



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Cuatro procedimientos de  
calibración en medidores de flujo**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A**

Ángel Eduardo Casas Valdés

**ASESOR DE INFORME**

M.I. César Guillermo Nájera Martell

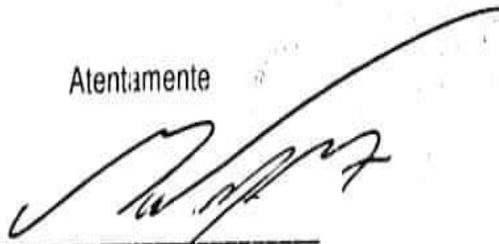


Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

CALPRO S.A de C.V autoriza el uso de datos y material mostrado en el reporte de actividades llamado '**Cuatro procedimientos de calibración en medidores de flujo**', incluyendo evidencia fotográfica, tablas, anexos, fórmulas, etc.

Se extiende la presente constancia a solicitud del interesado y para los fines que estime conveniente.

Atentamente



**M.I. César Guillermo Nájera Martell**

Gerencia Técnica de la Unidad de Inspección S.A. de C.V.

**CALIBRACIONES PROFESIONALES E INGENIERÍA S.A. DE C.V.**

CAMINO REAL DE CALACOAYA 63 CD. LOPEZ MATEOS C.P. 52990 ATIZAPÁN  
EDO. DE MEX. CONMUTADOR: TEL/FAX: ++52(55)5362-74 31 Y ++52(55)5362-74 39  
E-MAIL: info@calpro.com.mx SITIO: www.calpro.com.mx

## *Agradecimientos*

Ofrezco mi más sincero agradecimiento a la **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO** que desde el nivel de bachillerato me ha brindado una formación de calidad y que ha continuado hasta el último nivel universitario.

A todos los **profesores**, que durante más de los 8 años que he pertenecido a la **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**, han impartido clases y me han dejado todas las enseñanzas que han formado en mi la persona que soy hoy día.

Al **M.I. César Guillermo Nájera Martell**, que fungió como profesor y asesor en mi estadía en CALPRO S.A de C.V y me brindó toda la ayuda posible en cada cuestión. Por apoyarme y despejar mi mente durante mis prácticas profesionales.

A todos mi **sinodales**, que aceptaron participar en mi examen profesional y en ningún momento se negaron de enseñarme aspectos importantes de la carrera y la industria.

A todos mis **compañeros** con los que interactué y de los que aprendí valiosas experiencias tanto para mi formación profesional como personal.

A todas las **personas** que lamentablemente ya no están, pero tuvieron un impacto importante en mi vida.

# *Dedicatorias*

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

A mi madre, **Reyna**, y mi padre, **Adolfo**, que han dedicado toda su vida a brindarme lo mejor y jamás me han abandonado.

A mis hermanos, **Juan Manuel** y **Gustavo Adolfo**, que me han brindado su apoyo y conocimiento sin dudarlos y de forma incondicional.

A mis tíos y tías, **María de los Ángeles, Josefina, Manuela y Martín Valdez**, que durante toda mi vida me han acompañado y han sido de suma importancia en este logro.

A mis abuelitos, **Manuela y Berulo**, que me han regalado múltiples anécdotas y enseñanzas para mi vida diaria.

A mis amigos, **Diego, Rodrigo S., Rodrigo B., Alexis y Fernando**, que han sido la familia elegida y siempre me han dado lo mejor de ellos en cada momento.

A **mí**, por tener la constancia y dedicación para llegar hasta aquí y seguir por más.

A **todas las personas** que lamentablemente no puedo mencionar por ser mayoría pero que saben que esto también es gracias a ellos el estar donde estoy.

Esto va dedicado a **todos ustedes** que sin lugar a duda son la piedra angular para mi formación y que seguramente sin ustedes jamás habría logrado llegar hasta aquí.

*Este y todos mis futuros éxitos son dedicados a ustedes.*

# Contenido

Lista de Figuras.....	7
Lista de Tablas.....	8
Objetivo.....	9
Alcance.....	9
Introducción.....	10
Antecedentes.....	12
Definición del problema en el contexto de la participación profesional.....	12
CAPITULO 1.....	13
1. Calibración de medidor de flujo por comparación con una medida volumétrica para determinar el Factor del medidor (FM).....	13
1.1 Metodología utilizada.....	13
1.2 Requerimientos.....	14
1.3 Actividades preliminares.....	14
1.4 Procedimiento de calibración.....	14
1.5 Resultados.....	16
CAPITULO 2.....	18
2. Calibración de medidor de flujo por comparación con un probador bidireccional de desplazamiento positivo. para determinar el FM.....	18
2.1 Principio de operación del probado bidireccional.....	18
2.2 Accesorios.....	20
2.3 Actividades preliminares.....	20
2.4 Procedimiento Calibración.....	21
2.5 Resultados.....	21
CAPITULO 3.....	22

3. Procedimiento general para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un probador compacto de desplazamiento positivo	22
3.1 Principio de operación del probador compacto	22
3.2 Requerimientos	23
3.3 Accesorios	24
3.4 Actividades Preliminares	24
3.5 Procedimiento de Calibración	26
3.6 Resultados	27
CAPITULO 4	29
4. Procedimiento general para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un medidor de flujo (turbina con turbina)	29
4.1 Principio de Operación	29
4.3 Requerimientos	30
4.3 Procedimiento de Calibración	31
4.4 Resultados	32
Conclusiones	33
CAPITULO 5	35
5. Anexos y Resultados	35
5.1 ANEXO A	35
5.2 ANEXO B	47
Glosario	59
Bibliografía	61

# Lista de Figuras

Figura 1. Esquema general de un medidor de flujo para líquidos. Método de calibración de medida volumétrica. Fuente: Elaboración propia, 2021	14
Figura 2. Indicador de Presión. Fuente: Fotografía tomada en campo de trabajo, 2020.	15
Figura 3. Tanque volumétrico con válvula. Fuente: Fotografía tomada en campo de trabajo, 2020.	16
Figura 4. Esquema de un probador Bidireccional de desplazamiento positivo. Fuente: El probador bidireccional de esfera, concepto y funcionamiento, Jonhatan H. Bernal, Jhon F. Ramírez, 2013.	18
Figura 5. Probador bidireccional en campo. Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.	19
Figura 6. Indicador de temperatura. Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.	20
Figura 7. Esquema de un probador compacto de desplazamiento positivo. Fuente: Cuaderno de apuntes de la clase de Metrología, 2020.	23
Figura 8. Probador compacto de desplazamiento positivo. Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.	26
Figura 9. Computador de flujo electrónico Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.	27
Figura 10. Modelo de Turbina interna. Fuente: Emerson, 2020.	29
Figura 11. Partes del medidor de Turbina. Fuente: Documentos técnicos; medición de flujo, 2020.	30
Figura 12. Medidor Tipo Turbina en campo Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.	31
Figura 13. Densímetro en línea Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.	32

# Lista de Tablas

Tabla 1. Datos de calibración por medida volumétrica. Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	16
Tabla 2. Resultados de calibración por medida volumétrica. Fuente: Hoja de cálculo, 2020. __	17
Tabla 3. Datos de calibración por probador bidireccional Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	21
Tabla 4. Resultados de calibración por probador bidireccional. Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _	21
Tabla 5. Datos de calibración por probador compacto Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	27
Tabla 6. Resultados de calibración por probador compacto Fuente: Hoja de cálculo, 2020. ____	28
Tabla 7. Datos de calibración por patrón volumétrico (medidor tipo turbina). Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	32
Tabla 8. Resultados de calibración por patrón volumétrico (medidor tipo turbina) Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	32
Tabla 9. Resultados de corridas IBC para calibración por unidad volumétrica Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	48
Tabla 10. Resultados de corridas de medida volumétrica para calibración por medida volumétrica Fuente: Hoja de cálculo, 2020 _____	49
Tabla 11. Resultados de corridas IBC para calibración por probador bidireccional. Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	51
Tabla 12. Resultados de corridas del probador para calibración por probador bidireccional. Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	52
Tabla 13. Resultados de corridas del IBC para calibración por probador compacto. Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	55
Tabla 14. Resultados de corridas del probador para calibración por probador compacto. Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	55
Tabla 15. Resultados de corridas del IBC para calibración por patrón volumétrico (medidor tipo turbina). Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	57
Tabla 16. Resultados de corridas del probador para calibración por patrón volumétrico (medidor tipo turbina). Fuente: Hoja de cálculo, 2020. _____	58

## Objetivo

Presentar cuatro distintos procedimientos de calibración correspondientes a medidores de flujo para estado líquido, los cuales son empleados para la medición de fluidos en el sector de la industria petrolera y de los cuales la gerencia técnica de la unidad de inspección de CALPRO S.A DE C.V tiene conocimiento para poder calibrar en sus operaciones.

## Alcance

Utilizar como referencia un patrón volumétrico (probador, medidor, medida volumétrica) para lograr mediciones con cierto grado de incertidumbre y trazabilidad confiables, de igual manera se discutirá la importancia de la medición y confiabilidad en los procesos de medición dentro de la industria petrolera.

Así mismo se brindará la información y descripción de los distintos métodos aplicados en este trabajo, los cuales fueron usados en un proceso de metrología para lograr de forma exitosa la calibración de los equipos cumpliendo con los requisitos periódicos y buenas prácticas dentro del laboratorio para su uso comercial.

# Introducción

El sistema de medición debe de contar con el mejor desempeño posible para asegurar que las mediciones tomadas sean las más exactas para brindar confianza a los usuarios por lo cual se debe de tener un cronograma de calibración para asegurar que el sistema de medición sea confiable y seguro.

La calibración es el proceso de comparación documentada entre el dispositivo de medición que se requiere calibrar y otro que servirá de referencia, en otras palabras, es la comparación entre lo que indica la medición y lo que debería indicar (valor verdadero) de acuerdo con un patrón conocido con la finalidad de que el dispositivo a calibrar sea trazable. (C.V, 2020)

El patrón conocido es un patrón de medición que representa una unidad física de medición destinada a realizar, conservar o reproducir uno o varios valores conocidos de una magnitud para servir como referencia en la calibración y trazabilidad.

