



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Calibración de medidor de
flujo de efecto Coriolis por
comparación con un medidor
de flujo de referencia**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Raúl Alexis López Huitrón

ASESOR(A) DE INFORME

M.I. César Guillermo Nájera Martell



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

Agradecimientos

Como una muestra del inmenso amor y cariño que les tengo a mis padres y hermano, les dedico este trabajo, que simboliza la culminación de una de las etapas más importantes de mi vida, mi desarrollo académico, y que indudablemente sin su apoyo y su comprensión no hubiese sido posible.

*A **Luz Elena Huitrón** y **José Raul Lopez**, porqué sin ellos no podría ser la persona que hoy soy. No puedo imaginar mi existencia sin sus enseñanzas, consejos, apoyo y sobre todo la paciencia que siempre me mostraron. Gracias por darme la vida y, aún más, gracias por permitirme cumplir mi sueño, Estaré toda mi vida agradecidos con ustedes, de verdad muchas gracias.*

*A mi hermano **José Carlos** por el apoyo, cariño y motivación que siempre me has mostrado, gracias por ser uno de los pilares más importantes en mi vida.*

*A mi abuelita **Celerina** que, aunque ya no estás conmigo por todo el amor, cariño y valiosas enseñanzas que me dejaste.*

*A **Dios** por brindarme la oportunidad de seguir día a día con lo que me he propuesto y lograrlo*

*A mi alma mater, la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a todos los profesores de la carrera de Ingeniería petrolera de la **Facultad de Ingeniería**, por todos sus conocimientos y enseñanzas y sobre todo por la gran oportunidad que me brindaron de poder ser uno más de sus alumnos.*

*Al **M.I César Guillermo Nájera Martell**, por todo el apoyo y dedicación que tuvo para ayudarme a la realización de este trabajo de titulación. Por ser un excelente ser humano y un excelente tutor y amigo gracias por su paciencia y conocimiento que me transmitió durante toda mi estadía en CALPRO.*

*A todos mi **sinodales** que decidieron participar en mi examen profesional y en ningún momento dejaron de enseñarme cosas importantes de la carrera y la industria.*

*A mis amigos de la facultad, **Ángel, Rodrigo, Fernando, Miguel y Andrés**, que me enseñaron cosas que incluso yo desconocía de mí y de las áreas de conocimiento que compartimos. Gracias por acompañarme en mi estadía por la universidad y por forjarme el sentido de amistad más importante que he tenido.*

Este trabajo y futuros éxitos van dedicado a todos ustedes.

Resumen

La metrología es de suma importancia dentro de la industria petrolera, ya que tanto los operadores petroleros como los consumidores necesitan saber cuál es la cantidad exacta, contenido y pureza de los hidrocarburos que se están produciendo o consumiendo. Por lo cual las empresas deben contar con los instrumentos y equipos de medición adecuados y calibrados al momento de cuantificar los hidrocarburos, garantizando así seguridad y confiabilidad en las actividades de medición que se realizan día con día en el sector energético. Dada esta importancia este informe tiene como principal objetivo describir el proceso de calibración de un medidor de flujo de efecto Coriolis en campo y laboratorio debido a que es ampliamente utilizado en la industria por la exactitud que nos proporciona en la medición de hidrocarburos. Así mismo se mostrará el proceso empleado para la obtención de un factor de corrección (Meter Factor o MF). Utilizando el método por comparación con un medidor de flujo de referencia que en este caso será otro medidor de flujo de efecto Coriolis, teniendo en cuenta todas las variables que pueden afectar a un medidor másico y su impacto en la medición.

Todas las actividades que se enlistan, cálculos y procedimientos que se detallan en este informe fueron las que desarrollé en mi estadía dentro de la empresa CALPRO S.A. de C.V. donde tuve la oportunidad de implementar los conocimientos adquiridos en mi etapa como estudiante y aprender más sobre las operaciones que se realizan en campo y laboratorio para la calibración de equipos de medición garantizando su confiabilidad en el mesurado de los hidrocarburos, dando pauta a que los operadores cumplan con su régimen fiscal y legal.

Contenido

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | Introducción | 8 |
| 2. | Principio de operación | 9 |
| 3. | Aspectos Fundamentales y Recomendaciones | 13 |
| 3.1 | Recomendaciones para su Desempeño | 13 |
| 3.1.1 | Medidor configurado en la dirección del flujo | 13 |
| 3.1.2 | Instalación | 13 |
| 3.1.3 | Realizar el Zero | 16 |
| 3.1.4 | Condiciones dinámicas del fluido | 16 |
| 4. | Calibración | 20 |
| 4.1 | Instalación del Sistema de Calibración | 20 |
| 4.1.1 | Instalación en laboratorio | 21 |
| 4.1.2 | Instalación en campo | 23 |
| 4.1.3 | Recomendación de montaje: | 26 |
| 4.1.3.1 | Montaje en horizontal para la medición de líquidos | 26 |
| 4.1.3.2 | Montaje en horizontal para la medición de gases | 26 |
| 4.1.3.3 | Montaje en Bandera para la medición de fluidos Viscosos | 26 |
| 4.1.4 | Instrumentos adicionales | 27 |
| 4.2 | Proceso de Calibración | 28 |
| 4.2.1 | Selección del patrón | 28 |
| 4.2.2 | Temporizar | 30 |
| 4.2.3 | Configuración | 31 |
| 4.2.4 | Comparar (Corridas de Calibración) | 32 |
| 4.3 | Desmontar | 33 |
| 5. | Resultados | 34 |
| 5.1 | “MF” Masa VS Masa | 34 |
| 5.2 | “MF” Masa VS Volumen | 35 |
| 5.3 | Informe de Calibración | 36 |
| 6. | Conclusiones | 39 |
| | Anexo A | 41 |
| | Cálculos y Fórmulas | 41 |
| | “MF” Masa VS Masa | 41 |

| | |
|--|----|
| “MF” Masa VS Volumen | 41 |
| Cálculos del mensurando | 43 |
| Desarrollo de cálculos del “MF” Masa VS Masa | 43 |
| Desarrollo de cálculos de “MF” Masa VS volumen | 44 |
| 7. Glosario | 48 |
| 8. Bibliografía | 50 |

Lista de Figuras

| | |
|---|-----------|
| Figura 1.- Tubos Coriolis oscilando en una sola fase (No Flow). Fuente: D. W. Spitzer, 1991. | 9 |
| Figura 2.- Tubos Coriolis oscilando a diferentes frecuencias (Flow). Fuente: D. W. Spitzer, 1991. | 9 |
| Figura 3.- Ejemplo Fuerza Coriolis. Fuente: Laguna Alejandro, 2015. | 10 |
| Figura 4. Medidor de flujo de efecto Coriolis, Fuente: Silver Instruments, 2020 | 10 |
| Figura 5. Funcionamiento típico medidor tipo Coriolis. Fuente: Laguna Alejandro, 2015. | 11 |
| Figura 6. Esquema de Buenas prácticas para la Instalación del medidor Coriolis. Fuente: Elaboración Propia,2021. | 12 |
| Figura 7. Medidor de flujo de Efecto Coriolis con Soporte. Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2020, | 13 |
| Figura 8. Medidor de flujo de efecto Coriolis montado y ajustado con el torque especificado por el fabricante. Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2020. | 14 |
| Figura 9. Mangueras de Neopreno empleadas en laboratorio para soportar presión y condiciones de flujo. Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2020 | 14 |
| Figura 10. Bomba para el flujo en laboratorio. Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2020. | 15 |
| Figura 11. Transmisor empleado en el medidor de flujo de efecto Coriolis. Fuente: Tomada en campo, 2021. | 17 |
| Figura 12. Conexión de Coriolis transmisor a la computadora. Fuente: Elaboración Propia, 2021. | 18 |
| Figura 13. ROC (Recolector de Pulsos). Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2021. | 18 |
| Figura 14. Esquema de Instalación del medidor de flujo de efecto Coriolis. Fuente: Elaboración Propia, 2021. | 19 |
| Figura 15. Medidor de flujo de efecto Coriolis instalado. Fuente: Tomada en campo, 2021. | 21 |
| Figura 16. Representación esquemática conexiones medidor de flujo Coriolis. Fuente: Elaboración Propia, 2021. | 22 |
| Figura 17. Medidor de flujo de efecto Coriolis operando. Fuente: Tomada en campo, 2021. | 23 |
| Figura 18. Conexión del transmisor. Fuente: Tomada en campo, 2021. | 24 |
| Figura 19. Montaje horizontal omega abajo. Fuente: API MPMS 5 CAP 6, 2020. | 25 |
| Figura 20. Montaje horizontal omega arriba. Fuente: API MPMS 5 CAP 6, 2020. | 25 |
| Figura 21. Montaje Vertical para fluidos viscosos Fuente: API MPMS 5 CAP 6, 2020. | 25 |
| Figura 22. Tina de almacenamiento y conexiones Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2021. P. | 27 |
| Figura 23. Medidor Coriolis desarmado Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2021. | 28 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Datos de calibración empleando como referencia un medidor masico Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 33 |
| Tabla 2. Resultados de calibración empleando como referencia un medidor masico . Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 33 |
| Tabla 3. Datos de calibración empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen, Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 34 |
| Tabla 4. Resultados de calibración empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen. Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 34 |
| Tabla 5. Resultado de las corridas del patrón masico empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Masa. Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 42 |
| Tabla 6. Resultado de las corridas del IBC empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Masa. Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 42 |
| Tabla 7. Resultado de las corridas de calibración y MF empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Masa. | 43 |
| Tabla 8. Resultado de las corridas del patrón masico empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen. Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 45 |
| Tabla 9. Resultado de las corridas del IBC empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen. Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 46 |
| Tabla 10. Resultado de las corridas de calibración y MF empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen. Fuente: Hoja de cálculo, 2021. | 46 |

Antecedentes

La complejidad e importancia que conlleva el utilizar correctamente los medidores de flujo másico de efecto Coriolis por las condiciones de flujo, el desconocimiento del personal operativo, los cálculos empleados, la instalación y montaje para su óptimo funcionamiento nos puede llevar a tener errores de cuantificación de volumen que guían a malos resultados de operación y a no cumplir con la regulación en cuestión de régimen fiscal en la medición de hidrocarburos. Debido a esto y que es ampliamente utilizado en la industria por la exactitud que nos proporciona, el contar con los modelos matemáticos, información de instalación, calibración y la correcta cuantificación de flujo, presión, temperatura y diversas propiedades que interactúan con el medidor, nos ayudaran a tener mejores operaciones y disminuir la incertidumbre o error al momento de la medición de los hidrocarburos.

