



**INSTITUTO ARGENTINO  
DEL PETRÓLEO Y DEL GAS**

# PRÁCTICA **RECOMENDADA**

---

**PR IAPG-SC-29-2022-00**

---

**Medidores coriolis: influencia del  
proceso en la medición primaria**

 **Notas Especiales**

Por tratarse de una Práctica Recomendada (PR) las acciones, modalidades operativas y técnicas en ellas incluidas, carecen de contenido normativo, legal o interpretativo, y no resultan obligatorias ni exigibles por terceros bajo ninguna condición.

No podrán ser invocadas para definir responsabilidades, deberes, ni conductas obligatorias para ninguno de los sujetos que las utilice, ya que sólo integran un conjunto de consejos para el mejoramiento de las operaciones comprendidas.

De optar por la aplicación de la presente PR y dado que la misma refiere de manera explícita a Prácticas Recomendadas y ESTANDARES del API, los mismos deben ser respetados y cumplidos en todo su alcance. A tal efecto y dado que los mismos están sujetos a actualizaciones se debe aplicar la última Edición o Actualización de cada uno de ellos.

La adopción de una PR no libera a quien la utilice del cumplimiento de las disposiciones legales nacionales, provinciales y municipales, como así tampoco de respetar los derechos de patentes y /o propiedad industrial o intelectual que correspondieren.

El IAPG no asume, con la emisión de esta PR, la responsabilidad propia de las compañías, sus Contratistas y Subcontratistas, de capacitar, equipar o entrenar apropiadamente a sus empleados. Asimismo, el IAPG no releva ni asume responsabilidad alguna en lo que respecta al cumplimiento de las Normas en materia de salud, seguridad y protección ambiental.

Toda cita legal o interpretación normativa contenida en el texto de esta PR no tiene otro valor que el de un indicador para la conducta propia e interna de quienes voluntariamente la adopten o utilicen, bajo su exclusiva responsabilidad.

El IAPG quiere llamar la atención de quienes adopten la presente Práctica Recomendada para que se adecue su utilización a la normativa ambiental que corresponda a su localización. En tal sentido, desea recordar que, tanto en el orden Nacional como en las Provincias Argentinas, existen estructuras normativas para la protección del ambiente.

## > Índice

- 1 | Propósito
- 2 | ALCANCE
- 3 | Definiciones
- 4 | Principio de medición
- 5 | Influencia de la temperatura en la medición Coriolis
- 6 | Influencia de la presión en la medición Coriolis
- 7 | Influencia de la viscosidad en la medición Coriolis
- 8 | Referencia bibliográfica

## 1 PROPOSITO

El propósito de este documento es establecer una guía general para identificar la influencia que tienen las variables de proceso (temperatura, presión y viscosidad) en la medición primaria (caudal másico y densidad) del medidor Coriolis y reconocer las compensaciones utilizadas. Su área de aplicación es solamente la Medición. Otros aspectos inherentes al diseño (mecánicos, ambientales, de seguridad, etc.) no son analizados en este documento.

## 2 ALCANCE

Medidores másicos de efecto Coriolis.

## 3 DEFINICIONES

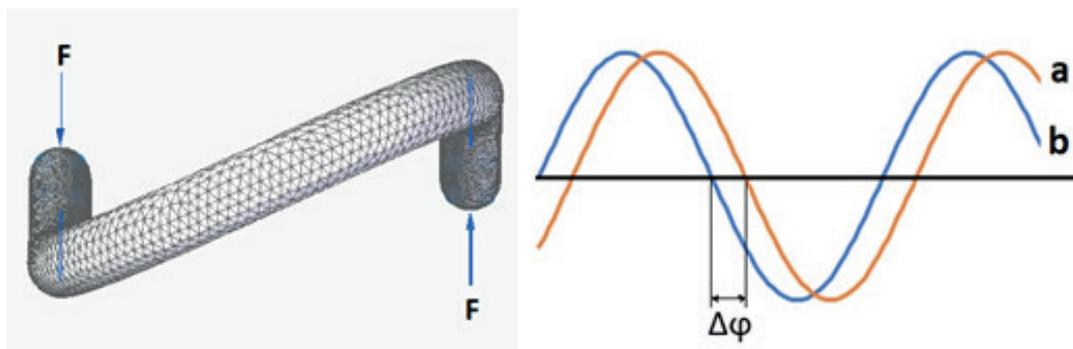
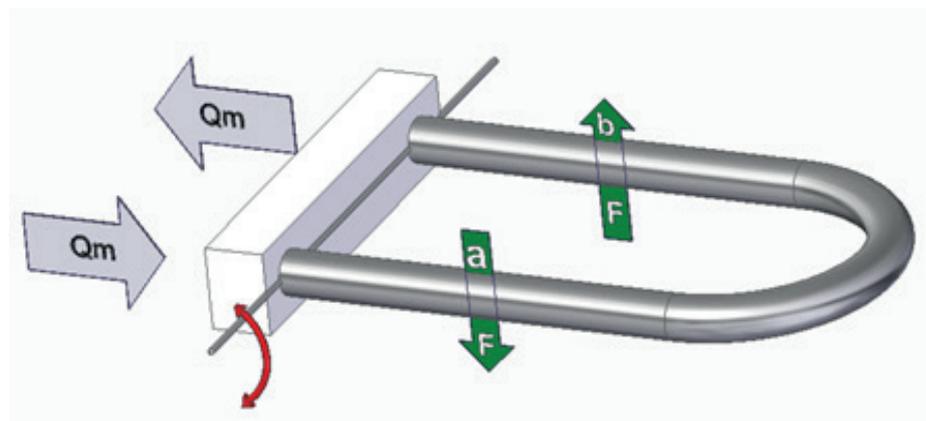
- MC: medidor Coriolis.
- DRIVER: bobina impulsora del sensor Coriolis encargada de mantener los tubos oscilando.
- PICKOFF: bobina lectora del sensor Coriolis
- RTD: sensor de temperatura resistivo (Resistance Temperature Detector).