Terminado el procedimiento de calibración el sistema de medición deberá de ser trazable por lo que es necesario enlazar este con un patrón nacional o internacional, lo que significa que la medición que se hace con el sistema deba de ser comparada con el valor de un patrón nacional o simplemente compararlo con un eslabón de la cadena, de tal manera, esto es necesario para que los resultados de las mediciones efectuadas sean comparables en cualquier tiempo y espacio.

Al contar con un sistema de gestión de la medición confiable se podrá evitar la aplicación de actividades ilícitas, dado que al tener sistemas de medición calibradas y auditables se obtendrán valores adecuados en la medición fiscal para establecer los impuestos, regalías, balances, entre otros, como resultado de los volúmenes producidos, comercializados o de transferencia de custodia, garantizando así seguridad y confiabilidad de las actividades de empresas del sector de hidrocarburos.

Puesto que los asignatarios y contratistas están obligados a cumplir con la regulación, lineamientos y disposiciones administrativas que emitan la Comisión Nacional de Hidrocarburos y las Secretarías de Energía, Hacienda y Crédito Público, en el ámbito de sus respectivas competencias, será necesario contar con todas las acreditaciones y procedimientos marcados que nos indican las instituciones que rigen estas actividades.

Dada la importancia de contar con un sistema de gestión de la medición, CALPRO S.A de C.V proporciona o brinda servicios para la calibración de equipos de medición, garantizando su confiabilidad y fiabilidad en el mesurado de los hidrocarburos, dando pauta a que los operadores cumplan con su régimen fiscal y legal dada la importancia de la medición en la sociedad y en el país.

En este informe presentaré las habilidades que adquirí dentro de la empresa, las cuales consisten en la calibración con distintos métodos, mostrando así una cercanía más real a la cuantificación de volumen o masa refirmando así la importancia de la metrología.

# Antecedentes

Debido a que las empresas petroleras deben cumplir con la regulación, en cuestión de régimen fiscal en la medición de hidrocarburos, CALPRO S.A de C.V fue contratada a fin de realizar la calibración de sus equipos para así corroborar y comprobar los datos obtenidos dentro de sus resultados, influyendo a gran escala para que la dependencia de estos resultados brinde mejor operación y ganancia monetaria. Algunas formas de obtener lo solicitado, es empleando fórmulas y modelos matemáticos que nos indicarán los cambios en la cuantificación obtenida, dándonos así factores de corrección que nos ayudarán a resolver algún problema que se presente para así poder corroborar y validar los resultados en un computador de flujo.

## Definición del problema en el contexto de la participación profesional

Las mediciones representan cierta importancia en la vida diaria de cada persona o empresa. Se encuentran en cualquiera de las actividades, desde la cantidad que requieren para una operación básica hasta un proceso de control o investigación, debido a esto, mi participación en la empresa CALPRO S.A de C.V consistió en el apoyo de la ejecución de servicios de calibración por el método de comparación volumétrica solicitado por los clientes, con la finalidad de obtener datos confiables y trazables en su línea de procesos y servicios.

Mi aportación dentro del proyecto consistió en la calibración de un medidor de flujo tipo turbina mediante cuatro métodos, usando como referencia un patrón volumétrico (medida volumétrica, probador bidireccional, probador compacto y un medidor de flujo tipo turbina).

# CAPITULO 1

## 1. Calibración de medidor de flujo por comparación con una medida volumétrica para determinar el Factor del medidor (FM)

### 1.1 Metodología utilizada

Método de comparación volumétrica: Consiste en la comparación del volumen indicado en una medida volumétrica contra el volumen indicado en el medidor; expresados a condiciones estándar. (C.V, 2020)

*Nota: Por el impacto en la medición debe considerarse la limpieza, la nivelación, resolución, integridad de la señal de pulsos, condiciones de instalación, además de la temperatura y presión del líquido en la línea a las condiciones de la medición.*

Primeramente, seleccioné la medida volumétrica de acuerdo con el medidor de flujo a calibrar, cuya capacidad debe ser igual o mayor al volumen colectado en el flujo máximo del medidor, a expensas de un tiempo de un minuto. Procedí a su instalación respetando los diámetros recomendados por el API.

Posteriormente realicé la recolección de instrumentos auxiliares para las magnitudes de influencia:

- Sensores de temperatura instalados en la medida volumétrica y en la línea, lo más cercano al medidor de flujo con división de la escala de 0,1 °C. En algunas mediciones de hidrocarburos recomiendan una incertidumbre de  $\pm 0,05$  °C
- Sensor de presión. Incertidumbre en la medición mínima de  $\pm 0,05$  MPa. En algunas mediciones de hidrocarburos recomiendan una incertidumbre de  $\pm 0,025$  MPa o mejor.
- Cronómetro con división de la escala de centésimas de segundo.

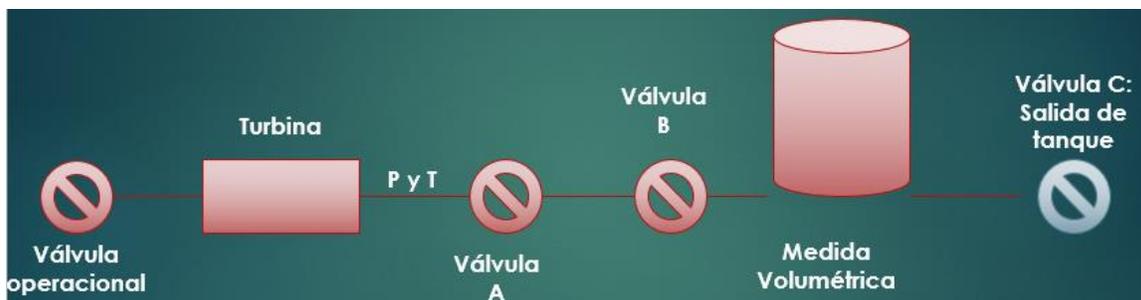


Figura 1. Esquema general de un medidor de flujo para líquidos. Método de calibración de medida volumétrica. Fuente: Elaboración propia, 2021.

## 1.2 Requerimientos

- El medidor de flujo debe estar calibrado con el líquido o líquidos a emplear.
- El medidor de flujo debe estar instalado de acuerdo con las instrucciones del fabricante y en caso de no contar con estas utilizar las del API.
- No debe existir vibración o pulsaciones que puedan afectar el comportamiento del medidor de flujo.
- Deben seleccionarse mínimo entre 2 y 5 valores de flujo dentro del alcance de operación del medidor.

## 1.3 Actividades preliminares

- Nivelé la medida volumétrica vacía.
- Realicé corridas de ambientación con el objeto de estabilizar las condiciones de prueba, tanto del medidor de flujo como de la medida volumétrica a emplear (con el mismo fluido empleado).
- Nivelé la medida volumétrica llena.
- Verifiqué fugas de la instalación.

## 1.4 Procedimiento de calibración

1. Fijé el flujo de prueba mediante la válvula instalada (válvula A) a la salida del medidor de flujo.
2. Determiné el flujo empleando el indicador del medidor durante la prueba.
3. Cerré la válvula de drenado (válvula C) de la medida volumétrica con el objeto de llenarlo.

4. Cuando la medida volumétrica se llenó hasta un punto de la escala preestablecida (de preferencia el cero) cerré la válvula de llenado (válvula B) de la medida volumétrica.
5. Abrí la válvula de salida (válvula C) de la medida volumétrica para vaciarla y dejé un tiempo de escurrimiento de 30 segundos antes de cerrar la válvula (válvula C).
6. Inicié las corridas al flujo predeterminado, abriendo la válvula de llenado de la medida volumétrica (válvula B).
7. Mientras se colecta el volumen en la medida volumétrica efectué y registré la lectura de temperatura y de la presión de la línea, así como el flujo indicado,
8. Cuando apareció el líquido en el cuello superior dejé que se acercara al volumen nominal y cerré la válvula de llenado (válvula B) de la medida volumétrica.
9. Registré los pulsos del medidor.
10. Registré la lectura de la escala de la medida volumétrica.
11. Registré la temperatura de la medida volumétrica.
12. Repetí los puntos del 5 al 11, al menos tres veces para cada flujo.
13. Calculé el valor del mensurando y su incertidumbre con los datos obtenidos.



Figura 2. Indicador de Presión. Fuente: Fotografía tomada en campo de trabajo, 2020.



Figura 3. Tanque volumétrico con válvula. Fuente: Fotografía tomada en campo de trabajo, 2020.

## 1.5 Resultados

### Datos

Tabla 1. Datos de calibración por medida volumétrica. Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

Corridas	IBC ( $k_f=3.543$ )				Medida volumétrica	
	Flujo (l/min)	T(°C)	Presión (MPa)	Pulsos	Lectura de cuello (l)	T (°C)
1	1501	26.1400	0.0980	10629	3000.5	26.8
2	1503	26.1800	0.0981	10628	3000.2	26.83
3	1500	26.2000	0.0986	10630	3000.4	26.89
4	1503	26.3800	0.0983	10627	3000.1	26.92
5	1500	26.4000	0.0988	10628	3000.2	27

Posterior a las corridas de ambientación, realicé cinco corridas del laboratorio para determinar FM donde se utilizó un K-Factor del medidor de tipo turbina que venía dado por el fabricante  $k_f = 3.543$ .

## Resultados del FM obtenido

Tabla 2. Resultados de calibración por medida volumétrica. Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

FM
1.00149255
1.00149334
1.00138178
1.00157851
1.00153089
<b>1.00149541</b>

## Interpretación del resultado y conclusión

El FM se utiliza para corregir el volumen cuantificado por el medidor, en este caso vemos un promedio de FM obtenido de *1.00149541*, lo que refiere a que la cantidad de volumen estaba bajo estimada causando un impacto considerable en el resultado final.

