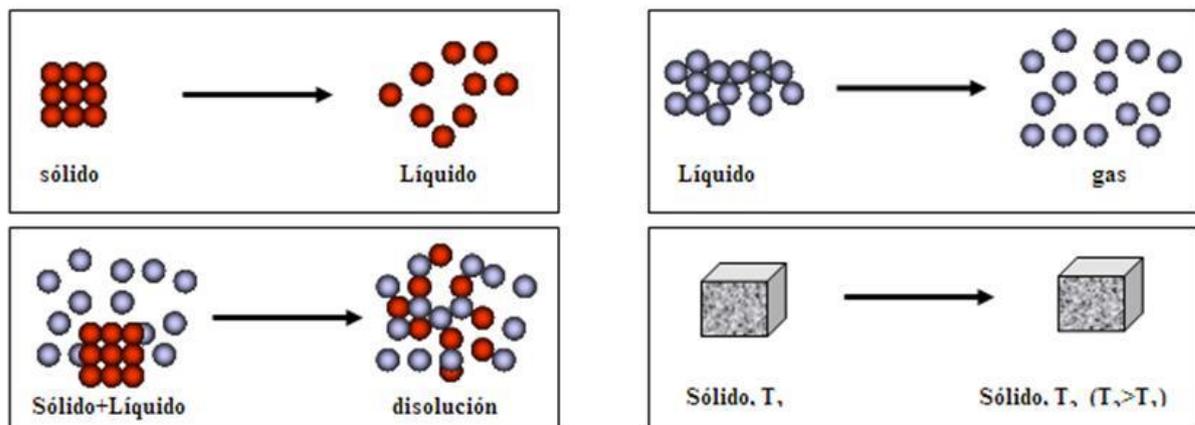


Figura 1.06, Diagrama entropía (Comunicaciones, 2011-2019)

1.1.9 Flujo Másico

Es la cantidad de masa que pasa en un área específica por unidad de tiempo.(Figura 1.07)

$$\dot{m} = \rho AV \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (38)$$

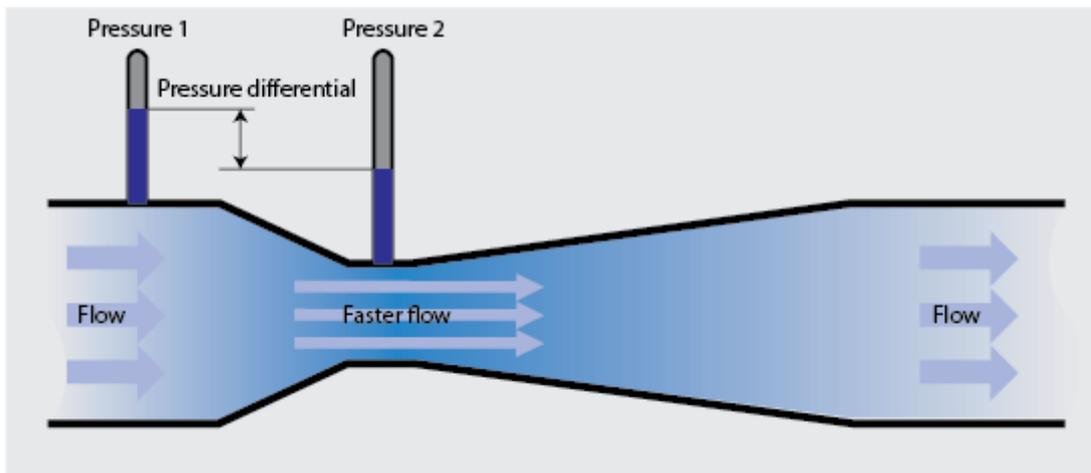


Figura 1.07, Faster Flow (Scientific, 2019)

1.2 IMPORTANCIA DE LA MEDICION DEL FLUJO MASICO

“La medición del caudal es imprescindible en el sector industrial, ya que esta variable resulta esencial en el control de los procesos de producción para evitar fallos en el sistema y también para conseguir la máxima eficiencia energética posible.

Se pueden medir los líquidos, gases y vapores de manera lineal y no lineal, y el flujo volumétrico (Figura 1.08) a la hora de la medición los parámetros como la densidad, la presión, la temperatura pueden influir de manera decisiva”. (QUIMICA, s.f.)

En el laboratorio de térmica y fluidos (L2) de FES-Aragón se pueden encontrar instrumentos para la medición del flujo en las distintas máquinas térmicas, como el rotámetro, placa de orificio, tubo Venturi, medidor del agua y tipo codo.

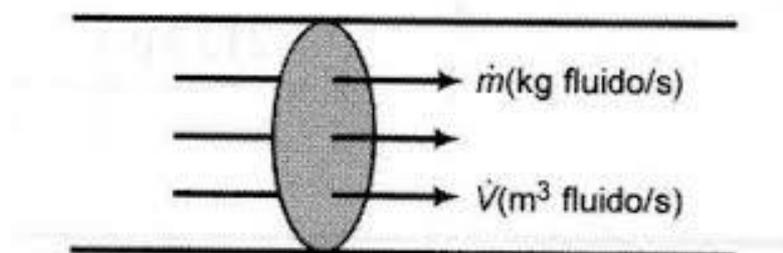


Figura 1.08, Flujo Másico (QUIMICA, s.f.)

1.3 APLICACIONES DEL VAPOR DE AGUA

“A lo largo del tiempo el vapor ha sido utilizado para diferentes situaciones dado que sus propiedades son bastas, se puede encontrar entre las aplicaciones más comunes las siguientes:

- A. Esterilización/Calentamiento
- B. Vapor al vacío
- C. Vapor para Impulso/Movimiento
- D. Vapor Motriz
- E. Atomización
- F. Limpieza/Hidratación
- G. Humidificación

A. Esterilización / Calentamiento

Vapor de presión positiva

El vapor generalmente es producido y distribuido en una presión positiva. En la mayoría de los casos, esto significa que es suministrado a los equipos en presiones mayores a 0 MPaG y a temperaturas mayores de 100°C.

Las aplicaciones de calentamiento para vapor a presión positiva se pueden encontrar en plantas procesadoras de alimentos, plantas químicas, y refinerías solo por nombrar algunas. El vapor saturado es utilizado como la fuente de calentamiento para fluido de proceso en intercambiadores de calor, reactores, reboilers, precalentadores de aire de combustión, y otros tipos de equipos de transferencia de calor.

Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

En un intercambiador de calor, el vapor eleva la temperatura del producto por transferencia de calor, el cual después se convierte en condensado y es descargado a través de una trampa de vapor.

Horno de Vapor

Vapor sobrecalentado entre 200 – 800°C a presión atmosférica es particularmente fácil de manejar, y es usado en los hornos domésticos de vapor vistos hoy en día en el mercado. A continuación se puede ver un horno de vapor en el sector médico:



Figura 1.09, Horno de vapor para esterilización. (Pardell, 2001)

B. Vapor al vacío

El uso de vapor para el calentamiento a temperaturas por debajo de 100°C, tradicionalmente el rango de temperatura en el cual se utiliza agua caliente, ha crecido rápidamente en los últimos años.

Cuando vapor saturado al vacío es utilizado en la misma forma que el vapor saturado a presión positiva, la temperatura del vapor puede ser cambiada rápidamente con solo ajustar la presión, haciendo posible el controlar la temperatura de manera más precisa que las aplicaciones que usan agua caliente. Sin embargo, en conjunto con el equipo se debe utilizar una bomba de vacío, debido a que el solo reducir la presión no lo hará por debajo de la presión atmosférica.

Calentamiento con Calor (Vapor) Latente

Comparado con un sistema de calentamiento de agua caliente, este sistema ofrece rapidez, calentamiento balanceado. (Figura 1.10) Se alcanza rápidamente la temperatura deseada sin ocasionar un desbalance en la temperatura en sí.



Figura 1.10, Sistema de calentamiento con Vapor al Vacío (TLV, 2019)

C. Vapor impulso / Movimiento

El vapor sobrecalentado se usa en las turbinas de vapor para prevenir daños al equipo causados por la entrada de condensado. Sin embargo, en ciertos tipos de plantas nucleares, el uso de vapor a lata temperatura se debe de evitar, ya que podría ocasionar daños al material usado en las turbinas. Se utiliza en su lugar vapor saturado a alta presión. En donde se usa vapor saturado, generalmente se instalan separadores en la línea de suministro de vapor para remover el condensado del flujo de vapor.

El vapor se usa regularmente para propulsión tales como turbinas de vapor. En un esfuerzo por mejorar la eficiencia, se han realizado progresos orientados al uso del vapor a presiones y temperaturas aún mayores. Existen algunas plantas termoeléctricas que utilizan vapor sobrecalentado a 25 MPa abs, 610°C.

Además de la generación de energía, otras aplicaciones típicas de impulso/movimiento son los compresores movidos por turbinas o las bombas, ej. compresor de gas, bombas para las torres de enfriamiento, etc.

Generador de Turbina

La fuerza motriz del vapor ocasiona que los alabes giren, lo que ocasiona rote el rotor que se encuentra acoplado al generador de energía, y esta rotación genera la electricidad. (Figura 1.11)

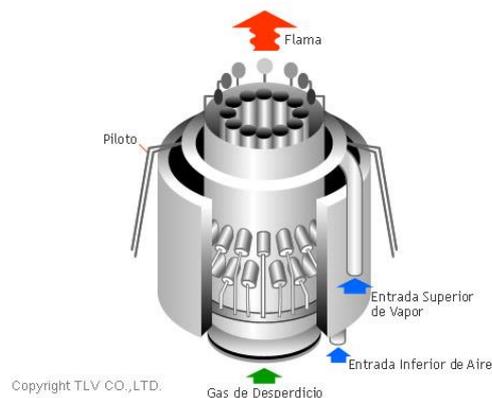


Figura 1.11 Impulso de un Motor (TLV, 2019)

D. Vapor motriz

En un tipo similar de aplicación, el vapor también es el fluido motriz primario para los drenadores de presión secundaria, los cuales son usados para bombear el condensado de tanques receptores ventilados, tanques de flash, o equipos de vapor que experimentan condiciones de Stall. (Figura 1.12)

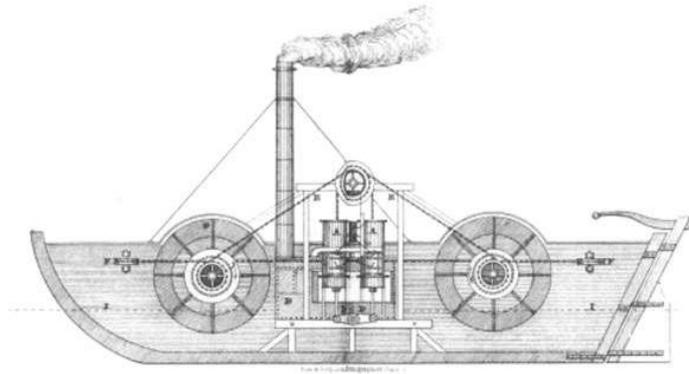


Figura 1.12 Máquina de vapor, (Slope, 2015)

E. Vapor para atomización.

La atomización de vapor es un proceso en donde el vapor es usado para separar mecánicamente un fluido. Por ejemplo, en algunos quemadores, (Figura 1.13) el vapor es inyectado en el combustible para maximizar la eficiencia de combustión y minimizar la producción de hidrocarburos. Calderas y generadores de vapor que utilizan combustible de petróleo utilizaran este método para romper el aceite viscoso en pequeñas gotas para permitir una combustión más eficiente. También los quemadores comúnmente utilizaran la atomización de vapor para reducir los contaminantes a la salida.



Figura 1.13 Automatización en calderas. (Control, 2004)

F. Vapor para limpieza/hidratación

Algunas veces el vapor es usado para hidratar el proceso mientras se suministra calor al mismo tiempo. Por ejemplo, el vapor es utilizado para la hidratación en la producción del papel, así que ese papel que se mueve en los rollos a gran velocidad no sufra rupturas microscópicas. Otro ejemplo son los molinos de bolitas. Continuamente los molinos que producen las bolitas de alimento para animales utilizan inyección-directa de vapor tanto para calentar como para proporcionar contenido de agua adicional al que es suministrado en la sección de acondicionamiento del molino.

La hidratación del alimento lo suaviza y gelatiniza parcialmente el almidón contenido en los ingredientes, resultando en bolitas más firmes. (Figura 1.14)



Figura 1.14 Vapor para limpieza, (Sil, 2015)

G. Vapor para humidificación.

Muchas grandes instalaciones industriales y comerciales, especialmente en climas fríos, utilizan vapor saturado a baja presión como la fuente de calor predominante para calentamiento interior estacional (Figura 1.15). Las bobinas HVAC, normalmente combinadas con humidificadores de vapor, son el equipo usado para el acondicionamiento del aire, para confort interno, preservación de registros y libros, y de control de infecciones. Cuando se calienta el aire frío por las bobinas de vapor, la humedad relativa del aire gotea, y entonces deberá ser ajustada a los niveles normales en adición a una inyección controlada de vapor seco saturado en la línea inferior del flujo de aire". (Ecuador, 2010)



Figura 1.15 Humificadores con vapor (humidificador, 2017)

1.4 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA.

“La ley de la conservación de la energía constituye el primer principio de la termodinámica y establece que la energía no se crea, ni se destruye solo se transforma. Como consecuencia de ello, un aumento del contenido de energía de un sistema, requiere de una correspondiente disminución en el contenido de energía de algún otro sistema.

$$\Delta E_{sistema} + \Delta E_{alrededores} = 0 \dots(39)$$

Hay que tener en cuenta, que debido a que la energía puede cambiar de una forma a otra, una forma de energía perdida por un sistema puede haberla ganado otro en una forma diferente.

Una consecuencia de la ley de la conservación de la energía es la llamada Primera Ley de la Termodinámica, la cual establece que la variación de la Energía interna de un sistema es igual a la suma de la energía transferida en forma de calor y la energía transferida en forma de trabajo.

$$\Delta E = q - W \dots (40)$$

En donde “**q**” es la energía transferida en forma de calor y “**W**” es la energía transferida en forma de trabajo.

Podemos concluir que la variación de energía interna de un sistema, es igual a la suma del intercambio de calor entre el sistema y los alrededores y el trabajo realizado por (o sobre) el sistema (Figura 1.16).