Contexto de la participación profesional

Dentro de la empresa CALPRO S.A de C.V hubo varios requerimientos sobre ciertos servicios de calibración usando un medidor másico como patrón de referencia con la finalidad de corroborar o ajustar la cantidad de flujo de sus sistemas de medición, ante esto fui incluido como parte del equipo que se encargó de dichos trabajos donde participe en cada una de las ejecuciones de operación de montaje, calibración y cuantificación de los datos recolectados. Las operaciones fueron realizadas tanto en laboratorio como en campo, teniendo diferentes ambientes de operación que cambian los procedimientos que son necesarios para obtener el factor de corrección o meter factor (MF) y la configuración en la que será calibrado el medidor de flujo en “masa o volumen” de acuerdo con la solicitud del cliente.

1. Introducción

La calibración de los medidores de flujo en la modalidad dinámica consiste en comparar los caudales volumétricos o masicos que detectan los medidores de flujo con sus señales de salida (Frecuencia). Si la modalidad es arranque y paro se compara con la discretización de lotes contra un patrón de referencia con incertidumbre y trazabilidad conocida y demostrable. Esta requiere una medición con máxima exactitud ya que generalmente los medidores de flujo son las cajas registradoras del operador petrolero.

La medición del caudal es una parte integral de la industria energética (petróleo & gas). Existen varios tipos de dispositivos que se utilizan para este propósito, el medidor de flujo de efecto Coriolis es uno de ellos.

Existen cuatro metodologías de calibración en la magnitud de flujo:

- Medidor de flujo por comparación con un medidor de referencia
- Medidor de flujo por comparación con un probador
- Medidor de flujo por comparación con una medida volumétrica
- Medidor de Flujo por comparación con una celda de carga

Este reporte está basado y en apego al procedimiento Medidor de flujo por comparación con un medidor de referencia del laboratorio de metrología de CALPRO S.A de C.V, así como en la práctica internacional.

Los medidores de flujo Coriolis son de un costo de instalación inicial más alto en comparación con otros tipos de medidores de flujo. Sin embargo, factores como su exactitud, linealidad, repetibilidad, lo hacen más atractivo respecto a otros medidores de flujo.

Este dispositivo funciona según el principio de la inercia que genera un fluido mientras fluye a través de un tubo oscilante. Esta fuerza de inercia resulta en la torsión del tubo, proporcionalmente al gasto másico. El grado de este giro o distorsión es capturado por los sensores en el dispositivo y se emite una señal de flujo lineal como salida.

2. Principio de operación

Un medidor Coriolis consiste en un sensor y un transmisor. Un sensor Coriolis típico tiene uno o dos tubos a través de los cuales fluye el fluido. (Spitzer, 1991) menciona que el tubo o los tubos están fabricados para vibrar en sus frecuencias naturales o armónicas mediante un mecanismo de impulsión electromagnético como se muestra en la figura 1. Cuando el fluido avanza y entra en contacto con los tubos Coriolis genera una fuerza Coriolis, provocando que los tubos oscilen a diferentes vibraciones y frecuencias naturales como se muestra en la figura 2. Esta fuerza Coriolis que se genera por el paso del fluido en los tubos es directamente proporcional a la tasa de flujo de masa del fluido. Por lo cual la magnitud de la fuerza Coriolis se puede detectar y convertir en una tasa de flujo de masa.



Figura 1.- Tubos Coriolis oscilando en una sola fase (No Flow). Fuente: D. W. Spitzer, 1991.



Figura 2.- Tubos Coriolis oscilando a diferentes frecuencias (Flow). Fuente D. W. Spitzer, 1991.

La fuerza de Coriolis es una fuerza resultante que aparece cuando un cuerpo está en movimiento con respecto a un sistema en rotación y se describe su movimiento en ese referencial como se muestra en la figura 3. La fuerza de Coriolis es diferente de la fuerza centrífuga, ya que esta es siempre perpendicular a la dirección del eje de rotación del sistema y a la dirección del movimiento del cuerpo vista desde el sistema en rotación.

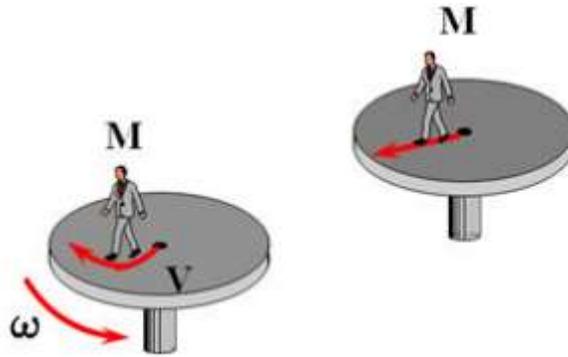


Figura 3. Ejemplo Fuerza Coriolis (M: Masa del cuerpo, V:Velocidad del cuerpo en un sistema de rotación, ω : Velocidad angular del sistema rotación).

Fuente: Laguna A ,2015.

El alcance de los medidores de efecto Coriolis puede ir desde ½ pulgada hasta 12 pulgadas de diámetro nominal actualmente, da una señal directamente proporcional al gasto másico y es independiente de las propiedades dinámicas del producto como conductividad, presión, viscosidad o temperatura.



Figura 4. Medidor de flujo de efecto Coriolis, Fuente: Silver Instruments, 2020.

La fuerza Coriolis surge cuando se trata de una superposición de movimientos rectos con movimientos giratorios. El gasto másico o caudal provoca un cambio en la fase de oscilación entre la entrada y la salida del equipo como se muestra en la figura 5. Este desfase es proporcional al gasto másico y dando una amplificación correspondiente de la señal de salida.

Las frecuencias de resonancia de los tubos de medición dependen de la masa oscilante en los tubos y densidad del producto. Se podrían considerar densímetros.

Para el uso industrial la fuerza Coriolis se genera sustituyendo el movimiento giratorio por una excitación mecánica. Es decir, los dos tubos de medición por donde pasa el producto oscilarán en su frecuencia de resonancia. Las fuerzas Coriolis producidas por el flujo en los tubos de medida causan un desfase en la oscilación del tubo siendo esta proporcional al flujo másico. Entre mayor sea este desfase implicara que hay un mayor flujo.

Cuando el gasto es cero, ambos tubos oscilan en la misma frecuencia. Con el gasto másico, las oscilaciones del tubo disminuyen en la entrada y aumentan en la salida. Si el gasto másico aumenta, la diferencia de fase también aumenta. Las oscilaciones de los tubos se determinan utilizando sensores en la entrada y a la salida. Cuando el fluido está en movimiento se inducen fuerzas de Coriolis. Estas fuerzas hacen que los tubos de medición se tuerzan. Como se muestra a continuación en la figura 5.

El desfaseamiento también es conocido como tiempo de retraso de la señal de entrada respecto a la de salida (Delta T). El cual es medido y procesado por el transmisor electrónico y convertido en unidades de flujo másico.

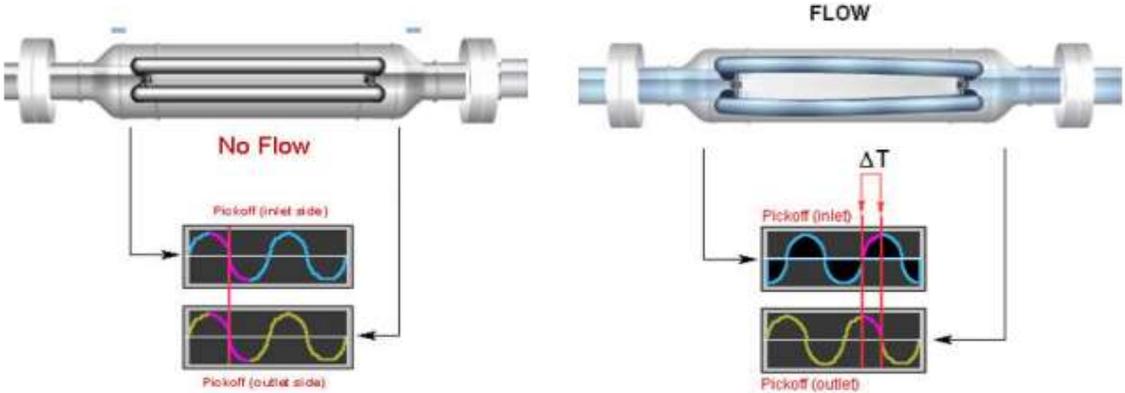


Figura 5. Funcionamiento típico medidor tipo Coriolis. Fuente: Laguna A, 2015.

Las buenas prácticas de instalación recomiendan que la tubería sobre la cual se instala el medidor de flujo de efecto Coriolis debe estar bien soportada como lo indica la figura 6, para evitar cualquier carga sobre el medidor ya que estos medidores se basan en la vibración y son sensibles a cualquier elemento ajeno que interactúe con él.

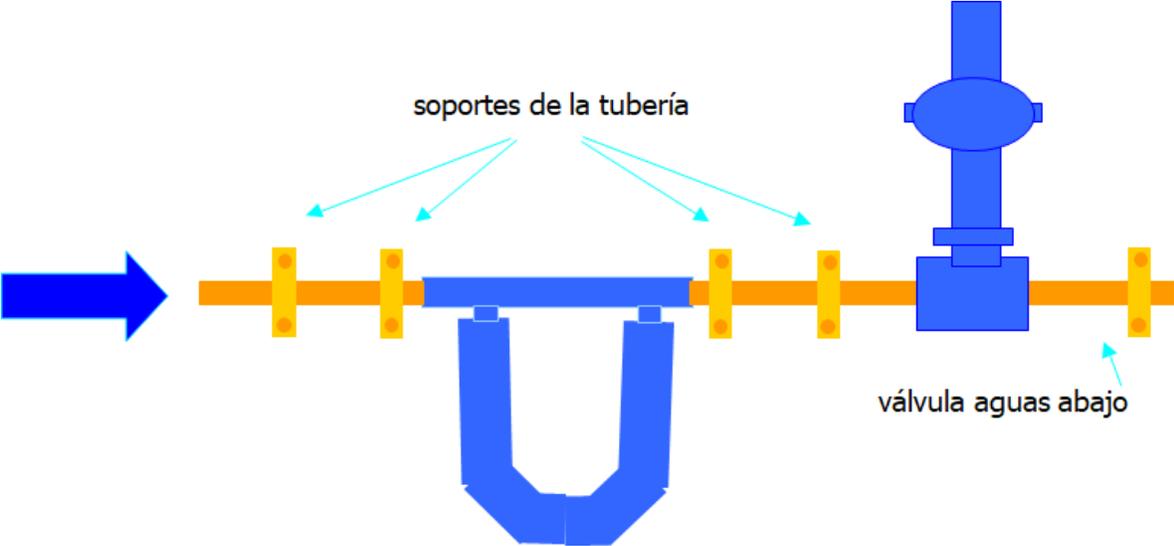


Figura 6. Esquema de Buenas prácticas para la Instalación del medidor Coriolis.

