

EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL MEDIDOR DE FLUJO
MÁSICO TIPO CORIOLIS PARA GAS NATURAL

FAVIO EDUARDO SOLANO CASTELLANOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE GAS
BUCARAMANGA
2006

EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL MEDIDOR DE FLUJO
MÁSICO TIPO CORIOLIS PARA GAS NATURAL

FAVIO EDUARDO SOLANO CASTELLANOS

Monografía
para optar el título de
Especialista en Ingeniería de Gas

Director
Henry Abril Blanco
Especialista en Ingeniería de Gas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE GAS
BUCARAMANGA
2006

A mi madre

A mi esposa

A mis hijos

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

- A Dios, de quien todo lo he recibido.
- A mi familia, por su estímulo a seguir superándome personal y profesionalmente.
- A las Unidades Tecnológicas de Santander, por su apoyo en todo sentido para estudiar.
- Al Ingeniero Henry Abril Blanco, Director de la monografía, que con su asesoría y orientación me condujo a culminar satisfactoriamente este proyecto.
- A la Universidad Industrial de Santander, y en especial a la escuela de ingeniería petróleos, por darme la oportunidad de seguir formándose profesionalmente.
- A mis profesores del postgrado, por compartir sus conocimientos y experiencias.
- A mis compañeros de estudio, por compartir sus experiencias y haber hecho agradable el postgrado.
- A un selecto grupo de mis alumnos de las Unidades Tecnológicas de Santander, que no solo me apoyaron sino también aprendieron.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1 MARCO CONCEPTUAL	15
1.2 DESCRIPCIÓN DEL REPORTE AGA N° 11	17
1.3 MARCO REFERENCIAL	19
1.3.1 Medición de flujo y de volumen de gas natural.	19
1.3.2 Generalidades de la tecnología del medidor Coriolis	20
1.3.4 Aspectos constructivos	28
1.3.5 Diseños típicos.	34
1.3.6 Condiciones de operación.	35
1.3.7 Usos en gas natural.	36
2. ASPECTOS TÉCNICOS DEL MEDIDOR CORIOLIS	38
2.1 REQUISITOS DEL MEDIDOR	38
2.1.1 Cuerpo del medidor.	38
2.1.2 Electrónica.	39
2.1.3 Software.	40
2.1.4 Requisitos de calibración.	43
2.1.5 Desempeño.	44
2.2 SELECCIÓN	46
2.3 REQUISITOS DE INSTALACIÓN	52
2.4 PUESTA EN OPERACIÓN	56
2.4.1 Ajuste del cero.	56
2.4.2 Pruebas de entrada y salida.	57
2.4.3 Ajuste de salida de miliamperios.	58
2.5 CALIBRACIÓN DE CAUDAL MÁSIKO	58
2.5.1 Métodos de calibración de flujo.	59
2.5.2 Periodos de recalibración	62
2.6 MANTENIMIENTO Y PRUEBA DE DESEMPEÑO DE CAMPO	66
2.6.1 Mantenimiento de campo	66

2.6.2 Prueba de desempeño de campo	68
2.7 DIAGNÓSTICO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS	69
3. ANÁLISIS DEL ESTADO TECNOLÓGICO DEL MEDIDOR CORIOLIS	76
3.1 GENERALIDADES	76
3.2 CONVERSIÓN DE CAUDAL MÁSIICO A CAUDAL VOLUMÉTRICO	80
3.3 COMPARACIÓN CON OTROS MEDIDORES	81
3.4 ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS TÉCNICOS DEL MEDIDOR CORIOLIS	83
4. GUIA DE PROCEDIMIENTOS PARA EL USUARIO	89
4.1 OBJETIVO	89
4.2 GENERALIDADES	89
4.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	90
4.4 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	91
4.5 CONDICIONES DE OPERACIÓN	92
4.6 REQUISITOS DEL MEDIDOR	93
4.7 SELECCIÓN	93
4.8 INSTALACIÓN	94
4.9 PUESTA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	94
4.10 INFORMACIÓN DE INTERÉS	95
4.11 ADQUISICIÓN DEL MEDIDOR CORIOLIS	97
4.12 CALIBRACIÓN	98
4.13 HOJA DE DATOS DE PRUEBA DE CAMPO	99
5. CONCLUSIONES DEL PROYECTO	100
BIBLIOGRAFÍA	101

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema del principio del medidor Coriolis	24
Figura 2. Esquema de las fuerzas sobre el tubo en U	25
Figura 3. Diagrama de movimiento del tubo	25
Figura 4. Esquema del momento de oscilación del tubo	26
Figura 5. Representación de la deformación angular del tubo	27
Figura 6. Medidor Coriolis MicroMotion de equipo ASPRO	28
Figura 7. Medidor Coriolis Micro Motion de equipo Galileo	29
Figura 8. Tarjeta de alimentación	29
Figura 9. Tarjeta del sensor	30
Figura 10. Sensor del medidor Coriolis	31
Figura 11. Transmisor del medidor Coriolis	32
Figura 12. Dispositivos periféricos	33
Figura 13. Comunicación del transmisor	33
Figura 14. Porcentaje de error	45
Figura 15. Error a mínimo caudal vs. Q_{max} / Q_{min}	48
Figura 16. Error en el caudal y caída de presión vs. Caudal	49
Figura 17. Diagrama para dimensionar el medidor Coriolis	51
Figura 18. Configuración de la tubería	53
Figura 19. Sensor fijado con pernos	54
Figura 20. Orientación del sensor para gas	55
Figura 21. Esquema del método con patrón de referencia	60
Figura 22. Esquema método gravimétrico	61
Figura 23. Esquema del método volumétrico	62
Figura 24. Esquema del método de ajuste automático	64
Figura 25. Esquema del método gráfico de control	64
Figura 26. Esquema del método tiempo de utilización	65
Figura 27. Esquema del método de la verificación continua.	65
Figura 28. Esquema del método tiempo del calendario.	66
Figura 29. Configuración para la prueba de desempeño de campo	69
Figura 30. Perfil de velocidades distorsionado	77
Figura 31. Esquema de los efectos de rotación y desplazamiento	77

Figura 32. Esquema de flujo helicoidal	77
Figura 33. Esquema del principio de funcionamiento	91
Figura 34. Componentes del medidor Coriolis	92

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Incidencia del tamaño del medidor Coriolis	48
Tabla 2. Problemas y soluciones de variables de proceso	73
Tabla 3. Problemas y soluciones de salida de miliamperios.	74

RESUMEN

TITULO*: EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL MEDIDOR DE FLUJO MÁSICO TIPO CORIOLIS PARA GAS NATURAL

Autor: Favio Eduardo Solano Castellanos**

Palabras claves:

Medidor de flujo másico Coriolis

Evaluación del medidor de flujo másico Coriolis

Contenido:

La evaluación de la tecnología del medidor de flujo másico Coriolis para gas natural empieza con un marco teórico, como capítulo uno, en donde: se describe el reporte N° 11 de la Asociación Americana del Gas (AGA), dando a conocer su propósito y su contenido; se expresa el principio de funcionamiento y los aspectos genéricos y constructivos del medidor Coriolis, así como también sus usos y las condiciones mínimas de operación.

Como capítulo dos, se dan a conocer con fundamentos en el reporte AGA N° 11 y en publicaciones dadas por fabricantes y usuarios, los aspectos técnicos que se deben tener en cuenta en la aplicación del medidor Coriolis, como son: requisitos del medidor, selección, requisitos de instalación, puesta en operación, calibración, mantenimiento, prueba de desempeño en campo y diagnóstico y solución de problemas.

El tercer capítulo presenta el análisis de la tecnología del medidor Coriolis, empezando por aspectos genéricos, de su principio, del reporte AGA N° 11 y de sus aplicaciones; terminándose con el análisis de la literatura disponible para dar adecuada aplicación al medidor Coriolis. Como cuarto capítulo, se presenta una guía de procedimientos para el usuario, de forma sencilla e ilustrativa, que contribuye a orientar al usuario en el conocimiento de aspectos de la tecnología del medidor Coriolis y en su uso adecuado.

* Monografía

** Facultad de Ingeniarías Físicoquímicas, Especialización en Ingeniería de Gas, Director: Ing. Henry Abril Blanco

SUMMARY

TITLE*: TECHNOLOGY EVALUATION OF CORIOLIS TYPE MASS FLOWMETER FOR NATURAL GAS.

Author: Favio Eduardo Solano Castellanos**

Key words:

Coriolis mass flowmeter.

Evaluation of Coriolis mass flowmeter.

Content:

The evaluation of the Coriolis mass flowmeter technology for natural gas it starts with a theoretic mark, as chapter one, in which it is described the 11th report of the American Gas Association (AGA), letting us know its purpose and content; it is expressed the functioning principle and the generic and constructive aspects of the Coriolis flowmeter as well as its uses and the minimal operation conditions.

As chapter two, it is shown with fundamentals in the AGA 11th report and in publications given by manufacturers and users, the technical aspects that we have to take into account in the Coriolis meter application as are: flowmeter requirements, selection, installation requirements, starting operation, calibration, maintenance, field performance testing and diagnostic and problems solution.

The third chapter presents the analysis of the Coriolis flowmeter technology, starting with the generic aspects, of its principle, of AGA 11th report and its applications; ending with the analysis of the available literature to give the appropriate application to the Coriolis flowmeter. As four chapter it is presented a procedure user's guide, in a simple and illustrative way, that contributes to orientate the user in the aspects' knowledge of the Coriolis flowmeter technology and in its proper use.

*

Monography

** Physicochemistries engineering faculty, Gas engineering specialization, Director: Ing. Henry Abril Blanco.

INTRODUCCIÓN

Una de las mejores estrategias para realizar un eficaz control en los procesos industriales, es a través de la aplicación de la tecnología de medición de flujo de fluidos, ciencia que entre otras, facilita la confianza en las transacciones comerciales entre vendedores y consumidores.

En la industria del gas natural, medir con exactitud, es una tarea necesaria y cada día se hace más exigente dados los incrementos tarifarios a que este energético viene siendo sometido.

Acorde con lo anteriormente mencionado, se ha venido dando desarrollo a los diferentes medidores de flujo, para obtener mediciones con exactitud dentro de rangos permisibles dependiendo de la tecnología. No obstante el desarrollo actual de algunos medidores, el hombre ha seguido estudiando sus comportamientos y ha establecido normas para precisar cada vez más su aplicación.

En la década de los 80 fueron desarrollados y comercializados los medidores de flujo que miden directamente masa, como el medidor de flujo másico tipo Coriolis. Aunque la raíz del medidor Coriolis se remonta a los años 50, no fue sino hasta 1977 que Micro Motion introdujo este medidor a ser comercialmente viable para los usos industriales.

Para la medición exacta y eficiente, no basta aun el desarrollo tecnológico que ha obtenido hasta hoy el medidor Coriolis, se requiere además una serie de actividades como, el pleno entendimiento del proceso a ser medido, seguido de la selección del instrumento específico, su instalación, operación, mantenimiento y la interpretación correcta de los resultados obtenidos.

La tecnología de la medición de flujo con Coriolis es relativamente reciente, pero a pesar de ello existe información, ya que los fabricantes realizan publicaciones a través de catálogos y cursos; además, existe el reporte N° 11 de la Asociación Americana del Gas (AGA), publicado en el año 2003, el cual contiene información técnica, referencias, resultados, recomendaciones e información de interés para usuarios del medidor Coriolis en gas natural. Por otro lado, el conocimiento alrededor de este medidor no está totalmente divulgado y aprendido por los usuarios, de tal forma que todavía existen falencias en la aplicación de su tecnología.

Se pretendió con esta monografía, evaluar la tecnología del medidor Coriolis para gas natural con fundamento en criterios de aplicación, de tal manera que el

usuario responsable de la medición disponga de un documento que contribuya a orientarlo hacia eficientes resultados.

Lo primero que se realizó fue la recopilación de la información acerca de la tecnología del medidor de flujo másico Coriolis, sobre todo aquella concerniente con su aplicación, de tal forma que se dispuso de un sólido marco teórico. Fue de interés obtener información directamente del usuario, a través de entrevistas previamente orientadas hacia la forma cómo vienen aplicando la tecnología del medidor Coriolis.

Parte de la información en la cual se fundamentó la evaluación de la tecnología del medidor Coriolis fue recopilada del reporte AGA N° 11, debido a que este reporte fue escrito fundamentándose en las experiencias de científicos, fabricantes, industriales y usuarios, entre otros, que tienen que ver con el medidor Coriolis para gas natural.

1. MARCO TEÓRICO

Antes de comenzar cualquier estudio sobre un tema específico se hace necesario que la persona interesada esté familiarizada con ciertos conocimientos, que serán de gran importancia durante su desarrollo. Es por eso que se darán a conocer los fundamentos referentes a la tecnología del medidor de flujo másico tipo Coriolis para gas natural, de tal forma que se disponga de una base sólida para efectuar un análisis de dicha tecnología.

Por otro lado, el fundamento teórico recopilado y organizado contribuirá a orientar al usuario en la aplicación de la tecnología del medidor Coriolis para gas natural.

1.1 MARCO CONCEPTUAL

Se presentan a continuación una serie de definiciones aplicables a la tecnología Coriolis:

Agua abajo (Downstream - D/S): dirección del flujo del fluido que transporta el gasoducto.

Blowdown: válvula utilizada en el proceso de venteo de una línea de gas presurizada en forma controlada.

Calibración: conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de las magnitudes que indique un instrumento de medición o un sistema de medición, o valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes determinados por medio de los patrones.

Caudal de transición: Es el caudal en el cual ocurre un cambio brusco en el valor del error de caudal presentado en la curva de desempeño.

Condiciones base: presión y temperatura específicas a las cuales la medida acumulada de la masa del gas es convertida a volumen.

Corrección: valor agregado algebraicamente al resultado no corregido de una medición para compensar un error sistemático (valor verdadero menos el valor medido).

Desviación: valor menos su valor de referencia.

Dirección de Flujo: la dirección en la cual el gas fluye.

Diseñador: organización que diseña y construye instalaciones de medición y accesorios del medidor.

Error de medición: resultado de una medición menos un valor verdadero de la magnitud por medir.

Estabilidad: aptitud de un instrumento o de una medición, para mantener constantes sus características metrológicas a lo largo del tiempo.

Exactitud: cercanía del acuerdo entre el resultado de una medición y un valor verdadero de la magnitud por medir.

Factor de calibración: valor obtenido por el fabricante en la calibración del medidor, aplicado a los valores de salida del medidor para ser ajustados a los valores de desempeño; (por ejemplos, el valor del cero, el periodo, la linealidad, etc. del sensor).

Factor de corrección: factor numérico por el cual se multiplica el resultado no corregido de una medición para compensar un error sistemático.

Factor del medidor: es el factor numérico por el cual debe multiplicarse la respuesta del medidor para obtener la mejor estimación del mensurando.

Incertidumbre de la medición: parámetro asociado con el resultado de una medición, que caracteriza a la dispersión de los valores que en forma razonable se le podrían atribuir a la magnitud por medir.

Instrumento de medición: dispositivo destinado para efectuar mediciones, solo o en conjunto con uno o varios dispositivos adicionales.

Intervalo: es el módulo de la diferencia entre los dos límites del alcance nominal de un medidor.

Linealidad: se refiere a la proximidad de concordancia entre la respuesta del medidor y una referencia lineal o proporcional.

Medición: conjunto de operaciones cuyo objeto es determinar el valor de una magnitud.

Patrón de referencia: patrón que generalmente posee la máxima calidad metrológica a partir del cual se derivan las mediciones hechas en dicho lugar.

Presión de operación: Es la presión correspondiente a las condiciones reales de flujo, a la cual está sometido el medidor.

Relación máx/mín de caudales (Turndown ratio): es la relación entre el flujo máximo y el flujo mínimo para un alcance de medición determinado.

Repetibilidad: es la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando realizadas bajo las mismas condiciones de medición.

Sensibilidad: cambio en la respuesta de un instrumento de medición, dividido por el cambio correspondiente en el estímulo.

Sensor: elemento de un instrumento de medición o de una cadena de medición que es afectado en forma directa por la magnitud por medir.

Señal de manejo: una señal eléctrica producida por el transmisor para iniciar y mantener la vibración cíclica en el tubo del flujo del sensor.

Trazabilidad: propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, en virtud de la cual ese resultado se puede relacionar con referencias estipuladas, generalmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena interrumpida de comparaciones que tengan todas incertidumbres determinadas.

Tubo de flujo: el elemento del sensor (transductor de medida) a través del cual fluye el gas.

Usuario: toda persona responsable del medidor Coriolis para que opere con exactitud y eficiencia, a través de aspectos de selección, instalación, operación y mantenimiento.

Válvula de bloqueo (Block valves): válvulas mayores usadas para aislar las secciones del gasoducto en caso de un rompimiento o que se necesite un mantenimiento general.

Viscosidad: propiedad por la cual un fluido ofrece resistencia a su cizallamiento. La resistencia del fluido al cizallamiento depende de las fuerzas de cohesión interna y de la velocidad de transferencia de la cantidad de movimiento molecular.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL REPORTE AGA N° 11

La Asociación Americana del Gas (AGA) a través del Comité de Medición y Transporte (TMC) desarrolló el informe N° 11 denominado 'medición del gas natural con el medidor Coriolis', publicado en el año 2003, como un servicio a la industria del gas natural y al público en general. Su uso es voluntario y debe tomarse como una revisión general independiente de los hechos aplicables y de las circunstancias que se tienen para medir el gas natural.

El reporte N° 11 de AGA fue publicado como base en especificaciones del medidor Coriolis para gas natural y fue resultado del esfuerzo y la colaboración de los usuarios del gas natural, fabricantes del medidor de Coriolis, organizaciones de investigación en mediciones de flujo y consultores independientes, que en conjunto formaron 11 grupos de trabajo para el comité de medición y transporte de AGA. Además los grupos alternativos del medidor de Coriolis bajo el comité de medida de flujo de Gas del Instituto Americano del Petróleo realizaron aportes para el informe AGA N° 11.