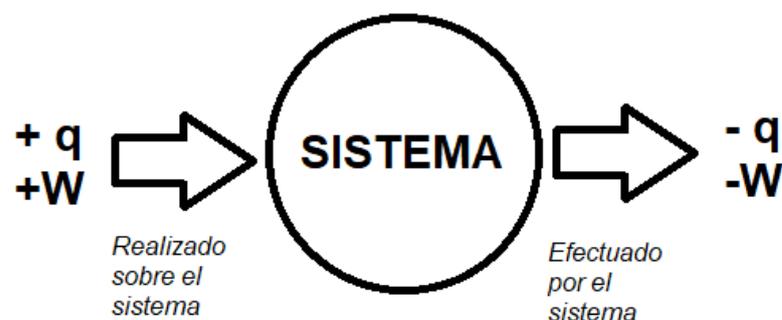


Figura 1.16, Calor y trabajo (Cedròn, Landa, & Robles, 2017)

El calor que ingresa a un sistema y el trabajo realizado sobre el sistema, tendrán signo **(+)**; mientras que el calor liberado por el sistema, o el trabajo realizado por el sistema sobre el entorno, tendrá signo **(-)**.(Cedròn, Landa, & Robles, 2017)

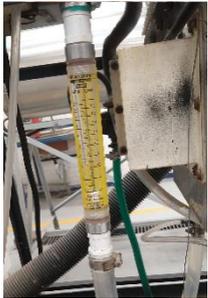
1.5 MEDICIONES DE FLUJO EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS

La medición de flujo másico es ideal, ya que su valor no depende de la presión y temperatura de trabajo.

En el laboratorio existen distintos tipos de medidores de flujo, rotámetro, placa de orificio, tubo Venturi y tipo codo. En la Tabla 1 se muestran algunas de las aplicaciones en el Laboratorio.

Tabla uno. Ejemplos de aplicación de medidores de flujo en L2. Creación propia.

MAQUINA TERMICA	IMAGEN	TIPO DE MEDIDOR DE FLUJO
Compresor de Baja Presión	 <p>1.17 Creación propia.</p>	Placa de orificio
Unidad de Demostración de Refrigeración	 <p>1.18 Creación propia.</p>	Rotámetro
Ciclo Rankine "Cussions"	 <p>1.19 Creación propia.</p>	Rotámetro

<p>Torre de Enfriamiento</p>	 <p>1.20 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>
<p>Unidad de Combustión Continua</p>	 <p>1.21 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>
<p>Bomba de Calor</p>	 <p>1.22 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>
<p>Unidad de refrigeración</p>	 <p>1.23 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>

<p>Tubo de conexión de la caldera Clayton hacia el intercambiador de calor en el ciclo Rankine.</p>	 <p>1.24 Creación propia.</p>	<p>Medidor de flujo tipo codo</p>
<p>Intercambiador de calor marca wards.</p>	 <p>1.25 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>
<p>Bomba de Pistones</p>	 <p>1.26 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>
<p>Turbina</p>	 <p>1.27 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>

<p>Unidad de transferencia dos fases</p>	 <p>1.28 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>
<p>Equipo de gradientes hidráulicos</p>	 <p>1.29 Creación propia.</p>	<p>Medidor del agua</p>
<p>Medición de flujo</p>	 <p>1.30 Creación propia.</p>	<p>Medidor de flujo</p>
<p>Medición de flujo</p>	 <p>1.31 Creación propia.</p>	<p>Rotámetro</p>

1.6 REQUERIMIENTO DE MEDICION DEL FLUJO DE VAPOR PARA EQUIPOS DE LABORATORIO

En equipos de laboratorio e industriales es necesario conocer el flujo másico para determinar el gasto real y de energía que esta circulando por un sistema y de esta manera se puedan desarrollar criterios de análisis, además el estudiante de ingeniería podrá familiarizarse con los equipos que mas adelante encontrara en el ámbito laboral.

Tambien es importante mencionar el funcionamiento de los medidores de flujo que hay en L2, como lo son, el rotámetro, placa de orificio, tubo venturi, medidor de agua y el tipo codo.

Rotámetro:

“Instrumento utilizado para medir caudales, tanto de líquidos como de gases que trabajan con un salto de presión constante. (Figura 1.32) Se basan en la medición del desplazamiento vertical de un “elemento sensible”, cuya posición de equilibrio depende del caudal circulante que conduce simultáneamente a un cambio en el área del orificio de pasaje del fluido, de tal modo que la diferencia de presiones que actúan sobre el elemento móvil permanece prácticamente constante.



Figura 1.32 Rotámetros (WebMeMarketing, 2015)

Placa de Orificio

En una placa perforada que se instala en la tubería, el orificio que posee es una abertura cilíndrica o prismática a través de la cual fluye el fluido. El orificio es normalizado, la característica de este borde es que el chorro que éste genera no toca en su salida de nuevo la pared del orificio. (Figura 1.33) El caudal se puede determinar por medio de las lecturas de presión diferenciales. Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa captan esta presión diferencial.



Figura 1.33. Placa de orificio (Chassan Jalloul, 2015)

Tubo Venturi

Consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor. Si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido contenido en este segundo conducto.

El efecto Venturi se explica por el Principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. (Figura 1.34) Si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección. Por el teorema de la energía si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente.” (Ecuador, 2010)



Figura 1.34. Tubo Venturi (Ecuador, 2010)

Medidor de agua potable.

Son ideales para controlar consumos o posibles pérdidas en las instalaciones internas ya que indican la cantidad de agua potable consumida en litros y los movimientos por leves que sean muestran el paso de agua potable a través del medidor.

El medidor consiste en perillas que aumentan la sensibilidad a través de sensores, además de una guía para aumentar la confiabilidad de los resultados, además de una sonda para controlar el nivel.

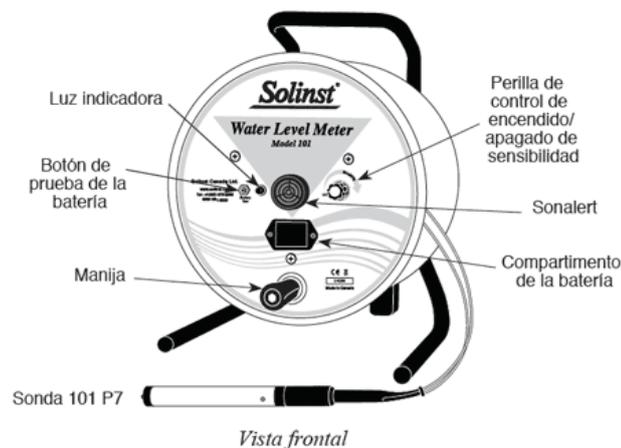


Figura 1.35 Medidor del agua y partes (Solinst, s.f.)

1.7 APLICACIONES DE MEDIDORES DE FLUJO TIPO CODO.

El codo es uno de los medidores de caudal más simples, cuando un fluido circula por el codo de una tubería está sujeto a una aceleración angular, la fuerza centrífuga resultante crea una presión diferencial entre el radio interior y el radio exterior, el flujo en la tubería es proporcional a la raíz cuadrada de dicha presión diferencial.

Dado que en las plantas de procesos se dispone de codos, el costo de estos medidores es muy bajo. Sin embargo, la exactitud es pobre en comparación con otros medidores.

Una longitud recta de apaciguamiento debe preceder el codo, y para resultados más exactos el medidor debería calibrarse en el campo.

Ventajas:

- Muy bajo costo.
- Baja pérdida de carga.

Desventajas:

- Baja precisión.

Aplicaciones:

Sus aplicaciones incluyen aquellas que no requieran una medición rigurosa del caudal, en donde sea de mayor prioridad un bajo costo de implementación. (Freddy & Ronny, 2016)

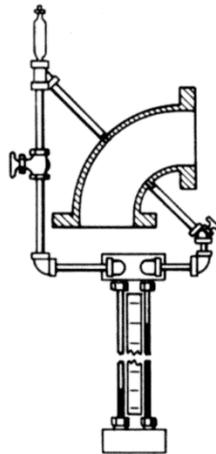


Figura 1.36. Bosquejo Codo (calmansys, 2019)

CAPITULO II *Principio de funcionamiento*

Una vez descritos los conceptos básicos necesarios para el funcionamiento del medidor tipo codo, se dará a conocer de una manera enfocada la teoría complementaria para el medidor diferencial.

El funcionamiento teórico del medidor de flujo tipo codo no es diferente a los usados normalmente en la industria o de manera académica, hablando específicamente de un tubo Venturi o rotámetro, pero dado que el presupuesto y la necesidad de conocer un instrumento de medición diferente al que se usa en el laboratorio de máquinas térmicas de FES- Aragón, se realizó de manera teórico-práctica dicho medidor.

Los medidores de flujo tipo codo no son tan comunes dado que la forma de calibración es compleja, y la teoría sobre ellos es poca, por dichas circunstancias se decidió realizar de manera física el medidor.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MEDIDORES TIPO CODO.

Es uno de los medidores de caudal más simple, las aberturas piezométricas en el lado interno y externo del codo se conectan a un manómetro diferencial. (Figura 2.01) Debido a la fuerza centrífuga en la curva, la diferencia de presiones está relacionada con el caudal. Una longitud recta de apaciguamiento debe preceder el codo. Debido a que la mayoría de las tuberías tienen un codo este puede utilizarse como medidor.

El fluido que pase cerca del radio del codo tendrá una presión ligeramente inferior a la del fluido que pasa en el radio exterior del codo. También se puede observar que la distancia que el fluido viaja en el radio exterior del codo será mayor que la distancia en el radio interior del codo. Se proporcionan dos puertos de baja presión en el lado interior del codo para proporcionar la lectura de presión más baja, y se proporcionan dos puertos en el lado exterior del codo para proporcionar la lectura de mayor presión de modo que se obtenga una mejor media de cada presión determinada. La cantidad de diferencia de presión de este tipo de sensor es muy pequeña y se debe usar un manómetro o sensor de presión diferencial para detectarlo. La diferencia de presión se utiliza en un cálculo para determinar el flujo de fluido. La cantidad de diferencia de presión aumentará cuando el flujo de fluido aumente, y la diferencia de presión disminuirá cuando el flujo de fluido disminuya.

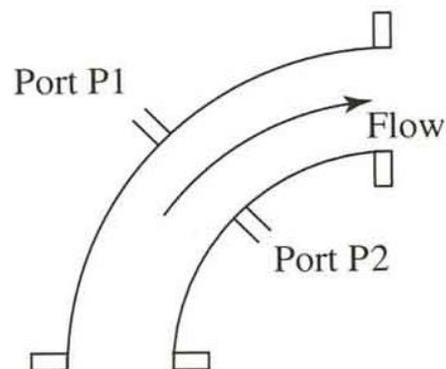


Figura 2.01, Dibujo "elbow flow meter" (Home, 2015)

A medida que el fluido fluye alrededor de un codo, la fuerza centrífuga hace que la presión en la pared exterior sea mayor que la presión en la pared interior. Esta diferencia de presión es proporcional al flujo, y su coeficiente puede estimarse a partir del conocimiento de las dimensiones del codo. Para una medición más precisa, se recomienda un codo (con al menos 10 diámetros de vástago de enderezamiento en línea recta para estabilizar el flujo de remolino - y 5 diámetros abajo). Si se realizan cuidadosamente soldaduras en un codo de entrada y grifos de presión, los codos se calibrarán con una curva de calibración muy estable. (electronics, s.f.)

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS CODOS PARA TUBERÍAS

Los codos se clasifican como accesorios, los cuales son unidos a las tuberías en un proceso determinado, su principal función es cambiar de dirección la dirección del caudal que va pasando a través de esta, también son utilizados como medidores de flujo y de vibración.

Los codos pueden colocarse de dos maneras:

- ❖ Roscados. (Figura 2.02)
- ❖ Soldados. (Figura 2.03)

Los accesorios roscados se usan generalmente en tuberías de 2 ½ pulgadas o menos, dado que por las dimensiones hacen más fácil el uso de herramientas manuales o mecánicas, los tipos de rosca se clasifica en cónica o paralela.

Rosca cónica, tiene una conicidad de 1/16 por pulgada en las roscas externas o internas. Con esta conicidad se fija la distancia que la tubería entra en el accesorio y se asegura un acoplamiento ajustado. Se identifica esta rosca en los dibujos NPT.

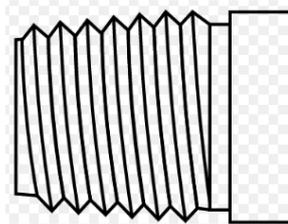


Figura 2.02, rosca cónica (Industrieprodukte, 2015)

Rosca paralela, Se usan en casos muy especiales, además también tienen el mismo número de filetes por pulgada que las cónicas. Se identifican en los dibujos NPTS.

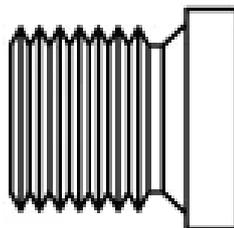


Figura 2.03 rosca paralela (Industrieprodukte, 2015)

Accesorios soldados: Se usan cuando las conexiones deben ser permanentes y en líneas de alta presión y temperatura. Otras ventajas sobre los accesorios de bridas o roscados son: las tuberías soldadas son más fáciles de aislar, tienen menos probabilidad de fuga, además de poder utilizarse anillos de empalme cuando la tubería soldada se debe desmontar periódicamente.

Los codos de tuberías generalmente cuentan con un grado de dirección, los cuales pueden ser: 45°, 60°, 90°, 180°

Existen diversos criterios o características que deben ser tomados en cuenta para la elección de un codo de tubería: (Rojas, 2014)

Diámetro

Es el tamaño o medida del orificio del codo entre sus paredes los cuales existen desde ¼" hasta 120".

Ángulo

Es la existente entre ambos extremos del codo y sus grados dependen del giro o desplazamiento que requiera la línea.

Radio

Es la dimensión que va desde el vértice hacia uno de sus arcos. Según sus radios los codos pueden ser: radio corto, largo, de retorno y extra largo.

De acuerdo a su radio, la mayoría de los codos pueden ser divididos en codos de radio pequeño y codos de radio grande.

Aleación

Es el tipo de material o mezcla de materiales con el cual se elabora el codo.

Junta

Es el procedimiento que se emplea para pegar un codo con un tubo, u otro accesorio y esta puede ser: soldable a tope, roscable, embutible y soldable.