Fuente: Elaboración Propia,2021.

3. Aspectos Fundamentales y Recomendaciones

3.1 Recomendaciones para su Desempeño

3.1.1 Medidor configurado en la dirección del flujo

El medidor de flujo debe estar configurado en la dirección del flujo para evitar errores de lectura (datos negativos o no detectar señal de salida).

3.1.2 Instalación

- El transmisor Coriolis debe ubicarse en una zona de fácil acceso y seguro para el operador.
- La instalación del medidor Coriolis se debería equipar con un equipo de eliminación de aire/vapor, según sea necesario, de modo que la exactitud de la medición no se degrade.
- La instalación del medidor Coriolis se debería equipar con un equipo de medición de presión tanto corriente arriba como corriente abajo del medidor.
- Verificar que las bridas estén alineadas para evitar vórtices y remolinos en el perfil completamente desarrollado. Evitar que las juntas queden dentro de la tubería (zona de flujo) para evitar que se genere turbulencia en la medición.
- Utilizar el torque adecuado según fabricante en el apriete de los birlos ya que el principio de medición es la vibración.
- La tubería debe ser sujeta para evitar que se transfieran tensiones hasta el sensor de flujo.
- La vibración y pulsación del fluido afecta la capacidad del sensor de flujo para medir de manera correcta. En algunas situaciones, puede ser necesario utilizar amortiguadores de pulsación para evitar interferencias.
- El efecto de remolinos en el fluido o de perfiles de velocidad irregulares producidos por la configuración de tuberías corriente arriba o corriente

abajo en el rendimiento del medidor pueden diferir entre un diseño de medidor y otro.

- Tomar precauciones para asegurar que la vibración externa no intervenga y afecte la frecuencia de funcionamiento del sensor de flujo, se recomienda que estas fuentes estén aisladas para que no se vuelvan perjudiciales para el rendimiento del medidor.
- La pulsación hidráulica cerca de la frecuencia de funcionamiento del sensor (o de uno de sus armónicos) también puede afectar la precisión del medidor. Si esta condición existe, los amortiguadores de pulsación pueden ser útiles.
- Interferencia electromagnética y de radiofrecuencia. Los campos magnéticos fuertes pueden afectar las señales electromagnéticas del sensor. El sensor y los componentes electrónicos del medidor no se deben instalar cerca de fuentes de interferencia de radiofrecuencia o electromagnética, como motores de frecuencia variable, transformadores, transmisores de radio, equipos de conmutación de gran tamaño o cables de alta tensión.

A continuación, se mostrarán imágenes representativas de un medidor de flujo de efecto Coriolis, que permitan comprender al lector los puntos mencionados anteriormente.



Figura 7. Medidor de flujo de Efecto Coriolis con soporte. Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2020.



Figura 8. Medidor de flujo de efecto Coriolis montado y ajustado con el torque especificado por el fabricante. Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2020.



Figura 9. Mangueras de Neopreno empleadas en laboratorio para soportar presión y condiciones de flujo. Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2020.



Figura 10. Bomba para el flujo en laboratorio. Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2020.

3.1.3 Realizar el Zero

La operación de realizar el Zero es esencial hoy en día en los medidores de flujo de efecto Coriolis debido a que nos ayuda a evitar un error de escalamiento en la medición por la influencia de la tensión, peso de los accesorios, tuberías, transmisores, sensores, etc. Así como factores externos durante el montaje y la instalación del medidor. En un inicio el medidor registrara lecturas erróneas que no representan las condiciones del fluido, por lo cual es necesario verificar que la operación o actividad del Zero se haya llevado a cabo en el computador y medidor de flujo y así evitar errores en la medición.

3.1.4 Condiciones dinámicas del fluido

Efectos de las Propiedades de los Fluidos

Para alcanzar el nivel de precisión requerido para la medición de transferencia de custodia, se debería probar un medidor Coriolis en un fluido similar y bajo

condiciones similares de operación e instalación a las de las operaciones normales. Si existen cambios en las propiedades del fluido o en las condiciones de funcionamiento, o si existe una alteración en la instalación del sensor de flujo, se puede producir un cambio en el factor del medidor. Por lo tanto, el medidor Coriolis se debería probar bajo las nuevas condiciones tan pronto como sea práctico.

- Vaporización o la cavitación : Este fenómeno de flujo sucede principalmente por las burbujas que se pueden formar si la presión cae cerca de la presión de vapor a medida que el líquido pasa a través de la válvula de control. Las burbujas pueden colapsar repentinamente conforme la presión aumenta en el sistema lo que produce la cavitación. Por lo cual la cavitación es uno de los resultados de un caudal estrangulado. si se mantiene la presión de entrada constante, no resultará en un aumento adicional en el caudal y por lo tanto no tendremos cavitación.
- Temperatura : Los cambios en la temperatura del fluido afectan la elasticidad del tubo oscilatorio, las tensiones en la tubería cercana al medidor y la densidad del fluido, que puede cambiar la indicación de tasa de flujo del medidor en condiciones de flujo cero. El efecto de la temperatura es sistemático y se puede caracterizar y compensar para minimizar su influencia sobre la precisión del medidor Coriolis. El tamaño de este efecto depende del diseño del medidor y de la tubería, y de la magnitud del cambio de temperatura.
- Contrapresión: Se debe mantener una contrapresión suficiente en el medidor para evitar la vaporización súbita o la cavitación en el medidor. Las geometrías de los tubos y los diseños de los sensores pueden crear un área de baja presión dentro del sensor que es inferior a la presión de salida. Se debería consultar al fabricante cuando las condiciones de funcionamiento son cercanas a la presión de vapor del líquido. No aplicable en medición de gas a baja presión.

- Viscosidad: No existen datos que muestran que los cambios en la viscosidad del fluido afecten directamente la precisión del medidor. Sin embargo, los fluidos de alta viscosidad pueden afectar el funcionamiento del medidor debido a una caída de presión aumentada. Esto puede resultar en una necesidad de funcionamiento a un porcentaje de tasa nominal máxima más bajo.
- Densidad: Los cambios en la densidad del fluido pueden tener como resultado un cambio en el valor cero, que puede afectar la precisión del medidor. Un cambio significativo en la densidad del fluido, según lo determinado por la prueba, puede requerir el restablecimiento y la reprobación del medidor.
- Corrientes de flujo de fases múltiples (líquido/gas/sólidos). La presencia de gas o aire en una corriente de líquido es perjudicial para una medición precisa y debería minimizarse o eliminarse.



Figura 11. Transmisor empleado en el medidor de flujo de efecto Coriolis. Fuente: Tomada en campo, 2021.

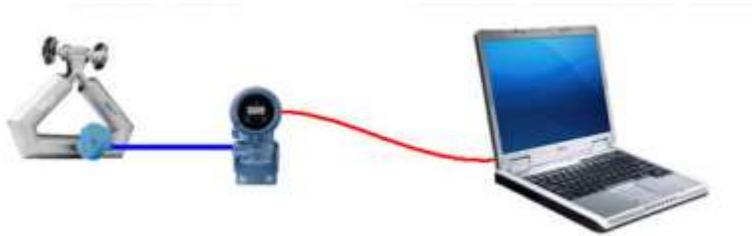


Figura 12. Conexión de Coriolis transmisor a la computadora. Fuente: Elaboración Propia, 2021.



Figura 13. ROC (Recolector de Pulsos). Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2021.

4. Calibración

4.1 Instalación del Sistema de Calibración

La instalación del Instrumento Bajo Calibración o IBC depende de las especificaciones del fabricante en caso de no existir debe basarse en el Manual of Petroleum Measurement Standards, American Petroleum Institute.

Nota: El IBC y sus instrumentos se encuentran previamente instalados por el cliente, la figura 14 ilustra esquemáticamente la configuración del medidor de flujo de efecto Coriolis.

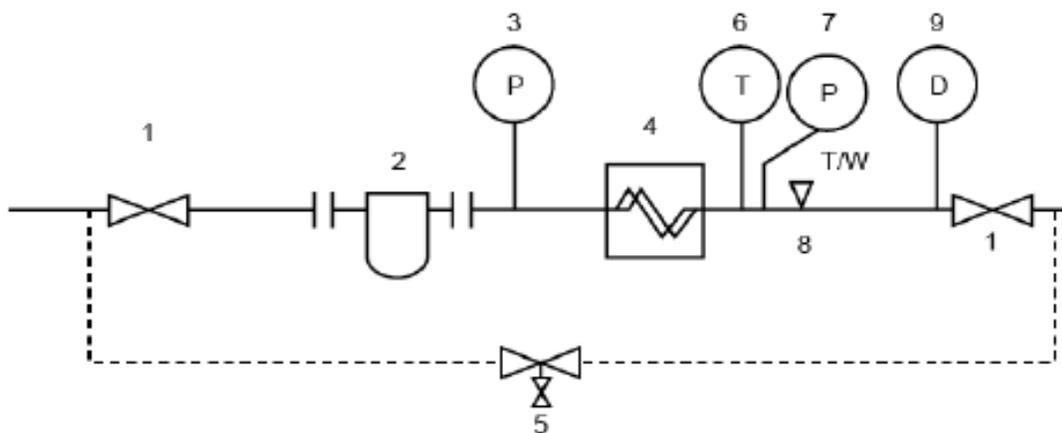


Figura 14. Esquema de Instalación del medidor de flujo de efecto Coriolis. Fuente: Elaboración Propia, 2021.