En sí, el informe AGA N° 11 fue desarrollado para ayudar a diseñadores y usuarios en la selección, operación, instalación, calibración, mantenimiento y verificación de los medidores de flujo Coriolis usados para la medición del gas natural. El alcance del reporte AGA está limitado a los medidores del gas natural y otros gases asociados a hidrocarburos. Aunque no están dentro del alcance de esta norma, los medidores Coriolis son usados también para medir una gama de fluidos compresibles y líquidos.

El informe AGA 11 es aplicado a medidores Coriolis para usos desde media a alta presión del gas natural. Las aplicaciones típicas contemplan mediciones de flujo de gas en una sola fase, encontradas en producción, procesos, transporte, almacenajes, distribuciones y en sistema de medición de combustible en usos finales.

El reporte N° 11 de AGA contiene un tratado general subdividido en 10 tópicos que aluden a 4 apéndices complementarios, desarrollados con mayor exactitud y conteniendo información técnica, referencias, resultados, recomendaciones e información de interés para usuarios. El tratado general contiene los siguientes aspectos:

- Alcance y principios de medición.
- Simbología.
- Terminología.
- Condiciones de operación.
- Requisitos del medidor.
- Consideraciones de selección.
- Requisitos de desempeño.
- Requisitos de instalación.
- Mantenimiento de campo y prueba de desempeño.
- Listado de referencias.

El apéndice “A” está relacionado con la calibración del medidor del flujo Coriolis para gas; el apéndice “B” contiene una hoja de datos del medidor de Coriolis; el apéndice “C” es una nota técnica de ingeniería que contiene principios de operación, temas técnicos, evolución de desempeño, análisis de error, calibración

y referencias de literatura; y el apéndice “D” es un reporte técnico del desempeño del medidor Coriolis.

1.3 MARCO REFERENCIAL

El propósito de este marco referencial es expresar los fundamentos acerca de la tecnología del medidor de flujo másico tipo Coriolis para gas natural, de tal forma que se disponga de suficiente información para poder acceder a los aspectos técnicos de dicho medidor.

1.3.1 Medición de flujo y de volumen de gas natural. El interés por la medición del gas natural surgió con la necesidad de obtener control sobre los procesos y sobre las transacciones comerciales. Por ello se ha logrado desarrollar medidores con exactitud y confiabilidad, adquiribles en el mercado.

Por su naturaleza el flujo y el volumen son magnitudes complejas de medir, debido a que por lo general intervienen muchas variables en este fenómeno, conllevando a incrementar los errores en la medición y dificultando la selección de un determinado medidor.

Los medidores de volumen y caudal han sido clasificados de diversas formas; en el sistema de clasificación más general, los medidores se dividen en medidores de cantidad (totalizadores) y medidores de caudal; otra forma de clasificarlos es dividiéndolos según su principio de operación. Esta alternativa divide los medidores en aquellos que miden volúmenes discretos (medidores de desplazamiento positivo) y los que directa o indirectamente utilizan el movimiento del gas para actuar sobre un elemento secundario. A pesar de que este sistema describe razonablemente las dos clases de medidores, en la práctica los medidores de caudal son a menudo usados como medidores de cantidad (vortex, turbinas, orificio, etc.), y los medidores de cantidad son usados en ocasiones como medidores de caudal.

Para propósitos de calcular el caudal o el volumen total de gas natural, se conoce la clasificación de los medidores en: medidores de raíz cuadrada (generadores de la presión diferencial) y medidores lineales; esta clasificación es más conveniente puesto que, en general, todos los medidores para los cuales el caudal no es una función de raíz cuadrada de la presión diferencial son en esencia medidores de escala lineal. Esta clasificación provee el mismo modelo matemático para todos los medidores y evita la confusión en los cálculos de volumen y caudal de gas natural.

Una clasificación más particular es aquella que divide las tecnologías en cuatro categorías dependiendo de la interacción del medidor con el flujo objeto de medición:

- Medidores con partes móviles inmersas en el fluido, como los de desplazamiento positivo, turbina y área variable.
- Medidores sin partes móviles inmersas en el fluido, como los medidores por presión diferencial, vortex, target y térmicos.
- Medidores de no-intrusión, como los medidores Coriolis, magnéticos y ultrasónicos.
- Medidores con sensores externos, tales como los medidores ultrasónicos y vertederos.

Otra posibilidad es clasificar las tecnologías según el modelo físico que da origen a la medición, así:

- Volumétricos: los medidores de desplazamiento positivo que miden el volumen directamente.
- Velocidad: como por ejemplo los medidores magnéticos, las turbinas y los medidores ultrasónicos, donde el caudal se determina multiplicando la velocidad del fluido por el área de flujo.
- Inferencia: es el caso de los medidores de presión diferencial, target y área variable, donde el caudal se infiere por medio de una propiedad física que ha sido estudiada en forma teórico-experimental y que se correlaciona con el caudal.
- Másicos: medidores de Coriolis, los cuales miden el caudal másico en forma directa.

1.3.2 Generalidades de la tecnología del medidor Coriolis. Los medidores de caudal que miden directamente la masa usando sus propiedades, como los medidores Coriolis, opuestos a aquellos que miden volumen o velocidad, fueron desarrollados y comercializados en la década de 1980. Los medidores de este tipo, han encontrado numerosas aplicaciones por que esta tecnología es robusta y soporta variaciones moderadas en las propiedades del fluido sin disminuir su desempeño metrológico. La medida de flujo es insensible a los cambios en la presión, la temperatura, la viscosidad y la densidad.

Los medidores que miden directamente masa, se valen de los principios básicos de la mecánica clásica, considerando el fluido como un medio continuo para obtener una medición exacta y confiable ante variaciones en las condiciones de proceso. A causa de esta cualidad, es posible usar el medidor Coriolis en una amplia variedad de procesos.

En 1835 el ingeniero y matemático francés Gustave Gaspard Coriolis descubrió una fuerza inercial conocida como el efecto Coriolis. El efecto de la fuerza de Coriolis, es una desviación aparente de la trayectoria de un objeto que se mueve dentro de un sistema rotativo de coordenadas. En realidad el objeto no se desvía de su trayectoria, pero parece hacerlo debido al movimiento del sistema. Cuando un fluido se desplaza a través de los tubos del sensor en oscilación se produce la fuerza de Coriolis. Esta fuerza origina una flexión en sentidos opuestos entre la entrada y la salida el sensor; esto origina una torsión. Si el flujo másico a través del sensor en oscilación se incrementa, la flexión es mayor, y es medida por los detectores montados en la entrada y la salida de los tubos.

Cuando los medidores tipo Coriolis fueron introducidos por primera vez, los tubos de vibración eran montados en sistemas rígidos. Como regla del dedo pulgar eran montados en placas de metal. A lo largo de los años, los realces en el diseño han facilitado los requisitos del montaje para muchos medidores de Coriolis. Algunos medidores se pueden montar en la tubería usando buenas prácticas, incluyendo la alineación apropiada de los rebordes de acoplamiento.

Aunque las raíces de los medidores tipo Coriolis de hoy se remontan a los años 50, no fue sino hasta 1977 que Micro Motion (www.micromotion.com) introdujo un medidor tipo Coriolis comercialmente viable para los usos industriales. Desde ese tiempo otros medidores se han incorporado al mercado, incluyendo el Endress + Hausser ([www. Edress.com](http://www.Edress.com)) y Krohne (www.Krohne-mar.com).

Los avances del medidor de flujo másico Coriolis aplicados en los procesos, permitieron que el medidor ampliara la sola medida de flujo de líquido, a medir también la densidad y posteriormente a medir flujo de gas.

La ventaja más grande del medidor Coriolis es probablemente su alta exactitud. Los niveles de exactitud para muchos de estos medidores Coriolis se encuentran en la gama 0,5%. “Es indudablemente que esta característica hace ideal la utilización del medidor Coriolis para la transferencia de custodia y otros usos donde se requiere gran exactitud en la medida”, expresa el Dr. Jesse Yorder. *

El Dr. Jesse Yorder ha aportado al control de flujo, y ha sido un importante analista en la industria de control de procesos desde 1986. Se especializa en medidores y otros dispositivos de campo, incluyendo los de presión, nivel y temperatura. El Dr. Jesse Yorder ha realizado más de 60 estudios de mercados de automatización industrial y control de proceso. El mercado para la medida de flujo de gas fue su último estudio. Actualmente el Dr. Jesse Yorder dirige investigaciones de flujo.

* Jesse Yorder, ph, D jesse@flowresearch.com 78124-3200 Información www.flowresearch.com

En el año 2003 el mercado del medidor Coriolis era de US\$404 millones y se pronostica que para el año 2008, será de US\$617 millones según un estudio del grupo de investigación ARCO. Los medidores de Coriolis están ganando la aceptación por todo el mundo para la medida del caudal del gas natural.

La medición de gas natural está emergiendo como oportunidad significativa del crecimiento para los medidores de Coriolis. El reconocimiento por la Asociación Americana del Gas (AGA), de los medidores Coriolis para los usos del gas natural incluyendo la producción, procesamiento, transmisión, almacenamiento, distribución, y medida del combustible abre un nuevo mercado para esta tecnología. El gas natural comprimido (CNG) se está utilizando cada vez más como combustible alternativo en el transporte debido a sus bajos niveles de contaminación.

Debido a su capacidad de medir flujo másico directamente, los medidores Coriolis tienen una ventaja sobre otras tecnologías de medición de flujo para usos en CNG. Las ventajas del medidor Coriolis tales como no poseer ninguna pieza móvil, los requisitos mínimos de mantenimiento y la medida másica directa, llevan el costo de operación del medidor a un valor bajo, beneficiando al usuario.

El Comité de Medición y Transporte (TMC – **Transmission Measurement Committee**) de la Asociación Americana de Gas (AGA – **American Gas Association**), publicó en Noviembre de 2003 el Reporte Formal AGA N° 11, que trata el tema de Coriolis para uso en transferencia fiscal de gas natural. Este documento, que muestra las mejores prácticas en medición tipo Coriolis para flujo de gas, describe la tecnología, su aplicación común y su uso en la transferencia fiscal. Junto con otras aprobaciones en el mundo tales como PTB (Pesos y Medidas en Alemania) y NMI (Pesos y Medidas en Holanda), AGA N° 11 permite y guía la aplicación de esta tecnología para gas natural.

Los medidores Coriolis son medidores que ofrecen lecturas de caudal másico y/o volumétrico, temperatura de fluido y densidad. Algunas importantes características que algunos fabricantes expresan de estos medidores son las siguientes:

- Buena exactitud y alto alcance de medición. Se introdujo al mundo de los procesos como tecnología viable para la medición de flujo y ha tenido un desarrollo intensivo de ingeniería, hasta llegar a ser altamente confiable, exacta, de uso fácil para la medición en un amplio rango de caudal de mínimo a máximo. Esta tecnología es menos exigente en el requerimiento del acondicionamiento de caudal, ya que los efectos de remolino y de perfil no son tan influyentes en la exactitud del medidor.
- Alta fiabilidad. No tienen partes que se desgasten, casi no requieren mantenimiento rutinario. Necesitan menos dispositivos instalados en comparación

con medidores de turbina o de orificio compensado, hay menos fuentes de error, mantenimiento y calibración.

- Bajo costo de operación. Mientras que Coriolis a menudo tiene un costo de capital alto, los ahorros debidos a los costos reducidos de instalación y operación, combinados con el "valor de la exactitud" a menudo hacen que esta tecnología sea la menos costosa con el tiempo.

1.3.3 Principio de medición de flujo másico por Coriolis. El medidor de flujo másico tipo Coriolis se fundamenta en el teorema del matemático francés Gustave Gaspard Coriolis (1795-1843), que expresa que una partícula que se desplaza con una velocidad lineal 'v' a través de una superficie que a la vez gira con una velocidad angular 'ω', experimenta una aceleración adicional denominada aceleración de Coriolis 'a_c', cuya magnitud es la siguiente:

$$a_c = 2 \omega \times v$$

Si un cuerpo 'A' experimenta una aceleración, según la segunda ley de Newton, es porque una fuerza está actuando sobre él, proveniente de otro cuerpo 'B' con el cual interactúa; a la vez, según la ley de acción y reacción de Newton, el cuerpo 'B' ejercerá otra fuerza sobre el cuerpo 'A', con las mismas dirección y magnitud pero de sentido opuesto. Siendo la fuerza proporcional tanto a la aceleración como a la masa del cuerpo, los valores de las fuerzas de Coriolis para los cuerpos 'A' y 'B' quedarían así:

$$(F_c)_A = 2 \cdot m \cdot \omega \times v$$

$$(F_c)_B = -2 \cdot m \cdot \omega \times v$$

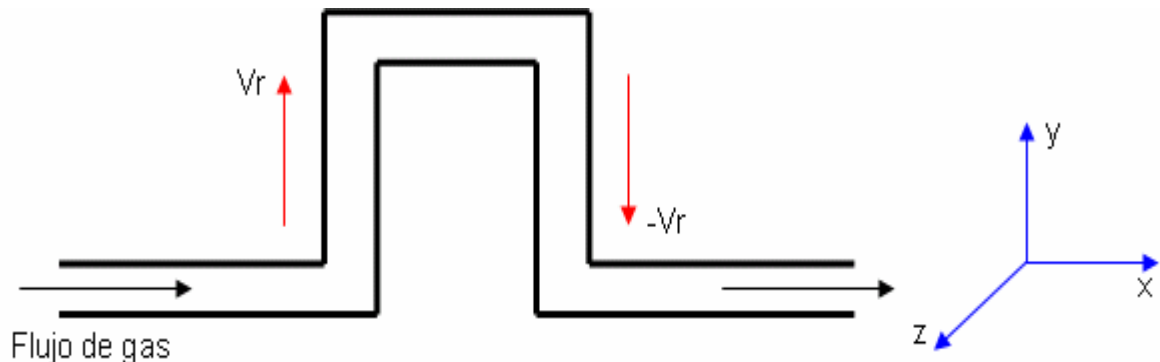
El medidor de flujo másico Coriolis consiste en un tubo doblado en 'U' a través del cual fluye gas natural, como muestra la figura 1. Mediante dispositivos electromagnéticos el tubo en 'U' se hace vibrar, de tal forma que para cualquier instante el tubo tenga una velocidad angular 'ω', cuya dirección va a lo largo del eje 'X'. Si el gas que fluye por el tubo es el cuerpo 'A' mencionado anteriormente y el tubo en 'U' es el cuerpo 'B', de esta forma el lado izquierdo del tubo en 'U' experimenta una fuerza dada por la siguiente ecuación:

$$F_{\text{tubo}} = -2 \cdot m \cdot \omega \times v$$

Donde 'm' es la masa de gas natural al interior del lado izquierdo del tubo y 'v' es la velocidad relativa del gas respecto del lado izquierdo del tubo en 'U'. La dirección y el sentido de la fuerza sobre el tubo es el resultado de aplicar la anterior ecuación vectorial. En todo caso la dirección de la fuerza va perpendicular al plano formado por los ejes de las direcciones de 'ω' y de 'v', es decir perpendicular al plano en donde se encuentra el tubo (eje 'Z'). Como los sentidos

de las velocidades relativas del gas respecto al lado izquierdo y respecto al lado derecho del tubo son contrarias, también lo serán las fuerzas aplicadas sobre estos dos tramos del tubo. Este par de fuerzas contrarias están deformando permanentemente al tubo.

Figura 1. Esquema del principio del medidor Coriolis



Cuando el tubo en 'U' vibra con el sentido de la velocidad angular mostrada en la figura 2-a, las fuerzas aplicadas en los tramos izquierdo y derecho del tubo en 'U' van en los sentidos mostrados, de tal forma que la fuerza (F) en el lado izquierdo del tubo hace retardar su movimiento y la fuerza ($-F$) sobre el lado derecho del tubo hace adelantar su movimiento. En la figura 2-b se nota el cambio de los sentidos de las fuerzas sobre el tubo en 'U', debido al cambio del sentido de la velocidad angular del tubo provocado por su vibración, haciendo que el movimiento del lado izquierdo del tubo se adelante y el del lado derecho se atrase. Este adelanto o atraso del movimiento de ambos tramos del tubo es con respecto al movimiento debido a la vibración del tubo provocada por el dispositivo electromagnético. En ambos casos siempre va a existir un desfase del movimiento entre los lados del tubo en 'U'.

El conducto de flujo se debe hacer vibrar controladamente a su frecuencia de resonancia para reducir la energía requerida. El movimiento de cualquier punto del tubo, representa una onda senosoidal. Si no hay flujo a través del tubo, todos sus puntos se mueven en fase con el controlador (ver figura 3-a). Con el flujo a través del tubo existe siempre un desfase entre los movimientos de ambos lados del tubo, que representa un retardo entre los tiempos ' t_1 ' y ' t_2 ' (ver figura 3-b), al pasar por una determinada posición de referencia. La ordenada 'X' de la figura 3 representa la posición de partículas del tubo.