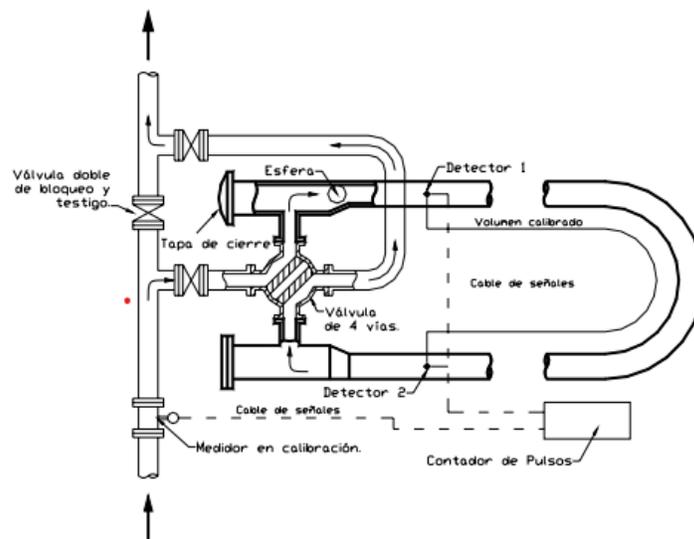
*Nota: Todos los datos y operaciones encontradas en el reporte fueron modificados a los originales obtenidos en campo debido al acuerdo de confidencialidad.*

# CAPITULO 2

## 2. Calibración de medidor de flujo por comparación con un probador bidireccional de desplazamiento positivo. para determinar el FM

### 2.1 Principio de operación del probador bidireccional

Los probadores bidireccionales (*figura 4*) son dispositivos de medición que funcionan como patrón de flujo para la calibración de medidores. El patrón de referencia es utilizado en la calibración de los medidores de flujo empleados por la industria del petróleo.



*Figura 4. Esquema de un probador Bidireccional de desplazamiento positivo. Fuente: El probador bidireccional de esfera, concepto y funcionamiento, Jonhatan H. Bernal, Jhon F. Ramírez, 2013.*

El principio de operación de desplazamiento positivo consiste normalmente de una tubería especial, comúnmente dispuesta en forma de U, dentro del cual se desplaza una esfera, por ejemplo, de poliuretano, con el propósito de actuar a los sensores de posición necesarios para definir el volumen de referencia. La esfera puede cambiar la dirección de desplazamiento debido a la operación de una válvula de cuatro vías, instalada entre las cámaras de recepción de la esfera.

Su principio de funcionamiento se describe a continuación; en primera instancia, el fluido que acaba de pasar por el medidor empuja a la esfera o pistón en un probador compacto en dirección a este, la esfera realiza un sello hermético contra la pared del probador.

Al entrar la esfera a la sección de volumen conocido, un sensor detecta su proximidad y envía una señal eléctrica que abre una compuerta electrónica para admitir y contar los pulsos que son emitidos por el medidor bajo calibración. Cuando la esfera abandona la sección de volumen conocido entonces un segundo sensor de proximidad envía la señal eléctrica para cerrar la compuerta electrónica y finalizar el conteo de pulsos. Después de realizar las correcciones pertinentes por temperatura y presión, se compara el total de pulsos acumulados durante el viaje de ida y vuelta de la esfera contra el volumen base del probador (round trip volume).



*Figura 5. Probador bidireccional en campo. Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.*

Realicé la recolección de instrumentos auxiliares para las magnitudes de influencia.

- Probador bidireccional con volumen certificado a condiciones de referencia.
- Sensores de temperatura, en mediciones de hidrocarburos se recomienda una incertidumbre de medición de temperatura  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ .

- Sensores de presión, en mediciones de hidrocarburos se recomienda una incertidumbre de  $\pm 0,025$  MPa.

*Nota:*

- *El medidor de flujo debe estar calibrado con las muestras que usa normalmente (Aceite) el sistema de medición.*
- *Deben evitarse vibraciones/pulsaciones o cualquier irrupción en la tubería que afecten el comportamiento del medidor de flujo.*
- *El número de flujos de prueba puede estar entre 2 y 5 flujos diferentes en el alcance del medidor.*

## 2.2 Accesorios

- Tornillos y juntas para instalar el probador en la línea.
- Línea de conexión eléctrica.
- Mangueras flexibles o tubería acoplada.
- Cable para la toma de la señal de pulsos.
- Computadora con programa de aplicación para el probador o instrumentos para colección y despliegue de temperatura, pulsos, presión y señal eléctrica.
- Variador de frecuencia.



*Figura 6. Indicador de temperatura. Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.*

## 2.3 Actividades preliminares

- Instalé el probador aguas abajo del medidor a calibrar.
- Conecté la computadora y todos los instrumentos necesarios al probador.
- Conecté la señal de pulsos del medidor a la computadora o contador.
- Verifiqué que la señal del sistema de medición a la computadora u osciloscopio esté estable y sin interrupciones.

## 2.4 Procedimiento Calibración

1. Fijé el flujo de prueba a través del variador de frecuencia.
2. Definí los flujos a los cuales será calibrado el medidor.
3. Una vez que eliminé el aire del probador, procedí a iniciar la prueba (observé el cambio de posición de la válvula de 4 vías).
4. Tomé los datos del probador y medidor.
5. Procedí a calcular el mensurando con los datos obtenidos.

*Nota: Al final de la prueba se cumplió que, en tres o más mediciones consecutivas, la desviación del factor del medidor debe ser menor o igual al  $\pm 0,05$  % del factor promedio. En caso de calibración de un medidor de referencia la repetibilidad cuantificada como desviación estándar no debe exceder 0,02 %.*

## 2.5 Resultados

### Datos

Tabla 3. Datos de calibración por probador bidireccional Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

Corridas	IBC (kf=6.66)				Probador	
	Flujo (l/min)	T(°C)	Presión (MPa)	Pulsos Totales	Presión (MPa)	T (°C)
1	5056.33	22.720	0.853179	22927	0.823759	22.6
2	5062.16	22.725	0.853179	22934	0.833565	22.69
3	5067.16	22.730	0.853179	22932	0.833565	22.65
4	5071.5	22.730	0.853179	22927	0.833565	22.7
5	5071.16	22.732	0.853179	22929	0.833565	22.71

### Resultados obtenidos

Tabla 4. Resultados de calibración por probador bidireccional. Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

FM
1.00011725
0.99979496
1.00015266
1.00001882
0.99991893
1.00000052

*Nota: Las densidades a diversas temperaturas fueron sacadas del API 11, 53 D.*

# CAPITULO 3

## 3. Procedimiento general para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un probador compacto de desplazamiento positivo

### 3.1 Principio de operación del probador compacto

El objetivo del probador es verificar el volumen medido por el sistema de medición dinámica (cada uno de los medidores que lo conforman) ejecutando una comparación. En el transcurso de la medición del probador se determina el factor de medición, el cual es obtenido por una comparación entre el volumen registrado por el medidor y el volumen certificado por el probador, con la finalidad que el factor de medición verifique la medición realizada por el medidor.

El probador de desplazamiento positivo es un mecanismo de medida de flujo que secciona el fluido en volúmenes discretos y contabiliza los volúmenes.

El probador compacto consta de una sección recta de tubo (cilindro), de mayor diámetro que el diámetro de entrada al probador (diámetro cilindro aproximado a dos veces el diámetro nominal del probador), esto debido a que en él se aloja un conjunto de pistón y de una válvula con características especiales que dado un instante abrirá permitiendo, reducidamente, circular el fluido a través del cilindro.

Fuera del pistón y en posición lineal al cilindro, se ubica una sección que está constituida por una barra delgada, la cual a un extremo está conectada al pistón que se desplaza dentro del cilindro; en el otro lado de la barra está fuertemente sujeta una lengüeta que simulará una bandera y su asta. Paralelo a la barra que fija la "bandera", están varios sensores ópticos instalados en un soporte, los cuales detectan el paso de la bandera a través de ellos, en su recorrido propiciado por el desplazamiento del conjunto pistón-válvula. Fuera también del probador y en posición lineal y al centro del cilindro, se encuentra una cámara que aloja el eje principal sobre el cual se soporta el arreglo pistón-válvula; este eje, como se indica, en un extremo está fijo al arreglo de pistón-válvula y en el otro se tiene instalado un

segundo pistón comparativamente de dimensiones pequeñas, el cual por uno de sus lados está sometido a una presión hidráulica y por el otro a una presión neumática.

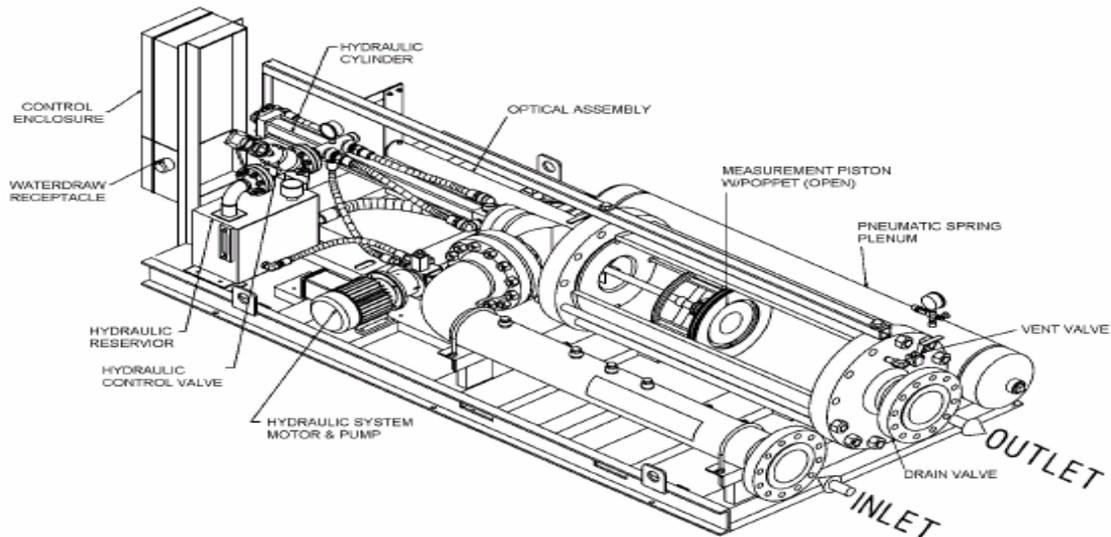


Figura 7. Esquema de un probador compacto de desplazamiento positivo. Fuente: Cuaderno de apuntes de la clase de Metrología, 2020.