1. Válvula de bloqueo.
2. Filtro y/o eliminador de aire (opcional).
3. Manómetro.
4. Medidor de flujo de efecto Coriolis.
5. Desviación o puente de flujo con brida ciega (opcional).
6. Termopares o dispositivos indicadores de temperatura.
7. Manómetro
8. Conexión T/W Termopar (opcional)
9. Densímetro

Una vez que ya se comprendió el principio de funcionamiento del medidor de flujo de efecto Coriolis, así como las recomendaciones necesarias para su óptimo funcionamiento y las implicaciones particulares que se pueden presentar durante su operación e instalación, proseguiré a mencionar las actividades que desempeñe durante mi estadía en la empresa CALPRO S.A de C.V.

Actividades previas a la calibración.

1. En esta actividad me aseguré de que no se presentaron daños por transporte inadecuado a el medidor de flujo. Los daños de transporte se deben registrar en caso de detectarlos.
2. Instalé evitando tensiones mecánicas (torsión, flexión y alineación).
3. Monté el medidor de manera paralela y céntricamente entre las tuberías.

El proceso de instalación de nuestro patrón (Medidor Coriolis) cambia de acuerdo con el tipo de actividad que se vaya a realizar ya sea en laboratorio o en campo.

4.1.1 Instalación en laboratorio

Debido a que en el laboratorio se cuenta con una medida volumétrica suficientemente grande para realizar las corridas de calibración, se hace uso de esta. A continuación, enumerare las actividades que lleve a cabo para la instalación del medidor de flujo de efecto Coriolis en el laboratorio.

1. Verifiqué que la medida volumétrica no presentará fugas o abolladuras que puedan alterar su medición.
2. Instalé una bomba con una capacidad suficiente para simular las corridas de flujo que se tendrían en la operación.
3. Debido a que el medidor Coriolis ya se encuentra ensamblado durante su fabricación únicamente procedí a montarlo en un soporte con las recomendaciones mencionadas en el punto 3.1.2 de este trabajo.
4. La instalación y conexiones para la calibración del IBC la realicé de la siguiente manera:
 - 4.1. Coloqué una manguera de neopreno de 4 pulgadas la cual conecté de la bomba a nuestra medida volumétrica.

- 4.2. En la segunda conexión de nuestra medida volumétrica igualmente conecté una manguera de neopreno de 4 pulgadas a una válvula de bloqueo la cual conecté a nuestro medidor Coriolis con otra manguera con las mismas especificaciones.
- 4.3. Finalmente coloque otra válvula de bloqueo al final del medidor y una manguera con las especificaciones mencionadas nuevamente a nuestro medidor masico.
5. Para la Instalación del computador de flujo, es necesario que previamente se haya verificado en la tapa del transmisor Coriolis las señales de salida de este. Estas señales de salida son de las magnitudes que se estén midiendo presión, temperatura y densidad.
6. Estas señales se recolectan a partir de un cable de salida que proviene del transmisor y se conectan al ROC (Recolector de pulsos). En el cual se recolectarán los pulsos emitidos; este dispositivo se conectará a el computador con el software instalado previamente para su interpretación y poder proceder a las corridas de ambientación y verificación.

La figura 16 ilustra las conexiones que se realizan en la instalación del medidor de flujo en laboratorio, mientras que la figura 15 muestra la instalación del medidor previo a las corridas de ambientación .



Figura 15. Medidor de flujo de efecto Coriolis instalado. Fuente: Tomada en campo, 2021.

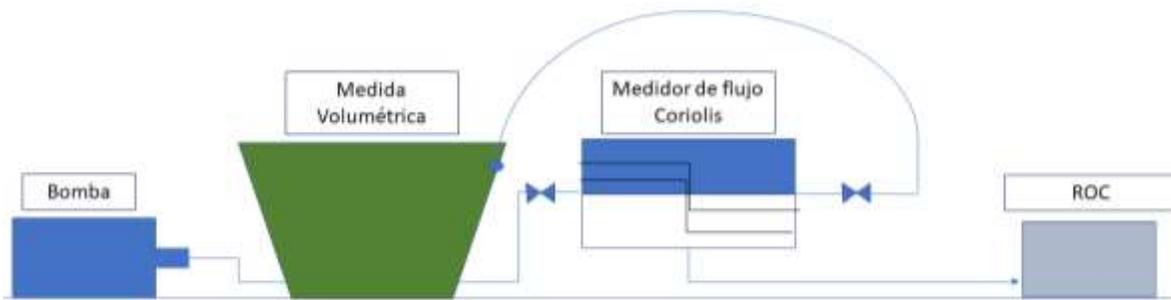


Figura 16. Representación esquemática conexiones medidor de flujo Coriolis. Fuente: Elaboración Propia, 2021.

4.1.2 Instalación en campo

Debido a que en campo no se cuenta con una medida volumétrica todo el proceso se realiza con las condiciones de flujo de operación incluido el bombeo del fluido. A continuación, enumerare las actividades que lleve a cabo para la instalación del medidor de flujo de efecto Coriolis en campo.

1. En primer instancia, me ubiqué en la tubería donde se encuentra el flujo para montar el equipo de calibración, en específico se debe ubicar la zona de disparos en la tubería. Éstos se encuentran tapadas con brida ciega, y así esta zona nos permitirá interactuar con el IBC y el flujo de operación.
2. Para poder conectar nuestro patrón de flujo, que en este caso es nuestro medidor de flujo de efecto Coriolis calibrado, cerré la válvula que se encuentra antes y después del IBC para poder abrir las bridas ciegas y conectar con ayuda de mangueras de neopreno nuestro patrón másico.
3. Al patrón de flujo se le conecta una manguera bridada de 4 pulgadas las cuales soportan una presión de 600 PSI para gas y 150 PSI para aceite.
4. Con ayuda de otra manguera conecté el final del patrón másico a la otra brida ciega con la finalidad de que pueda operar el flujo con normalidad y pueda pasar por ambos medidores tanto el del cliente como el que se lleva a campo el cual fue previamente calibrado en la empresa CALPRO S.A de C.V.

5. Finalmente abrí la válvula que previamente cerré y la válvula que está después del IBC para que continúe el flujo e iniciar con la calibración.

Para la calibración en caso de que se pueda se debe indicar al operador de la casa de bombas para que ajuste el flujo, lo recomendable es que sea en tres puntos. Uno el de operación, un flujo menor y otro mayor al de operación, en caso de que no se pueda se realiza el ajuste de flujo en la válvula de salida que se encuentra después de los disparos. Cabe destacar que al hacer esto se restringe el flujo y aumenta presión en el Coriolis.

6. Después de que conecté la parte mecánica, proseguí a la parte eléctrica, del medidor del cliente abrí la tapa del transmisor con la finalidad de identificar los pulsos que emite, a partir de las magnitudes medidas para poder conectarlo al ROC (Recolector de pulsos). y computador de flujo.

El computador de flujo necesita 4 conexiones para calibrar volumen y 2 para calibrar masa, una vez hechas las conexiones correspondientes y teniendo listo el software, se procede a calibrar.



Figura 17. Medidor de flujo de efecto Coriolis operando. Fuente: Tomada en campo, 2021.

Conexión Eléctrica:

- Conexión de la bomba (220 o 440 VCA) en el laboratorio.
- Aseguré la conexión a tierra física el sistema de medición.
- Conecté las señales de salidas de pulsos del patrón, pulsos del IBC, salidas de mili amperes del transmisor de temperatura del patrón y medidor, salidas de mili amperes del transmisor de presión del patrón y medidor al computador de flujo.
- Aseguré y confirmé la conexión eléctrica al IBC.
- Conecté los cables de comunicación a los transmisores de presión, temperatura, flujo y Densidad al computador de flujo



Figura 18. Conexión del transmisor. Fuente: Tomada en campo, 2021.

4.1.3 Recomendación de montaje:

4.1.3.1 Montaje en horizontal para la medición de líquidos

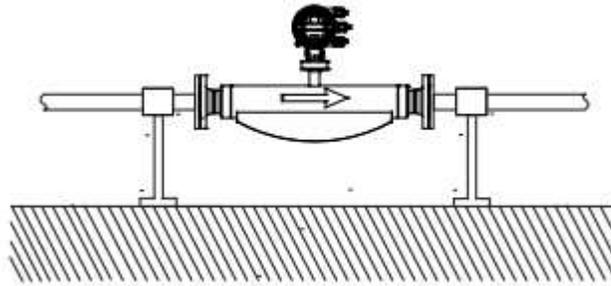


Figura 19. Montaje horizontal omega abajo. Fuente: API MPMS 5 CAP 6, 2020.

4.1.3.2 Montaje en horizontal para la medición de gases

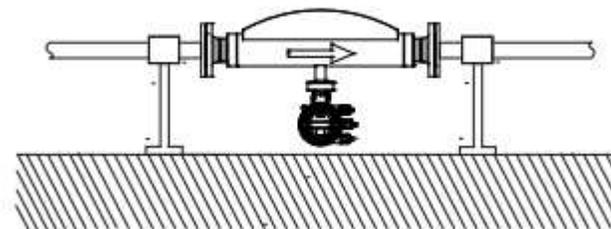


Figura 20. Montaje horizontal omega arriba. Fuente: API MPMS 5 CAP 6, 2020.

4.1.3.3 Montaje en Bandera para la medición de fluidos Viscosos

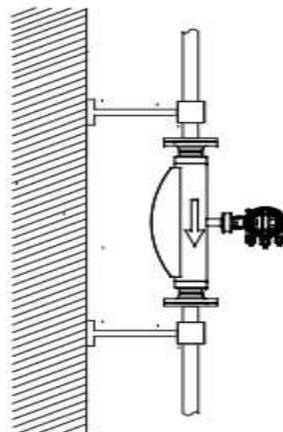


Figura 21. Montaje Vertical para fluidos viscosos Fuente: API MPMS 5 CAP 6, 2020.