Se deducirá un modelo simplificado de la ecuación que se aplica a la estructura del medidor Coriolis, a partir de las leyes físicas correspondientes, así:

La fuerza de Coriolis (ver figura 4) generada por el flujo es descrita por la siguiente ecuación:

$$F = 2 \cdot m \cdot \omega \times v \quad (\text{ecuación 1})$$

Figura 2. Esquema de las fuerzas sobre el tubo en U

a) Oscilación en sentido 'X'

b) Oscilación en sentido '-X'

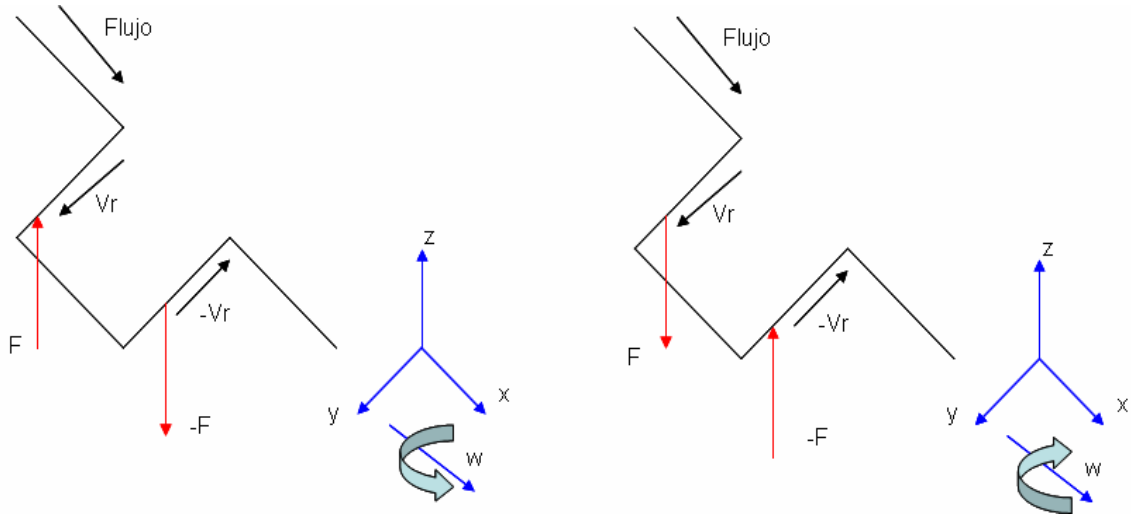
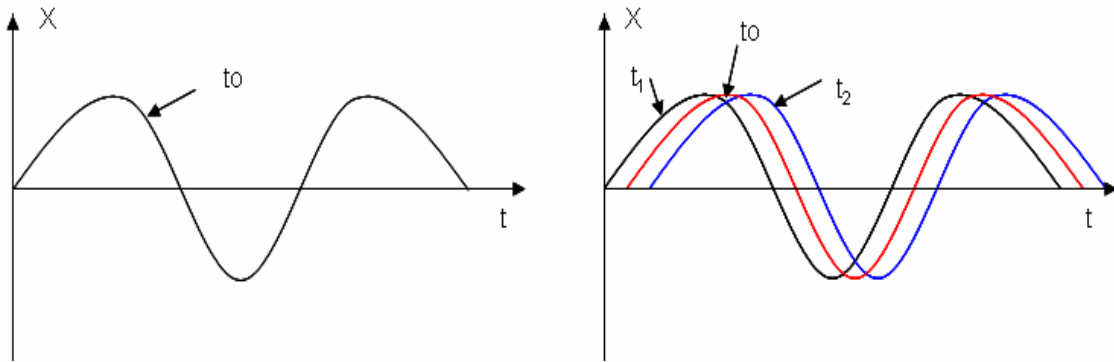


Figura 3. Diagrama de movimiento del tubo

a) Movimiento en fase

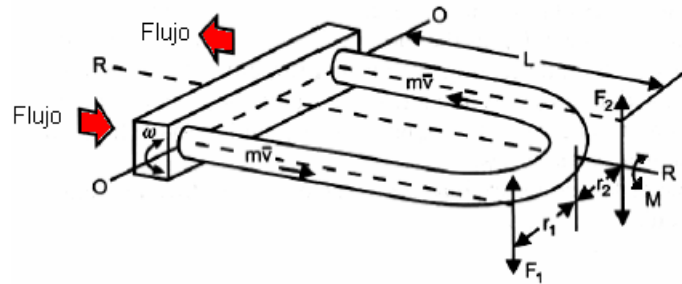
b) Movimiento en desfase



Puesto que el tubo oscila alrededor del eje 'o-o', las fuerzas desarrolladas crean un momento de oscilación 'M' alrededor del eje 'R-R', con un radio 'r'. Esto se expresa como:

$$M = F_1 r_1 + F_2 r_2 \quad (\text{ecuación 2})$$

Figura 4. Esquema del momento de oscilación del tubo



Las magnitudes de las fuerzas 'F1' y 'F2' son iguales a 'F' y $r_1 = r_2 = r$, de tal forma que reemplazando la ecuación 1 en la ecuación 2 se tiene:

$$\mathbf{M = 2Fr = 4mv\omega r} \quad (\text{ecuación 3})$$

Por otro lado, la velocidad es definida como longitud 'L' recorrida por una partícula de gas, por unidad de tiempo, y el caudal másico 'W' se define como la masa que fluye por unidad de tiempo, así:

$$\mathbf{v = L / t} \quad (\text{ecuación 4})$$

$$\mathbf{W = m / t} \quad (\text{ecuación 5})$$

Eliminando el tiempo entre las ecuaciones 4 y 5 se tiene:

$$\mathbf{W = mv / L} \quad (\text{ecuación 6})$$

Eliminando la masa de las ecuaciones 3 y 6 se tiene:

$$\mathbf{M = 4\omega rWL} \quad (\text{ecuación 7})$$

El momento 'M' genera una deformación angular 'θ' en el tubo de medición alrededor del eje 'R-R', directamente proporcional al momento aplicado e inversamente proporcional a una constante 'k' de rigidez, así:

$$\mathbf{\theta = M / k} \quad (\text{ecuación 8})$$

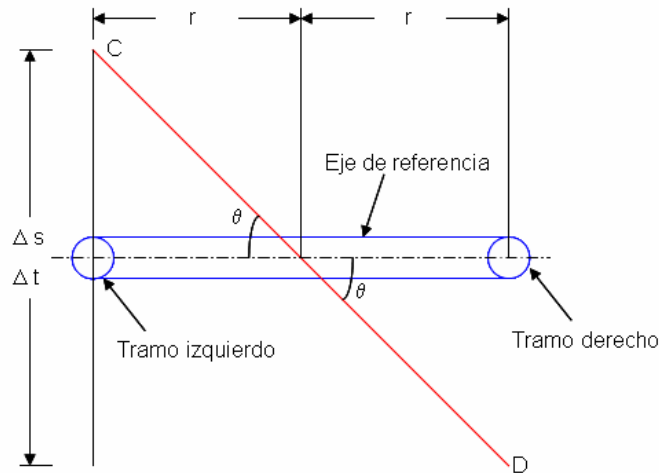
Eliminando 'M' en las ecuaciones 7 y 8 se tiene:

$$\mathbf{W = (k\theta) / (4\omega rL)} \quad (\text{ecuación 9})$$

Cada sensor usa un método de procesamiento de señales para medir 'θ' (ver figura 5) como una función del tiempo que le toma a cada tramo del tubo para cruzar un eje de referencia. La diferencia de tiempo entre los tramos es cero (0) para una condición sin flujo. Cuando se establece un flujo se genera una deformación angular 'θ', que se mide con un diferencial de tiempo entre las

señales correspondientes a los extremos 'C' y 'D' de los tramos del tubo. Este diferencial de tiempo debe ser proporcional a la cantidad de flujo que pasa por el medidor Coriolis, como se demostrará a continuación.

Figura 5. Representación de la deformación angular del tubo



De la figura 5 se tiene:

$$\tan \theta = \Delta s / 2r \quad (\text{ecuación 10})$$

Para ángulos 'θ' pequeños $\tan \theta \cong \theta$.

Según los principios cinemáticos se tiene:

$$\Delta s = v \cdot \Delta t \quad (\text{ecuación 11})$$

$$v = \omega L \quad (\text{ecuación 12})$$

Reemplazando las ecuaciones 11 y 12 en la ecuación 10 se tiene:

$$\theta = \omega L \Delta t / 2r \quad (\text{ecuación 13})$$

Reemplazando la ecuación 13 en la ecuación 9, el caudal másico queda:

$$W = (k \cdot \Delta t) / (8r^2) \quad (\text{ecuación 14}), \text{ o sea:}$$

$$W = K \cdot \Delta t$$

Lo anterior expresa que el caudal másico es proporcional únicamente al desfase de tiempo 'Δt' y a una constante 'K' que depende de condiciones geométricas y características del material del tubo. Este caudal másico es independiente de la velocidad angular 'ω' del tubo y por lo tanto independiente de la frecuencia de vibración del tubo del medidor.

'K' es una constante de proporcionalidad, que debe ser compensada por cambios de temperatura que ocurran en el proceso. Comúnmente la temperatura superficial del tubo de flujo es monitoreada utilizando un sensor de temperatura RTD. Con los cambios de temperatura el sistema electrónico que procesa las señales ajusta continuamente la constante de proporcionalidad, al mismo tiempo que escala ' Δt ', para obtener la medición de caudal másico corregida.

1.3.4 Aspectos constructivos. Un medidor tipo Coriolis está compuesto por un sensor, un transmisor y, en muchos casos, dispositivos periféricos para monitoreo, alarma, y/o funciones de control. Los elementos correspondientes al sensor detectan flujo, densidad y temperatura. El transmisor procesa las señales provenientes del sensor y suministra esta información como señal de salida.

Las figuras 6 y 7 muestran las fotografías de medidores Coriolis de MicroMotion, de surtidoras de gas vehicular marcas ASPRO y GALILEO respectivamente. La figura 8 muestra la fotografía de una tarjeta de alimentación de energía. La parte izquierda alimenta a un sensor y la parte derecha es la tarjeta de alimentación general del surtidor. La figura 9 muestra la fotografía de una tarjeta del sensor, encargada de tomar señales y enviarlas a la tarjeta madre (mother) para almacenar datos. Es decir, se tiene un contador para llevar consecutivo de ventas del surtidor. Por un puerto "p₅" sale comunicación hacia la base de datos o computador de la estación.

Figura 6. Medidor Coriolis MicroMotion de equipo ASPRO



Figura 7. Medidor Coriolis Micro Motion de equipo Galileo



Figura 8. Tarjeta de alimentación



Figura 9. Tarjeta del sensor



A continuación se señalan los elementos principales que componen el sensor y el transmisor de un medidor tipo Coriolis, describiendo la función y los requerimientos generales de estos.

➤ **Sensor.** El tamaño y la forma pueden diferir, pero ciertos componentes son comunes para todos los modelos de sensores. Los componentes del sensor se muestran en la figura 10.

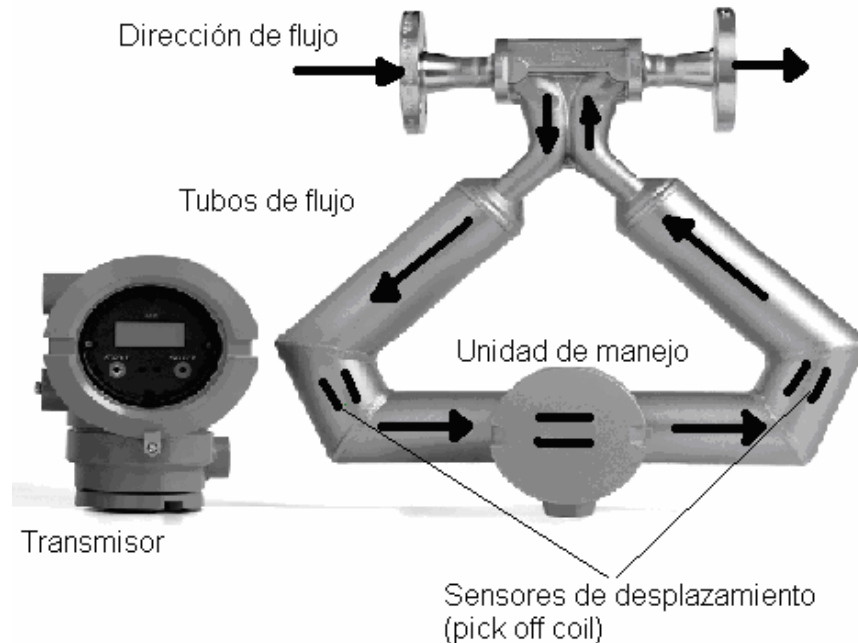
- **Tubos de flujo:** son los elementos que están en contacto directo con el fluido. La selección de medición primaria es hecha de tubería metálica altamente resistente a la corrosión. El material más usado es el acero inoxidable 316 L sin costura. Los medidores de Coriolis también están disponibles con tuberías hechas de titanio, hastelloy (aleación especial), y algunas bases metálicas químicas para compatibilidad con procesos en los cuales el fluido es altamente corrosivo.

- **Excitador (Drive-coil):** lo componen una bobina excitadora y un imán. La bobina está montada en la parte central de un tubo y en la parte opuesta, sobre el otro tubo, está el imán. La bobina es energizada para mantener los tubos vibrando a su frecuencia natural.

- **Sensor de movimiento (Pick-off):** los sensores de movimiento están instalados a la entrada y a la salida de cada tramo del tubo para medir el movimiento de cada uno de los extremos. El tipo más común de sensor de movimiento es el electromagnético, aunque algunos fabricantes han aplicado satisfactoriamente sensores ópticos. Estos elementos generan una señal que presenta la velocidad y

posición del tubo de vibración en ese punto. Sus señales son comparadas en los dispositivos electrónicos para determinar la cantidad de giro de Coriolis.

Figura 10. Sensor del medidor Coriolis



Tomado de manuales Micro Motion (www.micromotion.com)

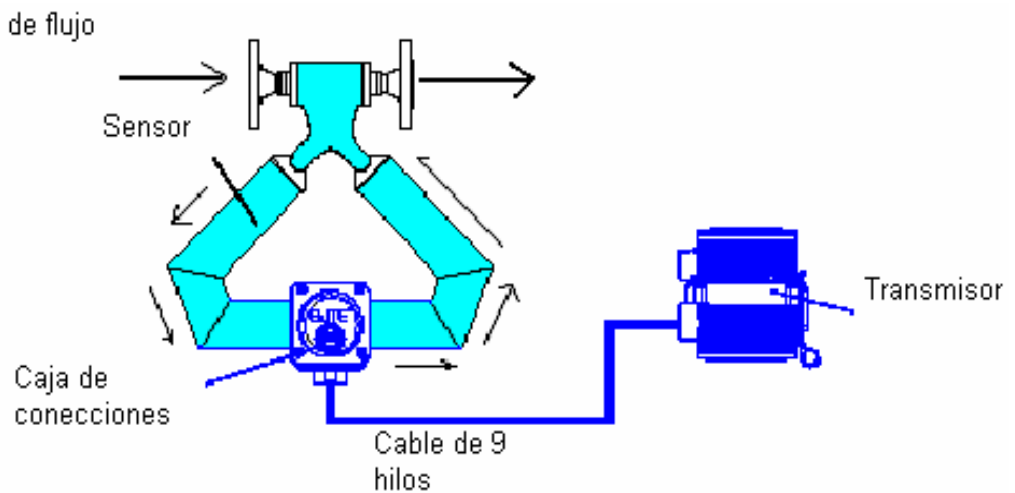
- Sensor de temperatura: se fija en la superficie exterior de uno de los tubos para compensar la constante de elasticidad debido a los cambios de temperatura. El sensor utilizado comúnmente es termorresistivo RTD.
- Conexión a proceso: cada medidor cuenta con dos conexiones a proceso que se deben empalmar cuidadosamente y sin ocasionar esfuerzos mecánicos.
- Divisor de flujo: en sensores que presentan una configuración de tubos en paralelo, las extremidades de la tubería son rígidamente conectadas por el divisor de flujo. Este divisor de flujo constituye la transmisión entre las conexiones de proceso y la sección correspondiente a los tubos de vibración. El divisor permite que la mitad del flujo pase a través de cada tubo.
- Caja: el ensamble de tubos completo es alojado comúnmente dentro de un cuerpo de acero inoxidable soldado y sellado para proteger los tubos y el sensor de su ambiente de operación.

- Caja de conexiones: los cables del excitador, sensor de movimiento, y el sensor de temperatura son pasados a través de un conducto de alimentación sellado a una caja de enlace para realizar el cableado desde el sensor al transmisor electrónico.

➤ **Transmisor.** El transmisor es el “cerebro” del sistema y realiza tres acciones:

- Primera: el transmisor envía pulsos de corriente al excitador generando la vibración de los tubos (figura 11). Debido a la potencia requerida para hacer vibrar los tubos, algunos transmisores de Coriolis requieren cableado separado para la potencia del dispositivo, ya que la potencia demandada es de aproximadamente 10 watt. El sistema de suministro de potencia depende del fabricante y del modelo, estos elementos pueden emplear tanto corriente alterna como corriente continua.

Figura 11. Transmisor del medidor Coriolis

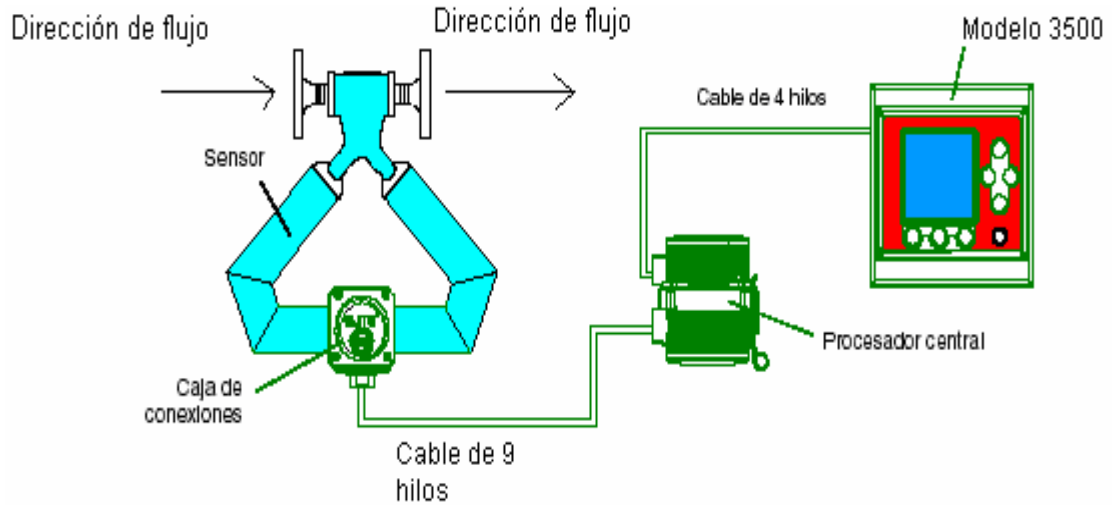


Tomado de manuales Micro Motion (www.micromotion.com)

- Segunda: el transmisor procesa las señales de entrada del sensor, realiza cálculos, y produce varias señales de salida para los dispositivos periféricos (ver figura 12). Las señales de salida pueden ser entre otras:

- Salidas análogas (4-20 mA): Esta señal es utilizada para aplicaciones de control de procesos.
- Información digital (RS-232, RS-485, etc.): esta señal es utilizada para aplicaciones de comunicación.
- Salida en pulsos/frecuencia.