Nota: Para reunir los 10 000 pulsos el pistón realiza más vueltas.

### 3.2 Requerimientos

El primer paso por realizar es la recolección e inspección de los instrumentos y equipos del medidor.

- Probador certificado con volumen a condiciones de referencia.
- Sensores de temperatura; en mediciones de hidrocarburos recomiendan una incertidumbre de  $\pm 0,05$  °C.
- Sensores de presión; se recomienda una incertidumbre de  $\pm 0,025$  MPa en caso de hidrocarburos.

### 3.3 Accesorios

- Tornillos para bridas ANSI 150, o bien para bridas ANSI 300.
- Juntas de neopreno.
- Aire o nitrógeno comprimido.
- Nivel de gota.
- Línea eléctrica.
- Tramos de hule de alta presión.
- Tramos de adaptación a la línea de calibración.
- Extensión eléctrica para toma de señal de pulsos del medidor.
- Computadora con programa de aplicación para el probador o instrumentos para colección y despliegue de temperatura, pulsos, presión y señal eléctrica

### 3.4 Actividades Preliminares

Previo a la calibración, fue necesario realizar actividades anticipadas a la prueba para garantizar que esta se llevara a cabo de forma exitosa y no ocurrieran contratiempos al momento de la prueba.

- Me aseguré que todas las válvulas de drenado y de venteo se encuentren bien cerradas. Posteriormente se debe abrir ligeramente la válvula de entrada del probador para llenar de fluido tanto el probador compacto como las mangueras de conexión.
- Abrí lentamente las válvulas de venteo para eliminar por completo el aire localizado tanto en el interior del probador como de las mangueras.
- Una vez que me aseguré que no existan fugas en todo el sistema, procedí a abrir completamente la válvula de entrada del probador. Esta operación debe realizarse lentamente para revisar fugas y expulsar el aire contenido.
- Finalmente abrí lentamente la válvula de salida del probador.
- Cerré la válvula de bloqueo se lentamente, la cual se encontraba situada entre las válvulas de entrada y salida del probador.

- Una vez que se verificó el sistema procedí a realizar la conexión eléctrica entre el probador compacto y la computadora de flujo.
- Conecté eléctricamente la señal de salida del amplificador de la turbina a la computadora de flujo y suministré la energía eléctrica a la computadora de flujo.
- Finalmente encendí la computadora, accionamos la bomba del sistema hidráulico y verifiqué que la señal pulsante del medidor a calibrar fuera recibida en la computadora de flujo.
- Conecté las señales de temperatura y presión de los transductores respectivos a la computadora de flujo.
- Verifiqué que las señales de temperatura y presión estén presentes en la computadora de flujo.
- Permití que el pistón del probador se desplace al menos 10 veces para cerciorarme que no existieran fugas y aire en el interior del probador.
- Esperé un tiempo de al menos 30 minutos para alcanzar un equilibrio térmico entre el probador compacto y la turbina (realice en este tiempo lanzamientos del pistón para que el vástago del pistón también alcanzara el equilibrio térmico).



Figura 8. Probador compacto de desplazamiento positivo. Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.

### 3.5 Procedimiento de Calibración

1. Inicié la calibración registrando todos los datos en el formato que se pide tanto del medidor como de cualquier instrumento utilizado en la actividad.
2. Después elegí los flujos para hacer las corridas y determinar la calibración dentro del parámetro de medidas del medidor.
3. Registré también las condiciones ambientales. Teniendo 30 segundos de intervalo entre el término de un viaje del pistón y el inicio de un viaje posterior.
4. Lo hice hasta completar un total de 30 corridas y tener en la computadora un registro de cada uno de ellos.
5. Obtuve para cada corrida individual el valor del factor de corrección para el medidor (FM).
6. Determiné el factor de calibración o en su caso el K-Factor del medidor.
7. Evalué la repetibilidad de cada grupo de corridas, todos los datos deben agruparse alrededor de la media con una desviación estándar máxima de  $\pm 0,025$  %. los 6 valores promedio de cada uno de los grupos de corridas deben manifestar una dispersión máxima de  $\pm 0,025$  % alrededor de la media.

*Nota: Si la dispersión de los datos obtenidos excede los límites establecidos, entonces la prueba debe detenerse y se debe iniciar la búsqueda y solución del problema.*

Repetí desde el paso 3 hasta el paso 7 para cada uno de los valores de flujos definidos.



*Figura 9. Computador de flujo electrónico Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.*

### 3.6 Resultados

#### Datos

*Nota: Para este probador se necesita tener una interpolación de pulsos midiendo el tiempo entre los sensores ópticos, este paso se obtuvo directamente de un computador de flujo y, una vez hecho eso, se calcula de forma convencional.*

*Tabla 5. Datos de calibración por probador compacto Fuente: Hoja de cálculo, 2020.*

Corridas	IBC (kf=6.646)				Probador	
	Flujo (l/min)	T(°C)	Presión (MPa)	Pulsos Totales	Presión (MPa)	T (°C)
1	5027.49	22.740	0.850	22937	0.830	22.65
2	5028.99	22.750	0.852	22936	0.833	22.64
3	5036.4846	22.760	0.855	22940	0.835	22.65
4	5043.48	22.740	0.858	22941	0.836	22.64
5	5045.98	22.744	0.859	22944	0.838	22.68

## Resultados

Tabla 6. Resultados de calibración por probador compacto Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

FM
0.997126853
0.997157489
0.996983945
0.996944274
0.996844315
0.997011375

En esta ocasión encontramos un valor por debajo a 1 al momento de obtener el FM, esto nos indicará que nuestro volumen medido es mayor al que en realidad pasa por nuestro equipo. Es importante saber esto, ya que muchas operaciones dependen de la venta de cierta cantidad de producto, el tener contemplado un volumen y obtener otro totalmente diferente, puede golpear significativamente las próximas decisiones laborales del sector encargado.

# CAPITULO 4

## 4. Procedimiento general para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un medidor de flujo (turbina con turbina)

Como he mencionado anteriormente la calibración es un proceso indispensable para garantizar seguridad y confianza a los usuarios, para asegurar que las medidas sean valores verdaderos. Existen diferentes tipos de calibraciones y una de las que realicé se basa en la calibración de un medidor de flujo a partir de un medidor ya calibrado, de esta manera se puede ocupar de referencia el medidor calibrado ocupándose como un patrón para hacer la comparación de los dos medidores y así obtener los valores medidos y realizar la calibración.

### 4.1 Principio de Operación

Este tipo de medidores cuenta con un grupo de aspas giratorias fijadas en un eje central, dentro de una tubería (*figura 10*). La energía de fluido se transmite a la turbina que gira a una velocidad proporcional al fluido relacionando un volumen determinado de fluido con el giro de la turbina. El movimiento del rotor puede ser detectado mecánica, óptica o eléctricamente, registrándose el movimiento del rotor en un sistema lector externo.



*Figura 10. Modelo de Turbina interna. Fuente: Emerson, 2020.*

Nota: para una medición confiable del medidor los pulsos mínimos registrados deben ser mayor a 10k.

El primer paso por seguir es la recolección e inspección del instrumental y equipos de medición.

- Un medidor de flujo de referencia cuya capacidad debe ser igual o mayor al medidor bajo calibración.
- Sensores de temperatura en el patrón y en el medidor se recomiendan una incertidumbre de  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ .
- Sensores de presión en cada uno de los medidores se recomienda una incertidumbre de  $\pm 0,025\text{ MPa}$  o mejor.
- Cronómetro.

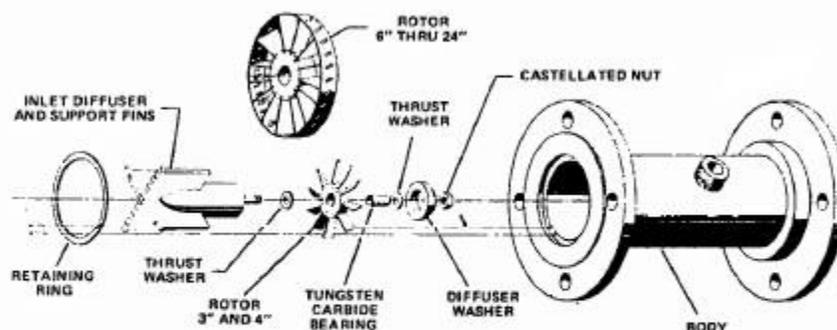


Figura 11. Partes del medidor de Turbina. Fuente: Documentos técnicos; medición de flujo, 2020.

### 4.3 Requerimientos

- Es importante que el medidor de flujo esté calibrado con el líquido o líquidos con los que opera normalmente el sistema de medición y con el fluido correspondiente.
- El medidor de flujo debe ser instalado de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

- No debe existir ninguna interferencia que pueda afectar el comportamiento del medidor de flujo.
- Los flujos de prueba pueden estar entre dos y cinco diferentes en el alcance del medidor



*Figura 12. Medidor Tipo Turbina en campo Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.*

### **4.3 Procedimiento de Calibración**

1. Una vez que recolecté e inspeccioné el material adecuado procedí a fijar el flujo de prueba a través de la operación de la válvula instalada a la entrada del medidor bajo calibración.
2. Posteriormente determiné el flujo mediante el empleo del indicador del computador.
3. Inicé las corridas de flujo predeterminado, apoyado por válvulas y el indicador de flujo en un periodo de 3 minutos

*Nota: Durante el tiempo de la prueba es importante tener un registro de la temperatura y la presión del fluido en ambos medidores.*

4. Por cada corrida, registré los pulsos, temperatura y presión.
5. Repetí este proceso al menos cinco veces para cada flujo.
6. Finalmente registré el resultado de la medición (mensurando) y el cálculo de la incertidumbre con los datos obtenidos.