## 4 PRINCIPIO DE MEDICIÓN

- Si bien existen configuraciones de uno o cuatro tubos de distintas formas, la mayoría de los sensores Coriolis en nuestra industria están diseñados a partir de dos tubos de acero inoxidable en forma de "U", tomaremos entonces esta topología en la siguiente explicación.
- Un sensor Coriolis está compuesto por dos tubos (por lo general de acero inoxidable) en forma de U y tres pares de bobina-imán. A continuación, se muestra un esquema de los tubos internos de medición:



- Las bobinas están montadas en un tubo y los imanes en el tubo opuesto, de manera de proveer más inmunidad a las vibraciones externas durante la operación del equipo. Todo el conjunto se encuentra cubierto por una carcasa metálica soldada.
- Una de las bobinas (bobina impulsora también conocida como Driver en bibliografía técnica) es excitada con una corriente sinusoidal por el transmisor para causar que el sistema oscile a su frecuencia natural (frecuencia de resonancia). Las otras dos bobinas lectoras (también conocidas como Pickoffs en bibliografía técnica) miden la frecuencia de la oscilación del sistema.
- El medidor Coriolis es también un densímetro de oscilación. Hay una relación lineal entre el cuadrado del período de oscilación y la densidad del fluido contenido en los tubos del sensor. De esta manera (midiendo el período de oscilación), el transmisor puede determinar la densidad del producto. Hay que recordar que el período de oscilación (tiempo requerido para completar una oscilación) es la inversa de la frecuencia (cantidad de oscilaciones por unidad de tiempo). Por lo tanto, en la bibliografía técnica podemos encontrar que la densidad de esta tecnología es obtenida por medición de frecuencia o período indistintamente.
- Cuando circula fluido y por efecto Coriolis se produce una torsión de los tubos sensores que es proporcional al caudal másico desplazado. Esta torsión es medida por la diferencia de fase de los voltajes inducidos en las bobinas lectoras. Hay, por lo tanto, una relación directa entre la torsión de los tubos y la diferencia de fase detectada. Las gráficas siguientes muestran el principio de medición de masa de un sensor en “U” de tubo único.

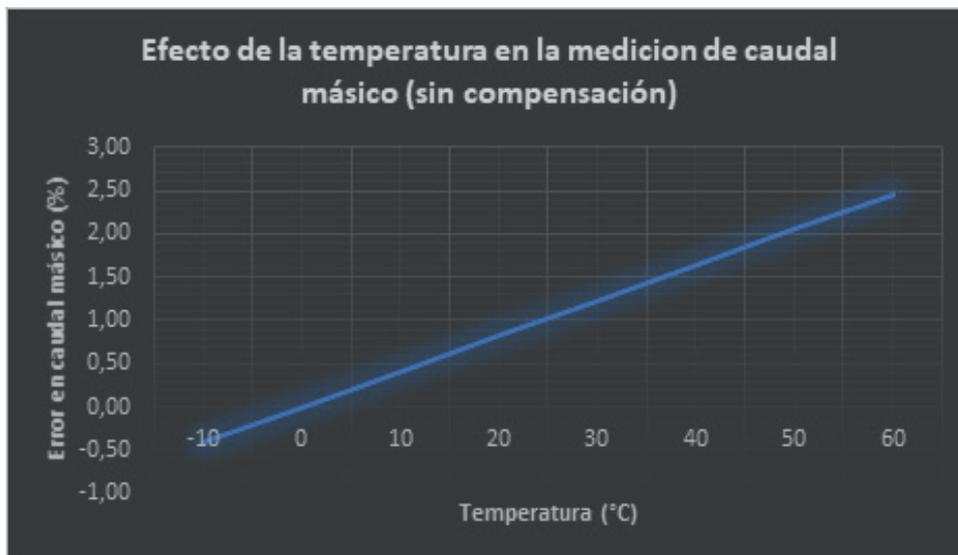


$$Q_m = k \cdot \Delta \varphi$$

- Adherido a los tubos hay un sensor de temperatura resistivo (RTD). Es importante aclarar que en esta práctica recomendada se tratará la influencia del proceso (temperatura, presión y viscosidad) sobre la medición primaria de la tecnología Coriolis (esto es las perturbaciones que produce el proceso a la oscilación y torsión de los tubos sensores) y no la compensación que debe hacerse sobre el fluido (gas-petróleo) para obtener el volumen a condiciones base. La influencia en la medición primaria provocada por la presencia de gas en la corriente de líquido (o líquido en la corriente de gas), se trata en la siguiente Práctica Recomendada del IAPG: "Medidores por Efecto Coriolis: Típicos de Montaje y Diagnóstico de Proceso en Aplicaciones de Petróleo y Gas" En esta PR se mostrarán tablas extraídas de manuales de sensores de distintos fabricantes. La finalidad de mostrar las tablas no es comparar la calidad de los equipos (puesto que cada fabricante ofrece sensores que cubren distintas gamas de calidad de medición). Se muestran sólo a los fines de presentar valores de referencia y de esta manera poder dimensionar los efectos expuestos.

## 5 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA MEDICIÓN CORIOLIS

A medida que la temperatura se incrementa, los tubos se vuelven más elásticos. Cuando la temperatura decrece, los tubos se vuelven más rígidos. Para un caudal másico constante, un incremento de temperatura de los tubos causará una deflexión mayor lo que se traducirá en un incremento del caudal másico. El efecto de la temperatura en el caudal másico es lineal y su magnitud depende principalmente del material de construcción de los tubos. La gráfica siguiente muestra el error de un medidor másico (utilizado con fines de ejemplo) por el cual circula un caudal másico constante. Se observa claramente que el equipo mide un mayor caudal másico a medida que la temperatura se incrementa.



Por lo mencionado, el valor del coeficiente utilizado para compensar este efecto también dependerá principalmente del material de los tubos.