- En la dirección de montaje, el caudal fluye por el sensor en el sentido de la flecha.
- El sensor debe instalarse en la parte baja del sistema y que la tubería tenga una forma de U, ya que si se instala en la parte alta ocurrirá la formación de burbujas de gas y aumentara el número de errores en la medición.
- Evitar la liberación de gases disueltos en el fluido y que las tuberías estén llenas.
- Para evitar la liberación de gases hacer una contrapresión.
- Para presiones negativas o líquidos con bajo punto de ebullición se debe asegurar que la presión de vapor sea mayor que el valor límite.
- Evitar cambios de fase en los fluidos medidos ya que al tener dos fases circulando existen errores de medición
- Asegúrese de que el sensor de caudal no entre en contacto con otros objetos.
- Para evitar daños en las conexiones a proceso y las tuberías por las fuerzas transversales, en el caso de dispositivos con un gran peso se deben utilizar dispositivos de apoyo adecuados.

4.1.4 Instrumentos adicionales

En esta actividad realice el montaje con los siguientes equipos de medición:

- Transmisor de temperatura en el patrón y en el medidor.
- Transmisor de presión en el patrón y en el medidor.
- Tina (tanque de almacenamiento) en el caso del laboratorio.
- Electrobomba con capacidades de 15 HP, 1 HP, 20 HP y variador de frecuencia en el caso del laboratorio.
- Conexiones y mangueras
- Computador de flujo



Figura 22. Tina de almacenamiento y conexiones Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2021.

4.2 Proceso de Calibración

Una vez que realicé la instalación y montaje del medidor de flujo de efecto Coriolis, de los instrumentos adicionales, las conexiones eléctricas y esta en funcionamiento el computador y recolector de pulsos, procedí a realizar las siguientes actividades.

4.2.1 Selección del patrón

En primer instancia definí las características del patrón con base a la orden de trabajo del cliente, para esto es necesario establecer los puntos siguientes:

- Intervalo de operación.

- Fluido de trabajo
- Presión mínima y la presión máxima de trabajo
- Temperatura mínima y temperatura máxima de trabajo
- Puntos de calibración

Registré estos datos generales, así como la configuración del IBC y fluido a utilizar como se menciona en el punto 4.2.3 de este trabajo. En caso de presentar anomalías que impidan la calibración será considerado no apto para su calibración y registrar en el apartado de “observaciones” del formato GT-XXX-XX “Toma de lectura de flujo”.



Figura 23. Medidor Coriolis desarmado Fuente: Tomada en laboratorio de trabajo, 2021.

4.2.2 Temporizar

Una vez instalado y definido la selección del patrón como se mencionó anteriormente se procede a temporizar el equipo de medición. Si por cuestiones del proceso no es factible respetar la instalación, el Patrón puede ser instalado aguas arriba del IBC y se registrará el comentario.

1. Programé en el variador de frecuencia un flujo similar al de operación,
2. Verifiqué que no existieran fugas y proseguí a realizar el ajuste del Zero.

Ajuste de Zero: Para verificar que el ajuste de Zero sea apropiado, hay que comprobar Zero en el Display. Este debe Oscilar entre valores positivos y negativos en la misma magnitud aproximadamente, la variación de Zero es dada por el fabricante. Es preferible tener válvulas de cierre ubicadas tanto corriente arriba como corriente abajo del medidor para bloquearlo durante el restablecimiento. Como mínimo, se requiere una válvula de cierre y purga ubicada corriente abajo del medidor.

Se requiere la verificación del valor Zero almacenado como parte del procedimiento de funcionamiento normal del medidor.

El rendimiento del medidor y la salida Zero observadas específicamente se verán afectadas de manera negativa por la curvatura axial y las tensiones torsionales producidas por la presión, el peso y los efectos térmicos; estas tensiones y cargas asociadas se pueden minimizar utilizando tuberías alineadas adecuadamente y soportes bien diseñados.

Esta operación es necesaria cuando se calibra, cuando se instala, cuando se cambia de fluido.

3. Fijé el caudal de prueba a través de la operación de la válvula instalada a la entrada del medidor bajo calibración y se ajusta mediante el variador de frecuencia.

En caso de que la calibración se realice en la línea del cliente, será a ese flujo.

4. Inicié la corrida de ambientación, abriendo la válvula a la salida del medidor de referencia y arranqué el computador de flujo.
5. Durante el tiempo de la prueba registré la temperatura, densidad y presión del fluido en ambos medidores. y lo registré en el formato "Toma de Lecturas".

Cuando en el medidor de referencia ha pasado el tiempo mínimo de recaudación de pulsos (más de 10 000 pulsos). Cerré la válvula del medidor de referencia, y se capturan los pulsos del IBC y Patrón.

4.2.3 Configuración

Antes de empezar con la calibración tome en cuenta el valor de la densidad, es necesario que esta permanezca estable, ya que nuestro medidor Coriolis está configurado para indicar masa y se está probando en comparación con un estándar volumétrico. Necesité contar con una densidad estable ya que así se minimizan las variaciones en la densidad entre el probador, el medidor y la determinación de la densidad utilizada en el cálculo.

Debido a que la densidad de flujo medida se utilizará para convertir el volumen del probador en una masa o la masa del medidor Coriolis en un volumen, cualquier diferencia en la densidad y la densidad de flujo verdadero durante la prueba tendrán como resultado errores en los cálculos. Esto, a su vez, resultará en un error en el factor del medidor. Por lo tanto, para minimizar los errores, es sumamente importante que la densidad permanezca estable durante la prueba.

Cuando se analice la medición de densidad, es importante distinguir entre la densidad base y la densidad de flujo, y cuándo se aplica cada una.

La densidad base o pb, es la densidad del fluido en las condiciones base de temperatura y presión. La densidad base se necesita para determinar los factores de corrección requeridos por temperatura y presión, cuando el probador y el medidor Coriolis están configurados para indicar volumen.

La densidad de flujo o pf, es la densidad del fluido en las condiciones reales de temperatura y presión del flujo.

La determinación precisa de la densidad del flujo es crítica para probar de manera satisfactoria un medidor Coriolis cuando el dispositivo de prueba y el medidor Coriolis no se miden en las mismas unidades de flujo: uno mide la masa, el otro mide el volumen.

4.2.4 Comparar (Corridas de Calibración)

Una vez que se ha establecido la configuración del IBC, del patrón y se han realizado las pruebas para temporizar el sistema se procede a calibrar el medidor de flujo de efecto Coriolis del cliente. A continuación, se enumerarán las actividades que lleve a cabo para la calibración del equipo de medición.

1. Inicié la corrida, abriendo la válvula a la salida del medidor de referencia.
2. Arranqué el computador de flujo.
3. Durante el tiempo de la prueba registré la temperatura, densidad y presión del fluido en ambos medidores. y lo Registré en el formato “Toma de Lecturas”
4. Cuando en el medidor de referencia ha pasado el tiempo mínimo de recaudación de más de 10 000 pulsos, cerré la válvula del medidor de referencia, y se captura los pulsos del IBC y Patrón.

En caso de que el IBC se encuentre fuera de especificación por el fabricante se debe realizar el ajuste, ingresando en la configuración del IBC el valor del “KF” obtenido.

Cabe destacar que cuando la calibración es interrumpida se debe “abortar” e iniciar nuevamente la calibración.

5. Realicé las corridas una arriba y otra abajo ($\pm 20\%$) del flujo de operación de acuerdo con lo que solicita el cliente, para ello, el flujo se ajusta mediante la bomba del sistema de medición por medio de la frecuencia del variador de ser posible.
6. Establecí el flujo al cual se va a calibrar, estabilizar el flujo, considerando que el flujo no varíe más de $\pm 10\%$ de su valor promedio.
7. Inicié las corridas arrancando el computador.
8. Una vez que el flujo ha sido estabilizado comprobé que la estabilidad de temperatura y presión entre el medidor bajo calibración y el patrón ha sido

alcanzada. El criterio de estabilidad para temperatura es: Temperatura en el medidor menos la temperatura del patrón igual o menor a 0.18°C . El criterio de estabilidad de presión es de ± 0.05 MPa entre el medidor y el patrón, mientras que la densidad ± 0.6 kg/m³.

9. Ya que se haya alcanzado la estabilidad térmica del sistema, realicé la corrida y registré el número de pulsos, promedio de temperatura, densidad y presión.
10. Cuando en el medidor de referencia ha pasado el volumen establecido (tiempo mínimo de recaudación), cerré la válvula del medidor de referencia, y se captura los pulsos del IBC y Patrón.
11. Realicé las corridas de calibración hasta cumplir con el criterio de repetibilidad entre pulsos de 5 corridas completas consecutivas. Repetí esto para dos flujos distintos más, uno arriba y otro abajo del flujo de operación, o bien los flujos indicados por el cliente.
12. Respaldé los datos de la calibración; Seleccioné toda la pantalla del Software. Esto se hace para cada punto de calibración dentro del mismo archivo.
13. Concluidos los tres puntos de calibración, desconecté las conexiones eléctricas, electrónicas y la instalación del sistema de medición, guardando los patrones, y conexiones.
14. Con los datos obtenidos calculé el resultado de la medición (mensurando) con los datos obtenidos, y obtuve el “MF”.
15. Utilicé el valor del “MF” para hacer la corrección y anoté si la prueba inicial es conforme en el formato “Toma de Lecturas”.

4.3 Desmontar

- Cerré todas las válvulas de flujo antes y después del IBC
- Quité las bridas para la desconexión de las mangueras usadas
- Volví a tapar la brida ciega
- Separé el IBC del patrón másico y vacié el poco flujo que había
- Restablecí la configuración de la línea flujo del IBC para dar continuidad al flujo de los fluidos tal como se encontraba antes del servicio.

5. Resultados

El meter factor o “MF” se obtiene a partir de la relación entre el volumen del patrón a condiciones base y el Volumen del medidor a condiciones base.

5.1 “MF” Masa VS Masa

En este ejercicio obtendremos el “MF” para un medidor de flujo de tipo Coriolis que midió gasolina estándar

0.738 Kg/L @ 20 °C.

Tabla 1. Datos de calibración empleando como referencia un medidor masico
Fuente: Hoja de cálculo, 2021.

| Corridas | IBC (kf=200 pulsos/kilo) | | | | Patrón Másico(Medidor Másico) Kf= 230 pulsos/kilo | | |
|----------|--------------------------|-------|---------------|--------|--|--------|--------|
| | Flujo (Kg/min) | T(°C) | Presión (MPa) | Pulsos | Presión (MPa) | T (°C) | Pulsos |
| 1 | 35 | 22.73 | 0.8456 | 498871 | 0.8542 | 22.74 | 498867 |
| 2 | 45 | 22.74 | 0.8437 | 498876 | 0.8546 | 22.75 | 498871 |
| 3 | 70 | 22.72 | 0.8398 | 498870 | 0.8551 | 22.74 | 498877 |
| 4 | 75 | 22.75 | 0.8591 | 498871 | 0.8553 | 22.73 | 498880 |
| 5 | 100 | 22.74 | 0.8594 | 498870 | 0.8564 | 22.75 | 498874 |

El “MF” del patrón es de 1.00020, recordar que para este tipo de servicios ya se lleva calibrado.