Dimensión

Es la medida del centro al extremo o cara del codo y la misma puede calcularse mediante fórmulas existentes. (Automatización, 2012)

2.3 MATERIALES DE FABRICACIÓN.

Los codos normalmente son hechos del material que están fabricadas las tuberías donde pasa el fluido, cada uno de estos materiales tiene una necesidad diferente dependiendo el fluido que pase por esta, ya que no es la misma especificación en una tubería farmacéutica, a una tubería petrolera; entre las más comunes encontramos los siguientes materiales.

- Hierro fundido
- Cobre
- Acero inoxidable
- Metales no ferrosos
- Plásticos
- Bronce
- Vidrio
- Fibra de vidrio
- PVC

Cabe mencionar, que los más comunes en tuberías de laboratorios escolares son el de bronce, cobre, hierro fundido y acero inoxidable, los demás son fabricados por especificación o dependiendo la industria y la norma específica. (Figura 2.04) (Automatización, 2012)



Figura 2.04 Materiales de codos

2.4 ECUACIONES EMPLEADAS

Ecuaciones Básicas: Al aplicar las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli para flujo incompresible estable, asumiendo que no existen pérdidas de energía a lo largo de la tubería, y que tanto la velocidad como la presión son uniformes a través de cualquier sección considerada, se obtiene:

Continuidad:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q \quad (41)$$

donde Q denota el caudal o flujo volumétrico.

Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + g z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + g z_2 \quad (42)$$

Esta ecuación se escribe también por su fácil interpretación:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (43)$$

en la cual, cada sumando representa a una forma de energía mecánica: Así, Z es la energía potencial por unidad de peso del fluido, $\frac{P}{\gamma}$ es la energía de presión y $\frac{V^2}{2g}$ la energía cinética correspondiente. De esta manera, a la cantidad

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z \quad (44)$$

Se le llama energía mecánica total o altura de "carga" total.

Entonces de la ecuación de Bernoulli,

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right] \quad (45)$$

Y de la continuidad

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \quad (46)$$

Al sustituir y despejar la velocidad teórica, V_2

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (47)$$

En términos de las alturas piezométricas h_1 y h_2 , la velocidad teórica puede escribirse:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{[1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (48)$$

El caudal teórico está dado entonces por

$$Q_{teorico} = V_2 A_2 = A_2 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{[1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (49)$$

La ecuación teórica se ajusta para el número de Reynolds y la razón de diámetro definiendo un coeficiente de descarga empírico como:

$$C_D = \frac{\text{flujo volumétrico real}}{\text{flujo volumétrico teórico}} \quad (50)$$

Mediante el empleo del coeficiente de descarga, el flujo volumétrico real se expresa como

$$Q_{real} = \frac{C_D A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (51)$$

En el caso de los codos usados como instrumentos primarios, la principal diferencia con los otros dispositivos es que la diferencia de presión es radial en vez de axial. Si se aplica la ecuación de Euler a una línea de corriente se tiene:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{V^2}{r} \quad (52)$$

Usando esta ecuación puede obtenerse la velocidad promedio en el codo, la cual se expresa como:

$$V = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho \ln \frac{r_1}{r_2}}} \quad \dots(53)$$

donde, V es la velocidad tangencial promedio en el codo. Entonces el flujo volumétrico en el codo está dado por:

$$Q = \frac{C_c D^2}{4} \sqrt{\frac{1}{\rho \ln \frac{r_1}{r_2}}} \sqrt{\Delta P_r} \quad (54)$$

El coeficiente C_c toma en cuenta la fricción entre el fluido y las paredes del ducto, además las inestabilidades del flujo.

Se establecen las ecuaciones que involucran la calibración de codos para la medición del flujo, entre estas se incluye el número de Reynolds, que es la manera en la que se espera quede el coeficiente de calibración:

$$Q_{real} = Calibracion_{Codo} * A \sqrt{\frac{R}{D} \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (55)$$

$$Q_{ideal} = \frac{masa(m)}{tiempo(t) * densidad(\rho)} \quad (56)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (57)$$

$$Cd = \frac{Q_{ideal}}{Q_{actual}} \quad (58)$$

2.5 NECESIDAD DE MEDIR EL FLUJO MÁSSICO DE VAPOR PARA CALCULAR LAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LA TURBINA DE VAPOR.

Siempre que se trabaja con un fluido, existe la necesidad de realizar un conteo de la cantidad que se transporta, para lo cual utilizamos medidores de flujo, en el laboratorio se cuenta con medidores como la placa de orificio, rotámetro y tubo Venturi los cuales quedan descartados por el tipo de fluido.

- FACTORES PARA LA ELECCIÓN DEL TIPO DE MEDIDOR DE FLUJO TIPO CODO.
 - *Intervalo de medición*
 - *Exactitud requerida*
 - *Pérdida de presión*
 - *Tipo de fluido*
 - Tipo de medición
 - *Calibración*
 - *Medio ambiente*
 - *Lugar de ubicación*
 - *Conocimiento del alumno a diferentes tipos de medidores*

- Características térmicas de una turbina de vapor

La turbina de vapor es una máquina térmica de combustión externa, giratoria. Que transforma la energía cinética del vapor en energía de rotación.(Figura 2.05)

En una caldera se obtiene el vapor haciendo hervir agua. El combustible para calentar el agua puede ser gas, petróleo, carbón o incluso uranio en las centrales nucleares.

El vapor de agua producido es un vapor a mucha presión (alta presión) y con alta velocidad.

A través de unos tubos, llamados toberas, el vapor generado en la caldera se lleva hasta la turbina.

Este vapor conducido por las toberas hasta la turbina, al llegar a la turbina golpea los álabes (paletas) y hace girar la turbina y su eje. El eje de la turbina se llama rotor.

La caldera no forma parte de la turbina propiamente dicha, es un elemento externo a la turbina.

A una fila de álabes se le llama carrete. Una turbina está formada por varios carretes y cada carrete tiene varios álabes.

En definitiva la energía química del combustible utilizado para calentar el agua se transforma en energía cinética (movimiento rotación del eje).

Si el rotor está enganchado, a un dinamo o un generador de electricidad, al moverlo producirá corriente eléctrica.

Una vez que el vapor sale de la turbina ha perdido su fuerza y parte de su calor, pero el vapor que quede a la salida se aprovechara condensándolo (convirtiéndolo de vapor gaseoso a líquido) y se volverá a llevar a la caldera para posteriormente volver a calentarlo y utilizarlo de nuevo en el circuito.

Es un circuito cerrado de vapor-líquido. De esta forma se aprovecha el calor y la presión residual del vapor a la salida de la turbina siendo mucho menores las pérdidas que si se enviara al exterior (a la atmósfera) perdiéndolo. (El ciclo Rankine de FES Aragón es un ciclo abierto, por lo cual si existe está pérdida de energía)

Las pérdidas son menores y el rendimiento de la máquina es mucho mayor al ser un circuito cerrado. (Tecnologica, 2009)

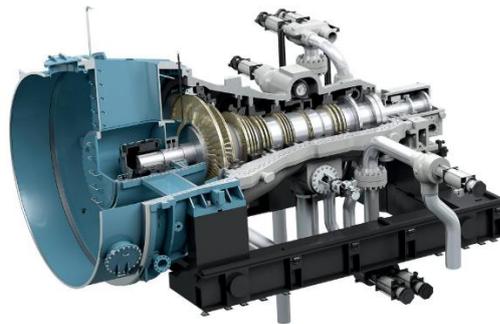


Figura 2.05 Visión interna de una turbina de vapor. (SIEMENS, 2019)

¿Por qué no usar rotámetro, placa de orificio o tubo Venturi?

- Desventajas del rotámetro. (Figura 2.06)
 - Son sensibles a los cambios de viscosidad del fluido.
 - El tubo de vidrio es poco resistente
 - Para rotámetros de más de 4'' el costo es elevado

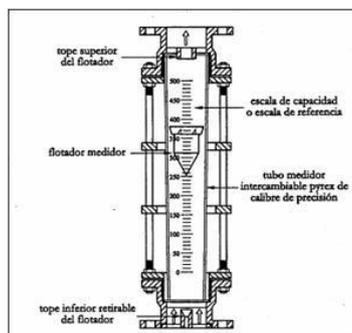


Figura 2.06. Dibujo de Rotámetro (UNEXPO, 2009)

- Desventajas de la placa de orificio. (Figura 2.07)

- Es inadecuada en la medición de fluidos con sólidos en suspensión.
- No conviene su uso en la medición de vapores
- El comportamiento en su uso con fluidos viscosos es errático, pues la placa se calcula para una temperatura y una viscosidad dada
- Produce las mayores pérdidas de presión en comparación con otros medidores. (Freddy & Ronny, 2016)

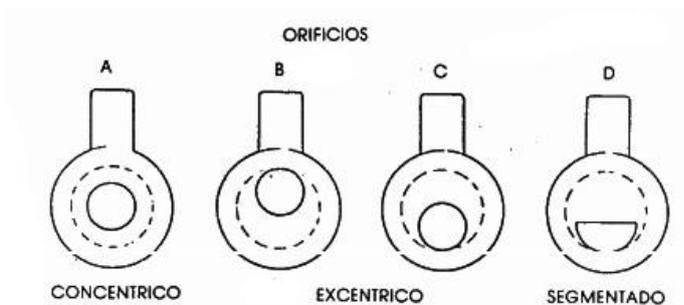


Figura 2.07 Dibujo de Placa de Orificio. (Tecnicos, 2018)

- Desventajas del tubo Venturi. (Figura 2.08)
 - El estándar no cubre los diámetros inferiores a DN 50.
 - Son sensibles a las variaciones en el perfil de velocidades y a las turbulencias.
 - No aptos para aplicaciones higiénicas.

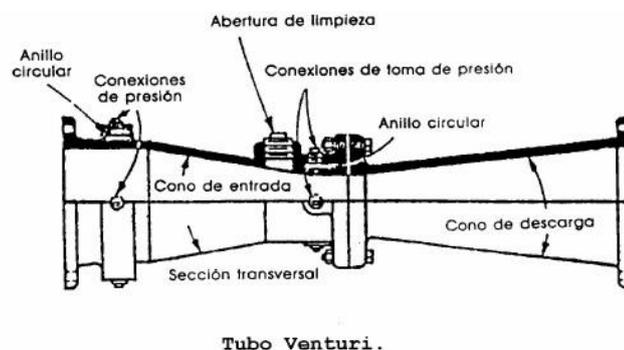


Figura 2.08 Dibujo de Tubo Venturi. (Tecnicos, 2018)

Una vez mencionado las ventajas y desventajas de cada instrumento de medición factible para instalar en el ciclo Rankine se decide fabricar el medidor de flujo tipo codo, dado que sería un instrumento que no está colocado en ninguna maquina térmica del laboratorio de máquinas térmicas de la FES – Aragón

Capítulo 3 Aplicación del medidor tipo codo

Ya explicados los conceptos básicos para la aplicación del medidor de flujo tipo codo y también sus características fundamentales, el siguiente paso sería la fabricación física, la cual se explicara paso a paso a base de imágenes en el presente capítulo, tomando en cuenta la inversión en los materiales, los definitivos y los de prueba, además de mencionar las propiedades físicas de ellos. Se encontrara un desarrollo matemático del coeficiente de calibración el cual es necesario para los alcances finales de este documento.

En la siguiente sección se podrá apreciar a partir de imágenes (3.01- 3.11) y texto el proceso en la fabricación del medidor de flujo tipo codo que se encuentra instalado en el laboratorio de térmica y fluidos, sección maquinas térmicas.

1.- Preparación del codo de menor cedula para prueba (cedula 40)

- Se manejó un codo de menor cedula para hacer las perforaciones de los costados, ya que una de las mayores complicaciones para hacer este tipo de medidor es la calibración en sí, y las tomas de presión tienen que estar céntricas al costado del codo. Si no se elaboraran estando céntricas, los resultados en la medición tienden a tener baja precisión o ser erróneos. En L1 sección –Máquinas y Herramientas- fue donde se hicieron dichas perforaciones, como se muestra a continuación.



Figura 3.01 Codo Creación propia.



Figura 3.02 codo y nipples. Creación propia.

2.- Manguera de silicón.

- Se compró un metro y medio de manguera de silicón quirúrgica dado que dentro de sus propiedades contaba con alta resistencia a la presión y temperatura, además de ser translúcida, lo que es necesario para poder apreciar la diferencia de presiones.
- El inconveniente fue al momento práctico, pues no hubo manera de sujetarla en "U" sin que esta se soltara o tuviera un corte alrededor del nipple, se realizaron las pruebas en el ciclo Rankine, como se puede apreciar en las siguientes imágenes.

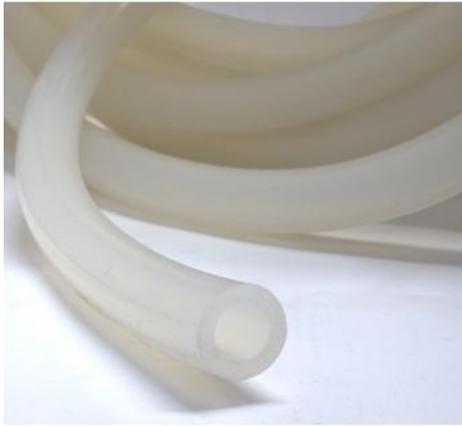


Figura 3.03 Manguera silicón. Creación propia. Figura 3.04 Prueba de manguera Creación propia.

3.- Placa de acrílico.

- Se compró una placa de acrílico de un espesor de $\frac{3}{4}$ in y 68 x 72cm, la cual se cortó a la mitad para poder colocarlas en sándwich y así poder hacer el medidor diferencial.



Figura 3.05 Placa acrílico. Creación propia. Figura 3.06 Placa acrílico 2 Creación propia.

3.1 Proceso de fabricación del medidor diferencial en placa de acrílico.

- Se utilizó rauter para hacer la curva tipo "U" que se necesita en el medidor diferencial



Figura 3.07 Ranura. Creación propia.

- Una de las propiedades del acrílico es que la fricción causa que se opaque, con el movimiento del rauter la curva realizada estaba opaca, así que se puso pulidor para auto



Figura 3.08 Ranura y pulidor. Creación propia.

- Una vez teniendo el acrílico pulido, se coloca la otra placa de acrílico que va servir como tapa y soporte del medidor de flujo, la cual se atornillo con 11 tornillos de alta resistencia, además de colocarle pegamento para acrílico alrededor para evitar fugas.



Figura 3.09 Perforaciones Creación propia.