Para dar aquí una idea de la magnitud del efecto, señalaremos que un fabricante en particular informa que un modelo de sus sensores de acero inoxidable 316L tiene un corrimiento de caudal másico de aproximadamente 4,26% por cada 100°C de cambio de temperatura (0,0426% / °C).

Analicemos ahora brevemente la incidencia de la temperatura sobre la indicación de densidad. Si la temperatura de los tubos sensores baja se tornarán más rígidos lo cual causará que la frecuencia natural aumente, aunque la masa del sistema no cambie. Esta disminución en el período de oscilación de los tubos se traduce en una disminución en la indicación de la densidad (si bien la densidad del producto medido se mantiene constante).

Por el contrario, si la temperatura de los tubos aumenta, los tubos se volverán más elásticos, causando que baje la frecuencia natural, redundando en un incremento en el período de oscilación y el subsecuente incremento en la indicación de densidad. Al igual que en el caso anterior de medición de caudal másico, la magnitud de la influencia sobre la elasticidad depende principalmente del material de construcción de los tubos sensores.

## 5.1 Compensación por efecto de la temperatura en los tubos sensores

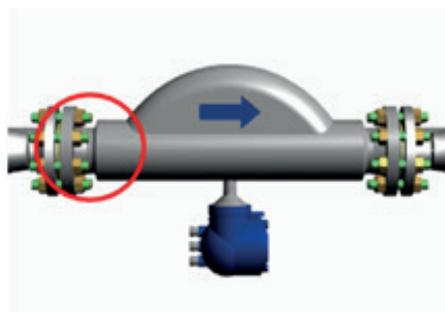
La RTD montada en los tubos sensores es utilizada por el transmisor para corregir el efecto que produce la variación de temperatura, por lo tanto, todos los equipos Coriolis proveen compensación por este efecto. La compensación está siempre habilitada.

Algunos fabricantes informan las constantes de compensación por efecto de la temperatura propia del sensor en una placa adherida al mismo (junto con otros datos de calibración) y en el momento de la parametrización del sensor en el transmisor se deben introducir estos factores. Otros fabricantes graban estos datos de compensación en una memoria interna del sensor y el transmisor los levanta automáticamente.

Cualquiera sea el método utilizado por el fabricante, a los fines de esta PR, debe quedar claro cuál es la incidencia de la temperatura en la medición Coriolis y dependerá del usuario consultar con el fabricante si la compensación requiere o no parametrizar al transmisor.

Se recomienda realizar un contraste de la indicación de temperatura del equipo en forma periódica. Generalmente este chequeo/ajuste se realiza en el mantenimiento programado cuando se envía al equipo a banco gravimétrico.

De requerirse una verificación en campo, podemos tomar lo enunciado en AGA 11 en el punto 9.1: AGA 11 9.1 Verificación de la temperatura - Se puede usar una temperatura de referencia ubicada en una termovaina aguas arriba del medidor o temporalmente presionada a la entrada del sensor (en la zona del splitter).



Recordemos que lo que se quiere chequear es la indicación de temperatura de la RTD del sensor cuya función primordial es medir la temperatura de los tubos para compensar los corrimientos mencionados.

## 5.2 Degradación de la exactitud por efecto de la temperatura

Independientemente de las compensaciones tratadas en el apartado 6.1, los fabricantes especifican una degradación de la exactitud del caudal másico dada por la diferencia entre la temperatura de operación y la temperatura a la que se realizó la calibración de cero caudal del equipo. Este efecto puede ser corregido calibrando el cero caudal a la condición de proceso.

Los fabricantes y la normativa utilizada (AGA 11 y API MPMS 5.6) recomiendan chequear el cero caudal del equipo a las condiciones de operación en la puesta en marcha y periódicamente. Se debe consultar al fabricante para evacuar dudas y realizar, si corresponde, de forma correcta la calibración de cero caudal en campo.

A continuación, se muestran datos extraídos de manuales de dos equipos (en varios tamaños) de diferentes fabricantes:

### Caudal másico y volumétrico

v.f.e = valor fondo de escala

Cuando hay una diferencia entre la temperatura en el ajuste del punto cero y la temperatura de proceso el error típico del medidor es  $\pm 0,0002 \% \text{ v.f.e}/^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,0001 \% \text{ v.f.e}/^{\circ}\text{F}$ ).

Para la medición de caudal másico, el **efecto de la temperatura de proceso** se define como el cambio en la exactitud de caudal del sensor debido a la diferencia entre la temperatura de calibración y la temperatura de proceso. Este efecto puede ser corregido calibrando el cero a la condición de proceso.

Código del modelo	Caudal másico (% maximo caudal) por $^{\circ}\text{C}$
F025	$\pm 0.0007$
F050, F100, F200, F300, F400	$\pm 0.0002$

Ejemplo de cálculo para un sensor F200:

- $Q_{\text{máx}} = 87100 \text{ kg/h}$  (del manual del equipo)
- Temperatura del Último Ajuste Cero:  $20^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de Operación:  $35^{\circ}\text{C}$
- Coeficiente Efecto Temperatura:  $\pm 0.0002\%/^{\circ}\text{C}$  del máximo caudal

Cálculo del efecto de temperatura:

$$\pm(0,0002/100) \frac{1}{^{\circ}\text{C}} * (35^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) * 87100 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \pm 2,613 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para incluir el efecto de la temperatura en el presupuesto de incertidumbre total de medición, se emplea la regla de sumatoria cuadrática.

Sobre este efecto de temperatura es importante notar algunos aspectos:

- 1) El error es de tipo offset o sistemático. Puede tomar valores positivos o negativos.
- 2) Lo valores calculados son los límites máximos para este offset. El offset estará en algún punto entre el límite positivo y negativo, pero no fluctuará.
- 3) Como se mencionó, este efecto de temperatura se puede corregir ejecutando el cero del instrumento a una temperatura cercana a la de operación.