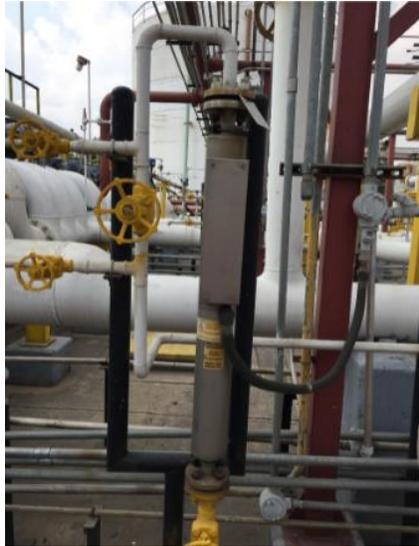


Figura 13. Densímetro en línea Fuente: Tomada en campo de trabajo, 2020.

#### 4.4 Resultados

##### Datos

Tabla 7. Datos de calibración por patrón volumétrico (medidor tipo turbina). Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

Corridas	IBC (kf=6.646)				Patrón Volumétrico (Medidor Turbina) Kf= 6.67			FM
	Flujo (l/min)	T(°C)	presión (MPa)	Pulsos	Presión (MPa)	T (°C)	Pulsos	
1	5045.481	22.73	0.8900	22871	0.8800	22.74	22867	1.00020
2	5043.98	22.75	0.8920	22876	0.9000	22.745	22871	
3	5047.147	22.73	0.8900	22870	0.8800	22.72	22877	
4	5052.3116	22.74	0.8940	22871	0.8960	22.75	22880	
5	5050.15	22.72	0.8935	22870	0.8990	22.73	22874	

##### Resultados

Tabla 8. Resultados de calibración por patrón volumétrico (medidor tipo turbina) Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

FM
0.99642157
0.99638952
0.99688687
0.99700272
0.99678913
0.99669796

# Conclusiones

La Metrología es probablemente una de las ciencias más importantes del mundo y el conocimiento sobre su uso es una necesidad esencial en la práctica de todas las profesiones y actividades con esencia científica puesto que la medición permite conocer de forma más exacta y cuantitativa, reduciendo la incertidumbre, las propiedades físicas y químicas de los objetos. El progreso en la ciencia siempre ha estado íntimamente ligado a los avances en la capacidad de medición, ya que, si no se busca reducir el error, no habrá un cambio y, sin el cambio, no habrá progreso.

Mencionada la importancia de la metrología demuestra que es esencial realizar inspecciones y calibraciones a todo el equipo que se tenga de forma periódica, ya que muchos de nuestros resultados pueden arrastrar errores hasta un valor económico e impacto social final. Para esto el uso de factores de corrección y manejo del material que se mida tendrá que plasmarse en cada registro o bitácora formando así un historial y siempre siguiendo los procedimientos sugeridos e impuestos por los organismos especializados en esta área, como lo son la CNH, API, ISO, etc.

Como resultado de este trabajo adquirí diferentes habilidades que pude poner en práctica realizando actividades de calibración. La importancia de las actividades que realice va desde el ensamblaje hasta su operación, dando así una responsabilidad completa. Fue de suma importancia en conocimiento y aplicación para que así siguiera fortaleciendo me en el área de la metrología, realice diferentes trabajos que me ayudaron a comprender los diferentes resultados que se pueden obtener dando así una comprensión y análisis de resultados, como la obtención del FM.

El FM juega un papel clave en la cuantificación y medición del volumen, fue necesario obtener e identificar los factores de corrección que involucra cada método de calibración presentados en este trabajo, elaborar y desarrollar cada corrida de ambientación y de flujo con sus respectivas fórmulas, esto me permitió comprender cómo funciona el software en el computador de flujo y el impacto que juegan las

variables como presión, temperatura y densidad en el mesurado de los hidrocarburos.

Debido a que pude realizar diferentes calibraciones a lo largo de mi estadía en CALPRO S.A de C.V pude analizar y entender el impacto que conlleva tener un FM mayor o menor a 1, este factor que obtenemos al final de cada calibración nos permitirá conocer el volumen real que está pasando por nuestros medidores lo cual es de suma importancia para el operador petrolero, para la nación y sobre todo cuando se hacen transferencias de custodia.

Obtener un FM 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 FM obtendremos el volumen real que está pasando por el medidor y el cual es mayor de lo que se tenía previo a la calibración.

El mayor problema se da cuando nuestro medidor está arrojando una mayor cantidad de hidrocarburo de lo que en realidad es, esto se da cuando después de la calibración tenemos un FM menor a 1, ya que al tener el volumen o cantidad de hidrocarburos en este lapso y multiplicarlo por el FM obtenido después de la calibración, visualizamos una menor cantidad de hidrocarburos que la que reportaba el medidor antes de su calibración.

Corrigiendo así las mediciones que ellos hacían y obteniendo los nuevos valores se puede asegurar que se salvaguardan los intereses económicos y sociales tanto del operador petrolero como del producto nacional que se maneje ayudando a un mejor servicio para cada sector de la población e institución gubernamental.

# CAPITULO 5

## 5. Anexos y Resultados

### 5.1 ANEXO A

#### 5.1.1 INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

*Nota: Valor estimado de la incertidumbre se obtiene de la fórmula general y con la hoja de cálculo de la empresa la cual considera todas las variables que puedan generar desconfianza en la medición norma (estándar) nmx-ch-140-imnc.*

Como se ha discutido anteriormente el resultado de medición que se obtuvo en los procedimientos de calibración debe ser acompañado de una estimación de su incertidumbre.

Es importante mencionar que gracias a estas pruebas de calibración donde se emplea un patrón volumétrico, nos permitirá determinar el valor de la constante del K-Factor del medidor, y preferentemente el factor de corrección del medidor “FM”. El cual es un factor adimensional que nos servirá para multiplicar la respuesta del medidor para obtener la mejor estimación del mensurando.

El modelo matemático de la medición debe ser expresado mediante una ecuación acompañada de su nomenclatura correspondiente, y las hipótesis necesarias para su validez.

#### Hipótesis

- La masa de fluido entre el medidor y el patrón volumétrico permanece constante.
- El flujo se encuentra en fase líquida.
- El flujo es estable (Régimen turbulento), es decir con pequeñas fluctuaciones de gasto que no cambian el comportamiento del medidor durante su calibración a esas condiciones.
- La temperatura del fluido a través del patrón volumétrico es la misma que la temperatura del metal del patrón volumétrico.

- Es suficiente una aproximación lineal para estimar la deformación del patrón volumétrico por efectos de temperatura.
- Las condiciones de operación del sistema de medición no son afectadas en el proceso de calibración.
- Durante el proceso de calibración no se presenta el fenómeno de cavitación.
- El sistema de medición no se ve afectado por su instalación física, y los efectos de vibración e instalación originados por el arreglo de tuberías y sus accesorios no provocan vórtices severos o distorsiones en el perfil de velocidades.

### 5.1.2 Ecuación general utilizada en la calibración de medidores de flujo de líquidos empleando como referencia un patrón volumétrico

Para el factor de corrección del medidor FM:

$$FM = \frac{V_{P20} \cdot CTS_P}{(N/FK) \cdot CTL_m \cdot CPL_m} [\text{adimensional}] \quad (1)$$

Donde:

$V_{P20}$ : Volumen a condiciones estándar del patrón volumétrico [l].

$V_m$ :  $\left(\frac{N}{FK}\right)$  Vol. 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.

$$CTS = 1 + 3\alpha_1 \cdot (T - T_{20=20}) [\text{Adimensional}] \quad (1.1)$$

Donde:

$CTS$ : Factor de corrección por efecto de la temperatura en el acero [adimensional].

Deformación cúbica. Medidas volumétricas, probadores, patrones de volumen

$\alpha_1$ : Coeficiente de dilatación lineal del acero [ $^{\circ}C^{-1}$ ]

$T_{20}$ : Temperatura de referencia [ $^{\circ}C$ ]

$T$ : Temperatura promedio del líquido dentro del instrumento [ $^{\circ}C$ ]

Para el cálculo de la densidad a cualquier temperatura (Correlación de Tanaka):

$$\rho = a_5 \left[ 1 - \frac{(T_L + a_1)^2 (T_L + a_2)}{a_3 (T + a_4)} \right] \quad [kg/m^3] \quad (1.2)$$

Donde:

$T_L$ : Es la temperatura de la línea [ $^{\circ}C$ ]

$$a_1 = -3,983\ 035\ [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

$$a_2 = 301,797\ [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

$$a_3 = 522\ 528,9\ [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

$$a_4 = 69,348\ 81\ [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

$$a_5 = 999,974\ 950\ [\text{kg}/\text{m}^3]$$

La densidad del fluido a las temperaturas marcadas y a la temperatura del medidor se obtienen a partir de la aplicación del modelo propuesto en API 2540.

$$\rho_T = \rho_{20} \cdot \exp[-\alpha_{20}(T_T - T_{20})(1 + 0.8 \cdot \alpha_{20}(T_T - T_{20}))] [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (1.3)$$

Donde:

$T_T$ : Temperatura a la cual se conoce la densidad del fluido, [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\rho_{20}$ : Densidad del fluido a  $20\ ^{\circ}\text{C}$ , [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_T$ : Densidad del fluido a la temperatura  $T_T$ , [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$$CTL = \frac{\rho_T}{\rho_{20}} [\text{Adimensional}] \quad (1.4)$$

Donde:

$CTL$ : Factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del líquido [adim.]

$$CTL = 1 + \beta \cdot (T - T_{20}) \quad (1.5)$$

Donde:

$\rho_T$ : Densidad del fluido a la temperatura de prueba [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_{20}$ : Densidad del fluido a la temperatura de prueba [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\beta$ : Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$T_{20}$ : Temperatura de referencia [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T$ : Temperatura promedio del líquido dentro del instrumento [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0.87096 \cdot \rho_{20}^{-2} + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot \rho_{20}^{-2}) \text{ [MPa}^{-1}\text{]} \quad (1.6)$$

Donde:

$F$ : Factor de compresibilidad del líquido [ $\text{Pa}^{-1}$ ]

$T$ : Temperatura a la cual se conoce la densidad del fluido, [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\rho_{20}$  : Densidad del fluido a 20  $^{\circ}\text{C}$ , [ $\text{kg/l}$ ]

$$CPL = \frac{1}{1 - (P_a - P_e) \cdot F} \text{ [adimensional]} \quad (1.7)$$

Donde:

$CPL$ : Factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del líquido [adim.]