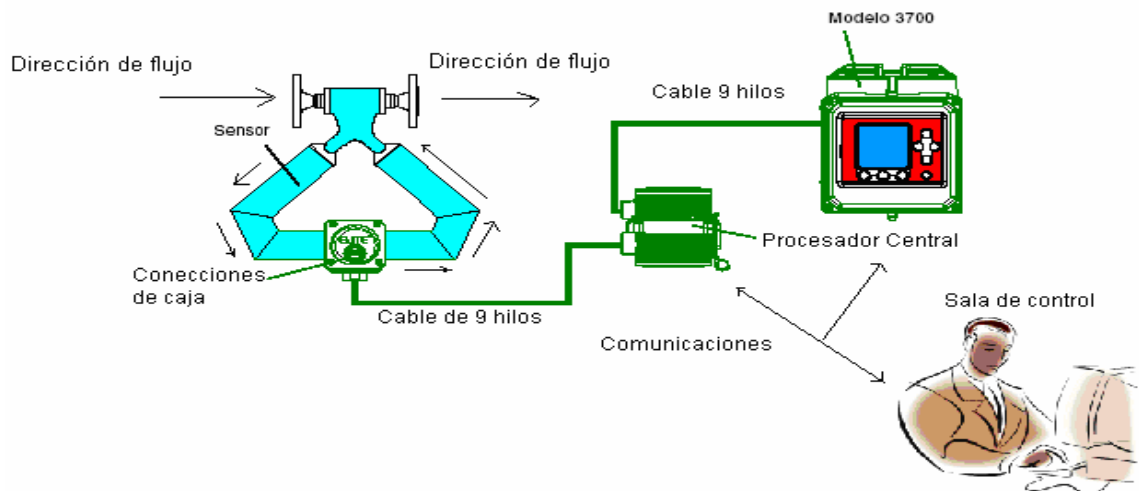
Figura 12. Dispositivos periféricos



Tomado de manuales Micro Motion (www.micromotion.com)

- Tercera: el transmisor permite la comunicación con un operador o con un sistema de control (figura 13). Son comunes en los transmisores de Coriolis los dispositivos electrónicos basados en microprocesadores y muchos tienen la capacidad de realizar comunicación digital directa con sistemas de control de un ordenador usando buses de campo industriales estándar.

Figura 13. Comunicación del transmisor



Los transmisores están disponibles para montaje en campo. El transmisor electrónico puede ser montado cerca del sensor pero también es capaz de operar a una distancia considerable (cientos de metros).

Para el uso de los sensores en ambientes peligrosos, muchos transmisores se han integrado con protección intrínsecamente segura para limitar la corriente y el voltaje del sensor (por ejemplo: Clase 1, División 2, Grupo D Hazardous Área – Nacional Electric Code). Los sensores son diseñados para servicio intrínsecamente seguro que pueden ser instalados sin riesgos en áreas restringidas, mientras que el transmisor puede localizarse en áreas de mayor riesgo. Algunos fabricantes ofrecen transmisores a prueba de explosiones para que tanto el sensor como los dispositivos electrónicos puedan instalarse en áreas peligrosas.

1.3.5 Diseños típicos. En la implementación práctica de medidores de caudal másico basados en el principio de Coriolis, muchos fabricantes usan dos tubos de flujo paralelos vibrando de manera opuesta uno contra otro para neutralizar la vibración inducida en la tubería y en el sistema de montaje. El flujo es dividido entre los dos tubos a la entrada del medidor y recombinado en la salida (medidores con ruta paralela) o el medidor es alineado para que el flujo pase a través de los tubos uno después del otro (medidores con ruta en serie o sencilla). Esto permite que la señal de giro de un tubo sea medida con respecto a la otra señal de giro mientras contrarresta la vibración de la tubería.

Mientras la mayoría de medidores de caudal másico tipo Coriolis tienen tubería curva para incrementar la señal de giro, unos pocos fabricantes están ofreciendo ahora medidores de tipo sencillo y con tubos rectos. Estos medidores fueron desarrollados para manejar aplicaciones de flujo másico donde son probables las obstrucciones si se utiliza una división en la corriente del flujo. Fibras, partículas insolubles, son casos particulares donde los medidores del tipo sencillo y de tubo recto presentan ventajas. La excitación de un tubo sencillo, sin embargo, posee un problema en que no se contrarrestan las fuerzas de vibración.

Otros pocos fabricantes han desarrollado un medidor sencillo con tubo recto cuya vibración se realiza en forma radial en lugar de flexional mencionado anteriormente. Este método también resulta en un sistema de vibración inherentemente balanceado. El modo radial de vibración es análogo a una restricción del tubo del flujo para desviar y, consecuentemente, acelerar una parte del flujo en lugar de hacerlo al flujo completo como en un tubo que se encuentra en el modo de flexión.

Este tipo de medidor de tubo sencillo recto está diseñado específicamente para mediciones de flujo de gas, donde el perfil de velocidades del flujo en la sección transversal del tubo es relativamente constante, debido a la naturaleza turbulenta del flujo de gas. Con líquidos, el perfil de flujo normalmente tendrá mayor velocidad hacia el centro del tubo que hacia las paredes, haciendo poco práctico el uso de medidores de Coriolis en el modo radial, debido a las limitaciones de exactitud.

1.3.6 Condiciones de operación. Tener en cuenta las condiciones de operación de un medidor de gas tipo Coriolis se hace necesario al igual que para cualquier instrumento de medición. Estas condiciones influyen en el buen desempeño y en un menor deterioro del medidor.

➤ **Calidad del gas.** El medidor Coriolis operará con exactitud en cualquier 'rango normal' de la composición de la mezcla del gas natural especificado en el Reporte AGA N° 8. Se incluye el gas natural con densidades relativas entre 0.554 (metano puro) y 0.87. Es limitada la aplicación de los medidores Coriolis a la fase del gas dentro del 'rango expandido' expresado en AGA N° 8. La aplicación al exterior del "rango normal" debe ser verificada por otros medios, por ejemplo verificación experimental.

El diseñador deberá examinar las condiciones de operación y consultar con el fabricante para identificar materiales apropiados en contacto con el gas, cuando se presenten las siguientes condiciones:

- Operación cerca de la temperatura a punto de rocío del hidrocarburo de la mezcla de gas natural.
- Niveles totales de sulfuro excediendo los especificados en la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE).
- Presencia de elementos halógenos en la mezcla del gas: por ejemplo, cloro, bromo etc.

➤ **Rango de presiones de operación.** El fabricante especificará la presión máxima de operación por códigos estándar. Se requiere la densidad del flujo, la caída de presión máxima aceptable y el desempeño deseable del medidor, para determinar la presión mínima. Por lo tanto, la presión mínima de operación de un sensor Coriolis es dependiente de los factores anteriores.

➤ **Temperaturas del gas y del ambiente.** Los sensores Coriolis operarán en un rango de temperaturas del flujo de gas entre -40°F y 200°F (-40°C a 93°C). Se recomienda que la temperatura del flujo de gas permanezca por encima de la temperatura del punto de rocío del gas hidrocarburo. El medidor debe operar en un rango de temperatura ambiente entre -13°F a 131°F (-25°C a 55°C). El fabricante debe proporcionar las especificaciones de la temperatura del gas y de la temperatura del aire ambiente para el medidor, si éstas son diferentes a las anteriormente mencionadas.

➤ **Consideraciones del flujo de gas.** El flujo másico y la presión de operación determinan los límites operacionales del caudal en un sensor Coriolis.

El diseñador determinará el caudal del gas esperado y verificará que se encuentre dentro de los límites de requerimientos de exactitud para caudales máximo, mínimo y de transición.

➤ **Tubería aguas arriba y perfiles de flujo.** La configuración de la tubería aguas arriba puede afectar el perfil de velocidad del gas que ingresa al sensor Coriolis. Dependiendo del diseño del medidor, las distorsiones del perfil de velocidad pueden causar errores en la medición. La magnitud y signo del error de medición es comúnmente función del diseño del medidor.

El diseñador debe consultar al fabricante del medidor y revisar los últimos resultados de chequeo del medidor o verificar los efectos sobre el flujo que causan los dispositivos instalados, a través de otros medios (por ejemplo, evaluación experimental).

1.3.7 Usos en gas natural. Los usos típicos incluyen las mediciones en una sola fase del flujo de gas, tales como GNV (gas natural vehicular), transferencia de custodia, medición fiscal, planta de proceso del gas natural y procesos industriales. La mayoría de los medidores Coriolis ofrecen medidas de flujo bidireccional para aplicaciones que requieren y pueden acomodarse a este tipo de flujo. Una aplicación especial del medidor de flujo Coriolis es para gas natural vehicular.

➤ **Surtidores de GNV.** El surtidor es la interface entre la EDS-GNV (estación de servicio de gas natural vehicular) y el consumidor. Estos son usualmente diseñados con una apariencia similar a los surtidores tradicionales de combustibles líquidos. El surtidor usualmente contiene tanto el sistema de medición como el sistema de control de ciclo de llenado.

De manera general se podría asimilar el surtidor de GNV como un sistema de medición, en cuyo caso se deben reconocer componentes específicos según regulaciones de estudio, que garanticen la estructura mínima para el correcto desarrollo del proceso de medición de GNV.

Los dispositivos adicionales son aquellos que integran el circuito de gas, principalmente las válvulas que controlan el flujo hacia el vehículo, las mangueras y boquillas de conexión. Otros dispositivos adicionales se consideran en los surtidores, tales como filtros, rectificadores de flujo, tubería y válvulas en general, los cuales no aportan a la incertidumbre del mensurado, pero cuyo correcto funcionamiento ayuda a mantener el desempeño metrológico del surtidor.

Los dispositivos auxiliares son dispositivos de preselección, de retorno a cero (reset) de los surtidores, teclados, display de interface (los cuales deben indicar por lo menos el precio por unidad de venta del gas en metros cúbicos a condiciones base, la cantidad de gas suministrado al vehículo y el costo total de la venta), impresoras, módulos de memoria para almacenamiento de datos, totalizadores, entre otros. Buena parte de estos dispositivos se hayan contenidos en un único módulo electrónico que realiza diversas tareas proveyendo finalmente la cantidad y el precio total de la venta.

Entre los dispositivos auxiliares puede incluirse también un dispositivo electrónico de seguridad para bloquear el sistema de llenado y evitar el acceso no autorizado a las constantes del surtidor (K factor del medidor, densidad, precio de venta, etc.).

Aunque no se puede considerar como componente físico y operacional del surtidor los documentos de soportes, son claves para el mantenimiento, operación y aseguramiento metrológico del surtidor. Por esta razón es recomendable mantener registrada y actualizada, la información referente al surtidor. Esta información debería incluir por lo menos: ficha técnica del surtidor y de sus componentes principales, manual de operación y mantenimiento, procedimientos de operación y seguridad, certificados de calibración, carta de trazabilidad para el surtidor, una carta de control que permita identificar la deriva del sistema de medición y la posible presencia de errores sistemáticos y por último los certificados de la cromatografía del gas utilizada para el cálculo de la densidad a condiciones base, así como los procedimientos para la obtención de la densidad y los documentos legales a que hubiere lugar según la regulación vigente.

Surtidores de gas natural en Colombia. Los medidores de flujo másico Coriolis para gas natural más usados en Colombia son para aplicaciones en gas natural comprimido para vehículos. Existen equipos de estaciones de servicio de marca GALILEO de tecnología española ensamblados en Argentina y de marca ASPRO de tecnología italiana también ensamblados en Argentina.

Los usuarios del medidor Coriolis expresan que para el despacho de gas natural vehicular, éste es el medidor más funcional por su exactitud, por su sistema electrónico, por la forma de expresar los resultados de la medición y porque no interesan los cambios de presión. También expresan que existe confiabilidad en los medidores y que son de poco mantenimiento.

2. ASPECTOS TÉCNICOS DEL MEDIDOR CORIOLIS

En este capítulo se darán a conocer los principales aspectos técnicos que los usuarios del medidor de flujo másico tipo Coriolis deben tener en cuenta para una adecuada aplicación. Estos aspectos comprenden los tópicos de selección, requisitos, operación, calibración y mantenimiento, los cuales orientarán al usuario del medidor Coriolis, aunque adicionalmente se deben complementar con las especificaciones dadas por el fabricante.

2.1 REQUISITOS DEL MEDIDOR

El usuario deberá tener en cuenta los mínimos requisitos que debe exigirle al fabricante, con los cuales el medidor de flujo másico Coriolis debe funcionar adecuadamente.

2.1.1 Cuerpo del medidor.

- **Condiciones máximas de operación.** El diseñador debe proporcionar al fabricante del medidor la información de todos los códigos industriales que se aplican para el lugar de la instalación. La información debe incluir la presión máxima de operación permitida del medidor y rango específico de temperatura del gas. Por ejemplo, los medidores deben ser fabricados de tal forma que se dispongan para cualquiera de las clases comunes de tubería, por mencionar algunas ANSI (American National Standard Institucional) clase 300,600 y 900. La presión máxima de operación del medidor debe ser la menor de todas las presiones máximas de operación de cada uno de sus componentes.
- **Resistencia a la corrosión.** Las partes del sensor en contacto con el gas, deberán ser fabricadas de materiales compatibles con gas natural. Todas las partes externas del medidor deberán ser diseñadas de un material resistente a la corrosión o selladas con una cubierta resistente a la corrosión para usarse en condiciones ambientales usualmente encontradas en el sitio propio para la instalación del medidor
- **Longitudes del medidor.** Los fabricantes deben publicar las normas en general de la longitud cara a cara del cuerpo del medidor. Los diámetros de la tubería y del medidor pueden ser diferentes. El diseñador debe asegurarse de disponer un espacio apropiado en la instalación que satisfaga la longitud del medidor.
- **Compensación del efecto de la variación de presión.** Algunos medidores Coriolis muestran una susceptibilidad a cambios en la presión de la línea, que

puede crear un margen negativo en la medida promedio del flujo, a presiones por encima de la presión de calibración. Sin embargo, este efecto puede ser compensado usando un sensor o transmisor de medición de presión externa, para que mida la presión de la línea. Se debe consultar al fabricante para que identifique la magnitud del efecto de la presión y si es necesario el método apropiado para corregirlo. Si se usa la compensación de la presión, la ubicación de su medición puede hacerse comúnmente aguas abajo o aguas arriba cerca del sensor. En una aplicación donde se requiere alta relación de caudales máximo y mínimo y una alta caída de presión a través del medidor, a caudal máximo, el diseñador debe evaluar la variación de la presión aguas abajo y si es apropiado localizar aguas arriba el dispositivo medidor de presión para compensar el efecto de su variación, ya que aguas arriba la presión de línea variará menos.

- **Manipulación del medidor.** El medidor será diseñado de tal forma que permita su fácil y segura manipulación durante el transporte y la instalación.
- **Marcas.** El medidor debe tener una placa adherida a su cuerpo que contenga la siguiente información:
 - Fabricante, número de modelo y número de serie.
 - Número de orden de compra o número de orden de adquisición (opcional).
 - Tamaño del sensor y clase de bordes.
 - Códigos de diseño y material.
 - Presión de operación permitida y alcances de temperatura de operación del gas.
 - Dirección del flujo.

2.1.2 Electrónica.

- **Requisitos generales.** El sistema electrónico del medidor Coriolis incluyendo suministros de potencia, señal de manejo y circuitos de procesamiento de señales pueden ser alojados en uno o más recintos adelante o remotamente alejados del medidor (transmisor). Opcionalmente, una unidad remota que contendrá los suministros de potencia y el operador de interfase, puede estar instalada en un área no peligrosa y conectada al sistema electrónico por un cable multiconductor.

El transmisor deberá operar correctamente sobre un rango total de las condiciones ambientales especificadas por el fabricante. También debe ser posible reemplazar el transmisor si existe un cambio considerable en el desempeño del medidor.

El sistema debe incluir una función automática para reanudar la función para el transmisor, en el caso de que un programa de computadora falle.

El medidor debe operar a un voltaje de suministro de potencia nominal de 240 V AC en 50 o 60 hz, o de 12 V DC suministrados por una batería, como fue especificado por el diseñador.

- **Requisitos de diseño de seguridad eléctrica.** El diseño del medidor, incluyendo el transmisor debe ser analizado, examinado y certificado por un laboratorio apto para esta labor. Luego cada medidor debe ser aprobado por el código eléctrico nacional clase I, segunda división, grupo D, área peligrosa.

- **Especificaciones de señales de salida.** El medidor debe ser equipado al menos con una de las siguientes salidas:

- Interfase de datos seriales, RS - 232, RS - 475 o equivalentes.
- Frecuencia, representando el tipo de flujo.

El medidor también estará equipado con una salida análoga (4 - 20 mA) para el caudal másico. La salida 4 - 20 mA debe ser similar a un transmisor industrial de dos hilos.

Se debe proveer de una función de corte a caudal bajo, que establezca la salida de caudal a cero cuando el caudal indicado esta por debajo del valor establecido.

Un método para diferenciar los flujos que van en uno y en otro sentido de la tubería deben ser seleccionados para facilitar la lectura del volumen total, separadamente en cada dirección, a través de computadora de flujo.

Todas las salidas deberán ser aisladas del suelo y tener la necesaria protección del voltaje.

- **Aislamiento térmico.** Las cubiertas de cable, goma (banda elástica), plástico y otras partes expuestas, deberán ser resistentes a la luz ultravioleta, llamas, aceite y grasa.

2.1.3 Software.

- **Software de procesamiento de señales.** El software de procesamiento o microprograma (firmware) responsable del control y operación del medidor se guardará en una memoria no volátil, al igual que todos los valores de flujos calculados, las constantes y parámetros de operación ingresados.