4.- Colocación de la placa de acrílico y el medidor de codo

- En el codo se colocó 1.5m de tubo flexible de cobre de $\frac{1}{4}$ de pulgada para facilitar la conexión del codo hacia la placa de acrílico, además se realizó una ranura en la placa para dicha conexión, y se colocaron válvulas para la regulación del flujo cuando se requiera la medición diferencial, también se agregó anticongelante en el medidor, pero se descartó por sus propiedades poco favorecedoras en el flujometro, el mercurio era la segunda opción, y actualmente es la substancia que está en el medidor de flujo tipo codo.

- A las placas de acrílico se les fabrico una base de acero a medida que está recubierta por pintura horneada y además para la fácil colocación y visión de dicho medidor.



Figura 3.10 y 3.11 Medidor Tipo Codo. Creación propia.

NOTA: Se hicieron dos pruebas en donde se demuestra que el medidor de flujo si muestra variaciones de presión diferencial, y de ahí se adquirieron los datos para el coeficiente de calibración.

3.1 COEFICIENTE DE CALIBRACIÓN.

El coeficiente de calibración permite tener un régimen laminar y caudal constante, lo que hace posible determinar el caudal practico, y mediante una formula definida compuesta del teorema de Bernoulli se determina el caudal teórico, al comparar estos dos caudales se determina el coeficiente de descarga.

El caudal teórico que se obtuvo a partir de una sustitución en la ecuación de Bernoulli ($Q_{teorico}$), no es igual al caudal real obtenido en forma práctica (Q_{real}), ya que no considera las pérdidas de energía existentes en el Medidor de flujo tipo codo utilizado. Para poder obtener el caudal real se debe multiplicar al caudal teórico, por el coeficiente de descarga (C_d).

$$Q_{real} = C_d (Q_{teorico}) \quad (59)$$

Se necesita una constante para que el alumno tenga un número directo que emplear en la fórmula de la medición del flujo másico.

$$C_k \frac{16x}{\left[(x^2-1) \left(\log \frac{x+1}{x-1} \right) \right]^2} \quad (60)$$

Nota: La manera de obtener un coeficiente de calibración es similar a la de un Venturímetro, con excepción de las grandes pérdidas de energía, por lo tanto la guía que se utilizó en la manera y forma de calibrar fue la de un tubo Venturi. (Jaime A. Pazmiño, 2017)

3.2 ECUACIONES A EMPLEAR.

Las siguientes ecuaciones vienen de una derivación del teorema de Bernoulli el cual supone lo siguiente *“En todo fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento), incomprensible, en régimen laminar de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de todo su recorrido.”*

Para el ensayo teórico del medidor de flujo tipo codo se puede observar la diferencia entre el caudal real y el caudal teórico, pues Q_{real} se toma del ensayo físico que tiene en cuenta las pérdidas área, mientras que $Q_{\text{teórico}}$ está en condiciones ideales.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + k \frac{v_1^2}{2g} \quad (42)$$

$$z_1 \text{ y } z_2 \approx 0 \text{ y } v_1 = v_2 \quad (60)$$

$$k \frac{v^2}{2g} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \quad (61)$$

Reduciendo

$$k \frac{v^2}{2g} = \Delta h \quad (62)$$

Despejando

$$v = \sqrt{\frac{2g \Delta h}{k}} \quad (63)$$

Suponiendo que $Cd = \sqrt{\frac{1}{k}}$ se obtienen las siguientes ecuaciones

Con la siguiente inducción matemática de la ecuación de Bernoulli se deduce lo siguiente:

$$Q_m = CdA\sqrt{2g\Delta h} \leftarrow \text{Caudal con coeficiente de descarga (caudal modelado) ...}(64)$$

$$Q_t = A\sqrt{2g\Delta h} \leftarrow \text{Caudal teorico (65)}$$

$$Q_r = \frac{V}{t} \leftarrow \text{Caudal real (66)}$$

Para el valor del coeficiente empírico

$$x = \frac{R}{r} \quad (67)$$

$$v = k \log \frac{R}{r} \quad (68)$$

$$k = \frac{(R-r)v}{\log \frac{R}{r}} \quad (69)$$

$$C_k = \frac{16x}{[(x^2-1)(\log \frac{x+1}{x-1})]^2} \quad (70)$$

Para obtener la altura de dicho sistema.

$$\Delta h = C_K \frac{V^2}{2g} \quad (71)$$

3.3 FORMA DE CALIBRACIÓN

La manera de calibrar el medidor de flujo tipo codo es muy similar a la de un tubo Venturi, por lo tanto se tienen que tomar en cuenta los siguientes pasos:

- Se tomaran datos del manómetro de la caldera y el radio superior e inferior de curvatura del codo.
- Mantener un caudal constante durante la prueba, tomando en cuenta que el medidor de flujo tipo codo está instalado en la posición final, se tomara nota de la diferencia entre el caudal real y el caudal teórico. Simultáneamente para cada lectura debe anotarse la carga real, estos datos permitirán conocer el caudal teórico y real que circula por el sistema.
- Se emplean las siguientes ecuaciones:

$$Q_m = CdA\sqrt{2g\Delta h} \leftarrow \text{Caudal con coeficiente de descarga} \quad (64)$$

$$Q_t = A\sqrt{2g\Delta h} \leftarrow \text{Caudal teorico} \quad (65)$$

- Con los datos y cálculos anteriores se construye la curva de caudales del medidor de flujo tipo codo, colocando en el eje vertical el caudal real y en el eje horizontal el caudal teórico, ambos en m³/s, se observara que se define una línea recta, se procede a ajustarla con el método de mínimos cuadrados y se obtendrá la pendiente, cuyo valor representa el coeficiente de descarga. Recordando que la ecuación de la pendiente es $y=mx + b$, la cual es similar a la relación entre el caudal real y el caudal teórico $Q_{real} = C_d Q_t + b$, donde la naturaleza del fenómeno corresponde a un valor de Q_r para cada valor de Q_t y por lo tanto para el valor del coeficiente de descarga
- La taza centrifuga de un fluido fluyendo a través de un codo puede ser empleado para crear la diferencial de operación de un flujometro.

$$s = 0.68 \sqrt{\frac{r_b}{D}} \quad (72)$$

- Donde:

r_b = Radio al centro de masa del fluido que atraviesa en el codo desde la curvatura.

D= Diámetro interno del codo al centro de masa del fluido que atraviesa en el codo desde la curvatura.

- Para precisión de la medición, el codo puede ser calibrado desde conocer el flujo o una instalación temporal de un medidor de flujo convencional.

$$Cd = \frac{\text{flujo volumetrico real}}{\text{flujo volumetrico teorico}} \quad (73)$$

$$Cd = \frac{Q_{ideal}}{Q_{real}} \quad (58)$$

3.4 NORMAS DE CALIBRACIÓN

“ISO 9001:1994: Guía necesaria para demostrar y asegurar el sistema de calidad en proyecto, diseño, desarrollo, instalación, fabricación y mantenimiento, de un producto o servicio.

Como indica el primer punto de la norma, es de aplicación a los laboratorios de ensayo incluidos los de calibración, con independencia al sector al que pertenezcan.

1. Los equipos de medida y ensayo utilizados en el laboratorio que tengan un efecto sobre la exactitud o validez de los ensayos se calibraran antes de su puesta en servicio y, posteriormente, cuando sea necesario de acuerdo con el programa de calibración establecido, ya que las características de medida de los equipos se degradan con el paso del tiempo y de uso.

Aunque ISO 17025 incluye muchas de las características y requerimientos ISO 9001, su enfoque es específico en competencia técnica para verificación y calibración. Existen requerimientos para:

- * Trazabilidad de las medidas y conocimiento de la incertidumbre de dicha medida.
- * Estructura y organización de actividades de laboratorio.
- * Calificación y competencia del personal.
- * Esquema de aprobación, firmas (y sellado).
- * Utilización del equipo de medida, prueba y calibración.
- * Informe de resultados.

2. ISO 17025 requiere de un mayor grado de competencia técnica que los requisitos impuestos por ISO 9001. La selección de auditores incluirá personal especialista en disciplinas de metrología o prueba.

Las aportaciones de ISO 17025 y que la diferencian de ISO 9001 son:

- * Requerimientos más prescriptivos.
- * Factores que promuevan independencia en la medida.
- * Designar personal técnico y gerencia competente en temas de calidad.
- * Aspectos de confidencia y protección de propiedad intelectual.
- * Requisitos con mayor alcance específico para evaluar Identificar y definir metodología para asegurar consistencia de la calibración.

- * Requisitos de ambiente y plantel físico en donde se realizan la medida y la calibración.
- * Aspectos de organización, sanidad y limpieza en las premisas de actividades.
- * Requisitos específicos para segregar, mantener, manipular y almacenar.
- * Medida y trazabilidad a patrones de calibración reconocidos (internacionalmente) y extender a medida, pruebas y ensayos según sea apropiado.
- * Metodología consistente para pruebas, ensayos y calibración.
- * Datos e información relevante a los requerimientos contractuales (de cliente regulatorio y esquema industrial).
- * Controles estrictos sobre procesos y actividades incluidos cuando se contraten las mismas.
- * Registros de los aspectos previamente indicados

3. Calibración, de acuerdo con el vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología (VIM), es aquel conjunto de operaciones con las que se establece, en unas condiciones especificadas, la correspondencia entre los valores indicados en el instrumento, equipo o sistema de medida, o por los valores representados por una medida materializada o material de referencia, y los valores conocidos correspondientes a una magnitud de medida o patrón, asegurando así la trazabilidad de las medidas a las correspondientes unidades básicas del Sistema Internacional (SI) y procediendo a su ajuste o expresando esta correspondencia por medio de tablas o curvas de corrección.

De esta definición se deduce que para calibrar un instrumento o patrón es necesario disponer de uno de mayor precisión que proporcione el valor convencionalmente verdadero que es el que se empleará para compararlo con la indicación del instrumento sometido a calibración. Esto se realiza mediante una cadena ininterrumpida y documentada de comparaciones hasta llegar al patrón, y que constituye lo que llamamos trazabilidad.

Así pues, la calibración puede implicar simplemente esta determinación de la desviación en relación un valor nominal de un elemento patrón, o bien incluir la corrección (ajuste) para minimizar los errores.

4. Trazabilidad, se ha indicado que la trazabilidad es la propiedad del resultado de una medida por la que este resultado se puede relacionar o referir a los patrones o referencias del más alto nivel y a través de éstos a las unidades fundamentales del SI por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones.

Cuando la cadena se recorre en sentido contrario, es decir, de arriba hacia abajo, se habla de diseminación de la unidad. Así se tiene una estructura piramidal en la que en la base se encuentran los instrumentos utilizados en las operaciones de medida corrientes de un laboratorio. Cada escalón o paso intermedio de la pirámide se obtiene del que le precede y da lugar al siguiente por medio de una operación de calibración. A cada escalón se encuentran instrumentos y patrones que a su vez actúan como patrones o referencias de los siguientes.

Como cada comparación de la cadena introduce nuevas causas de error que originan nuevas contribuciones a la incertidumbre del resultado, que se suman a la incertidumbre con la que se conoce el valor del patrón de partida, se precisa que la incertidumbre de los patrones primarios sean muy inferiores a los necesarios en las aplicaciones ordinarias. Esta agrupación piramidal es lo que se denomina plan de calibración y validación, que asegurará que todos los equipos y patrones tengan la adecuada trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.

La pregunta que se plantea al llegar a este punto:

¿Que ha de contener un certificado de calibración?

El contenido mínimo de un certificado de calibración es:

- * Identificación del equipo calibrado.
 - * Identificación de los patrones utilizados y garantía de su trazabilidad.
 - * Referencia al procedimiento o instrucción de calibración utilizado.
 - * Condiciones ambientales durante la calibración.
 - * Resultados de la calibración.
 - * Incertidumbre asociada a la medida.
 - * Fecha de calibración.
 - * Firma (o equivalente) del responsable de la calibración
- Aparte de lo anteriormente detallado, ha de contener cualquier otro requisito especificado por el cliente en el contrato o pedido.”

3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.

En la realización física del flujometro se tomaron en cuenta diferentes materiales y sustancias y dado que la inversión se hizo (Anexo 1, tabla de gastos), por sus propiedades teóricas.

Se dará una explicación de ellas y en la “Tabla dos: Comparación de los materiales utilizados” se hace una explicación breve del porque fueron descartados algunos de los materiales y sustancias.

3.5.1 Descripción de las propiedades de los materiales descartados.

Los únicos materiales que no se utilizaron fueron la manguera de silicón (Figura 3.12) y el anticongelante para auto (Figura 3.13), a pesar de eso es importante mencionar por qué se realizó la compra de ellos, las propiedades teóricas que manejan dichos materiales fue lo que llevo a la inversión en ellos, por lo cual es necesario hacer una breve mención de sus propiedades.

Manguera de silicón

- Excelente resistencia a los cambios climáticos y al envejecimiento.
- Estabilidad térmica.
- Alta repelencia al agua.
- Altas propiedades de adhesión.
- Capacidad para soportar la exposición a condiciones atmosféricas por periodos prolongados de tiempo.
- Resistencia a los rayos ultravioleta del sol.
- Volatilidad extremadamente baja.
- Inerte – no reacciona con la mayoría de los materiales.
- Resistencia química.
- Elasticidad, maleabilidad y flexibilidad duradera.
- Excelentes propiedades de aislamiento eléctrico.
- Resistencia a la tracción.
- Propiedades antiespumantes.
- Resistencia microbiana.



Figura 3.12 Manguera (ozono, 2018)

Anticongelante para auto.

- Baja temperatura de ebullición
- Fácilmente manejable en estado líquido
- Alto calor latente de vaporización
- No inflamable, no explosivo, no tóxico. Químicamente estable
- No corrosivo
- Moderadas presiones de trabajo
- Fácil detección y localización de pérdidas
- Inocuo para los aceites lubricantes
- Bajo punto de congelación
- Alta temperatura crítica
- Moderado volumen específico de vapor
- Bajo costo



Figura 3.13 Anticongelante (Euromaster, 2005)

3.5.2 Descripción de las propiedades de los materiales finales.

Hubo materiales que fueron desde un principio los únicos que se manejaron, como los accesorios de bronce y el tubo de cobre, y otros que tuvieron que ser remplazados en el proyecto como lo fueron el refrigerante por mercurio y la manguera de silicón por una placa de acrílico.