Además de la degradación de exactitud de caudal másico (que como mencionamos depende de la temperatura a la que se realizó la calibración de cero caudal), hay una degradación de la exactitud de la densidad reportada por el equipo que depende de la diferencia entre la temperatura de operación y la temperatura a la que se realizó la calibración de densidad. Algunos fabricantes ofrecen la posibilidad de calibrar la densidad en campo de tal manera de mejorar la exactitud de la densidad en operación.

A continuación, se muestran datos extraídos de manuales de dos equipos (en varios tamaños) de diferentes fabricantes:

Para la medición de densidad, **el efecto de la temperatura de proceso** se define como el cambio en la exactitud de densidad del sensor debido a la diferencia entre la temperatura de proceso y la temperatura a la cual se realizó la calibración de densidad. Ver el manual de instalación para una configuración adecuada.

Código del modelo	Densidad por °C
F025	±0.0003 g/cm <sup>3</sup> (±0.3 kg/m <sup>3</sup> )
F050, F100, F200, F300, F400	±0.0001 g/cm <sup>3</sup> (±0.1 kg/m <sup>3</sup> )

**Densidad**

Cuando hay una diferencia entre la temperatura de calibración de densidad y la temperatura del proceso, el error típico del sensor es ±0,00005 g/cm<sup>3</sup> / °C (±0,000025 g/cm<sup>3</sup> / °F). Es posible calibrar la densidad en campo.

**6 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LA MEDICIÓN CORIOLIS**

Vamos a definir al efecto de la presión de proceso como el cambio de las especificaciones de exactitud en el caudal másico y densidad del sensor debido a la diferencia entre la presión de operación y la presión de calibración del sensor.

Analizaremos de forma general como se afecta la medición tanto de la densidad como del flujo másico por el efecto de la presión estática sobre los tubos del sensor Coriolis.

Como ya mencionamos en el punto 5, el medidor obtiene:

- La densidad por medio de la variación de frecuencia (f) de vibración del tubo.
- El flujo másico por la torsión del tubo (twist), que se registra como un retardo (Δt) de lectura entre los pick-off.

Bajo condiciones de diseño y operativas, el tubo del instrumento se comporta de forma elástica frente al incremento de presión, donde una variación de presión implicará una variación del estado tensional según Laplace.

Para los estados tensionales:

$$\frac{\sigma_l}{\rho_l} + \frac{\sigma_c}{\rho_c} = \frac{P}{e}$$

Donde:

$\sigma_l$  es tensión longitudinal

$\sigma_c$  es tensión circunferencial

$\rho_l$  es el radio de curvatura longitudinal

$\rho_c$  el radio de curvatura circunferencial

$P$  es la presión

$e$  es el espesor de la pared del tubo.

Y esa variación tensional una deformación según la Ley de Hooke para la deformación del sólido (tubos) en rango elástico.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Donde:

$E$  es el módulo de elasticidad del material (también llamado módulo de Young).

$\sigma$  es la tensión.

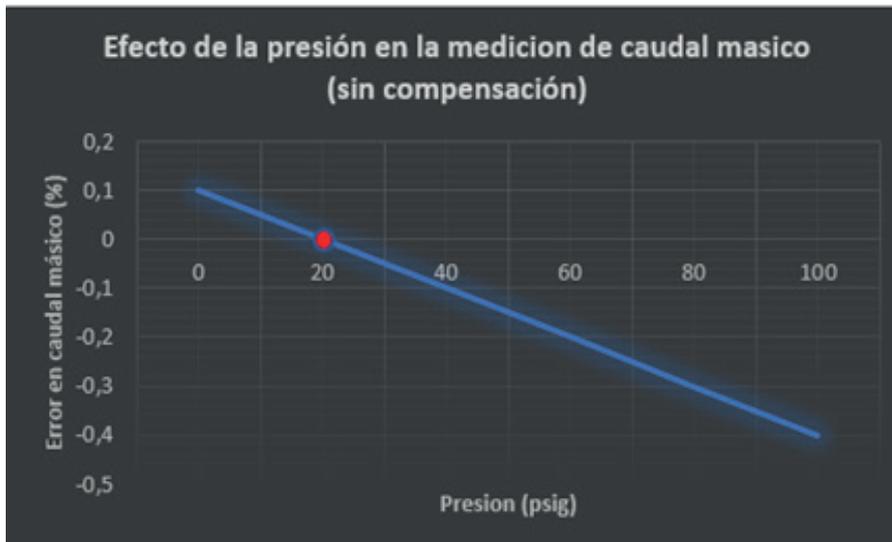
Los tubos metálicos de un medidor por efecto Coriolis trabajan en rango lineal elástico, donde una variación de presión genera un cambio tensional y geométrico. Este comportamiento implica que, para un flujo másico constante, la variación de presión generará (por este cambio tensional y geométrico) una variación en el  $\Delta t$  reportado por los pick-off; siendo este valor de desfase de ondas el utilizado para la medición de flujo másico.

Es importante señalar que el efecto de la presión sobre el tubo es exclusivamente mencionado en esta PR, para lo inherente al material y su respuesta frente a sollicitaciones externas; por tal motivo la variación de comportamiento del medidor siempre va a existir.

Las ecuaciones arriba descritas son conceptuales para dar un marco a la idea de que el material se deforma y cambia su comportamiento en función de la presión.

Desde un punto de vista más general podemos decir que a medida que la presión del sensor se incrementa, aumenta también la rigidez de los tubos. Este hecho provocará que los tubos tengan menos torsión por efecto Coriolis y el equipo medirá menos caudal másico que el real.

La gráfica siguiente muestra el error de un medidor másico (utilizado con fines de ejemplo) por el cual circula caudal másico constante. Se observa claramente que el equipo mide menos caudal másico a medida que la presión se incrementa.



La magnitud de la influencia de la presión en el sensor depende del espesor de la pared de los tubos, diámetro, geometría y material de construcción. Los tamaños de sensor más pequeños exhiben un efecto de presión insignificante en la precisión del medidor. Sin embargo, el efecto se vuelve más pronunciado al aumentar el tamaño del sensor.