Para propósitos de intervención será posible verificar todas las constantes del cálculo de flujo y los parámetros, mientras el medidor esté en operación.

El fabricante mantendrá un registro de todas las revisiones del microprograma (firmware) incluyendo: revisión del número de serie, fecha de la revisión, modelos aplicables al medidor, revisiones de la tarjeta del circuito y descripción de cambios en el microprograma. El número de revisiones en el microprograma, la fecha de revisión, el número de serie y el registro del evento deberán estar disponibles para que un auditor pueda verlos en su propia pantalla, y de forma remota por comunicación digital. Además, el número de revisión del microprograma, la fecha de revisión y el número de serie deben estar disponibles para la inspección visual del integrado del microprograma o un subsistema electrónico que comprenda el código de operación del software.

El fabricante puede ofrecer actualizaciones del software en cada momento para aumentar el desempeño del medidor o adicionar rasgos o características. El fabricante deberá informar al operador del medidor si la revisión del microprograma afectará la exactitud de un medidor de flujo calibrado.

- **Software de configuración y mantenimiento.** El medidor estará disponible con una capacidad para permitir la configuración del transmisor y monitoreo de la operación del medidor por el fabricante. Como mínimo, el software será capaz de mostrar en pantalla y registrar el caudal y la calidad de la señal manejada.

- **Funciones de inspección y auditoria.** Sería posible para un auditor ver, recopilar e imprimir los parámetros de configuración de mediciones de flujo (por ejemplo constantes de calibración y constantes de configuración del medidor) usado por el transmisor localmente o remotamente con un apropiado dispositivo de adquisición de datos, usando el software de configuración y mantenimiento.

El fabricante debe tener disponibles las precauciones para que el operador y/o el usuario prevengan un accidente o una alteración indetectable de aquellos parámetros que afectan el desempeño del medidor. Ejemplos de algunas precauciones convenientes pueden ser un interruptor o puente sellado, niveles múltiples, contraseñas o un integrado de memoria permanente solo para lectura.

- **Alarmas.** Las siguientes salidas de estados de alarmas deberán ser proporcionadas en la forma de relé de contactos de prueba de falla, o de interruptores de estado sólido libres de voltaje aislados de la tierra:

- Daños fuertes. Cuando ocurran algunas fallas internas severas de medición para un determinado lapso de tiempo.

- Daños leves. Cuando el medidor no produce una salida que se pueda utilizar (ver sección 8.2.5 correspondiente al reporte N° 11 de AGA).

• **Medidas de diagnóstico.** Para la realización del diagnóstico por parte del usuario, el fabricante deberá orientar al usuario en la obtención de la siguiente información.

- Indicaciones de potencia de manejo.
- Amplitud de señal de remoción.
- Salidas de temperatura.
- Indicadores del estado y calidad de medición.
- Alarma e indicadores de fallos.
- Densidad.

• **Unidades de ingeniería.** Las unidades que serán usadas para varias magnitudes asociadas con el medidor Coriolis son correspondientes a los sistemas internacional e inglés.

• **Documentación.** El fabricante proporcionará todos los datos necesarios, certificados y documentos para la configuración correcta, la selección y el uso del medidor, y en particular el uso por parte del operador o el diseñador. El operador o diseñador puede solicitar también copias del certificado de pruebas hidrostáticas, certificados de material y radiografías de soldadura que deben ser suministrados a la entrega del medidor.

El fabricante proporcionará o mantendrá disponible, como mínimo, el siguiente grupo de documentos cuando se requieran:

- Una descripción del medidor dando las características técnicas y principios de operación.
- Un dibujo en perspectiva o fotografía del medidor, con la nomenclatura de las partes y una descripción de materiales constituyentes.
- Un dibujo mostrando la ubicación de marcas y señales de verificación.
- Un dibujo de la placa (lámina) de datos o placa de la cara y de las disposiciones para las inscripciones.
- Instrucciones para operación, instalación y mantenimiento periódico.
- Una descripción general de operación.
- Una descripción de las señales de salida disponibles y cualquiera de los mecanismos de ajuste.
- Una lista de interfases electrónicas y puntos terminales de la instalación eléctrica con sus características esenciales.
- Una descripción de las funciones del software e instrucción de operación.
- Documentación que muestre que el diseño y la construcción cumplen con los códigos y regulaciones de seguridad requeridas.
- Documentación que muestre que el desempeño del medidor cumple con los requisitos establecidos por la sección 7 de AGA 11 (opcional).
- Toda la documentación debe ser fechada.

2.1.4 Requisitos de calibración. Según AGA 11, cada medidor debe ser calibrado con una medida estándar reconocida nacional e internacionalmente sobre un rango de caudales representativo del caudal de aplicación. Además deben haber suficientes pruebas para establecer la exactitud y linealidad del medidor; como mínimo se debe realizar tres pruebas de mediciones de caudal (en cada dirección del flujo a través del medidor si es aplicable) dentro de un rango para que se pueda mostrar cualquiera de los efectos de histéresis y repetibilidad. Si se hace un ajuste al factor del medidor se recomienda que por lo menos se compruebe en un punto.

- **Flujo de calibración alternativa.** Un número representativo de muestras de un tipo y tamaño de un medidor dado, deberá ser calibrado usando un fluido de calibración alternativo (por ejemplo agua, aire, etc.) y gas natural para caracterizar adecuadamente cualquiera de las deficiencias en el desempeño del medidor (por ejemplo su exactitud) producido por diferentes medios de la prueba. Basado en los resultados característicos de este proceso, un ajuste al factor de calibración del medidor puede hacerse para asegurar el desempeño aceptable del medidor en el servicio de gas. La incertidumbre de la medición para el Coriolis deberá establecerse para el servicio de gas. Algunas de las limitaciones o restricciones para el rango de operación del medidor en el servicio de gas también deberán ser establecidos.

- **Reportes de la prueba de calibración.** Todos los resultados de la prueba del medidor deberán ser documentados en un reporte escrito que será archivado por el fabricante del medidor y al mismo tiempo enviado al propietario y/o usuario del medidor. Al menos una copia del reporte completo debe dársele al propietario/usuario del medidor. El fabricante del medidor mantendrá una copia del reporte de la prueba en archivo por lo menos durante diez años y debe hacer un reporte completo que esté disponible para el propietario/operador cuando lo solicite durante ese periodo. El reporte como mínimo deberá incluir lo siguiente:

- Nombre y dirección del fabricante del medidor.
- El nombre y la dirección de la instalación de prueba.
- El modelo y número de serie del medidor de prueba.
- El tamaño o rango de capacidad de la línea del medidor de prueba.
- El número de revisión del software del medidor de prueba.
- Fechas de las pruebas.
- El nombre y el título de las personas responsables de las pruebas.
- Una descripción escrita de los procedimientos y condiciones pertinentes de la prueba.
- La disposición del montaje del medidor incluyendo configuraciones de la tubería aguas arriba y aguas abajo.
- Un reporte del diagnóstico de los parámetros de configuración del software del medidor.

- Todos los datos de prueba, incluyendo velocidades de flujo, presiones, temperaturas, composición del gas (si fue calibrada) y la incertidumbre de medición de la instalación de prueba.
- Una descripción de cualesquiera variaciones o desviaciones de las condiciones específicas de prueba.
- Algunas de las observaciones más relevantes de la instalación de prueba y del desempeño del medidor durante el transcurso de la prueba.
- El valor o valores de calibración obtenido(s) durante la prueba de flujo versus el caudal.

• **Prueba de presión estática.** Todo fabricante del medidor Coriolis debe probar la presión de cada medidor usando métodos convenientes para verificar su integridad estructural. La prueba debe ser hecha antes de que los componentes que contienen la presión del medidor sean cubiertos. Comúnmente la presión de prueba es una y media veces la máxima presión de operación del componente a presión más baja del medidor, o, como lo requiera el diseñador o la agencia que aprueba los productos seleccionados, por ejemplo, ANSI B31.3. Ninguna fuga deberá ser permitida por más de 15 minutos en la prueba de la presión. Los métodos más convenientes deberán ser usados para determinar fugas en el montaje del medidor.

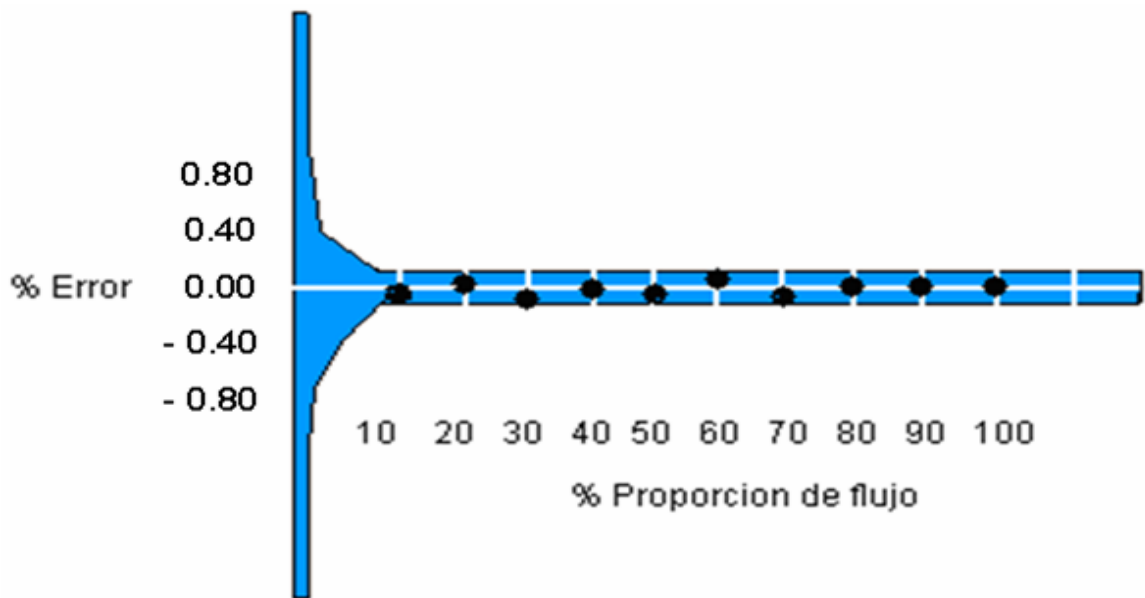
2.1.5 Desempeño. A causa de la naturaleza lineal de la señal desarrollada, los medidores Coriolis tienen un alcance de medición amplio. La relación típica entre caudal máximo y mínimo es del orden de 25:1, y en las mismas aplicaciones pueden obtenerse exactitudes aceptables sobre una relación de 100:1. La exactitud de medición se establece con respecto al porcentaje del caudal máximo.

El “cero” es el valor en la lectura del medidor de caudal cuando no existe flujo; existe un error de desplazamiento del cero, denominado “estabilidad del cero”, el cual define los límites dentro de los cuales el cero del medidor puede oscilar durante la operación; es constante sobre el rango de operación teniendo fijos los demás parámetros que intervienen. Puede expresarse como un valor en unidades de caudal o como un porcentaje del flujo másico nominal. El error por desplazamiento del cero se debe a la compensación de pequeñas variaciones tanto en el sensor como en los dispositivos electrónicos.

Muchos fabricantes especifican la incertidumbre del medidor asociada al caudal pero como un porcentaje de la capacidad de medición del sensor. Esta incertidumbre, añadida a la exactitud básica, puede tener una gran influencia en la exactitud total en la medición de caudales bajos. Por ejemplo, un desplazamiento del cero de 0.01% sobre la capacidad del medidor, contribuirá con un 0.25% del caudal adicional para la exactitud del medidor cuando éste opera a 4% de su capacidad. A 1% de la capacidad del medidor, el error por desplazamiento del cero se cuenta como 1% de error respecto al caudal. Si los límites de exactitud se

grafican como porcentaje de caudal, la gráfica obtenida será similar a la figura 14. Debido al error por desplazamiento del cero, la exactitud se degrada a medida que el caudal de operación se aproxima a cero.

Figura 14. Porcentaje de error



Para obtener el mejor desempeño posible en los flujos mínimos, los medidores Coriolis ofrecen la posibilidad de ajustar el cero para las condiciones de operaciones existentes en la línea. Después de que el medidor es instalado y llenado con el fluido de proceso a la temperatura de proceso, el cero puede optimizarse bloqueando el flujo y haciendo el ajuste del cero. Puesto que el ajuste del cero puede afectarse ligeramente por la temperatura, los fabricantes de medidores Coriolis recomiendan que el cero sea ajustado a una temperatura dentro de un límite de $\pm 10^{\circ}$ C con respecto a la temperatura de operación.

Cuando se presentan condiciones de flujo pulsante se puede afectar la estabilidad del cero mediante los mismos dispositivos electrónicos del medidor. Estos se manifiestan como una excesiva potencia de excitación o una reducción en la amplitud de la señal en el sensor de movimiento. Muchos fabricantes ofrecen características que inhiben la señal de salida o producen una alarma cuando el medidor es incapaz de realizar una medición exacta durante las condiciones de pulsación. Esto es particularmente útil en aplicaciones donde el flujo de la línea es purgado cada vez que se pone en funcionamiento, produciendo flujo pulsante durante el llenado y el vaciado de la línea.

2.2 SELECCIÓN

El aspecto más importante a tener en cuenta en la selección del tamaño de un medidor Coriolis es la relación existente entre la pérdida de presión y la exactitud del medidor. La selección de los medidores de flujo Coriolis está basada en una variedad de factores, de los cuales los más sobresalientes son seguridad, exactitud y desempeño en los rangos de medición requeridos. De tal forma, las consideraciones a tener en cuenta en la selección de un medidor Coriolis para gas natural son las siguientes:

- Incertidumbre de la medición del flujo de masa.
- Caudales normal, mínimo y máximo.
- Temperaturas mínima, máxima y de operación normal del fluido.
- Presiones mínima, máxima y de operación normal del fluido.
- Pérdida permisible de presión.
- Gravedad específica y viscosidad del gas.
- Tipo de flujo: unidireccional o bidireccional.
- Tipos de materiales y cubierta del medidor.
- Dimensiones de las conexiones en el proceso.
- Formatos requeridos y salidas de las variables medidas (ejemplo: 4-20 mA).
- Posibilidad para diagnosticar (remota o localmente).
- Condiciones ambientales y de seguridad en el área.
- Calidad del gas (condensados, componentes particulares, etc.).
- Disponibilidad y calidad de la fuente energética.
- Configuración de la instalación de la tubería.
- Otras consideraciones de operación: pulsación, esfuerzos mecánicos, remolinos, vibraciones, etc.
- Usos del medidor.

Seleccionar apropiadamente un medidor Coriolis, consiste en escoger un óptimo tamaño que satisfaga el rango de medición entre un caudal mínimo y un caudal máximo, con un porcentaje pequeño en el error de medición, moderada pérdida de presión y velocidades aceptables del gas a través del tubo.

➤ **Presión y temperatura.** Al seleccionar un medidor se deben determinar las condiciones de presión y temperatura del gas a medir, con el fin de establecer las características mínimas que deben cumplir los elementos seleccionados.

Las características del medidor que son afectadas directamente por la presión de operación son: la geometría de los tubos, las conexiones y el material de construcción de estos. Los tubos y las conexiones deben soportar presiones más altas que las presiones de línea, por lo cual se presentan gran variedad de configuraciones para medidores Coriolis, tanto de formas como de materiales.

➤ **Límite de velocidad.** Algunos medidores Coriolis tienen limitaciones de desempeño a velocidades de gas elevadas, debido al ruido generado en la señal del medidor. Esta señal de ruido puede afectar la exactitud y repetibilidad. La velocidad del gas para la cual el ruido se vuelve un problema debe ser proporcionada por el fabricante. Muy pocas veces se tiene en cuenta esta señal de ruido cuando la velocidad del gas en el medidor es inferior a 200 pies por segundo (61 m/s); adicionalmente los fabricantes proporcionan el número de Mach límite para definir la velocidad recomendada máxima.

Por otro lado, si la corriente de gas presenta contaminantes abrasivos y las velocidades del gas son altas, se produce erosión en los elementos que están en contacto con el fluido.

➤ **Caudal mínimo (Q_{\min}).** El caudal mínimo de un medidor Coriolis es determinado por el máximo error de medición permisible por debajo del caudal de transición (Q_t). El error de medición de un medidor Coriolis es determinado a partir de la estabilidad del cero en el medidor y de la exactitud suministrada por el fabricante.

➤ **Caudal máximo (Q_{\max}).** El caudal máximo de un medidor Coriolis es determinado por la pérdida de presión aceptable a través del medidor.

➤ **Relación de caudales máximo y mínimo (turndown ratio).** Esta relación es el cociente entre el caudal máximo y el caudal mínimo para un determinado tipo, tamaño y aplicación del medidor. El máximo error de medición estimado debe estar dentro de los límites aceptables a través de un rango de caudales especificados. La relación de caudales máximo y mínimo resulta de la selección del caudal máximo basado en la pérdida de presión y del error de medición aceptable a un mínimo caudal.

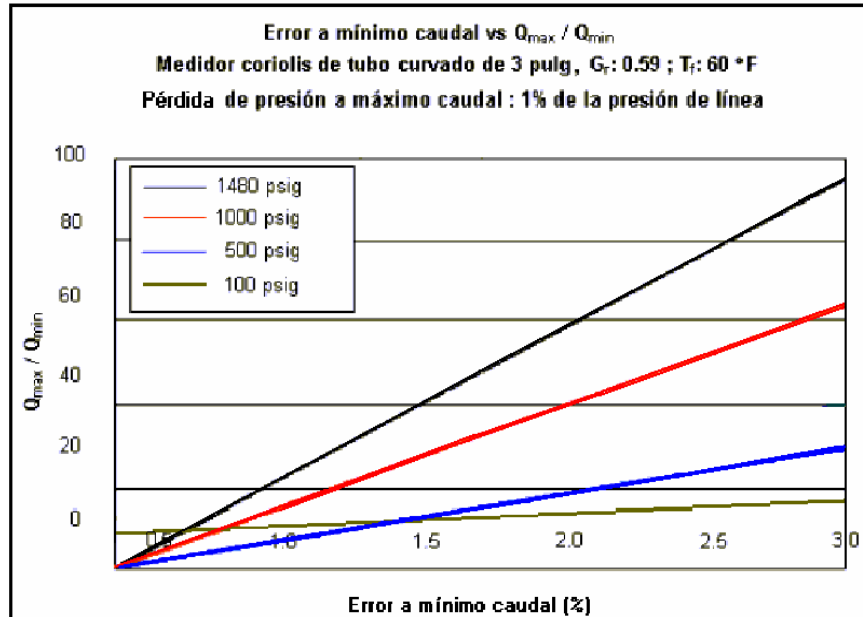
La figura 15 muestra el comportamiento de la relación de caudales máximo y mínimo en función del error a un mínimo caudal, a diferentes presiones. La tabla 1 muestra la incidencia del tamaño del medidor para tres diferentes presiones de operación a determinados caudales.