Tabla 2. Resultados de calibración empleando como referencia un medidor masico . Fuente: Hoja de cálculo, 2021.

| MF |
|-------------|
| 0.869587018 |
| 0.869549032 |
| 0.870005338 |
| 0.870081383 |
| 0.869891249 |
| 0.86982 |

Como interpretación de este “MF” podemos decir que el medidor que se calibró estaba midiendo una mayor cantidad que lo que en realidad era.

5.2 “MF” Masa VS Volumen

Ahora proseguiremos a realizar un ejercicio donde se calcule el “MF” de Masa vs volumen. Para un medidor de flujo de tipo Coriolis que midió gasolina premium.

0.729 Kg/L @ 20 °C.

Tabla 3. Datos de calibración empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen, Fuente: Hoja de cálculo, 2021

| Corridas | IBC (kf=7.54 pulsos/litro) | | | | Patrón Másico(Medidor Másico) Kf= 230 pulsos/kilo | | |
|----------|----------------------------|-------|---------------|--------|--|--------|--------|
| | Flujo (L/min) | T(°C) | Presión (MPa) | Pulsos | Presión (MPa) | T (°C) | Pulsos |
| 1 | 5045.481 | 22.72 | 0.853179 | 22871 | 0.8200 | 22.76 | 507789 |
| 2 | 5043.98 | 22.71 | 0.853182 | 22876 | 0.8237 | 22.69 | 507792 |
| 3 | 5047.147 | 22.73 | 0.853240 | 22870 | 0.8375 | 22.71 | 507787 |
| 4 | 5052.3116 | 22.74 | 0.853255 | 22871 | 0.8375 | 22.8 | 507783 |
| 5 | 5050.15 | 22.73 | 0.853241 | 22870 | 0.8375 | 22.74 | 507785 |

El “MF” del patrón es de 0.99970, recordar que para este tipo de servicios ya se lleva calibrado.

Tabla 4. Resultados de calibración empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen. Fuente: Hoja de cálculo, 2021

| MF |
|------------|
| 1.00058049 |
| 1.00026126 |
| 1.00098487 |
| 1.00109969 |
| 1.00100205 |
| 1.00078 |

Podemos interpretar que el medidor previo a la calibración realizaba o estimaba una medición menor a lo que representaba en la realidad.

5.3 Informe de Calibración

Una vez que realicé la calibración y se comprobó que cumplió con los estándares de repetitividad y estabilidad procedí a elaborar el informe de calibración. Donde realicé las siguientes actividades.

1. Ingresé los datos de la prueba en el software de flujo en la plantilla de Excel.
2. Revisé que los datos registrados de la calibración correspondan con los procesados en el certificado
3. Además de llevar en la plantilla el registro de las condiciones ambientales.
4. Aseguré que los datos asentados en el informe de calibración sean los del último informe de calibración del patrón utilizado.
5. Todos los certificados de calibración llevan la firma del signatario encargado y el signatario que realizó la medición.

A continuación, se muestran dos hojas que reflejan un informe de calibración con datos obtenidos del computador de flujo.

La interpretación de estos resultados es reportada al cliente u operador petrolero que haya solicitado el servicio de calibración.

EJEMPLO DE REPORTE DE CALIBRACIÓN

| | | | | | |
|--|------------------------------------|--|---|----------------|----------------|
| INFORMACIÓN DE PROBADOR | | EMPRESA DEL PROBADOR <u>CAIPRO</u> | | | |
| FECHA DE CERTIFICACIÓN: <u>05/04/2019</u> | (AÑO/MES/DÍA) | | | | |
| FACTOR K DEL MEDIDOR <u>230 pulsos/kg</u> | (AÑO/MES/DÍA) | | | | |
| N.º DE SERIE <u>12196762</u> | MODELO <u>CD M 100 PA M1000 SM</u> | | | | |
| INFORMACIÓN SOBRE EL MEDIDOR | | | | | |
| N.º DE SERIE <u>11033952</u> | FABRICANTE <u>M:romotion</u> | | | | |
| ID DEL MEDIDOR <u>TMPE-007</u> | MODELO <u>MF200 M4 18 LVA?</u> | | | | |
| UBICACIÓN <u>San Luis Potosí</u> | | | | | |
| FACTORES DE CALIBRACIÓN DE FLUJO DEL FABRICANTE <u>215.2</u> | | KF (en Equipo Asociado) <u>200 pulsos/kg</u> | | | |
| CONDICIONES DEL PROCESO | | | | | |
| TASA DE FLUJO _____ | TIPO DE FLUIDO <u>Gasolina</u> | | | | |
| DENSIDAD OBTENIDA MEDIANTE <u>Medidor Efecto Coriolis</u> | (DISPOSITIVO/UBICACIÓN) | | | | |
| INFORMACIÓN DE PATRÓN | | | | | |
| FACTOR DE MEDIDOR ANTERIOR <u>15/10/2010</u> | (FECHA DE PRUEBA AA/MM/DD) | <u>200 pulsos/kg</u> | (FACTOR) | | |
| NÚMERO DE CORRIDA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| PULSOS TOTALES DEL PATRÓN | <u>498,857</u> | <u>498,871</u> | <u>498,877</u> | <u>498,880</u> | <u>498,875</u> |
| PULSOS TOTALES DEL IBC | <u>498,871</u> | <u>498,876</u> | <u>498,877</u> | <u>498,871</u> | <u>498,875</u> |
| DENSIDAD EN EL PATRÓN <u>kg/m³</u> (en condiciones de flujo) | <u>738.00</u> | <u>738.00</u> | <u>738.00</u> | <u>738.00</u> | <u>738.00</u> |
| TIEMPO DE PRUEBA (s) | <u>17.0</u> | <u>17.0</u> | <u>17.0</u> | <u>17.0</u> | <u>17.0</u> |
| VOLUMEN DEL PATRÓN (Pulsos del patrón/Factor k del patrón) | <u>2</u> | | | | |
| MASA DEL PATRÓN | <u>2169.47</u> | <u>2169.47</u> | <u>2169.47</u> | <u>2169.47</u> | <u>2169.45</u> |
| MASA DEL IBC (Pulsos/Masa Factor K) | <u>2494.35</u> | <u>2494.35</u> | <u>2494.35</u> | <u>2494.35</u> | <u>2494.35</u> |
| FACTOR DEL IBC (Masa del Patrón/Masa del IBC) | <u>0.86973</u> | <u>0.86973</u> | <u>0.86973</u> | <u>0.86973</u> | <u>0.86974</u> |
| FACTOR DEL IBC PROMEDIO | <u>0.8697</u> | | UBICACIÓN DE LA ENTRADA (de Factor del Medidor) | | |
| REPETITIVIDAD DE PORCENTAJE <u>0.02</u> | (MAX - MIN) / MIN * 100 | | ¿CERO VERIFICADO? <u>SI</u> <u>-2</u> <u>-2</u> SINO FINAL FINAL | | |
| PROBADOR _____ | (SEÑAL) | IBC | (SEÑAL) | (FECHA) | (FECHA) |

EJEMPLO DE REPORTE DE CALIBRACIÓN

| | | | | | | |
|---|--|---|---|--------------------------------------|----------------|--|
| INFORMACIÓN DE PROBADOR | | FECHA DE CERTIFICACIÓN: <u>05/10/2014</u> | | EMPRESA DEL PROBADOR: <u>CAI PRO</u> | | |
| FACTOR K DEL MEDIDOR: <u>230 Pulso/Kilo</u> | | | | | | |
| N.º DE SERIE: <u>12196760</u> | | MODELO: <u>CHF-200-H4-18 K/A3</u> | | | | |
| INFORMACIÓN SOBRE EL MEDIDOR | | | | | | |
| N.º DE SERIE: <u>14027702</u> | | FABRICANTE: <u>Micra 250</u> | | | | |
| ID DEL MEDIDOR: <u>CHPF-007</u> | | MODELO: <u>CHF200H418 KDL7</u> | | | | |
| UBICACIÓN: <u>Talcahuano</u> | | | | | | |
| FACTORES DE CALIBRACIÓN DE FLUJO DEL FABRICANTE: <u>215.874</u> | | KF (en Equipo Asociado): <u>7.54 Pulso/Kilo</u> | | | | |
| CONDICIONES DEL PROCESO | | | | | | |
| TASA DE FLUJO: _____ | | TIPO DE FLUIDO: <u>Gasolina</u> | | | | |
| FUENTE DE DENSIDAD: <u>Medidor Electro Coriolis</u> <small>(DEPOSITO/UBICACIÓN)</small> | | | | | | |
| INFORMACIÓN DE PATRÓN | | | | | | |
| FACTOR DE MEDIDOR ANTERIOR: <u>12/10/2011</u> | | Z.54 Pulso/Kilo | | | | |
| | | <small>(FECHA DE PRUEBA ANTERIOR)</small> | | <small>(FACTOR)</small> | | |
| NÚMERO DE CORRIDA | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| PULSOS TOTALES DEL PATRÓN | | <u>507,789</u> | <u>507,792</u> | <u>507,787</u> | <u>507,783</u> | |
| PULSOS TOTALES DEL IBC | | <u>22,871</u> | <u>22,876</u> | <u>22,870</u> | <u>22,871</u> | |
| TIEMPO DE PRUEBA (s) | | <u>170</u> | <u>170</u> | <u>170</u> | <u>170</u> | |
| DENSIDAD PATRÓN | | <u>777.10</u> | <u>777.25</u> | <u>776.92</u> | <u>776.84</u> | |
| MASA DEL PATRÓN <small>(Pulsos/Factor K de Masa o Pantalla del Visualizador Total)</small> | | <u>3062.97</u> | <u>3062.81</u> | <u>3062.87</u> | <u>3062.04</u> | |
| MASA DEL IBC <small>(Pulsos/Factor K de Masa o Pantalla del Visualizador Total)</small> | | <u>3042.21</u> | <u>3042.85</u> | <u>3042.09</u> | <u>3042.25</u> | |
| FACTOR DEL IBC <small>(Medidor de Masa Maestro/Masa del Medidor)</small> | | <u>1.00026</u> | <u>1.00025</u> | <u>1.00026</u> | <u>1.00026</u> | |
| FACTOR DE IBC PROMEDIO | | <u>1.00026</u> | UBICACIÓN DE LA ENTRADA <small>(de Factor del Medidor)</small> | | | |
| REPETITIVIDAD DE PORCENTAJE | | TRANSMISIÓN DE CÁLCULO | | | | |
| <u>0.01</u> <small>(MAX - MIN) / MIN * 100</small> | | ¿CERO VERIFICADO? | | SI <u>0</u> NO <u>1</u> | | |
| PATRÓN | | IBC | | | | |
| <small>(SERIAL)</small> | | <small>(FECHA)</small> | <small>(SERIAL)</small> | <small>(FECHA)</small> | | |