Para el caso de la densidad, la situación es similar. La variación de presión genera un cambio geométrico y tensional, donde ambas variables impactan en la frecuencia de resonancia del tubo. Dicho esto, se espera que, para una densidad definida, un incremento de presión impacte en una variación de la frecuencia por cambio tensional y geométrico.

La forma de gestionar el efecto del comportamiento mecánico del equipo es por medio de la compensación de las variables respecto a la condición de calibración. La condición de calibración es la presión a la cual se realizó la calibración del sensor (en nuestra gráfica 20 psig).

Los fabricantes especifican en los manuales el error de caudal másico en porcentaje y el error de densidad (generalmente en unidades absolutas) por unidad de presión (psi o Bar) respecto de la presión de calibración.

A continuación, se muestran tablas extraídas de manuales de dos equipos (en varios tamaños) de diferentes fabricantes.

DN		[% o.r./bar]	[% o.r./psi]
[mm]	[in]		
8	3/8	no influence	
15	½	no influence	
25	1	no influence	
40	1½	-0.003	-0.0002
50	2	-0.008	-0.0006
80	3	-0.009	-0.0006
100	4	-0.007	-0.0005

Model	Mass flow (% of rate)		Density	
	per psi	per bar	g/cm <sup>3</sup> per psi	kg/m <sup>3</sup> per bar
F025	None	None	None	None
F050	-0.0008	-0.0116	None	None
F100	-0.0013	-0.01885	None	None
F200	-0.0007	-0.01015	-0.00003	-0.435
F300	-0.0012	-0.0174	-0.000017	-0.2465
F400	-0.0002	-0.0029	-0.000061	-0.884

Calculemos el error en la determinación de masa de un sensor F300, cuyo certificado indica que la calibración de masa se realizó a 20 PSI (Pcal = 20 psig) y que está midiendo una corriente de gas en un separador a 1200 PSI.

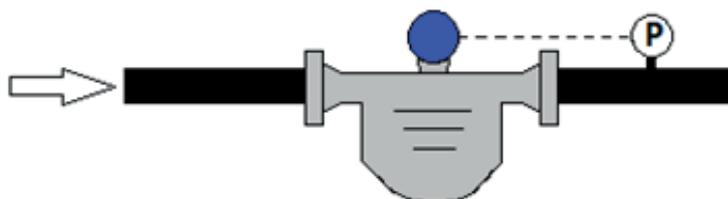
$\Delta P = 1200 \text{ psig} - 20 \text{ psig} = 1180 \text{ psig}$   
 Diferencia en masa =  $1180 \times (-0,0012\%)$   
 Diferencia en masa =  $-1,416 \%$

Por lo tanto, el equipo medirá 1,416 % caudal másico de menos si no se compensa la medición por efecto de la presión en los tubos sensores.  
 Al evaluar un nuevo punto de medición con esta tecnología se debe realizar el cálculo anterior (con los datos de la presión de operación y las constantes de compensación del sensor) para determinar la necesidad o no de compensar el desvío.

## 6.1 Compensación por efecto de la presión en los tubos sensores

El sensor Coriolis no tiene incluido un sensor de presión y, por lo tanto (a diferencia de la compensación por efecto de la temperatura que está siempre habilitada), la compensación por el efecto de la presión en el transmisor Coriolis está por defecto deshabilitada.

El efecto de la presión de proceso puede corregirse ingresando un valor fijo de presión de operación al transmisor Coriolis (compensación estática) o entregando el valor "vivo" de la presión medida por un PT al transmisor Coriolis mediante lazo 4-20 mA, escritura Modbus, etc. (compensación dinámica) tal como muestra el siguiente esquema:

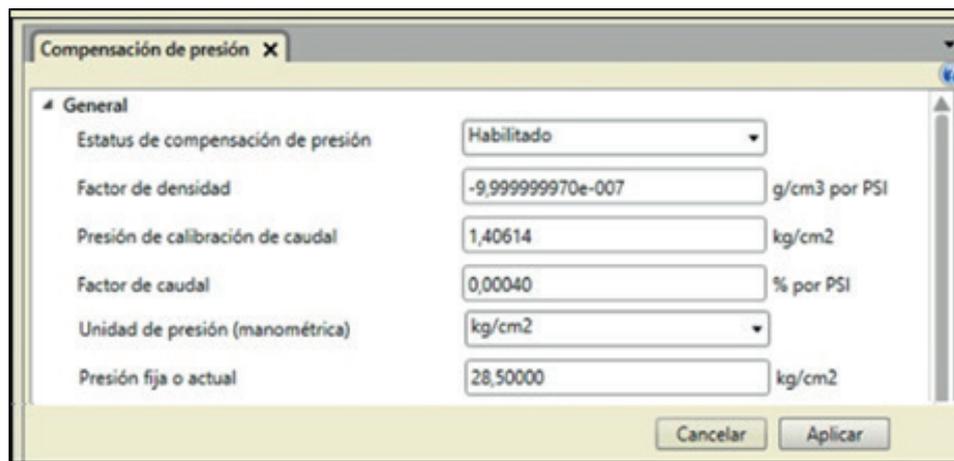


Como regla general podemos concluir:

Si la presión varía significativamente ➡ Transmisor de presión (compensación dinámica)

Si la presión no varía significativamente ➡ Valor fijo con la presión promedio (compensación estática)

La figura siguiente muestra la configuración empleada por un fabricante en particular que usaremos para ejemplificar lo dicho:



Estatus de compensación por presión: recordar que por defecto está deshabilitada

Factor de densidad y Factor de caudal: del manual del sensor

Presión de calibración de caudal: del certificado de calibración del sensor. Notar que la presión ingresada en este caso es 20 PSI, que es generalmente la presión de calibración original realizada por el fabricante.