El valor de la estabilidad del cero es un factor que limita la relación entre caudales máximo y mínimo. La estabilidad del cero se obtiene cuando se instala el medidor de flujo Coriolis y cuando se reinicia desde cero la medición a condiciones de operación. Para los medidores de flujo Coriolis a condiciones estables de operación, comúnmente no ocurre que la oscilación de los valores del cero se salgan de los valores dados en la estabilidad del cero.

Puesto que la estabilidad del cero es un error constante sobre todo el rango de operación de un medidor dado, se afecta grandemente la exactitud en caudales

bajos. La figura 16 muestra como afecta la estabilidad del cero a la exactitud en caudales bajos; por otro lado muestra la caída de presión a diferentes caudales.

Figura 15. Error a mínimo caudal vs. Q_{max} / Q_{min}



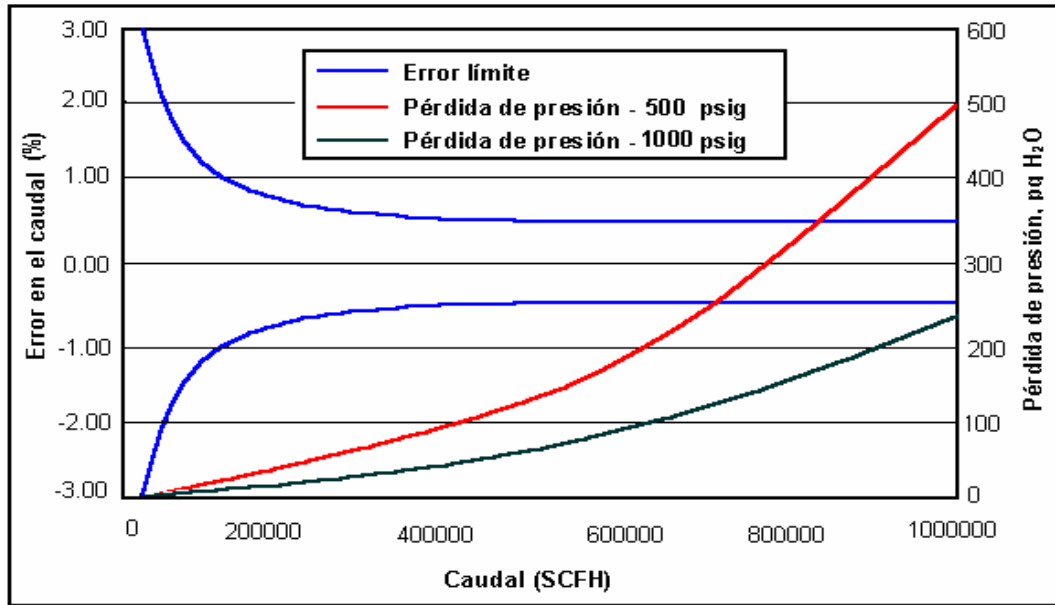
Tomada de AGA 11

Tabla 1. Incidencia del tamaño del medidor Coriolis

Diámetro Nominal de Medición	Presión de Línea (psig)	Caudal (scfh)	Caída de Presión (in. WC)	Error de Medición (%)	Estabilidad del cero del Medidor (Z.S)	Q_{max} / Q_{min}
2"	1000	400000	180	+/- 0,38 %	+/- 104 scfh	10:1
		40000	2	+/- 0,61 %		
3"	1000	400000	18	+/- 0,43 %	+/- 326 scfh	10:1
		40000	0,2	+/- 1,17 %		
2"	500	400000	408	+/- 0,38 %	+/- 104 scfh	10:1
		40000	4	+/- 0,61 %		
3"	500	400000	40	+/- 0,43 %	+/- 326 scfh	10:1
		40000	0,4	+/- 1,17 %		
2"	200	240000	400	+/- 0,38 %	+/- 104 scfh	6:1
		40000	10	+/- 0,61 %		
3"	200	400000	100	+/- 0,43 %	+/- 326 scfh	10:1
		40000	1	+/- 1,17 %		

Tomada de AGA 11

Figura 16. Error en el caudal y caída de presión vs. Caudal



Tomada de AGA 11

➤ **Pérdida de presión a través del medidor.** Se debe seleccionar un medidor Coriolis que permita optimizar el desempeño del medidor sobre el alcance de medición, con una pérdida de presión aceptable para la aplicación específica. Si la pérdida de presión es la prioridad, la selección del medidor se debe hacer teniendo en cuenta la pérdida de presión a caudal máximo, verificando que se mantenga un error de medición aceptable en los caudales mínimos.

Normalmente los fabricantes proporcionan una constante llamada coeficiente de pérdida de presión (K), la cual relaciona la pérdida de presión con la densidad del gas y con la velocidad de éste, expresada matemáticamente así:

$$K = \frac{2g_c \Delta P}{\rho v^2}$$

Solucionando esta ecuación para ΔP se tiene:

$$\Delta P = \frac{K \rho v^2}{2g_c}$$

La ecuación anterior muestra que con densidad constante la pérdida de presión es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del gas. Cada fabricante

proporciona para cada uno de sus modelos un coeficiente K que represente este comportamiento.

Cuando se cuenta con curvas de desempeño que fueron obtenidas mediante la utilización de agua como fluido de medición, se puede estimar la pérdida de presión para las aplicaciones de gas mediante la relación entre la densidad del gas a condiciones de operación y la densidad del agua a condiciones estándar. La pérdida de presión para agua (leída en la curva de desempeño) se debe dividir por el valor de esta relación de densidades y así se obtiene el valor de pérdida de presión que podría ser presenciada en una aplicación de gas.

La pérdida de presión de gas es dependiente de la presión total de línea. Si la pérdida de presión calculada es mayor que el 10% de la presión de línea absoluta, la densidad del gas cambia significativamente y causaría que la pérdida de presión existente sea más alta que la que fue calculada. Para calcular el factor de corrección se tiene la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{\Delta P_e}{P}$$

Si F_c es mayor que 0.4, se escoge un medidor más grande. La pérdida de presión existente bajo estas condiciones puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

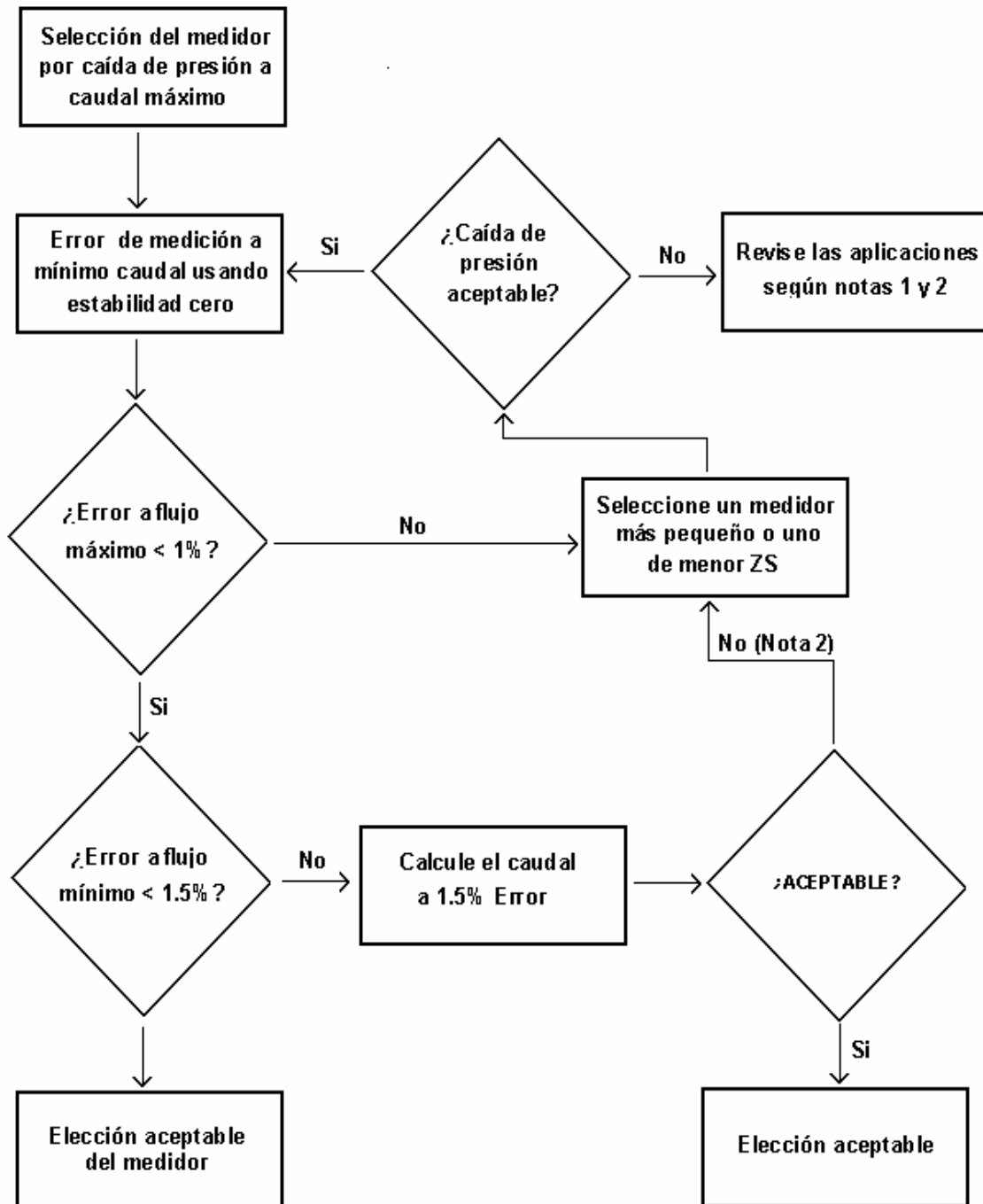
$$\Delta P = \Delta P_e(1+2F_c)$$

Este cálculo no tiene en cuenta la pérdida de presión que pueda existir debido a reducciones y expansiones de la tubería. Este factor debería calcularse para determinar la pérdida de presión total del sistema de medición.

➤ **Metodología para el dimensionamiento del medidor.** Una vez se halla seleccionado el tamaño del medidor fundamentándose en la caída de presión, la relación de caudal máximo y caudal mínimo y el error de medición, se debe realizar una evaluación para verificar que se cumplan los requisitos de desempeño. El diagrama de flujo mostrado en la figura 17, describe los pasos detallados que un diseñador u operador debería tener en cuenta para seleccionar el tamaño apropiado de un medidor para una aplicación determinada.

Si se desea un determinado error de medición a un mínimo caudal y a un máximo caudal, se puede determinar el desempeño requerido y así seleccionar el medidor más conveniente. Una vez sean seleccionados el tipo y el tamaño del medidor, el fabricante proporcionará los datos de errores y de relación de caudales máximo y mínimo.

Figura 17. Diagrama para dimensionar el medidor Coriolis



Tomada de AGA 11

Referente a la metodología para el dimensionamiento del medidor, se darán las siguientes notas:

Nota 1. El dimensionamiento del medidor puede optimizarse relocalizándolo en un punto de la tubería donde el gas esté a una presión más alta, por ejemplo aguas arriba del regulador de presión. Las presiones de proceso más altas mejoran la relación de caudales máximo y mínimo del medidor debido al incremento de la densidad del gas y reducción de la caída de presión, en todo el rango de medición de caudal. Utilizando las presiones de proceso más altas se pueden reducir los tamaños del medidor.

Nota 2. Seleccionando un medidor con mejor desempeño a un caudal mínimo puede resultar una caída de presión más alta que a un caudal máximo. Si un medidor no está disponible en el mercado, el diseñador u operador debe revisar los requisitos de operación. Los requisitos de desempeño a caudal mínimo pueden dejarse menos rigurosos y/o la caída de presión a máximo caudal puede incrementarse.

2.3 REQUISITOS DE INSTALACIÓN

Es necesario seguir algunos lineamientos durante la instalación de los medidores Coriolis, para que sean instalados en ambientes adecuados, garantizando de esta manera el desempeño óptimo y facilidad de uso. Para la instalación del medidor de flujo másico Coriolis se deben tener en cuenta los siguientes requisitos:

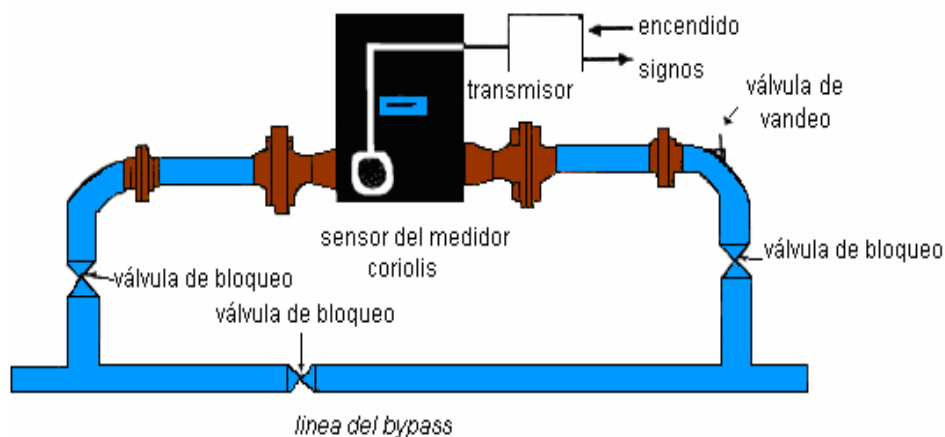
- **Temperatura.** Los medidores Coriolis en general operan apropiadamente sobre un rango de temperatura ambiental mínimo entre -25 a 55°C (-13° a 131°F). La temperatura debe considerarse de tal forma, acorde a la composición del gas, para evitar la formación de condensados. También hay que dar consideración especial a los ambientes extremos, por ejemplo, la operación bajo radiación solar directa y climas fríos.
- **Vibración.** Las vibraciones normales en la tubería usualmente no interfieren con el desempeño del medidor. Se debe tener especial cuidado para que los sensores de un medidor Coriolis no sean instalados donde los niveles de vibración mecánica de la estructura puedan afectar la frecuencia de resonancia natural del tubo de flujo.
- **Ruido eléctrico.** Aunque un medidor Coriolis está diseñado para soportar influencias de ruido eléctrico, no se debe exponer el medidor o el cableado de conexión a ningún tipo de ruido eléctrico innecesario; por ejemplo, interferencia electromagnética, interferencia de frecuencias de radio, etc.

- **Configuración de la tubería.** En los sensores de medidores Coriolis del tipo en “U” la distorsión del perfil de velocidad y el efecto de los remolinos, tienen menor incidencia que en las otras tecnologías, permitiendo flexibilidad en su montaje; pero sí hay que tener en cuenta hacer un buen soporte a la tubería para minimizar los esfuerzos en el cuerpo del sensor.

Otras configuraciones de sensores son sensibles a la distorsión del perfil de flujo de velocidad. En estos casos se deben seguir las recomendaciones para la configuración de la instalación de tubería aguas arriba y aguas abajo. Por ejemplo, el uso de un acondicionador de flujo apropiado aguas arriba del sensor, o proporcionar una suficiente longitud recta de tubería aguas arriba para permitir completamente el desarrollo del perfil de velocidad de flujo turbulento.

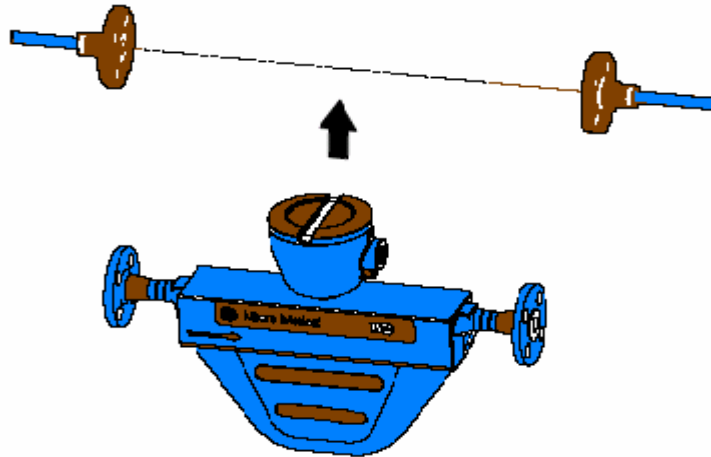
Un ejemplo típico de configuración de tubería se muestra en la figura 18, en la cual se nota que el medidor Coriolis es instalado en una derivación hecha sobre la tubería (bypass), para permitir la realización de inspecciones y mantenimiento sin interrumpir el servicio. En esta configuración se deben utilizar válvulas de bloqueo para permitir el mantenimiento del sensor, igualmente la instalación de una válvula de purga que permita el alivio de la presión en el sistema antes del mantenimiento o calibración.

Figura 18. Configuración de la tubería



- **Dirección del flujo.** Para aplicaciones de flujo bidireccional, ambos extremos del sensor deberían ser considerados aguas arriba, particularmente si el sensor es sensible a los efectos de distorsión del perfil de velocidad.
- **Montaje del sensor.** Bajo condiciones normales, los medidores Coriolis no requieren soportes de montaje especiales. Si la tubería es lo suficientemente rígida, el sensor puede fijarse simplemente con pernos a la tubería (ver figura 19).