$P_a$ : Presión del fluido a las condiciones de la prueba [ $\text{Pa}$ ]

$P_e$ : Presión de vapor del fluido a la temperatura del fluido en la prueba [ $\text{Pa}$ ]

$F$ : Factor de compresibilidad del líquido [ $\text{Pa}^{-1}$ ]

Sustituyendo estas definiciones en nuestra primera ecuación queda de la siguiente forma:

$$FM = \frac{V_{P20} \cdot (1 + 3\alpha_p \cdot (T - 20))}{N \cdot \left(\frac{\rho_m}{\rho_{20}}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 - P_m \cdot F}\right)} \text{ factor}_K \text{ [adimensional]} \quad (1.8)$$

Donde:

$\alpha_p$  es el coeficiente cúbico de expansión térmica del acero del patrón [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ].

$V_{P20}$  – Volumen a condiciones estándar del probador [ $\text{l}$ ]

$P_m$  – Presión del fluido en el medidor [ $\text{Pa}$ ]

$T_m$  – *Temperatura del fluido en el medidor* [°C]

$P_p$  – *Presión del fluido en el probador* [Pa]

$T_p$  – *Temperatura del fluido en el probador* [°C]

### 5.1.3 Modelo matemático para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un probador bidireccional

El volumen que pasa a través del medidor bajo calibración se define como:

$$V_m = \frac{N}{Factor_K} [l] \quad (2)$$

Donde:

*N*: Número de pulsos del medidor bajo calibración utilizados durante el tiempo de prueba

$$FM = \frac{V_{P20} \cdot CTS_p \cdot CPS_p \cdot CTL_p \cdot CPL_p}{N \cdot CTL_m \cdot CPL_m} factor_K [adimensional] \quad (2.1)$$

Donde:

*V<sub>P20</sub>*: Volumen a condiciones estándar del probador [l]

*V<sub>m</sub>*: Volumen determinado por el medidor bajo prueba a condiciones de operación [l]

El subíndice 'p' se usa para designar los factores de corrección del patrón de referencia empleado.

El subíndice m para designar los factores de corrección del medidor bajo prueba.

*CTL<sub>[p,m]</sub>*: Factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del líquido [adim.]

$$CTL = \frac{\rho_T}{\rho_{20}} [adimensional] \quad (2.2)$$

Donde:

*ρ<sub>T</sub>*: Densidad del fluido a la temperatura de prueba [kg/m<sup>3</sup>].

*ρ<sub>20</sub>*: Densidad del fluido a la temperatura de prueba [kg/m<sup>3</sup>].

Deformación cúbica. Medidas volumétricas, probadores, patrones de volumen.

$$CTS = 1 + 3\alpha_1 \cdot (T - T_{20=20}) \text{ [adimensional]} \quad (2.3)$$

Donde:

CTS: *Factor de corrección por efecto de la temperatura en el acero del instrumento [adim.]*

$\alpha_1$ : *Coefficiente de dilatación lineal del acero [ $^{\circ}C^{-1}$ ]*

$T_{20}$ : *Temperatura de referencia [ $^{\circ}C$ ]*

$T$ : *Temperatura promedio del líquido dentro del instrumento [ $^{\circ}C$ ]*

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0.87096 \cdot \rho_{20}^{-2} + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot \rho_{20}^{-2}) \text{ [MPa}^{-1}\text{]} \quad (2.4)$$

Donde:

$F$ : *Factor de compresibilidad del líquido [ $Pa^{-1}$ ]*

$T$ : *Temperatura a la cual se conoce la densidad del fluido, [ $^{\circ}C$ ]*

$\rho_{20}$ : *Densidad del fluido a 20  $^{\circ}C$ , [ $kg/l$ ]*

$$CPL = \frac{1}{1 - (P_a) \cdot F} \text{ [adimensional]} \quad (2.5)$$

Donde:

$CPL_{[p,m]}$ : *Factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del líquido [adim.]*

$P_a$ : *Presión del fluido a las condiciones de la prueba [ $Pa$ ].*

$F$ : *Factor de compresibilidad del líquido [ $Pa^{-1}$ ].*

$$CPS = 1 + \frac{P \cdot D_i}{E \cdot t} \text{ [adimensional]} \quad (2.6)$$

Donde:

$CPS$ : Factor de corrección por efectos de la presión en el acero del instrumento [adim.]

$P$ : Presión interna de operación (presión manométrica) [Pa]

$D_i$ : Diámetro interno de la sección de prueba de un probador [m]

$E$ : Módulo de elasticidad del material del probador [Pa]

$t$ : Espesor de la pared de la sección de prueba del probador [m].

Sustituyendo estas definiciones en nuestra primera ecuación queda de la siguiente forma:

$$FM = \frac{V_{P20} \cdot (1 + 3\alpha_p \cdot (T - 20)) \cdot (1 + \frac{P \cdot D_i}{E \cdot t}) \cdot (\frac{\rho_p}{\rho_{20}}) \cdot (\frac{1}{1 - P_p \cdot F})}{N \cdot (\frac{\rho_m}{\rho_{20}}) \cdot (\frac{1}{1 - P_m \cdot F})} \text{ factor } K \text{ [adimensional]} \quad (2.7)$$

Donde:

$\alpha_p$ : es el coeficiente cúbico de expansión térmica del acero del patrón [ $^{\circ}C^{-1}$ ].

$V_{P20}$ : Volumen a condiciones estándar del probador [l]

$P_m$ : Presión del fluido en el medidor [Pa]

$T_m$ : Temperatura del fluido en el medidor [ $^{\circ}C$ ]

$P_p$ : Presión del fluido en el probador [Pa]

$T_p$ : Temperatura del fluido en el probador [ $^{\circ}C$ ]

#### 5.1.4 Modelo matemático para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un probador compacto de desplazamiento positivo

Cálculo de los pulsos interpolados  $\dot{N}$ , usando la técnica de doble cronometría para la interpolación de pulsos:

$$\dot{N} = N \frac{tp}{tm} [\text{pulsos}] \quad (3)$$

Donde

$\dot{N}$  : Número de pulsos interpolados.

$N$  : Número de pulsos enteros en una pasada

$t_p$  : Tiempo entre sensores ópticos [s].

$t_m$  : Tiempo transcurrido para el conteo del número de pulsos completos [s].

$$k \text{ factor} = \frac{N \cdot tp}{V_{p20} \cdot CTS_C \cdot CPS_P \cdot CTL_P \cdot CPL_P \cdot CTS_V \cdot tm \cdot V_{p20e} \cdot CPL_m} \left[ \frac{\text{pulsos}}{l} \right] \quad (3.1)$$

Donde:

$V_{p20}$ : Volumen del patrón a 20 °C [l]

$T_i$ : Temperatura del líquido [°C]

$T_a$ : Temperatura del aire [°C]

$P$  : Presión del líquido [Pa]

$D_i$ : Diámetro interno del cilindro [m]

$E$  : Módulo de elasticidad del material del cilindro [Pa]

$t$  : Espesor de la pared del cilindro [m]

$\alpha_c$ : Coeficiente de expansión térmica del material del cilindro [°C<sup>-1</sup>]

$\alpha_v$ : Coeficiente de expansión térmico del material del vástago [°C<sup>-1</sup>]

$\beta$ : Coeficiente de expansión térmica del líquido, en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$

$P_e$ : Presión de vapor del líquido [Pa]

$F$ : Factor de compresibilidad del líquido [ $\text{Pa}^{-1}$ ]

$N$ : Número de pulsos enteros en una pasada.

$t_p$ : Tiempo transcurrido entre el paso de la bandera por los sensores ópticos[s]

$t_m$ : Tiempo transcurrido para el conteo del número de pulsos completos [s]

$s$ : Desviación estándar de la muestra [adim.]

#### Hipótesis para la validez del modelo matemático

La presión del fluido entre el medidor y la medida volumétrica no es mayor a 100,000 Pa, no se toma en cuenta la corrección por efectos de la presión en el fluido. Si la presión es mayor deben efectuarse las correcciones por CPL.

#### 5.1.5 Modelo matemático para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un medidor de flujo

$$\mathbf{FM} = \frac{\frac{N_p}{KF_p} * MF_p * CTL_p * CPL_p}{\frac{N_m}{KF_m} * CTL_m * CPL_m} \quad [\text{adimensional}] \quad (4)$$

Donde:

$N$ : Número de pulsos del medidor

$KF$ : Factor K del medidor

$V_m \odot N$

$(/KF)$  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.

$$CPL = 1 + \frac{1}{1-(P_a) \cdot F} [\text{adimensional}] \quad (4.1)$$

Donde:

*CPL*: Factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del líquido [adim.]

*P<sub>a</sub>*: Presión del fluido a las condiciones de la prueba [Pa]

*F*: Factor de compresibilidad del líquido [Pa<sup>-1</sup>]

$$CTL = 1 + \beta \cdot (T - T_{20}) [\text{adimensional}] \quad (4.2)$$

Donde:

*CTL*: Factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del líquido [adim.]

*β*: Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido [°C<sup>-1</sup>]

*T<sub>20</sub>*: Temperatura de referencia [°C].

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

$$\beta = \frac{k_0}{\rho_{20}^2} + \frac{k_1}{\rho_{20}} \quad (4.3)$$

Donde:

*β*: Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido a una temperatura de 20 °C [°C<sup>-1</sup>]

*K<sub>0</sub>, K<sub>1</sub>* : Constantes propias de cada líquido.

*ρ<sub>20</sub>*: Densidad del fluido a 20 °C, [kg/m<sup>3</sup>]

## 5.2 ANEXO B

### 5.2.1 Cálculos del mensurando

Se realiza el desglose del cálculo de la FM de una sola corrida para ejemplificar su obtención los resultados de cada variable se encuentran en la *Tabla 1*.