Placa de acrílico (Figura 3.14):

El acrílico, es una de las tantas variantes del plástico. La gracia del acrílico, es que puede permanecer largo tiempo, en la intemperie, sin sufrir daño alguno. Por lo mismo, es un material, largamente utilizado en las construcciones. Debido principalmente, a lo antes señalado, como al hecho de que es un tipo de plástico, más flexible de lo normal. Lo que lo hace aún más fácil de trabajar

Dentro de sus características técnicas, podemos señalar, que el acrílico soporta largas horas a la exposición de los rayos ultravioletas, sin dañar su estructura y los colores del mismo

Por otra parte, el acrílico es muchísimo más resistente que el vidrio. Con lo cual, no es fácil que se rompa y, de hacerlo, no se astilla, de esta manera no se corren

riesgos de lesiones, debido a cortes producidos por su quebradura. Por otra parte, para los más ecologistas, el acrílico es sumamente útil, ya que puede ser reciclado, en un 100%. (MORALES, s.f.)

- Resistencia al Impacto
- Transmisión de Luz
- Peso
- Resistencia Química
- Resistencia a la Intemperie
- Estabilidad Dimensional
- Conductividad Eléctrica
- Propiedades relativas a su termoformado
- Propiedades relativas a su moldeo en frío

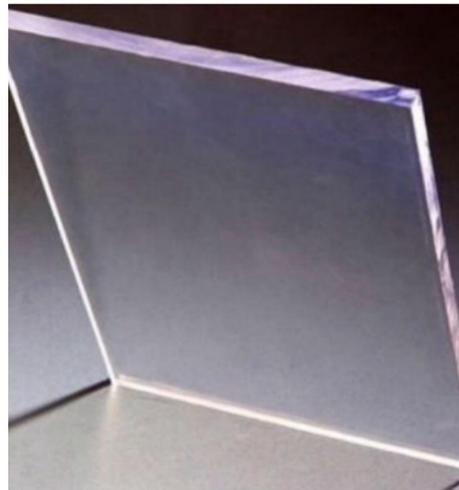


Figura 3.14 Acrílico (MORALES, s.f.)

Mercurio

El mercurio, también llamado azogue, es un elemento químico en la tabla periódica que tiene el símbolo Hg (del griego hydrargyrum, para plata acuosa (o líquida)) y el número atómico 80. Es un metal de transición pesado y plateado, y además uno de los dos únicos elementos que son líquidos a temperatura ambiente (el otro es el bromo). El mercurio se utiliza en termómetros, barómetros y otros aparatos científicos. (Minerales, 2009)

- Formula: Hg.
- Clase: Elementos nativos.
- Sistema: Ninguno.
- Dureza: No medible.
- Fractura: Ninguna.
- Exfoliación: Ninguna.
- Brillo: Metálico.
- Raya: Ninguna.



Figura 3.15 Mercurio (Minerales, 2009)

Hierro Negro

El hierro puro es un metal blanco plateado que es fácil de trabajar y dar forma y es lo suficientemente suave como para cortarlo con un cuchillo. Se puede comprimir en láminas y estirar en alambres.

Como la mayoría de los metales, el hierro conduce la electricidad y el calor muy bien y es muy fácil de magnetizar.

El hierro puro es demasiado blando y reactivo para usarlo en alguna aplicación, por lo que la mayor parte del «hierro» que tendemos a utilizar para fines cotidianos es en realidad en forma de aleaciones de hierro: hierro mezclado con otros elementos (especialmente carbono) para hacer formas más fuertes y resistentes del metal, incluido el acero. (10, 2019)



Figura 3.16 Fierro (10, 2019)

Tubo flexible de cobre

El cobre, por sus características, es sin duda el metal más apropiado para la fabricación de tubos para toda clase de aplicaciones, tanto en la construcción como en la industria. Como materia prima se utiliza cobre desoxidado al fósforo, Cu-DHP, con una pureza de cobre más plata igual o superior al 99,90%. (cobre, 2000)

Como características más destacadas del tubo de cobre, se pueden reseñar las siguientes:

- Alta resistencia a la corrosión.
- Pequeñas pérdidas de carga, debido a una superficie interior lisa. Inalterable con el paso del tiempo, en sus características físicas y químicas.
- Permite montajes rápidos y fáciles, utilizando diversos tipos de accesorios, tales como los soldados por capilaridad, a compresión, y uniones en frío.
- Excelente comportamiento con la gran mayoría de los materiales de construcción habituales y de los fluidos a transportar.
- Soporta elevadas presiones interiores, permitiendo el uso de tubos de pared delgada.



Figura 3.17 Tubo de cobre (Ecuador, 2010)

Accesorios de bronce

El bronce 630 es un bronce al Níquel Aluminio siendo una excelente opción para aplicaciones donde lleva cargas pesadas, una fuerte abrasión, alta fricción y que esté expuesta a la corrosión. El Níquel en ésta aleación incrementa la fuerza de éste bronce sin disminuir su ductilidad, resistencia a trabajos pesados y resistencia a la corrosión.

Tiene buena resistencia al ácido sulfúrico, hidroclicórico y a otros ácidos no oxidantes así como el agua salada. Su superior erosión y propiedades específicas facilitan su aplicación en bombas y hélices. En conjunto, las propiedades del bronce 630 lo hacen adecuado para dar servicio dentro de motores de combustión interna y aplicaciones donde se encuentre en contacto con químicos. (La Paloma Compañía de Metales, 2000)

No adecuado para ser trabajado en frío. La temperatura ideal para ser trabajado varía entre un rango de 760 a 900 C.

Algunos usos:

- Válvulas de escape.
- Agarradera de bombas.
- Casquillo de cerraduras.
- Bujes de trenes de aterrizaje.
- Cojinetes.
- Bujes del alerón.
- Bujes del puntal.
- Guías de válvulas.
- Asiento de válvulas.
- Intercambiador de calor de cabezales.
- Hélices para barcos, tuercas y ejes.
- Engranajes, levas, etc.



Figura 3.18 Bronce (Minerales, 2009)

Tornillo, tuercas y rondanas de alta resistencia.

Los tornillos de alta resistencia, o también llamados pretensados, se designan por la sigla TR, o alternativamente también por la sigla M (métrica), seguidos, al igual que los otros tipos de tornillos, por el diámetro d de la caña y la longitud l del vástago, seguidos del número que especifica la calidad del acero empleado en la fabricación del tornillo.

Las uniones donde se han empleado tornillos pretensados trabajan transmitiendo los esfuerzos por descompresión entre las superficies y por rozamiento. Por tanto, en estas uniones implica la existencia de un estado de compresión entre las superficies unidas, que junto al coeficiente de rozamiento entre ellas, hace que se impida que exista cualquier desplazamiento relativo.

Las uniones ejecutadas con tornillos de alta resistencia, TR , son uniones que resultan más rígidas, menos deformables y con mejor comportamiento en estado límite de servicio, que las realizadas con tornillos ordinarios o calibrados.

En estas uniones, al transmitirse los esfuerzos por rozamiento entre las superficies, es muy importante aplicar el momento de apriete adecuado para cada tornillo.

(Ingemecánica, s.f.)



Figura 3.19 Tornillos (Ingemecánica, s.f.)

Cada uno de los materiales finales es importante para el desarrollo de las ecuaciones, dado que los cálculos son dependientes de los materiales utilizados.

En la siguiente tabla se hace una comparación breve de los materiales que se utilizaron durante la fabricación del medidor tipo codo en el laboratorio, explicando así cuales fueron los materiales definitivos.

Tabla dos. Comparación de los materiales utilizados. (instrumentos de medición)

Materiales de prueba	Materiales finales	Comparación y resultados
Codo 90° hierro negro, cedula 40	Codo 90° hierro negro, cedula 80	El codo de cedula 40 sirvió para hacer una práctica de perforación en él, pues como ya se mencionó antes la calibración depende del ángulo de las ranuras, una vez practicado la ranura que se iba a hacer en el codo, se dispuso a hacerlo en el codo de cedula 80, que es la que maneja la tubería del ciclo Rankine en la sección donde se colocó el flujometro.
Anticongelante	Mercurio	La primera sustancia que se vertió en las placas de acrílico del medidor de flujo fue anticongelante para auto, a pesar de tener propiedades favorables para resistir altas temperaturas, la complicación llegó cuando el condensado se mezcló con el anticongelante, provocando a su vez que las ranura tipo "U" se encontrara llena evitando percibir la medición diferencial. La sustancia definitiva fue mercurio, a pesar de que la diferencia de presión se percibe en milímetros resulta aceptable para realizar la medición diferencial.
Manguera de silicón $\frac{1}{4}$ de diámetro con 1.5m de longitud	Placa de acrílico $\frac{3}{4}$ de pulgada, ranurada a $\frac{1}{4}$ en una cara en forma de U	Aunque el silicón y el acrílico, tienen una resistencia a la alta temperatura similar, la forma de colocación fue lo que hizo que el silicón quedara descartado.

Capítulo 4 Resultados obtenidos.

Los materiales que se utilizaron son de suma importancia en el desarrollo de fórmulas obtenidas, pues los datos que se tienen son a partir de los resultados prácticos del medidor de flujo tipo codo.

A lo largo de este capítulo se explica el desarrollo práctico y la manera en la que se emplea el funcionamiento termodinámico mediante fórmulas matemáticas ya empleadas en el medidor de flujo tipo codo en el ciclo Rankine del laboratorio de FES Aragón.

4.1 REGISTRO DE LA MEDICIÓN DIFERENCIAL EN MILÍMETROS COLUMNA DE AGUA.

La columna de agua es el instrumento de medición de presión más antiguo, y de los más exactos en los alcances de 500Pa a 200kPa. La selección de la configuración de la columna y del fluido manométrico permite la medición de todos los tipos de presión: absoluta, barométrica, bajo vacío, vacío negativo, relativa y diferencial. Las ventajas de este instrumento como patrón en laboratorios primarios (industria), así como su diseño, fabricación y uso, están al alcance de los laboratorios secundarios (sector educativo). La adecuada selección de la configuración del instrumento, la capacidad de medición auxiliar, el claro conocimiento de las magnitudes de influencia que afectan y ayudan a su operación y a la calibración del mismo; hacen del medidor de flujo tipo codo un instrumento muy versátil y capaz para fines prácticos de enseñanza en el laboratorio dado que se hizo una investigación minuciosa en la selección de materiales y conceptos básicos.

La columna de agua es el instrumento de medición primaria de presión más difundido y simple, esas características permiten que pueda ser fabricado para su uso como patrón de referencia de alta precisión para la calibración de manómetros. (G. Aranda)

Los puntos más importantes a considerar al momento de diseñar y fabricar este instrumento, es que el que se adaptó en laboratorio de máquinas térmicas, FES-Aragón, fue hecho de acrílico, lo cual para fines didácticos en el momento de la práctica para el estudiante será útil, dado que el flujometro es transparente, no hay demasiadas perdidas de energía, tiene válvulas de control (off/on) y se cuenta con fórmulas desarrolladas para el conocimiento y aprendizaje.

En la siguiente tabla se dan a conocer la conversión de columna de mercurio a columna de agua. Dado que la caldera del ciclo Rankine donde se adaptó el medidor de flujo tipo codo se encuentra en reparación, las pruebas hechas en el flujometro fueron realizadas a partir de los resultados que arrojó la columna de mercurio.

Suponiendo que la columna de agua podría reaccionar de manera favorable en el medidor diferencial, se hizo el cálculo matemático para la conversión de columna de mercurio a columna de agua en centímetros y en metros, los que se manejaron en todos los cálculos fueron en metros, (las conversiones hechas se podrán encontrar en el anexo C “memoria de cálculo”) el resultado obtenido fue el siguiente:

Tabla tres. Conversión de columna de mercurio a columna de agua

Columna de Mercurio (mHg)		Columna de agua (mca)	
cm	m	cm	M
0.1	0.001	1.3	0.013
0.2	0.002	2.7	0.027
0.3	0.003	4.07	0.0407
0.4	0.004	5.43	0.0543

Se encuentran dos graficas que contemplan dos diferentes sustancias, en la gráfica uno maneja mercurio y la dos agua.

En la siguiente gráfica, se puede ver que aunque el incremento de la columna de mercurio en la medición diferencial si existe y además es constante, es poco perceptible, dado que en carga máxima el condensado que pasaba por el tubo da una medición diferencial de 0.004mHg, aun con esta altura mínima se pudieron realizar todos los cálculos necesarios para este documento.

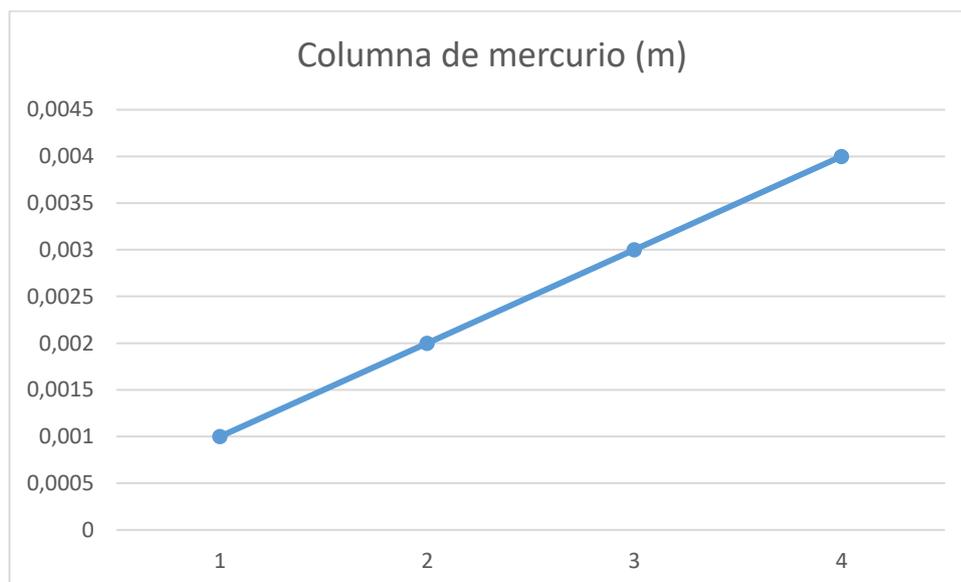


Figura 4.01 . Columna de mercurio. Creación propia.