Figura 19. Sensor fijado con pernos



Tomada de Micro Motion

Los desalineamientos en la tubería pueden afectar al sensor del medidor Coriolis si se transmiten los esfuerzos a través de las bridas del sensor. El divisor de flujo (manifold) del sensor está diseñado para aislarlo de esfuerzos externos moderados. El sensor es insensible a las fuerzas de tensión y de compresión, pero susceptible a las fuerzas de torsión excesivas, como las que se presentan cuando el cuerpo del sensor se utiliza para alinear la tubería.

Para la instalación de la tubería se deben aplicar los códigos industriales de ésta. El desempeño del medidor, específicamente la estabilidad del cero, puede ser afectado por los esfuerzos axiales, de flexión y de torsión, debido a la presión, peso y efectos térmicos. Un trabajo apropiado en la alineación de la tubería y en el diseño de los soportes puede minimizar los esfuerzos y cargas asociadas.

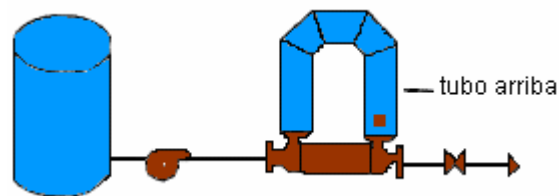
Se debe instalar buenos soportes de tubería a ambos lados del medidor. Estos soportes no deben fijarse al medidor, deben ir preferiblemente a cada lado del medidor en la tubería. Esto permite que el sistema de tubería soporte al medidor y no que el medidor soporte a la tubería. Los soportes de la tubería deben ir montados preferiblemente, si es posible, en el mismo plano de referencia para que el corrimiento de los elementos del soporte no le genere esfuerzos al sistema de tubería, los cuales podrían ser absorbidos por el medidor.

- **Puesta a tierra.** Si el transmisor está montado integralmente en el sensor, se puede poner a tierra el medidor de caudal, a través de la tubería, si las uniones de la tubería están puestas a tierra. Si el medidor de caudal no está puesto a tierra a través de la tubería, o si el transmisor está montado en forma remota desde el

sensor, conecte un hilo de tierra al tornillo de tierra interno o externo del transmisor. Ponga a tierra el transmisor y el sensor independientemente.

- **Orientación.** Los sensores deben orientarse con los tubos (o cubierta) apuntando hacia arriba (ver figura 20) o en posición de bandera montado sobre una tubería vertical para prevenir que se acumulen líquidos en los sensores. Los sensores no deben ubicarse en el punto más bajo de las tuberías porque la condensación puede acumularse en los tubos del sensor.

Figura 20. Orientación del sensor para gas



- **Adecuación de la instalación para la puesta a cero.** Se requieren válvulas para bloquear el flujo a través del medidor, y permitir el ajuste de cero. Por lo menos, se debe localizar una válvula de bloqueo aguas abajo del medidor. Si el sensor se localiza en una tubería que tiene flujo pulsante, es recomendable la utilización de válvulas de bloqueo a ambos lados del medidor, para bloquear completamente el flujo durante el ajuste del cero.

En algunas aplicaciones donde el flujo no puede bloquearse fácilmente, resulta de gran utilidad instalar un **bypass**.

- **Minimización de las influencias externas en el medidor.** Se debe evitar la instalación de los cables que conectan al sensor con el transmisor, cerca de suministros de potencia o dispositivos tales como motores eléctricos, transformadores y transmisores de radio, los cuales generan fuertes campos magnéticos y podrían afectar la señal electromagnética proveniente del sensor de movimiento (pickoff).

Si se instalan múltiples medidores del mismo tamaño y modelo, muy cerca, sobre la misma tubería, se requiere algún tipo de aislamiento para las vibraciones.

Si la temperatura ambiente es significativamente diferente de la temperatura de proceso (mayor de 30°C), puede ser muy útil el aislamiento del sensor. La necesidad de aislamiento depende de la aplicación en particular.

- **Filtración.** En la mayoría de los medidores Coriolis no es necesario la filtración del gas que fluye. Sin embargo si hay contaminantes abrasivos u otros escombros

en la corriente de flujo de gas, la erosión o el daño de los componentes húmedos del medidor puede ser relevante cuando éste está expuesto a altas velocidades de gas. La susceptibilidad a este efecto es específica al diseño del sensor y tamaño de la línea. Para evitar problemas relacionados con la erosión, el diseñador debe considerar el uso de la filtración aguas arriba y un incremento en el tamaño de la línea del medidor para reducir la velocidad del gas a través del cuerpo del sensor.

2.4 PUESTA EN OPERACIÓN

La operación del medidor se reduce a la puesta en marcha, que comprende el ajuste del cero, pruebas de entrada y salida y ajuste de salida en miliamperios, que se deben operar en el sensor en su plataforma de aplicaciones. Todo este proceso de operación se realiza a través de instrucciones, que son muy específicas y van acorde al fabricante. Detalladamente la configuración para la puesta en marcha comprende aspectos tales como: configuración de hardware, modos de seguridad del transmisor, configuración de comunicaciones, caracterización del sensor, factor de calibración de densidad, configuración de variables, configuración de dirección de flujo, configuración de salidas, configuración de unidades especiales.

2.4.1 Ajuste del cero. En la puesta en marcha debe realizarse un ajuste del cero del sensor. Este ajuste en el medidor establece el punto de referencia del medidor cuando no hay flujo (valor del cero). Una vez se realiza el ajuste del cero, permanece como parte de la memoria no volátil del transmisor, y no será afectada por una falla de energía o cuando se encienda o apague el transmisor.

En este proceso es necesario ajustar el parámetro del **zero time** (tiempo cero). Tiempo cero es la cantidad de tiempo que el transmisor toma para determinar el valor del cero. El valor determinado del tiempo cero varía de acuerdo al tipo de transmisor utilizado.

El tiempo cero puede ser grande o corto. Un tiempo cero grande puede producir un valor del cero más exacto, pero más probable que resulte en fallas de cero. Esto se debe a la incrementada posibilidad del caudal ruidoso, el cual provoca calibraciones incorrectas. Un tiempo cero corto es menos probable que ocasione una falla del cero, pero puede ser una referencia menos exacta. El valor predeterminado para el tiempo cero puede ser utilizado para la mayoría de los procedimientos de ajuste del cero.

Durante el ajuste del sensor, el caudal del fluido a través de éste debe estar completamente parado, ya que si hay caudal a través del sensor durante el ajuste del cero, éste será inexacto. Para preparar el medidor de caudal para el ajuste del cero del sensor es necesario tener en cuenta algunos aspectos tales como:

- Se debe instalar el sensor de acuerdo al manual de instrucciones adecuado.
- Energizar la plataforma de aplicaciones.
- Hacer pasar el fluido del proceso que se va a medir a través del sensor hasta que la temperatura en el sensor se aproxime a la normal del proceso.
- La válvula del corte se debe cerrar.
- El sensor debe estar completamente lleno con el fluido del proceso bajo condiciones normales de temperatura, densidad y presión.
- Que no haya flujo a través del sensor.

2.4.2 Pruebas de entrada y salida. Para probar la entrada y la salida se debe utilizar el menú diagnóstico. Por medio de estas pruebas se pueden obtener las entradas directas de frecuencia, presión y temperatura y las salidas discretas de miliamperios y frecuencia.

- **Pruebas de entrada.** La lectura de frecuencia es un mecanismo que contribuye a la medida exacta del fluido. Para probar las entradas de frecuencia, presión y temperatura se debe revisar cada una de estas variables en el dispositivo de entrada remoto y verificar que se reciba el valor adecuado en la plataforma de aplicaciones.

- **Pruebas de salida.** El software del medidor de flujo másico Coriolis permite establecer los estados de las salidas discretas, los valores de las salidas en miliamperios y las salidas de frecuencia.

Al realizar las pruebas de salida mientras los dispositivos de control están en modo de control automático provocará error de la medición. Para evitar errores de medición se debe poner los dispositivos de control para operación manual antes de realizar las pruebas de salida.

- Salidas discretas: al realizar el proceso de salidas discretas se debe tener bien claro la variable que se va a ajustar; tener en cuenta la polaridad de salida y revisar el dispositivo receptor para asegurar que se está recibiendo el nivel correcto.

- Salidas de miliamperios: para establecer los niveles de salidas de miliamperios, se debe seleccionar primero la salida de la corriente. Después de establecer los niveles, se debe tener en cuenta el dispositivo receptor para asegurar que se está recibiendo el nivel de salida correcta. Si la diferencia entre nivel de salida enviado por el transmisor y el recibido por el dispositivo receptor no es aceptable, se debe realizar nuevamente el ajuste de la salida de miliamperios; si por el contrario el nivel de entrada coincide con el nivel de salida el proceso se ha realizado de manera eficaz.

- Salida de frecuencia: la salida de frecuencia comprende establecer la salida que se requiere, establecer el nivel de frecuencia de salida, su valor y revisar el dispositivo receptor para asegurar de esta manera que se está recibiendo el nivel de salida correcto.

2.4.3 Ajuste de salida de miliamperios. El ajuste de salida de miliamperios crea un rango común de medición entre el transmisor y el dispositivo que recibe la salida de miliamperios. Por ejemplo, un transmisor podría enviar una señal de 4 miliamperios que el dispositivo receptor reporta incorrectamente como 3.8 miliamperios. Al ajustar correctamente la salida de transmisor, enviará una señal compensada adecuadamente para asegurar que el dispositivo receptor en realidad indique una señal correcta.

La salida de miliamperios se debe ajustar en ambos puntos del rango, 4 mA y 20 mA, para garantizar compensación adecuada a través de todo el rango de salida.

Al realizar el ajuste de salida de miliamperios es necesario tener en cuenta algunos aspectos como:

- Conectar un dispositivo de referencia a los terminales.
- Seleccionar la salida que se va a ajustar.
- Introducir la cantidad de corriente indicada para el dispositivo de referencia.
- Comparar el nivel de salida indicada por el dispositivo de referencia con el nivel de salida que aparece en el indicador.

Si el nivel de salida que aparece en el indicador coincide con el nivel de salida indicado por el dispositivo de referencia, indica que el proceso de ajuste de miliamperios está bien realizado; si el nivel de salida no coincide con el nivel de salida indicado por el dispositivo, es necesario realizar nuevamente el proceso de ajuste. Al realizar los ajustes de corriente, ésta no debe exceder los niveles de corriente indicados por el fabricante, alrededor de 200 microamperios.

En la operación del medidor del caudal de flujo másico tipo Coriolis, es necesario tener en cuenta las instrucciones que cada uno de los fabricantes proporciona a sus usuarios; por tal razón es importante aclarar que no todos los equipos se operan de la misma forma, de esta manera se optimizará el proceso de operación del equipo.

2.5 CALIBRACIÓN DE CAUDAL MÁSIKO

Cada medidor debe calibrarse individualmente y poseer trazabilidad a patrones reconocidos como soporte de su desempeño. El propósito de la calibración es reducir las variaciones de rendimiento en sensores, transmisores y dispositivos periféricos individuales. La calibración se realiza para producir mediciones exactas

de caudal másico, aunque algunos que sugieren que normalmente el transmisor no necesita ser calibrado en campo ya que son calibrados en fábrica.

La sensibilidad de un medidor a la influencia de las condiciones de operación se asocia a su diseño. Algunas influencias que afectan el desempeño de un medidor son: Esfuerzos mecánicos sobre el medidor; variación de caudal; configuración de tubería; variaciones extremas de presión y temperatura; cambio de temperatura ambiente y composición del gas.

Hay tres consideraciones que se deben tener en cuenta cuando se está calibrando un medidor Coriolis: Pérdida de presión, velocidad del gas dentro del sensor y errores totales en el medidor; estas consideraciones actúan recíprocamente.

Los fabricantes calibran cada medidor Coriolis en fábrica con un patrón estándar traceable y expiden certificado de calibración. Los medios de calibración son gas natural, aire, gases inertes y/o líquidos. Los factores de calibración determinados por este proceso son anotados en la placa del medidor y guardados electrónicamente en un registro del transmisor. La calibración de un medidor Coriolis es similar a la de cualquier otro medidor de flujo. Los medidores Coriolis son calibrados individualmente, si se les solicita y se paga, pero generalmente son producidos en serie y entregados al cliente.

En algunos casos, los medidores Coriolis son calibrados con un fluido líquido, tales como agua, mejor que el gas natural o aire. Las calibraciones líquidas son menos costosas tradicionalmente que las calibraciones con gas.

Measurement Canadá ha estado trabajando con un fabricante para investigar la transferibilidad de las calibraciones con agua para usos de mediciones en transferencia de custodia con gas natural. Si estas pruebas establecen la transferibilidad del factor de calibración entre gas y el agua, se espera que Measurement Canadá permita las calibraciones basadas en agua para aplicaciones en gas natural.

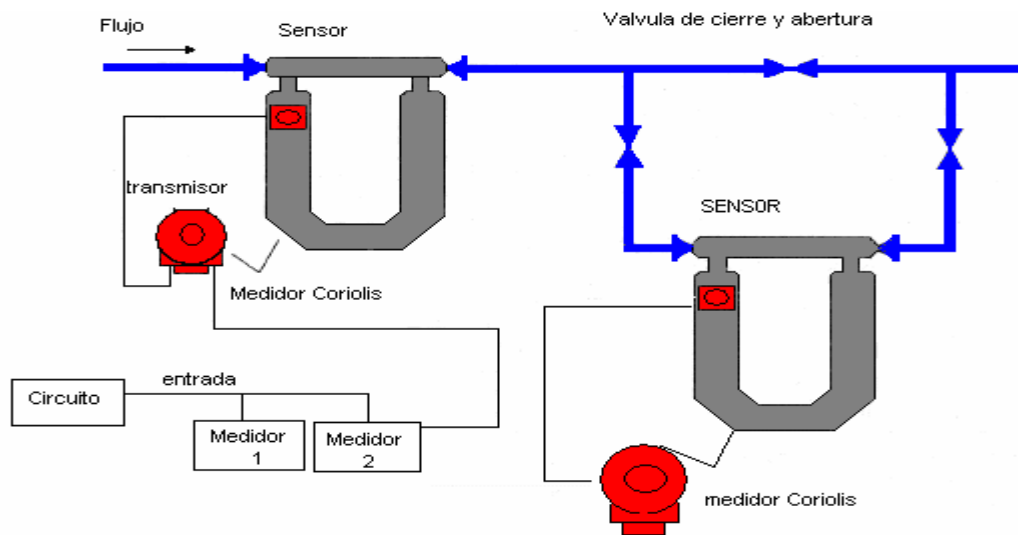
Existen datos y aprobaciones europeas, como mínimo de un fabricante, que muestra la transferibilidad de la calibración de agua con gas. NMI dio testimonio y certificación de la calibración con agua, por la facilidad que ofrece al fabricante de transferir la calibración con gas trazable a Pigsar en Alemania.

Los resultados de estos estudios se presentan en el apéndice j del AGA 11. En general los medidores Coriolis son dispositivos lineales. El factor de calibración es independiente del caudal.

2.5.1 Métodos de calibración de flujo. Entre los métodos más utilizados para realizar la calibración están los siguientes:

- Método con patrón de referencia. Se usa otro medidor como patrón, sometido a calibración en un laboratorio con trazabilidad (figura 21). Una vez documentada la calibración, este medidor patrón se instala en serie con el medidor en prueba, y se realizan una serie de mediciones simultaneas totalizando la cantidad de fluido que pasa a través de los medidores (patrón y en prueba) a diferentes caudales. Utilizando este método, pueden ejecutarse múltiples pruebas en un período de tiempo relativamente corto. Si hay medidores de diferentes tamaños y caudales en una instalación se requiere el uso de varios medidores patrones. Este método posee el beneficio de usar el mismo fluido de operación como medio de calibración.

Figura 21. Esquema del método con patrón de referencia

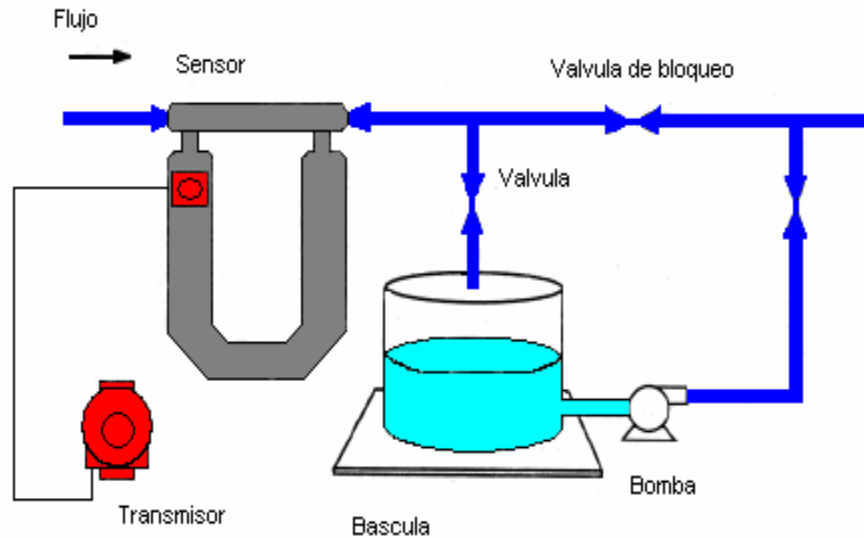


- Método Gravimétrico. Se requiere un recipiente estacionario o portátil con capacidad de pesaje (figura 22). Se pueden presentar errores de calibración por el uso de tramos de manguera flexible o por el tramo de tubería aguas abajo de la válvula. La válvula debe ser ubicada tan cerca como sea posible del tanque que se está llenando. La principal ventaja de este método es que puede realizarse una calibración de masa directa del sistema de medición. Una desventaja de este tipo de calibración es que puede ser muy grande y costoso diseñarlo, fabricarlo y mantenerlo. La calibración puede consumir demasiado tiempo.