### 5.2.2 Calibración de medidor de flujo por comparación con una medida volumétrica para determinar el FM y K-factor

Cálculo del volumen determinado por el medidor

$$V_m = \frac{10629 [\text{pulsos}]}{3.543 [\text{pulsos/l}]} = 3000 [l]$$

En seguida se realiza el cálculo del factor de corrección por efecto de la temperatura en el acero (medida volumétrica)

$$CTS_p = 1 + 3(0.0000519)[^{\circ}\text{C}^{-1}] \cdot (26.8 - 20)[^{\circ}\text{C}] = 1.00105876 [1]$$

Se calcula la densidad con la fórmula de 1.2 del anexo A (Correlación de Tanaka).

$$\begin{aligned} \rho_{20} &= 999.974950 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{(20 [^{\circ}\text{C}] - 3.983035 [^{\circ}\text{C}^{-1}])^2 (20 [^{\circ}\text{C}] + 301.797 [^{\circ}\text{C}^{-1}])}{522528.9 [^{\circ}\text{C}^{-1}] \cdot (20 [^{\circ}\text{C}] + 69.34881 [^{\circ}\text{C}^{-1}])} \right] \\ &= 996.526 [\text{kg/m}^3] \end{aligned}$$

Para el cálculo de la densidad del fluido con temperatura de 20 y 15 °C se ocupa la fórmula 1.3 del Anexo A.

$$\begin{aligned} \rho_T &= 998.206 \cdot \exp[-0.0000519 [^{\circ}\text{C}^{-1}](26.14 - 20)[^{\circ}\text{C}]] (1 + 0.8 \\ &\quad \cdot 0.000519 [^{\circ}\text{C}^{-1}](26.14 - 20)[^{\circ}\text{C}]) = 997.8878 [\text{kg/m}^3] \end{aligned}$$

Obtenidas las densidades  $\rho_{20}$  y  $\rho_T$  se realiza el cálculo de factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del líquido del medidor de flujo.

$$CTL_m = \frac{997.8878 [\text{Kg/m}^3]}{998.2067 [\text{Kg/m}^3]} = 0.9996 [1]$$

La fórmula del factor de compresibilidad es la fórmula 1.6 del anexo A que es sacada del MPMS de API 12.2.1

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 26.14[^\circ\text{C}] + 0.87096 \cdot 0.9982067^{-2}[\text{Kg/L}] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 26.14 \cdot 0.9982067^{-2}[\text{Kg/L}]) = 0.0005322\text{MPa}^{-1}$$

Ocupando el factor de compresibilidad se calcula el factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del líquido del medidor de flujo.

$$CPL_m = \frac{1}{1 - (0.098[\text{MPa}]) \cdot 0.000532252 [\text{MPa}^{-1}]} = 1.00052163 [1]$$

Para finalizar se utilizan las variables obtenidas para proseguir con el cálculo de la FM.

$$FM = \frac{3000.5 [l] \cdot 1.00105876 [1]}{3000 [l] \cdot 0.999681304 [1] \cdot 1.00052163 [1]} = 1.00149255 [1]$$

*Nota: Estas operaciones se deben efectuar para cada corrida registrada y sacar un promedio de cada resultado, obteniendo así el resultado final correcto que nos ayudará a corregir los volúmenes.*

Tabla 9. Resultados de corridas IBC para calibración por unidad volumétrica Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

Corridas	IBC					
	Vol.	Densidad [kg/m3]	CTL	F [MPa <sup>-1</sup> ]	CPL	Vol. IBC @20°C
1	3000.00	996.5266821	0.999681304	0.000532252	1.000052163	2999.200351
2	2999.72	996.5137984	0.999679227	0.000532252	1.000052217	2998.91211
3	3000.28	996.507347	0.999678189	0.000532252	1.000052483	2999.474135
4	2999.44	996.448997	0.999668845	0.000532252	1.000052323	2998.599117
5	2999.72	996.4424817	0.999667807	0.000532252	1.000052589	2998.878968

Tabla 10. Resultados de corridas de medida volumétrica para calibración por medida volumétrica Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

<b>Medida volumétrica</b>		
<b>CTS</b>	<b>Vol. IBC @20°C</b>	<b>FM</b>
1.00105876	3003.676809	1.00149255
1.00106343	3003.390506	1.00149334
1.00107277	3003.618748	1.00138178
1.00107744	3003.33244	1.00157851
1.0010899	3003.469918	1.00153089
		1.00149541

### 5.2.3 Cálculo de FM de la calibración de medidor de flujo (tipo turbina) por comparación con un probador bidireccional de desplazamiento positivo

Cálculo del volumen determinado por el medidor

$$V_m = \frac{22927 \text{ pulsos}}{6.66 \text{ pulsos/litro}} = 3,442.49 [l]$$

Volumen determinado por el probador

$$V_{probador} = 3,440 [l]$$

Se calculan los factores de corrección primero del medidor de flujo tipo turbina, para proceder con el cálculo se obtienen las densidades  $\rho_T, \rho_{20}$  las cuales se obtienen de las de las tablas del API 11, 53 D.

$$CTL_m = \frac{724.2 [Kg/m^3]}{729.2 [Kg/m^3]} = 0.997531 [1]$$

Cálculo del factor de compresibilidad del líquido "F" para el CPL del medidor

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 22.72[^\circ C] + 0.87096 \cdot 0.7292^{-2} [kg/l] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 22.72[^\circ C] \cdot 0.7292^{-2} [kg/l]) = 0.001223754 (MPa^{-1})$$

$$CPL_m = \frac{1}{1 - (0.853179 [MPa]) \cdot 0.001223754 [MPa^{-1}]} = 1.001045173 [1]$$

Terminado de obtener los factores de corrección del probador bidireccional se obtienen los factores del medidor de flujo.

$$CTS_p = 1 + 3 \cdot (0.0000335 [^\circ C^{-1}]) \cdot (22.6 - 20)[^\circ C] = 1.0002613 [1]$$

$$CPS_p = 1 + \frac{0.823759 [MPa] \cdot 0.4889[m]}{206822.25 [MPa] \cdot 0.0095[m]} = 1.000204 [1]$$

$$CTL_p = \frac{727.7 \text{ [Kg/m}^3\text{]}}{729.2 \text{ [Kg/m}^3\text{]}} = 0.99794295 \text{ [1]}$$

Cálculo del factor de compresibilidad del líquido “F” para el CPL del probador.

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 22.6[\text{°C}] + 0.87096 \cdot 0.7292^{-2}[\text{Kg/l}] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 22.6[\text{°C}] \cdot 0.7292^{-2}[\text{Kg/l}]) = 0.00122256 \text{ MPa}^{-1}$$

$$CPL_p = \frac{1}{1 - (0.823759 \text{ [MPa]}) \cdot 0.00122256 \text{ [MPa}^{-1}\text{]}} = 1.00100811 \text{ [1]}$$

Calculado todos los factores de corrección del medidor de flujo y del probador bidireccional se procede con el cálculo del FM

$$FM = \frac{3440 \text{ [l]} \cdot 1.0002613 \text{ [1]} \cdot 1.00020497 \text{ [1]} \cdot 0.99794295 \text{ [1]} \cdot 1.00100811 \text{ [1]}}{3442.49 \text{ [l]} \cdot 0.997531541 \text{ [1]} \cdot 1.001045173 \text{ [1]}} = 1.00011725 \text{ [1]}$$

Tabla 11. Resultados de corridas IBC para calibración por probador bidireccional. Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

Corridas	IBC					
	Vol.	densidad	CTL	F	CPL	Vol. IBC @20°C
1	3442.49	727.4	0.997531541	0.001223754	1.001045173	3437.58396
2	3443.54	727.37	0.9974904	0.001223804	1.001045215	3438.49184
3	3443.24	727.3	0.997394405	0.001223854	1.001045258	3437.861244
4	3442.49	727.32	0.997421832	0.001223854	1.001045258	3437.206184
5	3442.79	727.28	0.997366978	0.001223874	1.001045275	3437.317031

Tabla 12. Resultados de corridas del probador para calibración por probador bidireccional. Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

Probador								
Vol.	CTS	CPS	Densidad	CTL	F	CPL	Vol. @20°C	FM
3440	1.0002613	1.00020497	727.7	0.99794295	0.00122256	1.00100811	3437.987001	1.00011725
3440	1.00027035	1.00020741	727.64	0.99786067	0.00122346	1.00102087	3437.786828	0.99979496
3440	1.00026633	1.00020741	727.77	0.99803895	0.00122306	1.00102054	3438.386062	1.00015266
3440	1.00027135	1.00020741	727.53	0.99770982	0.00122356	1.00102095	3437.270865	1.00001882
3440	1.00027236	1.00020741	727.48	0.99764125	0.00122365	1.00102104	3437.038374	0.99991893
								1.00000052

#### 5.2.4 Cálculo de FM de la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un probador compacto de desplazamiento positivo

$$V_m = \frac{10629 \text{ pulsos}}{3.543 \text{ pulsos/l}} = 3,000 \text{ l}$$

Se calculan los factores de corrección primero del medidor de flujo tipo turbina, para proceder con el cálculo de  $\beta$  usando las constantes  $k_0$  y  $k_1$  que fueron encontradas en el manual API 11 y usando la densidad del fluido, que en este caso fue gasolina magna.