## 6.2 Indicaciones en normativa de medición de Oil & Gas

Expondremos brevemente aquí las referencias dadas respecto a la compensación por efecto de la presión sobre el sensor Coriolis en la normativa utilizada en nuestra industria.

- AGA Report N° 11 “Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter”  
AGA 11 indica que la densidad reportada por el medidor Coriolis no debe ser utilizada para el cálculo del volumen estándar de gas, en la ecuación únicamente interviene el caudal másico. Por este motivo, a los fines de cumplir con la exactitud requerida, sólo debemos compensar el efecto de la presión sobre el caudal másico.

En el punto 3.2 expone:

“Algunos medidores Coriolis exhiben sensibilidad a los cambios en la presión de operación, llamado “efecto de la presión en el caudal”, el cual puede crear un desvío negativo en la indicación del caudal a presiones por encima de la presión de calibración y un desvío positivo a presiones de operación por debajo de la presión de calibración. Este efecto puede ser compensado por el uso de una presión promedio de operación (valor fijo) o corrección de presión variable usando un dispositivo de medición de presión externo. Debido a que este efecto es específico para un diseño y tamaño del sensor, el diseñador debe consultar al fabricante para identificar la magnitud del efecto de la presión a condiciones de operación.”

- API MPMS 5.6 “Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters”  
A diferencia de la medición de gas natural, en la medición de hidrocarburo líquido interviene la

densidad y el caudal másico reportado por Coriolis y, por lo tanto, de ser necesaria la compensación por efecto de la presión, debemos hacerlo en las dos variables.

En el punto 6.3.2(g) expone:

*Un dispositivo de registro o indicador de presión debe ser instalado cerca del sensor de flujo. Para medición de volumen de fluidos altamente compresibles bajo caudales variables, puede ser necesario instalar un equipamiento sensor de presión ambas aguas arriba y aguas abajo del medidor Coriolis y utilizar la presión promedio en el cálculo del factor del medidor. Estas mediciones de presión pueden también ser usadas para compensar el desempeño del medidor por efectos de la presión*

Establece entonces que la instrumentación secundaria (en este caso medición de presión) puede utilizarse para realizar una compensación dinámica del sensor de ser necesario.

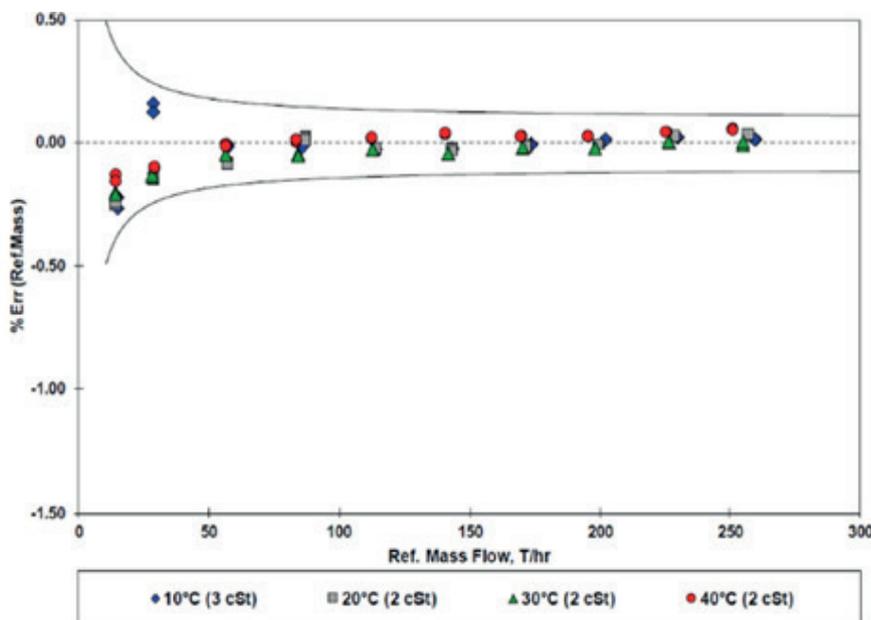
## 7 INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD EN LA MEDICIÓN CORIOLIS

Hasta hace relativamente poco tiempo, se pensaba que la medición Coriolis era prácticamente insensible a la viscosidad del fluido. Algunos fabricantes aceptan hoy que **ciertos equipos** muestran un corrimiento de caudal másico ante **condiciones de fluidos muy viscosos**.

### 7.1 Análisis cualitativo del efecto

Se mostrarán a continuación gráficas de ensayos realizados a un sensor Coriolis de 4" de un modelo y fabricante en particular. Estas gráficas se exponen para poder visualizar más claramente el efecto, pero no deben ser tomadas como corrimientos representativos de todos los sensores de 4", puesto que, como describiremos más adelante, el diseño del sensor determina también la magnitud del efecto.