Como se puede apreciar en la siguiente grafica el incremento de la altura en la medición diferencial también es constante, pero dicha medición es más fácil de visualizar dado que la altura máxima en carga máxima del condensado sería de 0.0543mca. Suponiendo que el agua fuese posible utilizarla los resultados que arrojaría serían los siguientes:

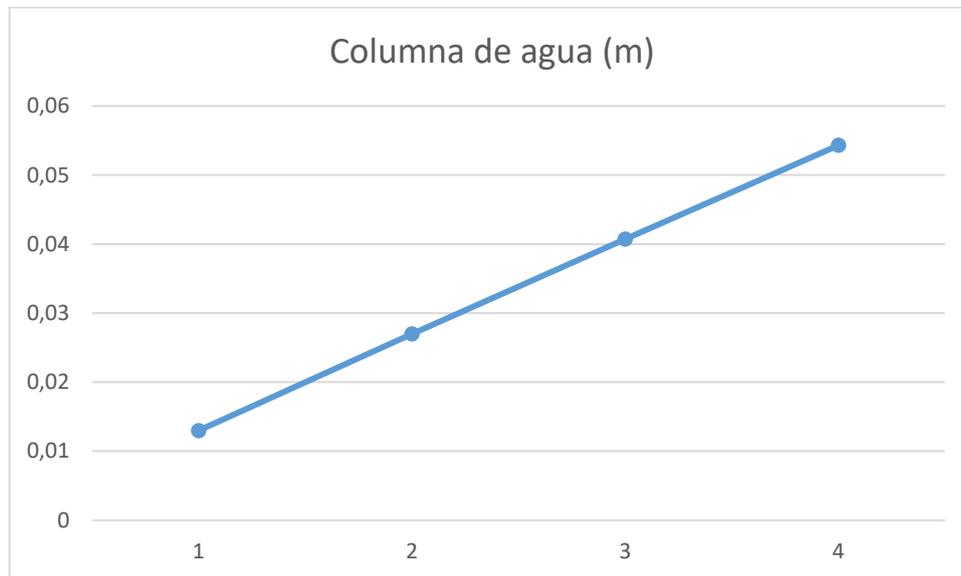


Figura 4.02. Columna de agua. Creación propia.

NOTA: Los cálculos en columna de agua se realizaron de una manera teórica solamente, pues dada la reparación de la caldera, no se podrían realizar de manera física, sin embargo están incluidos, por si en algún momento se decidiera realizar el cambio de sustancia.

4.2 EQUIVALENTE DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL.

La medición de presión diferencial demanda fuertemente el uso de columnas de mercurio, agua o aceite, en el medidor de flujo tipo codo (Figura 1.04) que se instaló en L1 de Fes Aragón, utilizó anticongelante en un principio, pero dado que se mezclaba con el condensado no fue viable utilizarlo, el mercurio se tomó como última opción pues en los cálculos teóricos la medición diferencial se daba en milímetros, y se esperaba que fuera más fácil de apreciar visualmente la diferencia de presión, pero al final se decidió que esta fuera la sustancia definitiva que manejaría el flujometro, no sin antes dejar bases factibles para poder realizar pruebas con agua, aunque esta no llegase a funcionar, ya sea porque se mezclara con el condensado o no resistiera la temperatura, se hizo un cálculo teórico.

La configuración de manómetro más recomendada para la calibración de tubos Venturi y tipo codo es la columna tipo "U", como se puede apreciar en la imagen 4.03 con mercurio o agua, en función del alcance de medición, esta columna presenta una ventaja de que es posible medir la altura de la columna directamente en los dos meniscos, además como se tienen materiales que no se afectan por el contacto prolongado con el agua o mercurio es posible cambiar sin mayor problema el fluido manométrico. (G. Aranda)



Figura 4.03, Medidor de flujo tipo codo Creación propia.

4.3 REGISTRO DE VOLUMEN DE CONDENSADO EN UNIDAD DE TIEMPO.

El medidor de flujo tipo codo no se encuentra funcionando dado que tiene reparación de tipo remedial el ciclo Rankine en donde fue instalado, antes de dichas reparaciones se hicieron dos pruebas donde se pudo obtener carga máxima y mínima del condensado, diámetro interno y externo del codo, la presión diferencial en los meniscos del flujometro y demás cálculos necesarios (Anexo B “memoria de cálculo”).

Estas pruebas constaron de cuatro tiempos donde los resultados de la carga máxima y mínima fueron constantes, dichas pruebas son físicas porque dependiendo la carga se tienen resultados reales y teóricos, dado que las pruebas teóricas contemplan condiciones ideales, y las reales perdidas en el sistema.

En la tabla cuatro se tienen el registro de la carga máxima a la mínima del condensado.

Tabla cuatro. Registro de cargas Creación propia.

Registro de Cargas kg/s		
Masa (kg)	Tiempo (s)	Carga (kg/s)
15.5	66	0.2348
15.5	64	0.2422
14.1	50	0.282
14	33	0.4242

NOTA: Las mediciones se realizaron antes de la reparación de la caldera Clayton, algunos valores podrían variar dependiendo de las condiciones de la reparación que se efectúe, sin embargo las pruebas que se realizaron fueron suficientes para obtener resultados representativos.

4.4 COMPARACION ENTRE LA PRESION DIFERENCIAL Y EL VOLUMEN DEL CONDENSADO.

Antes de la comparativa de las sustancias mercurio y agua se tiene que tomar en cuenta que los datos teóricos con respecto al agua pueden variar, pues en la práctica las condiciones reales son el factor fundamental para que el agua sea factible de utilizar. Comparando la columna de agua y la columna de mercurio para el volumen de vapor saturado que se obtiene, se puede hacer la comparación siguiente:

Tabla cinco. Comparaciones de sustancias. Creación propia.

Columna de Mercurio	Columna de Agua
Los datos que se obtienen en la medición diferencial, ya tienen pruebas fundamentadas.	Los datos que se obtienen solo son una hipótesis.
Alta resistencia a altas temperaturas +100°C.	Su temperatura de ebullición varía de 92°C. a 94°C
Sustancia toxica	Sustancia universal, no toxica
No crea daños en el material (Acrílico, cobre, hierro negro)	No crea daños en el material (Acrílico, cobre, hierro negro)
Utilizada en la industria para manómetros diferenciales, cuando las presiones son mayores a 500Pa	Substancia utilizada en la industria para manómetros diferenciales en un límite de 500Pa
La medición diferencial a carga máxima del condensado es de 0.004mHg. Poca percepción visual en la diferencia de alturas.	La medición diferencial a carga máxima del condensado es de 0.0543. Buena percepción visual en la diferencia de altura

Una vez obteniendo los registros de carga máxima y mínima se tomara en cuenta las siguientes conversiones, de columna de mercurio a columna de agua de acuerdo al volumen del condensado.

Tabla seis. Comparación en diferencia de altura Creación propia.

Carga kg/s	Δh columna de Hg (m)	Δh columna de agua (m)
0.2348	0.001	0.013
0.2422	0.002	0.027
0.282	0.003	0.0407
0.4242	0.004	0.0543

4.5 OBTENCIÓN Y APLICACIÓN DEL COEFICIENTE DE CALIBRACIÓN.

Para precisión de la medición, el codo puede ser calibrado desde conocer el flujo o una instalación temporal de un medidor de flujo convencional.

En donde se aplican las siguientes formulas:

$$Cd = \frac{\text{flujo volumetrico real}}{\text{flujo volumetrico teorico}} \quad (73)$$

$$Cd = \frac{Q_{ideal}}{Q_{real}} \quad (57)$$

El coeficiente de calibración se obtuvo a partir de una serie de iteraciones en donde se obtuvo un promedio (Anexo "C" memoria de cálculo), el cual funcionara como coeficiente de calibración del medidor de flujo tipo codo, en donde este no llega a tener un margen de error del 1% en punto máximo.

$$C_d = 0.6474$$

4.6 CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR TIPO CODO.

Como se mencionó anteriormente en el capítulo tres, para calibrar un codo se tienen que seguir los siguientes pasos:

- Se tomaran datos del manómetro de la caldera y el radio superior e inferior de la curvatura del codo.

Presión de la caldera:

$$P = 7 \text{ kg/cm}^2 = 686466 \text{ Pa} = 686466 \text{ N/m}^2 \quad (74)$$

Radio superior de la curvatura del codo:

$$R = 0.0127 \text{ m} \quad (75)$$

Radio inferior de la curvatura codo:

$$r = 0.00635 \text{ m} \quad (76)$$

- Mantener un caudal constante durante la prueba, tomando en cuenta que el medidor de flujo tipo codo está instalado en la posición final. Tomar nota de las cargas resultantes.

Tabla siete. Cargas (kg/s) Creación propia.

Carga (kg/s)
0.2348
0.2422
0.282
0.4242

- Se emplean las siguientes ecuaciones:

$$Q_m = CdA\sqrt{2g\Delta h} \leftarrow \text{Caudal con coeficiente de descarga (Caudal modelado)} \quad (64)$$

Tabla ocho. Q_m Hg Creación propia.

Caudal con coeficiente de descarga con Mercurio
(m^3/s)
1.832×10^{-4}
2.596×10^{-4}
3.178×10^{-4}
3.664×10^{-4}

Tabla nueve. Q_m H₂O. Creación propia.

Caudal con coeficiente de descarga con Agua
(m^3/s)
6.6106×10^{-4}
6.7795×10^{-4}
1.1697×10^{-3}
1.3511×10^{-3}

$$Q_t = A\sqrt{2g\Delta h} \leftarrow \text{Caudal teorico} \quad (65)$$

Tabla Diez. Q_t Hg. Creación propia.

Caudal teórico con Mercurio
(m^3/s)
2.83×10^{-4}
4.01×10^{-4}
4.91×10^{-4}
5.66×10^{-4}

Tabla Once. Q_t H₂O. Creación propia.

Caudal teórico con Agua
(m^3/s)
1.0211×10^{-3}
1.0472×10^{-3}
1.8067×10^{-3}
2.0869×10^{-3}

- Con los datos y cálculos anteriores se construye la curva de caudales del medidor de flujo tipo codo como se puede apreciar en las figuras 4.04 a la 4.07:

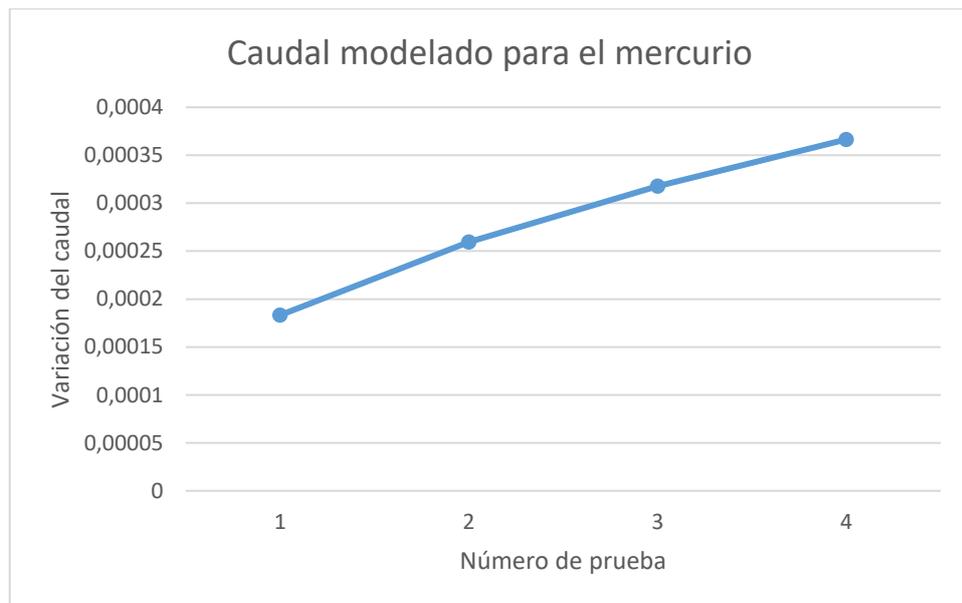


Figura 4.04, Caudal con coeficiente de descarga Hg Creación propia.

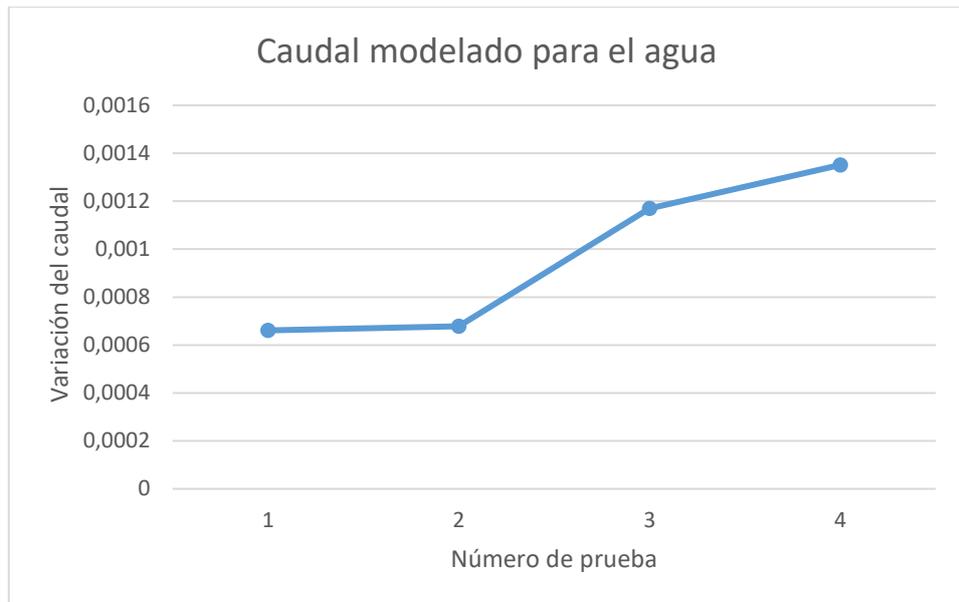


Figura 4.05, Caudal con coeficiente de descarga H₂O Creación propia.