6. Conclusiones

1. El medidor de flujo de efecto Coriolis debido a la exactitud que nos proporciona al momento de cuantificar los hidrocarburos y que es independiente de las propiedades dinámicas de flujo lo hacen más atractivo respecto a otros medidores de flujo. Sin embargo, factores como su costo de instalación y sensibilidad a las vibraciones hacen que este medidor requiera una mayor inversión y cuidado para su óptimo funcionamiento.
2. Las fuerzas Coriolis producidas por el flujo en los tubos de medida causan un desfase en la oscilación del tubo siendo esta proporcional al flujo másico. Por lo cual entre mayor sea este desfase implicara que hay un mayor flujo.
3. Las condiciones a las cuales se llevará a cabo la prueba deben ser tan cercanas a las condiciones de medición reales o como resulte práctico. Ocasionalmente, puede haber excepciones para este requisito; sin embargo, el propósito esencial de la prueba es confirmar el rendimiento del medidor en condiciones de funcionamiento normales.
4. Las condiciones bajo las cuales se prueba el medidor son las siguientes: Se debe tener una composición estable del producto para evitar así la cavitación. La temperatura y presión estables del producto para evitar cambios de fase del fluido. Una tasa de flujo estable para evitar errores al momento de cuantificar los pulsos del medidor. Se deben probar las válvulas y los sellos para asegurar que no haya fugas. Se deben realizar corridas de ambientación para evacuar el aire/gas del sistema y temporizar el sistema antes de la calibración.
5. Si el medidor Coriolis está configurado para indicar masa y se está probando en comparación con un estándar volumétrico (probador de tanque volumétrico, probador de tubo volumétrico, probador de volumen pequeño o medidor volumétrico maestro), es esencial que la densidad permanezca estable o en su defecto siempre se conozca.

6. Debido a que el medidor de flujo de efecto Coriolis es altamente sensible a vibraciones, cambios de fase y condiciones flujo a las que se haya calibrado es necesario tener un constante monitoreo de las propiedades y factores que puedan influir en la medición.
7. Una de las herramientas que más ayuda proporciona a la hora de monitorear las variables de interés o que interactúan con el medidor es el recolector de pulsos, el cual debemos estar conectado de forma correcta para tener las unidades y magnitudes en tiempo real, esta información se meterá a una base de datos que ayudará a detectar cualquier inconveniente.
8. Una vez que se realiza la calibración se tendrá una incertidumbre menor ya que con la ayuda del meter factor se corregirá de forma acertada la cuantificación de volumen o masa de los hidrocarburos
9. Obtener un meter factor mayor 1 nos indica que nuestro medidor antes de la calibración estaba midiendo una menor cantidad de volumen, por lo cual al multiplicar este volumen por nuestro factor de corrección obtendremos el volumen real que está pasando por el medidor . El cual es mayor de lo que se tenía previo a la calibración.
10. El mayor problema se da cuando nuestro medidor está arrojando una mayor cantidad de hidrocarburos de lo que en realidad es, esto se da cuando después de la calibración tenemos un meter factor menor a 1, ya que al multiplicar el volumen o cantidad de hidrocarburos reflejara una cantidad menor a la que estaba arrojando previo a la calibración.
11. Como se mostró a lo largo de este informe se enlistaron las actividades que estuve desarrollando para la correcta calibración de un medidor de flujo de efecto Coriolis, donde plasme los procedimientos y actividades que realice y que se llevan a cabo en campo y laboratorio, lo cual me permitió tener una visión mas completa de las actividades y operaciones que se realizan en la industria.

Anexo A

Cálculos y Fórmulas

“MF” Masa VS Masa

Para el meter factor del medidor y la relación de masa vs masa en la cual el medidor de flujo de efecto Coriolis se calibró por medio de un patrón (otro medidor másico).

$$MF = \frac{\frac{N_p}{KF_p} * MF_p}{\frac{N_m}{KF_m}} \text{ [adimencional]} \quad (1)$$

Donde:

N: Número de pulsos del medidor

KF: Factor K del medidor

$\frac{N}{KF}$: Volumen determinado por el medidor bajo prueba a condiciones de operación [Kg].

p: Se emplea para designar los factores de corrección del patrón de referencia empleado.

m: Para designar los factores de corrección del medidor bajo prueba.

“MF” Masa VS Volumen

Para el meter factor del medidor y la relación que tiene masa vs volumen en la cual el medidor de flujo de efecto Coriolis se calibró por medio de un patrón (otro medidor másico)

$$MF = \frac{\left[\frac{N_p}{KF_p} / \rho_f\right] * MF_p * CTL_p * CPL_p}{\frac{N_m}{KF_m} * CTL_m * CPL_m} \text{ [adimencional]} \quad (2)$$

Donde:

N: Número de pulsos del medidor

KF: Factor K del medidor

$\frac{N_m}{KF_m}$: Volumen determinado por el medidor bajo prueba a condiciones de operación [L].

p: Se emplea para designar los factores de corrección del patrón de referencia empleado.

m: Para designar los factores de corrección del medidor bajo prueba.

ρ_f : Densidad de flujo [$\frac{Kg}{L}$]

MF_p : Meter factor del patron [adimensional]

CPL - Factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del líquido [adimensional]

$$CPL = 1 + \frac{1}{1 - (P_a) \cdot F} \text{ [adimensional]} \quad (2.1)$$

Donde:

P_a : Presión del fluido a las condiciones de la prueba [MPa]

F : Factor de compresibilidad del líquido [MPa⁻¹]

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0.87096 \cdot \rho_{20}^{-2} + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot \rho_{20}^{-2}) \text{ [MPa}^{-1}] \quad (2.2)$$

Donde:

T – Temperatura a la cual se conoce la densidad del fluido, [°C]

ρ_{20} – Densidad del fluido a 20 °C, [kg/L]

CTL - Factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del líquido [adimensional].

$$CTL = 1 + \beta \cdot (T - T_{20}) \quad (2.3)$$

β – Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido [°C⁻¹]

T_{20} – Temperatura de referencia [°C].

T – Temperatura promedio del líquido dentro del instrumento [°C].

Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido a una temperatura de 20 °C [°C⁻¹].

$$\beta = \frac{k_0}{\rho_{20}^2} + \frac{k_1}{\rho_{20}} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}] \quad (2.4)$$

K_0, K_1 – Constantes propias de cada líquido.

ρ_{20} – Densidad del fluido a 20 °C, [kg/m³]

Cálculos del mensurando

Desarrollo de cálculos del “MF” Masa VS Masa

Se realiza el desglose para el cálculo del meter factor de la calibración del medidor de flujo de efecto Coriolis contra un patrón de flujo (medidor másico).

Para este desarrollo se utiliza un kf dado del fabricante de los medidores:

$$KF_m = 200 \left[\frac{\text{pulsos}}{\text{kg}} \right] \text{ y } KF_p = 230 \left[\frac{\text{pulsos}}{\text{kg}} \right]$$

Dando seguimiento al desarrollo del cálculo de meter factor de la calibración en comparación masa o masa emplearemos la ecuación numero 1:

$$MF = \frac{498867 [\text{pulsos}] / 230 \left[\frac{\text{pulsos}}{\text{kg}} \right] \cdot 1.00020 [1]}{498871 [\text{pulsos}] / 200 \left[\frac{\text{pulsos}}{\text{kg}} \right]} = 0.89973215 [1]$$

Tabla 5. Resultado de las corridas del patrón masico empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Masa. Fuente: Hoja de cálculo, 2021.

| Patrón Másico(Medidor Másico) Kf= 230 pulsos/kilo | | | MF=1.00020 |
|--|--------|--------|------------------|
| Presión (MPa) | T (°C) | Pulsos | Vol. Patron@20°C |
| 0.8542 | 22.74 | 498867 | 2169.420754 |
| 0.8546 | 22.75 | 498871 | 2169.438149 |
| 0.8551 | 22.74 | 498877 | 2169.464241 |
| 0.8553 | 22.73 | 498880 | 2169.477287 |
| 0.8564 | 22.75 | 498874 | 2169.451195 |

Tabla 6. Resultado de las corridas del IBC empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Masa. Fuente: Hoja de cálculo, 2021.

| IBC (kf=200 pulsos/kilo) | | | | | |
|--------------------------|----------------|-------|---------------|--------|--------------------|
| Corridas | Flujo (Kg/min) | T(°C) | Presión (MPa) | Pulsos | Vol. Medidor @20°C |
| 1 | 35 | 22.73 | 0.8456 | 498871 | 2494.355 |
| 2 | 45 | 22.74 | 0.8437 | 498876 | 2494.38 |
| 3 | 70 | 22.72 | 0.8398 | 498870 | 2494.35 |
| 4 | 75 | 22.75 | 0.8591 | 498871 | 2494.355 |
| 5 | 100 | 22.74 | 0.8594 | 498870 | 2494.35 |

Tabla 7. Resultado de las corridas de calibración y MF empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Masa.