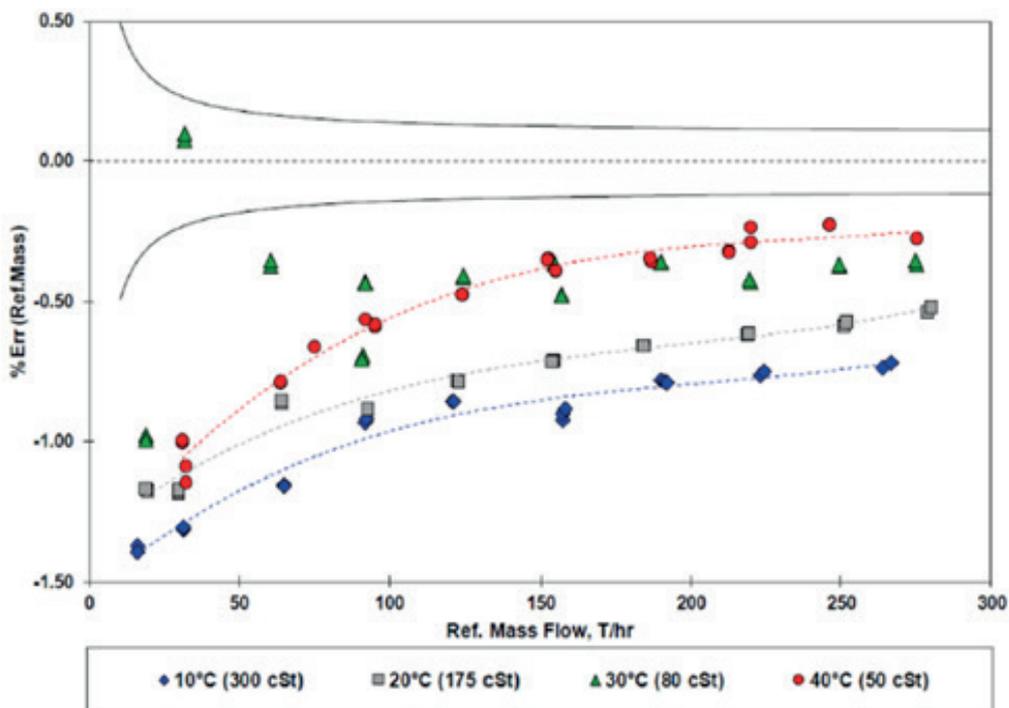
La figura siguiente muestra que a viscosidad baja (en este caso 2 a 3 cSt similar al Kerosene) y a varias temperaturas todos los puntos de error en caudal másico caen dentro de la especificación del sensor.



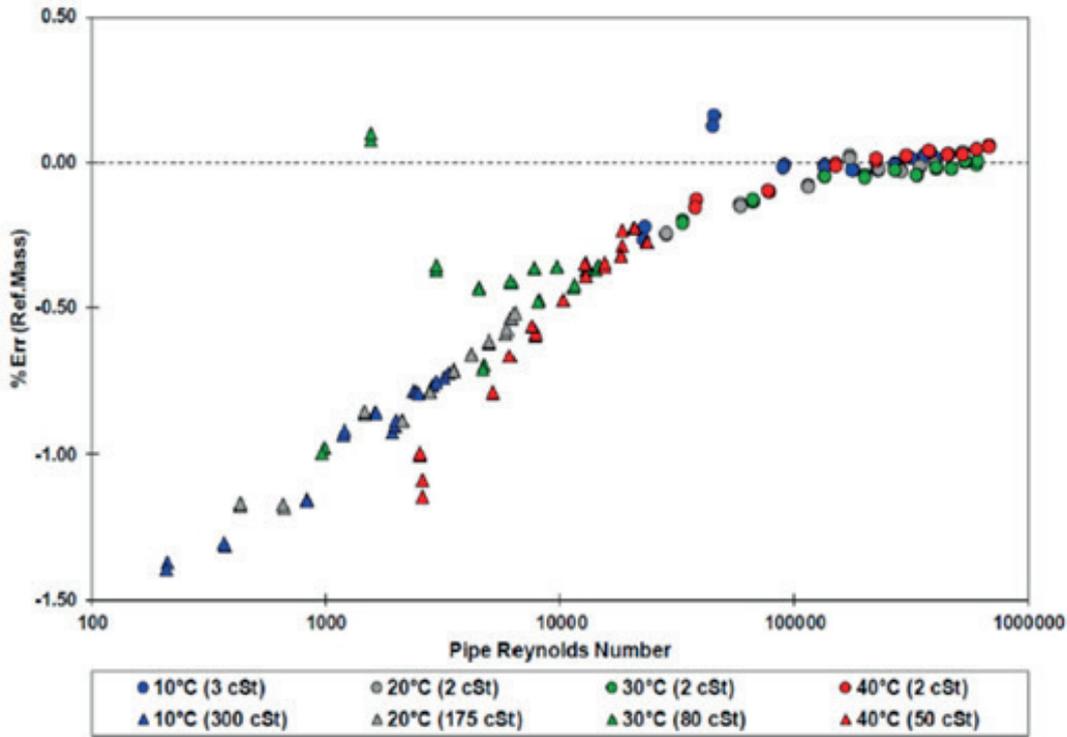
La figura siguiente demuestra el efecto de la viscosidad en la performance del medidor. A altas viscosidades los puntos caen fuera de la especificación del fabricante.

Observemos aquí que:

- La viscosidad produce una sub-medición de caudal másico (mide menos caudal másico que el real)
- Al aumentar la viscosidad el error crece
- A caudales bajos el error crece
- Hay distintas curvas para distintas viscosidades



Por último, la gráfica siguiente muestra la relación entre el número de Reynolds y el error en masa.



Se observa aquí una tendencia lineal entre ambas magnitudes a bajos números de Reynolds.

La explicación detallada de este fenómeno excede el alcance de esta PR. Sin embargo, daremos aquí un fundamento teórico básico para entender los mecanismos que proponen los fabricantes para compensar el efecto.

Como se mencionó, los tubos de medición se encuentran oscilando a la frecuencia de resonancia del sistema.

Bajo ciertas circunstancias la interacción entre las fuerzas de corte oscilatorias y las fuerzas inerciales Coriolis oscilatorias producen la aparición de un flujo secundario oscilante. Como este efecto de flujo secundario aparece en las últimas capas cerca de la pared del tubo, a este efecto se lo conoce como efecto de capa límite.

La fuerza Coriolis debe superar la fuerza de corte y parte de la energía de la fuerza Coriolis se disipa en la circulación del flujo secundario y por lo tanto no contribuye con la deflexión de los tubos. Esto explica la razón que el equipo muestre un caudal másico inferior al real.

La razón entre las dos fuerzas oscilatorias (fuerzas Coriolis y fuerzas de corte) es directamente proporcional al número de Reynolds. Esto demuestra la tendencia lineal de la gráfica anterior a bajos números de Reynolds. La capa límite más gruesa equipara a la diferencia de fase más pequeña del dispositivo Coriolis y consecuente sub-medición de caudal másico en una relación lineal con el número de Reynolds.