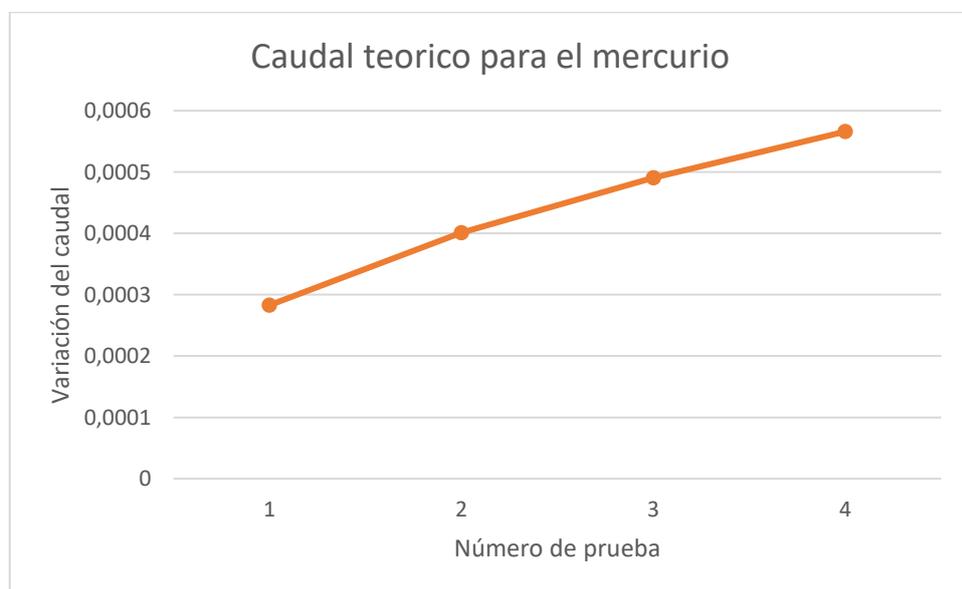


Figura 4.06, Caudal Teórico Hg Creación propia.

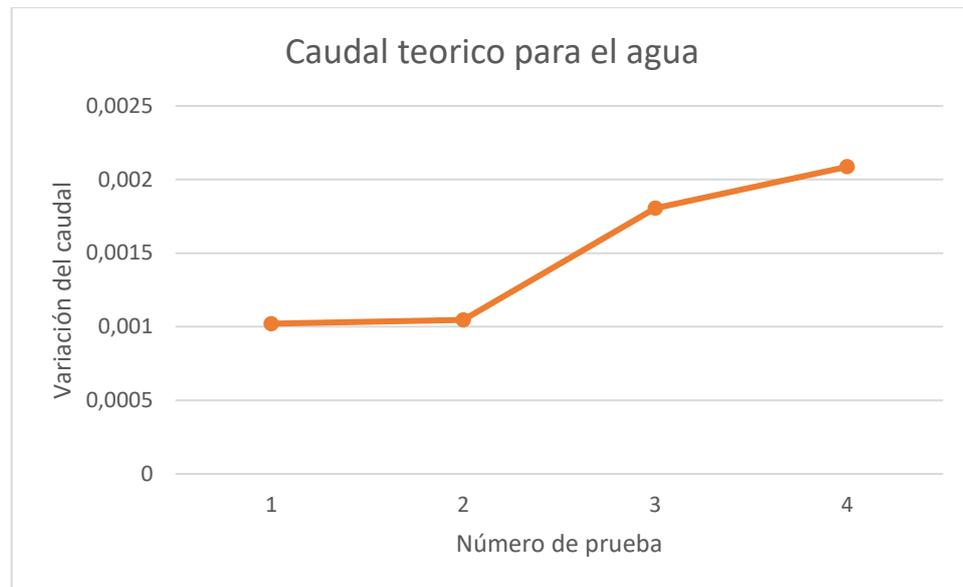


Figura 4.07 , Caudal Teórico H₂O Creación propia.

4.7 TABLA COMPARATIVA.

El coeficiente de descarga

CON COLUMNA DE MERCURIO

Tabla doce. Datos del sistema en Columna de Mercurio Creación propia.

h_1	h_2	Δh	Tiempo	D	A_1
m	m	m	s	m	m^2
0.149	0.150	0.001	66	0.508	0.002026
0.150	0.152	0.002	64	0.508	0.002026
0.150	0.153	0.003	50	0.508	0.002026
0.148	0.152	0.004	33	0.508	0.002026

$Q_{teorico}$	$Q_{modelado}$	Q_{real}	Porcentaje de error
m^3/s	m^3/s	m^3/s	%
0.000283	0.0001832	0.000238	0.0283
0.000401	0.0002596	0.000246	0.0401
0.000491	0.0003178	0.000286	0.0491
0.000566	0.0003664	0.000430	0.0566

CON COLUMNA DE AGUA

Tabla trece. Datos del sistema en Columna de Agua Creación propia.

Δh	Tiempo	D	A_1
m	s	m	m^2
0.0130	66	0.0508	0.002026
0.0270	64	0.0508	0.002026
0.0407	50	0.0508	0.002026
0.0543	33	0.0508	0.002026

$Q_{teorico}$	$Q_{modelado}$	Porcentaje de error
m^3/s	m^3/s	%
0.0010211	0.00066106	0.10211
0.0010472	0.00067795	0.10472
0.0018067	0.0011697	0.18067
0.0020869	0.0013511	0.20869

Conclusiones:

Cuando los alumnos cursen la asignatura de máquinas térmicas y que el generador de vapor se encuentre en funcionamiento, podrán realizar la medición del flujo de vapor utilizando el medidor de flujo tipo codo, viendo así la medición diferencial de una manera práctica, siendo esta la aportación de este trabajo de tesis.

Para el diseño y adaptación del medidor de flujo tipo codo se tomaron en cuenta los diferentes materiales, los cuales fueron, manguera de silicón, placas de acrílico, tubo de cobre flexible, tornillos de alta resistencia y accesorios en bronce como los niples, coples, campanas y válvulas de regulación de flujo, con las características de cada uno de ellos nos fue posible comparar los resultados entre el silicón y el acrílico, dando así el mejor comportamiento el del acrílico por su resistencia y transparencia, lo cual quedo expresado en las ecuaciones, 80, 81 y 82, que expresan su resistencia a la flexión.

Cuando se pidió información con respecto al costo del tubo Venturi de dos pulgadas de diámetro en fierro negro, que pudiera ser instalado en el generador de vapor, la cotización variaba de acuerdo al proveedor desde 800 a 11000 euros y esta inversión era muy elevada, una vez terminada la fabricación del medidor de flujo tipo codo la inversión fue de \$3955^{mn}, lo cual demuestra una gran disminución del gasto realizado.

El análisis realizado en los capítulos 3 y 4 en los que se compararon el agua con el mercurio, para observar la medición diferencial, dio paso a la obtención de datos satisfactorios en el caso del mercurio. Sin embargo, considerando el agua en esta tesis, solo se muestran los cálculos para obtener la medición diferencial, debido a que el generador de vapor no está en condiciones de prueba.

Por último, respecto a la calibración se realizó con unas cuantas mediciones, por lo que se obtienen valores del coeficiente de descarga que pueden mejorarse al realizar más pruebas con el equipo del GV ya operando nuevamente, sin embargo, se cuenta con un coeficiente de calibración establecido en la presente tesis.

ANEXOSAnexo A, Inversión en el medidor de flujo tipo codo.

Tabla catorce. Inversión Creación propia.

GASTOS DE TESIS		
MATERIAL	PRECIO	CANTIDAD
CODO DE HIERRO NEGRO CEDULA 40	\$49	1
CODO DE HIERRO NEGRO CEDULA 80	\$295	1
CAMPANAS DE BRONCE 1/4 X 1/8	\$200	4
TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA	\$60	12
TUERCAS DE ALTA RESISTENCIA	\$60	12
RONDANAS DE ALTA RESISTENCIA	\$60	24
VALVULAS DE BRONCE	\$190	2
PLACA DE ACRILICO 60X45cm	\$1000	1
MANGUERA DE SILICON 1/4	\$1,800	3m
NIPPLE DE BRONCE DE 1/4	\$600	8
TUBO DE COBRE FLEXIBLE 1/4	\$180	6m
SOPOTE DE FIERRO PARA PLACAS DE ACRILICO, A PINTURA AL HORNO	<u>\$1400</u>	2
TOTAL	\$ 5,894.00	

Anexo B. Comparación de precios.

Tabla quince, Comparativa de gastos Creación propia.

Comparativa de gastos	
Medidor de flujo	Precio
Tubo Venturi	Varía de acuerdo al proveedor
Placa de Orificio	\$ 2,900.00
Tipo Codo	\$3,955.00

Anexo C. Memoria de cálculo

Datos obtenidos.

Es importante realizar una comparación entre la resistencia del material con que se va a realizar el medidor de flujo y la presión del vapor, ya que este último va a determinar si el material soporta dicha presión o no.

La presión que se maneja en el ciclo Rankine es 7 kg/cm² y la presión absoluta es la suma de la presión atmosférica con la presión del sistema.

La presión atmosférica de acuerdo al barómetro del laboratorio es de 579.6 mmHg = 77,012.6 Pa y la presión del sistema 7 kg/cm² es equivalente a 686,000 Pa, por lo tanto:

$$P_a = P_{atm} + P_{man} \quad (77)$$

$$P_a = 77,012.6 \text{ Pa} + 686,000 \text{ Pa} \quad (78)$$

$$P_a = 763,012.3 \text{ Pa} = 76.3 \times 10^4 \text{ Pa} \quad (79)$$

Considerando la resistencia a la flexión del acrílico la cual de acuerdo a la norma ASTM D-790 es de 1020 kg/cm² la comparación queda de la siguiente manera:

$$1020 \text{ kg/cm}^2 \left(\frac{100^2 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} \right) = \quad (80)$$

$$10,200,000 \text{ kg/m}^2 \left(\frac{9.8 \text{ N}}{1 \text{ kg f}} \right) = 99,960,000 \text{ Pa}. \quad (81)$$

$$= 99.9 \times 10^6 \text{ Pa} > 76.3 \times 10^4 \text{ Pa} \quad (82)$$

Con este último valor queda claro que el acrílico tiene la virtud de soportar la presión a la que se someterá.

La aceleración de la gravedad local se obtiene de la siguiente formula:

$$g_L = g_a [1 + ((f)(\sin \phi^2)) - ((f_4)(\sin 2\phi^2)) - ((3.08 \times 10^{-6})(H))] \quad (83)$$

Donde:

$$g_L = \text{Gravedad Local.} \quad (84)$$

$$g_a = 9.780318 \text{ m/s}^2 \quad (85)$$

$$f = 0.005302. \quad (86)$$

$$f_4 = 0.00000058. \quad (87)$$

$$\phi = 19^\circ 24'' \quad (88)$$

$$H = 2404\text{m} \quad (89)$$

Sustituyendo los valores:

$$g_L = 9.780318 [1 + ((0.005302)(\sin 19^\circ 24'')) - ((0.00000058)(\sin 2 (19^\circ 24')^2)) - ((3.08 \times 10^{-6})(2404))] = 9.773478 \text{m/s}^2 \quad (90)$$

La densidad del mercurio:

$$\rho = 13600 \text{ Kg/m}^3 \quad (91)$$

Sustituyendo la ecuación 78, se obtiene la altura teórica.

$$h = \frac{606466 \text{N/m}^2}{(13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(9.77 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} = 4.56428 \text{m} \quad (92)$$

En la tabla tres para realizar la conversión de mmHg a milímetros de columna de agua, simplemente multiplica el valor en milímetros de mercurio por 13.595474315191 y se obtiene la equivalencia a columna de agua:

$$(1)(13.595474315191) = 13.595474315191\text{mmca} = 0.013595474315191\text{mca} \quad (94)$$

$$(2)(13.595474315191) = 27.19094863\text{mmca} = 0.02719094863\text{mca} \quad (95)$$

$$(3)(13.595474315191) = 40.78642295\text{mmca} = 0.04078642295\text{mca} \quad (96)$$

$$(4)(13.595474315191) = 54.38189726\text{mmca} = 0.05438189726\text{mca} \quad (97)$$

En la siguiente tabla se demuestran las iteraciones que se realizaron para obtener el coeficiente de descarga, tomando en cuenta las siguientes ecuaciones:

- Caudal modelado:

$$Q_m = CdA\sqrt{2g\Delta h} \quad (64)$$

- Caudal teórico:

$$Q_t = A\sqrt{2g\Delta h} \quad (65)$$

- Caudal real, el cual se tomó del flujo másico en pruebas físicas, convirtiéndolo a flujo volumétrico en donde la temperatura de prueba fue de 55°C. y la densidad del agua a dicha temperatura es de 985.6 kg/m³:

$$Q_r = \frac{\text{Flujo Masico}}{\text{Densidad}} = \text{Flujo Volumetrico} \quad (98)$$

- Iteraciones:

$$\text{Iteraciones} = \frac{Q_r}{Q_m} \quad (99)$$

- Coeficiente de descarga:

$$Cd = \text{Promedio de todas las iteraciones} \quad (100)$$

Tabla dieciséis, Obtención de coeficiente de descarga Creación propia.