Fuente: Hoja de cálculo, 2021.

| Vol. Patron@20°C | Vol. Medidor @20°C | MF |
|------------------|--------------------|-------------|
| 2169.420754 | 2494.355 | 0.869732157 |
| 2169.438149 | 2494.38 | 0.869730413 |
| 2169.464241 | 2494.35 | 0.869751334 |
| 2169.477287 | 2494.355 | 0.869754821 |
| 2169.451195 | 2494.35 | 0.869746104 |
| | | 0.86974 |

Desarrollo de cálculos de “MF” Masa VS volumen

Se realiza el desglose para el cálculo del meter factor de la calibración del medidor de flujo de efecto Coriolis contra un patrón de flujo (medidor másico), en configuración de masa vs volumen:

Para este desarrollo se utiliza un k_f dado del fabricante de los medidores:

$$KF_m = 7.54 \left[\frac{\text{Pulsos}}{\text{Litro}} \right] \text{ y } KF_p = 230 \left[\frac{\text{Pulsos}}{\text{Kg}} \right]$$

Continuando con el desarrollo para obtener el MF se prosigue a realizar el cálculo de los factores de corrección del IBC, es decir el cálculo de CTL Y CPL

Para el cálculo del CPL del IBC emplearemos la ecuación 2.1 detallada anteriormente, pero para poder realizar este cálculo es necesario conocer el factor de compresibilidad del líquido a partir de la ecuación 2.2 :

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 22.72[^\circ\text{C}] + 0.87096 \cdot 0.7292^{-2}[\text{Kg/l}] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 22.72[^\circ\text{C}] \cdot 0.7292^{-2}[\text{Kg/l}]) = 0.00122375 \text{MPa}^{-1}$$

$$CPL_m = \frac{1}{1 - (0.853179 [\text{MPa}]) \cdot 0.0012375 [\text{MPa}^{-1}]} = 1.00104517[1]$$

En seguida proseguiremos a realizar el cálculo del CTL del IBC para ello emplearemos la ecuación 2.3, debido a que es necesario conocer Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido a una temperatura de referencia emplearemos antes la ecuación 2.4.

Para proceder con el cálculo de β usando las constantes k_0 y k_1 es necesario estimarlas en este caso se recurrió a el manual API 11 usando la densidad del fluido, que en este caso fue gasolina premium.

$$k_0 = 192.4571 \quad \rho = 729,2 \text{ kg/m}^3$$

$$k_1 = 0.2438$$

$$\beta = \frac{192.4571}{729.2^2} + \frac{0.2438}{729.2} = 0.00069628$$

Para el cálculo de CTL_m

$$CTL_m = 1 + (0.00069628 * (22.72 - 20)) = 1.0018939 [1]$$

Una vez calculado los factores de corrección del IBC proseguiremos a realizar lo mismo, pero con el patrón masico. Es decir, volveremos a estimar los valores de CTL Y CPL para nuestro patrón.

Es necesario que realicemos que transformemos nuestra medición de masa del patrón a volumen .Para ello utilizaremos la densidad de flujo que nos arroja cada corrida.

$$Volumen = \frac{\frac{N_p}{K_{Fp}}}{\rho_f} [\text{Litros}] \quad (2.5)$$

$$Volumen = \frac{\frac{507789}{230}}{0.7272} = 3035.99871 [\text{litros}]$$

Para el cálculo del CPL del patron emplearemos la ecuación 2.1 detallada anteriormente, pero para poder realizar este cálculo es necesario conocer el factor de compresibilidad del líquido a partir de la ecuación 2.2 :

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 22.76[^\circ\text{C}] + 0.87096 \cdot 0.7292^{-2}[\text{Kg/l}] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 22.76[^\circ\text{C}] \cdot 0.7292^{-2}[\text{Kg/l}]) = 0.00122415 \text{MPa}^{-1}$$

$$CPL_m = \frac{1}{1 - (0.8200 [\text{MPa}]) \cdot 0.00122415 [\text{MPa}^{-1}]} = 1.00100481[1]$$

En seguida proseguiremos a realizar el cálculo del CTL del patrón para ello emplearemos la ecuación 2.3, como ya conocemos el Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido a una temperatura de referencia simplemente sustuiremos.

Para el cálculo de CTL_m

$$CTL_m = 1 + (0.00069628 * (22.76 - 20)) = 1.0019217 [1]$$

Finalmente se sustituyen los resultados obtenidos en la fórmula 2 para obtener el resultado del MF

$$MF = \frac{3035.99871(\text{litros}) \cdot 1.0019217 \cdot 1.000481}{(22871 [\text{pulsos}] / 7.54 [\frac{\text{pulsos}}{\text{litro}}]) \cdot 1.0018939 \cdot 1.00104517} = 1.00058049$$

Tabla 8. Resultado de las corridas del patrón masico empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen. Fuente: Hoja de cálculo, 2021.

| Patrón | | | | | |
|-------------|------------------|-----------|------------|------------|--------------|
| Volumen [L] | Densidad [Kg/m3] | CTL | F | CPL | Vol. P @20°C |
| 3035.99871 | 727.20 | 1.0019217 | 0.00122415 | 1.00100481 | 3043.97612 |
| 3035.80791 | 727.25 | 1.0018730 | 0.00122346 | 1.00100878 | 3043.6488 |
| 3037.15617 | 726.92 | 1.0018869 | 0.00122365 | 1.00102586 | 3045.09484 |
| 3037.46653 | 726.84 | 1.0019496 | 0.00122455 | 1.00102661 | 3045.59878 |
| 3037.14421 | 726.92 | 1.0019078 | 0.00122395 | 1.00102611 | 3045.1471 |

Tabla 9. Resultado de las corridas del IBC empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen. Fuente: Hoja de cálculo, 2021.

| Corridas | IBC | | | | |
|----------|---------|-----------|-------------|------------|----------------|
| | Vol. | CTL | F | CPL | Vol. IBC @20°C |
| 1 | 3033.29 | 1.0018939 | 0.001223754 | 1.00104517 | 3042.21015 |
| 2 | 3033.95 | 1.0018869 | 0.001223655 | 1.00104509 | 3042.853836 |
| 3 | 3033.16 | 1.0019009 | 0.001223854 | 1.00104533 | 3042.098761 |
| 4 | 3033.29 | 1.0019078 | 0.001223953 | 1.00104544 | 3042.253235 |
| 5 | 3033.16 | 1.0019009 | 0.001223854 | 1.00104533 | 3042.098765 |

Tabla 10. Resultado de las corridas de calibración y MF empleando como referencia un medidor masico en configuración Masa vs Volumen.

Fuente: Hoja de cálculo, 2021.

| Vol. IBC @20°C | Vol. P @20°C | MF |
|----------------|--------------|------------|
| 3042.21015 | 3043.976115 | 1.00058049 |
| 3042.853836 | 3043.6488 | 1.00026126 |
| 3042.098761 | 3045.09484 | 1.00098487 |
| 3042.253235 | 3045.598779 | 1.00109969 |
| 3042.098765 | 3045.147096 | 1.00100205 |
| | | 1.00078 |

7. Glosario

Calibración: Proceso de utilizar un estándar de referencia para determinar un coeficiente que ajusta la salida del transmisor Coriolis para llevarlo hasta un valor que esté dentro de la tolerancia de precisión especificada del medidor a través de un rango de flujo especificado.

Caudal: Cantidad de fluido que pasa a través de una sección transversal en un intervalo de tiempo.

Cavitación: Fenómeno relacionado con la vaporización súbita, que se produce como consecuencia de si la presión se recupera y las burbujas de vapor bullen (implosionan). La cavitación producirá un error de medición y puede dañar el sensor.

Computador de Flujo: Dispositivo de adquisición de datos para señales analógicas o digitales.

Comunicador Hart: Equipo que permite la comunicación electrónica en los transmisores de cualquier magnitud que manejan el protocolo.

Condiciones base: Las condiciones base pueden estar definidas por reglamentación o contrato. En algunos casos, las condiciones base son iguales a las condiciones estándar, las cuales son de 14,696 psia y 60 F dentro de los EE. UU. y, en otras regiones, de 101,325 kPa (absoluta) y 15 C.

Conexión Modo Activa: Transmisor que su alimentación eléctrica es tomada de manera directa de alguna fuente de voltaje, independientemente de la señal de (4 a 20) mA.

Conexión Modo Pasivo: Transmisor que su alimentación eléctrica es tomada de la señal de (4 a 20) mA, es decir de esa misma línea de corriente toma el voltaje que requiere para encender, se dice que es un instrumento de alimentación pasiva.

Factor K: Señal de salida de un medidor de flujo, expresada en número de pulsos por unidad de volumen.

Flujo Másico (qm): Razón de flujo, en el cual la cantidad del fluido se expresa en masa.

Flujo Volumétrico (qv): Razón de flujo en la cual la cantidad de fluido se expresa en volumen.

Flujo: Efecto de Fluir

IBC: Instrumento Bajo Calibración

Instalación Aguas Abajo: Cuando se coloca un dispositivo “después del medidor de flujo”.

Instalación Aguas Arriba: Cuando se coloca un dispositivo “antes del medidor de flujo”.

Variador de Frecuencia: Elemento de control de velocidad de la bomba hidráulica.

8. Bibliografía

1. OIML R 117 (1995), Organisation Internationale de Métrologie Légale, Measuring systems for liquids other than water, pp. 17.
2. Maldonado Razo José Manuel(2008), Desempeño del Medidor Másico Tipo Coriolis Como Patrón de Referencia en la Verificación de los Sistemas de Medición del GLP Residencial en Estado Líquido. CENAM.
3. Paton R, NEL, Review of LPG flow measurement Technologies and measurement issues, 2006.
4. API MPMS, Chapter 11.2.2, Section 2 (2017), Volume Correction Factors, American Petroleum Institute, New York.
5. Sánchez Laguna A. (2015). Modelo de Soporte para medidores de flujo tipo Coriolis aplicado a America latina . México: IPN
6. Norma ISO 17025, (2005). Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Mexico.
7. S. Lupo-J. Forastieri – J.C. Cirvini (2006), Evaluación de resultados obtenidos en la medición de medidores másicos utilizando fluidos de densidades diferentes, Simposio de Metrología México 2006
8. D. W. Spitzer, Flow Measurement: Practical Guides for Measurement and Control, Research Triangle Park,. NC: ISA, 1991.
9. Faneli Mireli Huey Gil, aplicación de medidores de flujo en hidrocarburos para transferencia de custodia (2014), UNAM, Tesis, Ciudad de México, México.
10. Libreta de trabajo CALPRO (2020), CALPRO S.A de C.V, Estado de México, México.