La magnitud del caudal secundario decrece fuertemente con altos números de Reynolds puesto que el espesor de la capa límite decrece exponencialmente con el incremento del número de Reynolds. Consecuentemente, el efecto de capa límite se vuelve insignificante por encima de un cierto número de Reynolds.

En fluidos muy viscosos es posible alcanzar bajos números de Reynolds con velocidades de flujo no tan bajas. Por lo tanto, el efecto observado no puede solamente ser atribuido a la velocidad del fluido.

## 7.2 Compensaciones del efecto

Al momento de la redacción de la presente PR un fabricante ofrece en uno de sus modelos de sensores Coriolis el ajuste de los corrimientos mencionados aplicando una corrección patentada por número de Reynolds. La corrección puede realizarse porque este modelo de sensor cuenta con la posibilidad de medir la viscosidad del fluido.

El número de Reynolds se puede calcular como:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\eta} = \frac{4Qm}{\pi n D}$$

Donde:

$V$  es la velocidad del fluido

$D$  es el diámetro interno de la tubería

$\nu$  viscosidad cinemática

$\rho$  densidad del fluido

$\eta$  viscosidad dinámica

$Qm$  caudal másico

Como el sensor mide la viscosidad y además tiene, como todo equipo Coriolis, los valores de densidad y caudal másico, calcula el número de Reynolds y realiza la compensación mencionada.

Por otro lado, debemos señalar las consideraciones en cuanto a diseño del sensor que proponen los fabricantes para minimizar el efecto de sub-medición de caudal a bajos números de Reynolds.

Un parámetro constructivo del sensor Coriolis que incide en el efecto por número de Reynolds es el llamado en la bibliografía "relación de aspecto" (Aspect Ratio) del sensor.

$$\alpha = \frac{L}{r}$$

Donde:

$\alpha$  es la "relación de aspecto"

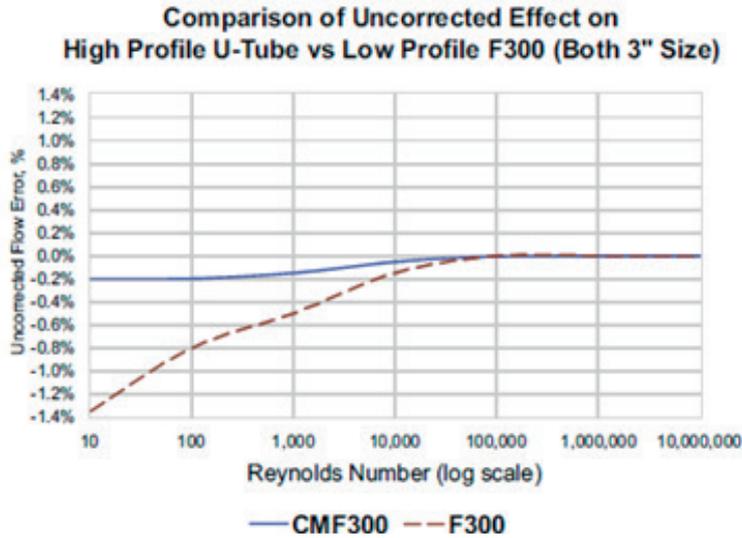
$L$  es la longitud de los tubos

$r$  es el radio de los tubos

Ensayos demuestran que sensores con alta "relación de aspecto" (sensores en "U" y no de perfil suave) son más inmunes al efecto por número de Reynolds (no presentan corrimientos en la indicación de caudal másico a bajos números de Reynolds).

Este resultado es lógico ya que al aumentar la longitud del tubo en "U" estamos aumentando la magnitud de la fuerza Coriolis para el mismo caudal másico y, por lo tanto, disminuyendo el efecto de capa límite.

A continuación, se muestra una gráfica dada por un fabricante donde se visualizan los corrimientos en masa a bajos números de Reynolds de dos sensores con distintas "relaciones de aspecto" (distintas longitudes).



Al respecto, el fabricante indica que el corrimiento en masa por efecto de capa límite puede ocurrir cuando la combinación de estas cuatro condiciones está presente:

- Medidores de gran tamaño (gran diámetro)
- Alta viscosidad del fluido
- Bajo caudal y número de Reynolds
- Baja “relación de aspecto” del sensor (sensores con perfil suave o rectos)

A continuación, se muestra la especificación que da un fabricante en el manual de sensores con “alta relación de aspecto”

**Rango de viscosidad**  
 Para instalaciones con sensores de 4 pulgadas (DN100) o más grandes, y viscosidades del fluido mayores a 500 centistokes (cSt), consultar con la fábrica o soporte técnico para que lo guíen en la optimización de su configuración. Estas recomendaciones no son aplicables para sensores más pequeños o procesos con viscosidades menores a 500 cSt.

### 7.3 Consideraciones finales

Se ha preferido dar aquí los fundamentos generales de la incidencia de la viscosidad en la medición Coriolis y no valores particulares de errores de masa y viscosidades ya que, como se mencionó, depende fuertemente del diseño del sensor y de la aplicación.

El espíritu de la PR es que el usuario final tenga herramientas técnicas a la hora de abordar la solicitud de información específica al proveedor.

## 8

### REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

En la confección de la presente PR se han tomado lineamientos dados en:

- API MPMS 5.6 “Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters”
- AGA Report N° 11 “Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter”
- WP-002502 Calibration and Optimization of Coriolis Meters for Applications with High Viscosity Fluids - Emerson Automation Solutions
- EFFECT OF REYNOLDS NUMBER IN CORIOLIS FLOW MEASUREMENT Christof Huber, Michael Nuber and Martin Anklin - Endress+Hauser
- Calibrating and operating Coriolis flow meters with respect to process effects, Chris Mills TUV SUD NEL
- Manuales de sensores Coriolis de Micromotion y Endress+Hauser