Caudal Teórico	Caudal Real	Iteraciones	Coeficiente de descarga	Caudal Modelado
m^3/s	m^3/s			m^3/s
0,000283	0,000238	0,841367	0,6474	0,00018382
0,000342	0,000241	0,706062	0,6474	0,00022199
0,000401	0,000246	0,613528	0,6474	0,00025997
0,000407	0,000249	0,610608	0,6474	0,00026444
0,000414	0,000252	0,607786	0,6474	0,00026892
0,000421	0,000255	0,605056	0,6474	0,0002734
0,000428	0,000258	0,602414	0,6474	0,00027788
0,000435	0,000261	0,599856	0,6474	0,00028236
0,000442	0,000264	0,597378	0,6474	0,00028684
0,000449	0,000267	0,594975	0,6474	0,00029132
0,000456	0,000270	0,592646	0,6474	0,00029579
0,000463	0,000273	0,590386	0,6474	0,00030027
0,000470	0,000276	0,588193	0,6474	0,00030475
0,000476	0,000279	0,586063	0,6474	0,00030923
0,000483	0,000282	0,583994	0,6474	0,00031371
0,000490	0,000285	0,581983	0,6474	0,00031819
0,000491	0,000286	0,583292	0,6474	0,00031839
0,000495	0,000295	0,595216	0,6474	0,00032125
0,000499	0,000303	0,606930	0,6474	0,00032412
0,000504	0,000312	0,618438	0,6474	0,00032698
0,000508	0,000320	0,629747	0,6474	0,00032984
0,000513	0,000328	0,640861	0,6474	0,0003327
0,000517	0,000337	0,651786	0,6474	0,00033557
0,000521	0,000345	0,662525	0,6474	0,00033843
0,000526	0,000354	0,673085	0,6474	0,00034129
0,000530	0,000362	0,683469	0,6474	0,00034415
0,000535	0,000371	0,693681	0,6474	0,00034702
0,000539	0,000379	0,703727	0,6474	0,00034988
0,000543	0,000388	0,713609	0,6474	0,00035274
0,000548	0,000396	0,723333	0,6474	0,0003556
0,000552	0,000405	0,732901	0,6474	0,00035847
0,000557	0,000413	0,742317	0,6474	0,00036133
0,000561	0,000422	0,751586	0,6474	0,00036419
0,000566	0,000430	0,759944	0,6474	0,00036765

*Obtención de cargas en tabla cuatro y siete:

$$(15 \text{ kg}) (66 \text{ s}) = 0.2348 \text{ kg/s} \quad (101)$$

$$(15.5 \text{ kg}) (64 \text{ s}) = 0.2422 \text{ kg/s} \quad (102)$$

$$(14.1 \text{ kg}) (50 \text{ s}) = 0.282 \text{ kg/s} \quad (103)$$

$$(14 \text{ kg}) (33 \text{ s}) = 0.4242 \text{ kg/s} \quad (104)$$

*Obtención del caudal modelado en tabla ocho, para el mercurio.

$$Q_m = CdA\sqrt{2g\Delta h} \quad \leftarrow \text{(Caudal modelado)} \quad (105)$$

$$Cd = 0.6474 \quad (58)$$

Área

$$D = 2 \text{ inch} = 50.8 \text{ mm} = 5.08 \text{ cm} = 0.0508 \text{ m} \quad (106)$$

$$A = \frac{(\pi)(D^2)}{4} \quad (107)$$

$$A = \frac{(\pi)(5.08 \text{ cm})^2}{4} = 20.26 \text{ cm}^2 \quad (108)$$

$$A = 0.002026 \text{ m}^2 \quad (109)$$

Gravedad Local

$$g_L = 9.773478 \text{ m/s}^2 \quad (90)$$

Diferencia de alturas (Δh)

$$h_1 = 0.001\text{m} \quad (110)$$

$$h_2 = 0.002\text{m} \quad (111)$$

$$h_3 = 0.003\text{m} \quad (112)$$

$$h_4 = 0.004\text{m} \quad (113)$$

Sustituyendo los valores se obtiene

$$Q_m = (0.6474)(0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.001)} = 1.832 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (114)$$

$$Q_m = (0.6474)(0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.002)} = 2.596 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (115)$$

$$Q_m = (0.6474)(0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.003)} = 3.178 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (116)$$

$$Q_m = (0.231)(0.02026)\sqrt{2(9.7734)(0.004)} = 3.664 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (117)$$

*Obtención del caudal modelado en tabla nueve, para el agua.

$$Q_m = CdA\sqrt{2g\Delta h} \quad \leftarrow \text{Caudal modelado} \quad (64)$$

$$Cd = 0.6474 \quad (58)$$

Área

$$D = 2 \text{ inch} = 50.8 \text{ mm} = 5.08 \text{ cm} = 0.0508 \text{ m} \quad (106)$$

$$A = \frac{(\pi)(D^2)}{4} \quad (107)$$

$$A = \frac{(\pi)(5.08\text{cm})^2}{4} = 20.26 \text{ cm}^2 \quad (108)$$

$$A = 0.002026\text{m}^2 \quad (109)$$

Gravedad Local

$$g_L = 9.773478\text{m/s}^2 \quad (90)$$

Diferencia de alturas (Δh)

$$h_1 = 0.01359\text{m} \quad (118)$$

$$h_2 = 0.02719\text{m} \quad (119)$$

$$h_3 = 0.04078\text{m} \quad (120)$$

$$h_4 = 0.05438\text{m} \quad (121)$$

Sustituyendo los valores se obtiene

$$Q_m = (0.6474)(0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.01359)} = 6.6106 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (122)$$

$$Q_m = (0.6474)(0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.02719)} = 6.7795 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (123)$$

$$Q_m = (0.6474)(0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.04078)} = 1.1697 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (124)$$

$$Q_m = (0.6474)(0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.05438)} = 1.3511 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (125)$$

Obtención del caudal teórico para la tabla diez, para el mercurio

$$Q_t = A\sqrt{2g\Delta h} \leftarrow \text{Caudal teorico} \quad (65)$$

Área

$$D = 2 \text{ inch} = 50.8 \text{ mm} = 5.08 \text{ cm} = 0.0508 \text{ m} \quad (106)$$

$$A = \frac{(\pi)(D^2)}{4} \quad (107)$$

$$A = \frac{(\pi)(5.08\text{cm})^2}{4} = 20.26 \text{ cm}^2 \quad (108)$$

$$A = 0.002026\text{m}^2 \quad (109)$$

Gravedad Local:

$$g_L = 9.773478\text{m/s}^2 \quad (90)$$

Diferencia de alturas (Δh):

$$h_1 = 0.001\text{m} \quad (110)$$

$$h_2 = 0.002\text{m} \quad (111)$$

$$h_3 = 0.003\text{m} \quad (112)$$

$$h_4 = 0.004\text{m} \quad (113)$$

Sustituyendo los valores se obtiene

$$Q_t = (0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.001)} = 2.83 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (126)$$

$$Q_t = (0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.002)} = 4.01 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (127)$$

$$Q_t = (0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.003)} = 4.91 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (128)$$

$$Q_t = (0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.004)} = 5.66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (129)$$

Obtención del caudal teórico para la tabla once, para el agua.

$$Q_t = A\sqrt{2g\Delta h} \leftarrow \text{Caudal teorico} \quad (65)$$

Área

$$D = 2 \text{ inch} = 50.8 \text{ mm} = 5.08 \text{ cm} = 0.0508 \text{ m} \quad (106)$$

$$A = \frac{(\pi)(D^2)}{4} \quad (107)$$

$$A = \frac{(\pi)(5.08 \text{ cm})^2}{4} = 20.26 \text{ cm}^2 \quad (108)$$

$$A = 0.002026 \text{ m}^2 \quad (109)$$

Gravedad Local

$$g_L = 9.773478 \text{ m/s}^2 \quad (90)$$

Diferencia de alturas (Δh)

$$h_1 = 0.01359\text{m} \quad (118)$$

$$h_2 = 0.02719\text{m} \quad (119)$$

$$h_3 = 0.04078\text{m} \quad (120)$$

$$h_4 = 0.05438\text{m} \quad (121)$$

Sustituyendo los valores se obtiene

$$Q_t = (0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.01359)} = 1.0211 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (130)$$

$$Q_t = (0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.02719)} = 1.0472 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (131)$$

$$Q_t = (0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.04078)} = 1.8067 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (132)$$

$$Q_t = (0.002026)\sqrt{2(9.7734)(0.05438)} = 2.0869 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (133)$$

Bibliografías:

- 10, L. M. (01 de 2019). *El hierro: Propiedades, cómo se obtiene y tipos de hierro*. Obtenido de <https://leanmanufacturing10.com/el-hierro-propiedades-como-se-obtiene-y-tipos-de-hierro>
- Automatizacion, C. (28 de Febrero de 2012). *QuimiNet.com*. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/conozca-la-funcion-principal-de-los-codos-para-tuberias-2688752.htm>
- California, U. A. (Enero de 2008). *Facultad de Ciencias Marinas*. Obtenido de Propiedades de los Fluidos: http://fcm.ens.uabc.mx/~fisica/FISICA_II/APUNTES/HIDROMETRO.htm
- calmansys. (2019). *Benvalle.com*. Obtenido de <http://benvalle.com/Flow.htm>
- Cedròn, J., Landa, V., & Robles, J. (junio de 2017). *Quimica General*. Obtenido de <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/13-primera-ley-de-la-termodinamica.html>
- Cegel, Y. (2019). *Termodinamica*.
- Cervantes, M. e. (2014). *Termodinamica. Temperatura*.
- Chassan Jalloul, M. M. (12 de 01 de 2015). *BLOG DE WIKA*. Obtenido de <https://www.bloginstrumentacion.com/productos/caudal/elementos-primarios-de-caudal-placas-de-orificio/>
- cobre, I. E. (2000). *Cobre Profesional*. Obtenido de <https://elcobre.com/montaje-e-instalacion/tubos-de-cobre/carateristicas-de-los-tubos-de-cobre>
- Comunicaciones, V. (2011-2019). *Concepto y Definicion*. Obtenido de Entropia: <https://conceptodefinicion.de/entropia/>
- Control, A. (2004). *Ingeneis 400*. Obtenido de Automatizacion y optimizacion completa: http://www.ating-control.com/igneis400_about_esp.html Auting Control
- Ecuador, U. d. (2010). *EcuRed*. Obtenido de Medidores de laboratorio: <https://www.ecured.cu/>
- electronics, I. (s.f.). *ELBOW METERS*. Obtenido de http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial_electronics/input_devices_sensors_transducers_s_transmitters_measurement/flow_meters/Elbow-Meters.html
- Euromaster. (2005). *Mantenimiento del vehiculo*. Obtenido de <https://www.euromaster-neumaticos.es/blog/anticongelante-organico>
- Freddy, L. G., & Ronny, Z. R. (2016). *Universidad de Carabobo 2016*. Obtenido de <https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria>
- G. Aranda, V. A. (s.f.). *Columna de liquido, Manometrico primario en laboratorios secundarios*. Obtenido de <https://www.cenam.mx/Memorias/>

- Glosarios*. (31 de Agosto de 2018). Obtenido de Glosario Termodinamica/ Termino: glosarios. servidor-alicante.com
- Hartley, W. Z. (1985). *Thermodynamics*. Harper & Row.
- Hewitt, P. G. (2007). *Física Conceptual, Décima Edición*. Mexico: Pearson, Addison Wesley.
- HOLMAN, J. P. (1975). *Termodinámica*. USA: Mc Graw Hill.
- Home, F. (2015). *Flow Meter*. Obtenido de http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial_electronics/input_devices_sensors_transducer_s_transmitters_measurement/flow_meters/Elbow-Meters.html
- humidificador, C. d. (2017). Obtenido de <https://comprarmihumidificador.com/pros-y-contras-humidificadores-de-vapor-frio-y-caliente/>
- IberCaja, F. B. (2000). *IberCaja Aula en Red*. Obtenido de Hidrostatica: <https://aulaenred.ibercaja.es/contenidos-didacticos/hidrostatica/densidad-1-3917/>
- Industrieprodukte, S. G. (2015). *Swepro*. Obtenido de <https://www.swepro.com/index.php?language=es&mainnavigation=service&subnavigation1=threads>
- Ingemecánica, I. C. (s.f.). *Estudio y Tipología de las uniones atornilladas*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn31.html>
- ISSO 9001, I. 9. (s.f.). *NORMAS ISSO*. Obtenido de <https://www.eni.es/wp-content/uploads/items/6-Calibración%20equipos%20de%20medida%20según%20ISO%209000.pdf>
- Jaime A. Pazmiño, R. J. (15 de 06 de 2017). *Determinacion del coeficiente de descarga de un prototipo tubo de Venturi construido para uso academico de un laboratorio*. Obtenido de [file:///C:/Users/princ_000/Downloads/171-390-2-PB%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/princ_000/Downloads/171-390-2-PB%20(2).pdf)
- Katterinne23. (Octubre de 2014). *Word Press en español*. Obtenido de Física, Fluidos y Termodinamica: <https://athanieto.wordpress.com/tematicas>
- La Paloma Compañía de Metales, S. d. (2000). *La paloma*. Obtenido de https://www.lapaloma.com.mx/lapaloma_metales/bronze.html
- libre, M. (s.f.). *Mercado Libre*. Obtenido de <https://listado.mercadolibre.com.mx/densimetro>
- Minerales, W. (2009). Obtenido de <https://mineralesweb.com/elementos-nativos/mercurio-usos-y-propiedades/>
- MORALES, Z. (s.f.). *Acrílico y policarbonato.com*. Obtenido de www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html#resistenciaquimica
- ozono, G. d. (20018). *BIOZON*. Obtenido de <https://generadordeozono.com.mx/products/blister-con-manguera-de-silicon>

- Pardell, N. L. (2001). *Curso esterilizacion*. Obtenido de <https://www.pardell.es/curso-esterilizacion.html>
- QUIMICA. (s.f.). *GRESI Q*. Obtenido de <https://gresiq.es.tl/Teor%EDa.htm>
- QuimiTube. (2003). *Transferencia de Energia en Forma de Calor*. Obtenido de QuimiTube.com: <http://www.quimitube.com/videos/termodinamica-teori-4-transferencia-energia-en-forma-de-calor-capacidad-calorifica-especifica-y-molar>
- Rojas, A. (04 de Febrero de 2014). *Accesorios para tuberias*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/acazro/accesorios-para-tuberias>
- Scientific, A. (2019). *Tecnicas de Medicion*. Obtenido de <https://www.alicat.com/es/tecnicas-de-medicion-de-flujo-masico-en-todo-el-espectro/>
- SIEMENS. (2019). *POWER GENERATION*. Obtenido de <https://new.siemens.com/es/es/productos/energia/power-generation/turbinas-vapor.html>
- Sil, L. (2015). *Limpieza a vapor*. Obtenido de <https://limpiezasil.com/limpieza-a-vapor-que-es-maquinas/>
- Slope, C. (2015). *La Maquina de Vapor*. Obtenido de <http://cyberslope.blogspot.com/2014/09/la-maquina-de-vapor.html>
- Solinst. (s.f.). *Instrucciones del funcionamiento del medidor de agua*. Obtenido de <https://www.solinst.com/espanol/productos/instrumentos-de-medicion-de-nivel/101-medidor-de-niveles-de-agua/instrucciones/101-p7-instrucciones-de-uso-del-medidor-de-nivel-de-agua/01-101-p7-medidor-de-nivel-de-agua.php>
- Tecnicos, O. (2018). *Medidores*. Obtenido de <http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/doc16.php>
- Tecnologica, A. (2009). *Turbina de Vapor*. Obtenido de <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbina-de-vapor.html>
- TLV. (2019). *Compañía Especialista en Vapor*. Obtenido de <https://www.tlv.com/global/LA/products/040000.html>
- UNEXPO. (2009). *Instrumentacion Industrial*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/instindunexpo2009i/primer-a-asignacion/salazar-azocar-granado-linares/caudal>
- WebMeMarketing. (2015). *TRATAGUA All Right Reserved*. Obtenido de <http://www.tratagua.mx/rotametros/>
- Z Black, W. (1985). *Termodinamica, Quinta Edicion*. Compañía Editorial Continental.