$$k_0 = 192.4571 \quad \rho = 738,8 \text{ kg/m}^3$$

$$k_1 = 0.2438$$

$$\beta = \frac{192.4571}{738.8^2} + \frac{0.2438}{738.8} = 0.00068259$$

Para el cálculo de  $CTL_m$

$$CTL_m = 1 + (0.00068259 * (22.740 - 20)) = 1.0018703 [1]$$

Cálculo del factor de compresibilidad del líquido "F" para el CPL del medidor

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 22.740[^\circ\text{C}] + 0.87096 \cdot 0.7388^{-2}[\text{Kg/l}] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 22.740[^\circ\text{C}] \cdot 0.7388^{-2}[\text{Kg/l}]) = 0.00116783 \text{ MPa}^{-1}$$

$$CPL_m = \frac{1}{1 - (0.85 [\text{MPa}]) \cdot 0.00116783 [\text{MPa}^{-1}]} = 1.000993642 [1]$$

terminado de obtener los factores de corrección del probador compacto se obtienen los factores del medidor de flujo

$$CTS_p = 1 + 3 \cdot (0.0000335 [^{\circ}C^{-1}]) \cdot (22.65 - 20)[^{\circ}C] = 1.00026633[1]$$

$$CPS_p = 1 + \frac{0.83 [MPa] \cdot 0.4889[m]}{206822.25[MPa] \cdot 0.0095[m]} = 1.00020653 [1]$$

$$CTL_p = 1 + (0.00068259 * (22.65 - 20)) = 1.00180887 [1]$$

Cálculo del factor de compresibilidad del líquido “F” para el CPL del probador

$$F = 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 22.740[^{\circ}C] + 0.87096 \cdot 0.7388^{-2}[Kg/l] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 22.740[^{\circ}C] \cdot 0.7388^{-2}[Kg/l]) = 0.00116783 MPa^{-1})$$

$$CPL_p = \frac{1}{1 - (0.83 [MPa]) \cdot 0.00122256 [MPa^{-1}]} = 1.00096955[1]$$

Calculado todos los factores de corrección del medidor de flujo y del probador compacto se procede con el cálculo del FM.

$$FM = \frac{3440 [l] \cdot 1.00026633[1] \cdot 1.00020653[1] \cdot 1.0018088[1] \cdot 1.00096955[1]}{3451.25 [l] \cdot 1.0018703 [1] \cdot 1.000993642 [1]} = 0.997126853 [1]$$

Tabla 13. Resultados de corridas del IBC para calibración por probador compacto. Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

Corridas	IBC				
	Vol.	CTL	F	CPL	Vol. IBC @20°C
1	3451.25	1.0018703	0.00116783	1.000993642	3461.139477
2	3451.10	1.00187713	0.001167923	1.000996061	3461.020524
3	3451.70	1.00188396	0.001168015	1.000999651	3461.66012
4	3451.85	1.0018703	0.00116783	1.001003003	3461.775441
5	3452.30	1.00187303	0.001167867	1.001004205	3462.241732

Tabla 14. Resultados de corridas del probador para calibración por probador compacto. Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

Probador								
Volumen	CTS	CPS	Densidad	CTL	F	CPL	Vol @20°C	FM
3440	1.00026633	1.00020653	737	1.00180887	0.001167	1.00096955	3451.19511	0.997126853
3440	1.00026532	1.00020727	737.17	1.00180205	0.0011669	1.00097298	3451.18253	0.997157489
3440	1.00026633	1.00020777	737	1.00180887	0.001167	1.00097539	3451.21956	0.996983945
3440	1.00026532	1.00020802	737.17	1.00180205	0.0011669	1.00097648	3451.1972	0.996944274
3440	1.00026934	1.00020852	736.89	1.00182935	0.00116727	1.00097913	3451.31599	0.996844315
								0.997011375

### 5.2.5 Cálculo de FM de la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un medidor de flujo (turbina con turbina)

$$V_m = \frac{10629 \text{ pulsos}}{3.543 \text{ pulsos/l}} = 3,000 \text{ l}$$

Se calculan los factores de corrección primero del medidor de flujo tipo turbina, para proceder con el cálculo de  $\beta$  usando las constantes  $k_0$  y  $k_1$  que fueron encontradas en el manual API 11 y usando la densidad del fluido, que en este caso fue gasolina magna.

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

$$k_1 = 0.2438$$

$$\beta = \frac{192.4571}{729^2} + \frac{0.2438}{729} = 0.00069657$$

Para el cálculo de  $CTL_m$

$$CTL_m = 1 + (0.00068259 * (22.73 - 20)) = 1.0019016 [1]$$

Cálculo del factor de compresibilidad del líquido "F" para el CPL del medidor

$$\begin{aligned} F &= 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 22.73 [^{\circ}C] + 0.87096 \\ &\quad \cdot 0.729^{-2} [Kg/l] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 22.73 [^{\circ}C] \cdot 0.729^{-2} [Kg/l]) \\ &= 0.001225075 \text{ MPa}^{-1} \end{aligned}$$

$$CPL_m = \frac{1}{1 - (0.89 \text{ [MPa]}) \cdot 0.001225075 \text{ [MPa}^{-1}]} = 1.000993642 [1]T$$

Terminado de obtener los factores de corrección del medidor de turbina calibrado se obtienen los factores del medidor de flujo.

$$CTL_p = 1 + (0.00069657 * (22.74 - 20)) = 1.0019086 [1]$$

Cálculo del factor de compresibilidad del líquido "F" para el CPL del medidor de flujo (patrón).

$$\begin{aligned}
 F &= 0.001 \cdot \exp(-1.6208 + 2.1592 \cdot 10^{-4} \cdot 22.740[^\circ\text{C}] + 0.87096 \\
 &\quad \cdot 0.729^{-2}[\text{Kg/l}] + 4.2092 \cdot 10^{-3} \cdot 22.740[^\circ\text{C}] \cdot 0.729^{-2}[\text{Kg/l}]) \\
 &= 0.00122518 \text{ MPa}^{-1})
 \end{aligned}$$

$$CPL_p = \frac{1}{1 - (0.88 [\text{MPa}]) \cdot 0.00122518 [\text{MPa}^{-1}]} = 1.001079318 [1]$$

Calculado todos los factores de corrección del medidor de flujo y del probador bidireccional se procede con el cálculo del FM.

*Nota: El KF y FM del patrón son datos de su previa calibración y son los siguientes:*

$$KF = 6.67 \text{ pulsos/l}$$

$$MF = 1.00020$$

$$\begin{aligned}
 FM &= \frac{3428.33583[\text{l}] \cdot 1.0019086 [1] \cdot 1.001079318[1] \cdot 1.00020]}{3441.32 [\text{l}] \cdot 1.0019016 [1] \cdot 1.000993642 [1]} \\
 &= 0.99642157 [1]
 \end{aligned}$$

*Tabla 15. Resultados de corridas del IBC para calibración por patrón volumétrico (medidor tipo turbina). Fuente: Hoja de cálculo, 2020.*

Corridas	IBC				
	Vol.	CTL	F	CPL	Vol. IBC @20°C
1	3441.32	1.0019016	0.001225075	1.001091507	3451.625613
2	3442.07	1.0019156	0.001225275	1.001094141	3452.437287
3	3441.17	1.0019016	0.0012250754	1.001091507	3451.474696
4	3441.32	1.0019086	0.0012251751	1.001096508	3451.666851
5	3441.17	1.0018947	0.001224976	1.001095715	3451.465207

Tabla 16. Resultados de corridas del probador para calibración por patrón volumétrico (medidor tipo turbina).  
Fuente: Hoja de cálculo, 2020.

<b>Patrón Volumétrico</b>						
Volumen	Densidad	CTL	F	CPL	Vol. IBC @20°C	FM
3428.33583	727.30	1.0019086	0.00122518	1.001079318	3438.586511	0.99642157
3428.93553	727.33	1.0019121	0.00122522	1.00110392	3439.28448	0.99638952
3429.83508	727.40	1.0018947	0.00122498	1.001079142	3440.041806	0.99688687
3430.28486	727.28	1.0019156	0.00122527	1.001099053	3440.633111	0.99700272
3429.38531	727.30	1.0019016	0.00122508	1.001102557	3439.695059	0.99678913
						0.99669796

# Glosario

**k-Factor:** Es la señal de salida de un medidor de flujo, expresada en número de pulsos por unidad de volumen o masa.

**Factor del medidor (FM):** Es el factor adimensional por el cual debe multiplicarse la respuesta del medidor para obtener la mejor estimación del mensurando.

**API:** El instituto americano del petróleo (API por sus siglas en inglés) que se encarga de emitir los estándares en materia de hidrocarburos.

**MPa:** Unidad de medida de la presión (Mega Pascales).

**ANSI:** Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI por sus siglas en inglés) es una organización que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos.

**Trazabilidad de medida:** Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

**Incertidumbre de medición:** Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

**Incertidumbre estándar:** Incertidumbre del resultado de una medición expresado como una desviación estándar.

**Incertidumbre estándar combinada:** Se define como la incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando el resultado es obtenido de los valores de un número dado de otras magnitudes.

**Incertidumbre expandida:** Cantidad que define un intervalo alrededor del resultado de la medición y del cual se espera que comprenda un porcentaje alto de los valores que razonablemente pudieran ser atribuidos al mensurando.

**Mensurado:** Magnitud particular sometida a medición.

*Nota: La diferencia entre los términos incertidumbre y error debe siempre permanecer en mente. Por ejemplo, el resultado de una medición después de aplicar los factores de corrección puede ubicarse muy cerca del valor del mensurando, esto es, puede tener un error despreciable, y sin embargo puede tener un valor de incertidumbre grande.*

## Bibliografía

- API 1101 (2013), American Standard Method for Measurement of Petroleum Liquid Hydrocarbons by positive displacement meters, American Petroleum Institute, New York.
- Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 4—Proving Systems (2013), American Petroleum Institute, New York.
- Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 5—Metering (2005), American Petroleum Institute, USA
- API MPMS Chapter 12,2, Part 4 (1997), Calculation of petroleum quantities using dynamic measurement methods –Calculation of base prover volumes by Waterdraw Method, American Petroleum Institute, New York.
- ISO 4267-2 (1988), Petroleum and liquid petroleum products –calculation of oil quantities – Part 2: Dynamic Measurement, International Standards Organization, Ginebra, Suiza.
- FANELI MIRELI HUEY GIL, APLICACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO EN HIDROCARBUROS PARA TRANSFERENCIA DE CUSTODIA (2014), UNAM, TESIS, Ciudad de México, México.
- MARCO ROLANDO CÓRDOVA LASCANO, INSTALACIÓN Y MONTAJE DE UN BANCO DE PRUEBAS DE CAUDAL, PARA EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA FACULTAD DE MECÁNICA (2008), Tesis, Ecuador.
- Libreta de trabajo CALPRO (2020), CALPRO S.A de C.V, Estado de México, México.