El método gravimétrico consiste en llevar a cabo el llenado de un cilindro receptor cuya masa antes y después del llenado es registrada por una balanza. Al final, el total del gas (en unidades de volumen a condiciones base) suministrado por el surtidor indicado en una pantalla, debe corresponder el volumen calculado a partir de la masa indicada por la balanza, pudiendo ser calculado el error del medidor en términos relativos, tomando como referencia la balanza. Lo ideal al ejecutar una

calibración por el método gravimétrico es realizarla a diferentes condiciones de caudal-presión.

Figura 22. Esquema método gravimétrico



La calibración de dispensadores de gas natural vehicular (GNV) por método gravimétrico es ampliamente aplicada por la industria de medidores tipo Coriolis para pruebas en fábrica y en campo; este método ofrece una exactitud aceptable.

En algunas estaciones de servicio de gas natural vehicular en Colombia, la calibración se está haciendo cada 6 meses y para los medidores que vienen con equipos marca ASPRO y GALILEO se hace de la siguiente forma:

Se determina el factor “K” que corrige la lectura “V_{Is}” de volumen estándar dada por el medidor, a través de la ecuación:

$$V_s = K \cdot V_{Is}$$

Donde “V_s” es el volumen estándar de gas recogido en un tanque patrón, que se pueden calcular con la siguiente ecuación:

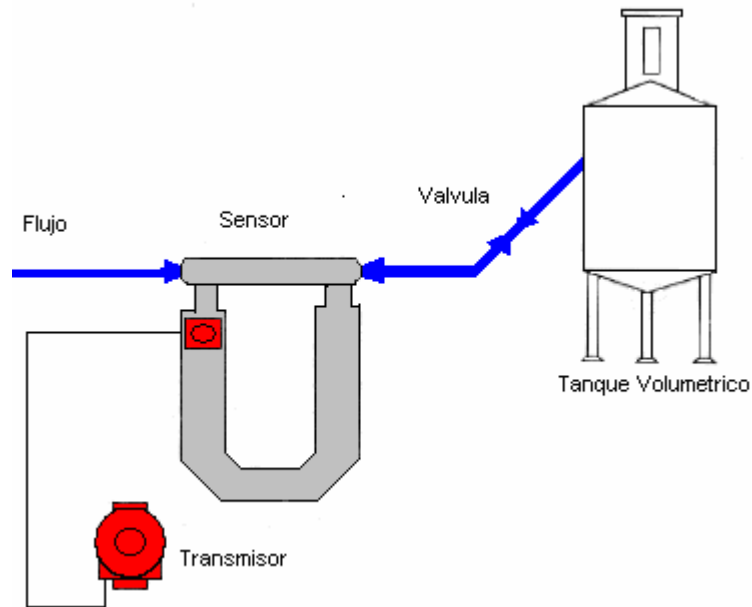
$$V_s = M / \rho$$

Donde “M” es la masa recogida en el tanque y que se puede medir, y “ρ” es la densidad estándar del gas natural que se ha obtenido de análisis cromatográfico.

El factor “k” siempre ha sido menor que 1 (uno) mientras la gravedad específica del gas no sea inferior a 0.7. Los valores de “K” han estado entre 0.96 y 0.98.

- Método volumétrico. Recientemente se están utilizando grandes volúmenes para realizar calibraciones de medidor másico sobre una base estándar de volumen (figura 23). Este método ha venido mostrando su validez y considerable eficiencia en la conducción de pruebas, particularmente en aplicaciones de tubería. Si el medio de calibración está suficientemente bien definido, tal como muchos productos refinados del petróleo o agua, esta calibración puede ser exactamente dirigida a una base de masa.

Figura 23. Esquema del método volumétrico



2.5.2 Periodos de recalibración. Por lo general la etapa de recalibración de los medidores Coriolis para gas natural se realiza teniendo en cuenta las mismas pautas para la recalibración de cualquier instrumento de medición.

Según AGA 11, los medidores Coriolis deben probarse varias veces en determinados periodos para asegurar su buena exactitud. El periodo de prueba debe determinarlo el operador y deberá realizar un profundo seguimiento de él. Algunos órganos reguladores definen intervalos específicos de recalibración. Se recomienda que cuando un medidor sea devuelto al fabricante para ser reparado, el operador debe considerar esto como una prueba de recalibración, para así tenerse un archivo del desempeño del medidor en el tiempo en el cual fue retirado del servicio.

Existen diversos factores que pueden influenciar en la determinación de la frecuencia de recalibración. Según Kazuto Kawaita⁴, los siguientes son los aspectos más relevantes a tener en cuenta en los intervalos de calibración:

- El tipo de instrumento y su principio de operación.
- Recomendación del fabricante.
- Severidad de las condiciones de uso.
- Condiciones ambientales de operación (temperatura, humedad, vibración).
- Punto de operación en relación al rango de operación nominal.
- Posibilidad de desgaste.
- Frecuencia de las calibraciones.
- Exactitud y confiabilidad esperada en la medición.

Por otro lado algunos factores considerados para la recalibración son:

- El tipo de instrumento y su principio de operación.
- La recomendación del fabricante del instrumento.
- Las condiciones de operación y la severidad de uso esperado.
- Las influencias de las condiciones ambientales.
- Exactitud y confiabilidad esperada de la medición.

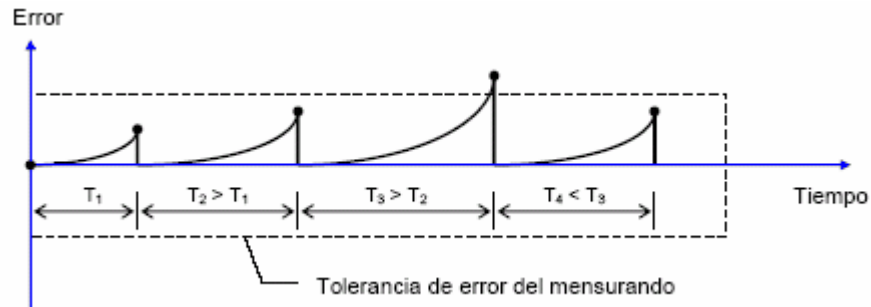
El método escogido dependerá de la implementación del plan de calibración del usuario. Existen algunos métodos para la evaluación del intervalo de recalibración y son los siguientes:

- Ajuste automático o escalera rodante (figura 24). La respuesta en la escalera rodante propicia un ajuste rápido de los intervalos de recalibración y puede implementarse fácilmente sin grandes esfuerzos. Cuando se mantiene y analizan los registros, es posible, incluso, identificar un problema incipiente indicando la necesidad de un ajuste. Una desventaja de este método es que trata los instrumentos de forma individual dificultando el trabajo de calibración. Cada vez

⁴ 3ª JORNADA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS CON Kazuto Kawakita, Instituto de Pesquitas Tecnológicas. Santafé de Bogotá.

que un instrumento es recalibrado el intervalo subsiguiente es extendido en caso de que se verifique que está dentro de la tolerancia.

Figura 24. Esquema del método de ajuste automático

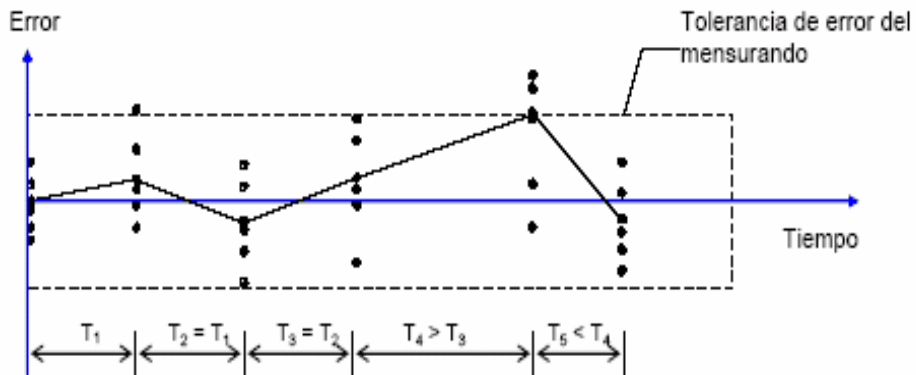


- Gráfico de control (Figura 25). Se escogen puntos de calibración representativos de las condiciones de operación de los instrumentos y los resultados son graficados en función del tiempo.

En la práctica, de este método es de difícil aplicación en el caso de instrumentos más complejos y prácticamente solo pueden utilizarse si hay disponible un procedimiento automático de datos. Para los cálculos de intervalos de recalibración, se requiere un conocimiento considerable de la ley de variabilidad.

Su ventaja principal es que los intervalos son confiables y permiten verificar la validez de los límites de errores posibles específicos.

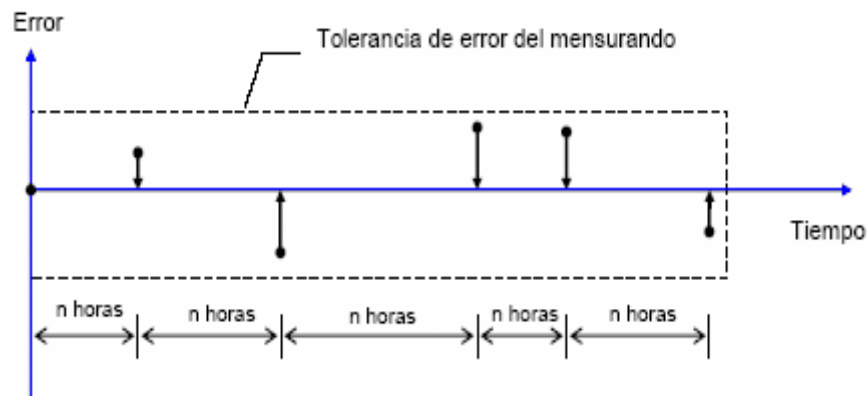
Figura 25. Esquema del método gráfico de control



- Tiempo efectivo de uso del instrumento (figura 26). En el intervalo de recalibración se expresan las horas de uso en lugar de un intervalo fijo en meses y

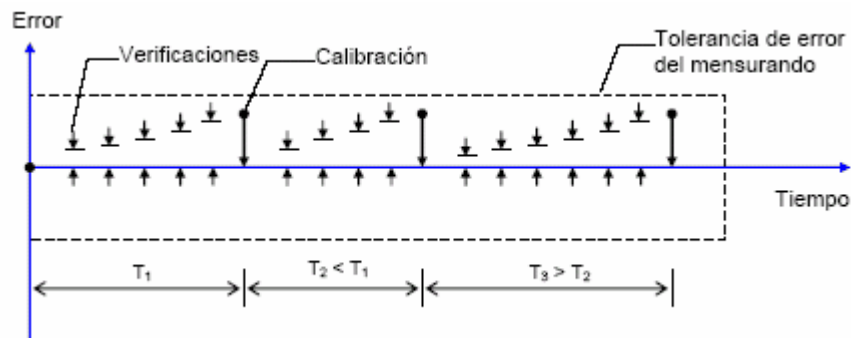
años. En este caso, el instrumento debe dotarse generalmente de un indicador de tiempo de operación o poseer un monitoreo externo, siendo enviado para la recalibración cuando el número de horas alcanza un determinado valor. La ventaja de este método, es que el número de calibraciones realizadas, así como los costos de calibración, varían directamente con el tiempo que el instrumento permanezca en uso. Pero también poseen algunas desventajas, como por ejemplo el costo inicial para instalar un controlador y la dificultad de reprogramar las recalibraciones ya que no se sabe cuando cumplirá su vida útil.

Figura 26. Esquema del método tiempo de utilización



- Verificación continua en servicio por medio de calibrador (figura 27). Es utilizado para sistemas de medición compleja. En este método los parámetros críticos son verificados con frecuencia por medio de un patrón o calibración portátil, especialmente construido para verificar los parámetros seleccionados. Ofrece una gran ventaja y es que proporciona una disponibilidad máxima del instrumento; las dificultades se encuentran en la definición de los parámetros críticos para el proceso. Pero sin embargo este método ofrece una alta confiabilidad.

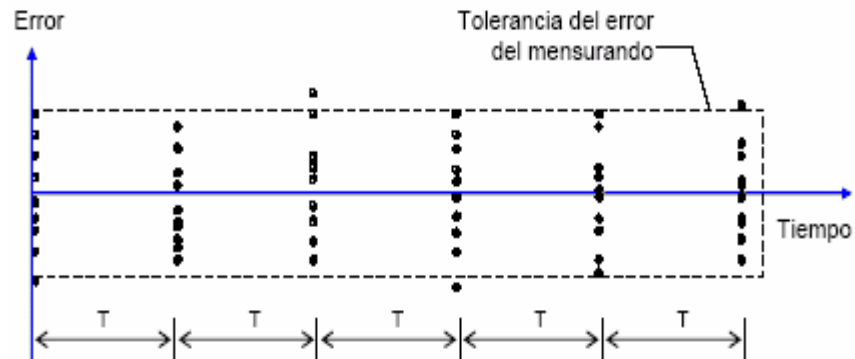
Figura 27. Esquema del método de la verificación continua.



- Tiempo calendario con abordaje estadístico (figura 28). En el proceso de calibración pueden existir varios instrumentos a ser calibrados, los intervalos

pueden revisarse con el apoyo de métodos estadísticos que definirán los intervalos de calibración según determinados niveles de confianza preestablecidos. La gran ventaja de este método es que los instrumentos son agrupados, facilitando su control, pero es necesario el conocimiento en herramientas estadísticas.

Figura 28. Esquema del método tiempo del calendario.



- Método de Schumacher. Los instrumentos son clasificados según las condiciones en que se encuentran. Algunas condiciones son: avería que perjudicará uno o más parámetros del instrumento y el estar fuera de tolerancia que significa que el instrumento no funciona bien. Con este tipo de información puede formarse un juicio con respecto al desempeño del instrumento. Por ejemplo, un instrumento que se encuentra en los niveles de tolerancia establecidos no necesita ser calibrado.

2.6 MANTENIMIENTO Y PRUEBA DE DESEMPEÑO DE CAMPO

Una larga vida útil de un medidor es una virtud en el sentido en que ella involucra un deterioro lento en su desempeño y confiabilidad. Por otro lado, la necesidad de un menor mantenimiento y la simplicidad en el diagnóstico del medidor, son parámetros muy importantes a tener en cuenta para las condiciones económicas actuales. Una de las mayores ventajas del medidor Coriolis es el bajo mantenimiento debido a no tener partes móviles.

El operador del medidor debe recurrir a los procedimientos del fabricante para proceder al mantenimiento de campo y a la prueba de verificación.

2.6.1 Mantenimiento de campo. El mantenimiento en campo de un sistema de medición con Coriolis consiste en el monitoreo y evaluación de las condiciones del medidor, en el diagnóstico del indicador de salida del transmisor y/o en el diagnóstico de dispositivos auxiliares del sistema de medición diseñados para identificar posibles cambios en el desempeño del sistema y sus causas. La

evaluación de estos indicadores orienta al operador en la determinación de la necesidad de ajustar el cero al medidor Coriolis, en ejecutar una prueba de verificación de desempeño, en ajustar los intervalos de mantenimiento y en la implementación de mejoras al diseño (si se requieren) para el sistema de medición.

Las revisiones más comunes de campo son las siguientes:

- **Verificación del cero en el medidor.** El cero del medidor debe verificarse, por primera vez, de una a cuatro semanas a partir de su instalación y después a periodos razonables de servicio en campo. La frecuencia de subsecuentes verificaciones del cero se debería guiar por el registro de datos de cero en el medidor y por el plan de acción del operador. El cero del medidor se debe ajustar si no cumple las especificaciones del fabricante. Si es necesario analizar incertidumbres debido a desviación del cero se puede recurrir a los apéndices H e I del AGA 11. la verificación del cero en el medidor deberá incluir los siguientes procedimientos:

- Asegurar que el medidor esté a temperatura y presión de operación, sin flujo.
- Verificar que el valor de cero del medidor indicado esté dentro de los límites especificados por el fabricante.
- Registrar el valor de cero del medidor, condiciones de medición, y condiciones ambientales.
- Evaluar el valor de cero indicado en el medidor con los históricos para identificar el desempeño a largo plazo del cero en el medidor y las influencias potenciales.
- Ajustar el cero del medidor y registrar el valor.

- **Verificación del sensor del medidor.** La verificación del sensor en un medidor es útil como una herramienta de diagnóstico, para monitorear los cambios y desempeño del medidor o condiciones de operación.

La capa de suciedad puede influir en el cero del medidor. Si la suciedad causa una desviación del valor cero, la limpieza y el ajuste del cero del medidor pudiesen darle buen desempeño, dentro de especificaciones.

Raramente la erosión o la corrosión podrían afectar permanentemente la calibración del medidor y comprometer la integridad del sensor. Cuando el medidor se usa con el fluido especificado y dentro de los límites de las condiciones ambientales, no es necesario realizar una inspección de la fatiga de los tubos sensores del medidor Coriolis, debido a la vibración durante el tiempo de vida establecido para el medidor, teniendo en cuenta que esto rara vez se presenta. La

operación del medidor en aplicaciones extremas de corrosión o erosión hará que el medidor tenga tiempo de vida corto.

- **Verificación del transmisor en el medidor.** La verificación del transmisor debería coincidir con la verificación del cero del medidor. Debería incluir los siguientes procedimientos:

- Verificación de la permanencia y exactitud de la calibración del sensor y los factores de corrección en la configuración del transmisor.

- Verificación del indicador de autodiagnóstico en el transmisor. Éste debe estar en el estado normal.

Los **LED** (diodo emisor de luz) de los **display** dan señales de operación de los elementos primarios y secundarios. Hay que ver los detalles en la documentación del fabricante acerca la descripción y diagnóstico de los elementos secundarios y procedimientos recomendados.

- **Revisión de la densidad.** La medición de la densidad de operación no deberá usarse para convertir la medida de flujo másico en medida de flujo volumétrico, sino como una herramienta de diagnóstico para monitorear cambios en el funcionamiento y condiciones de operación del medidor.

2.6.2 Prueba de desempeño de campo. La decisión para ejecutar la prueba de desempeño de campo (in-situ) o calibración de flujo, y la frecuencia con que se debe hacer se deja a consideración del operador.

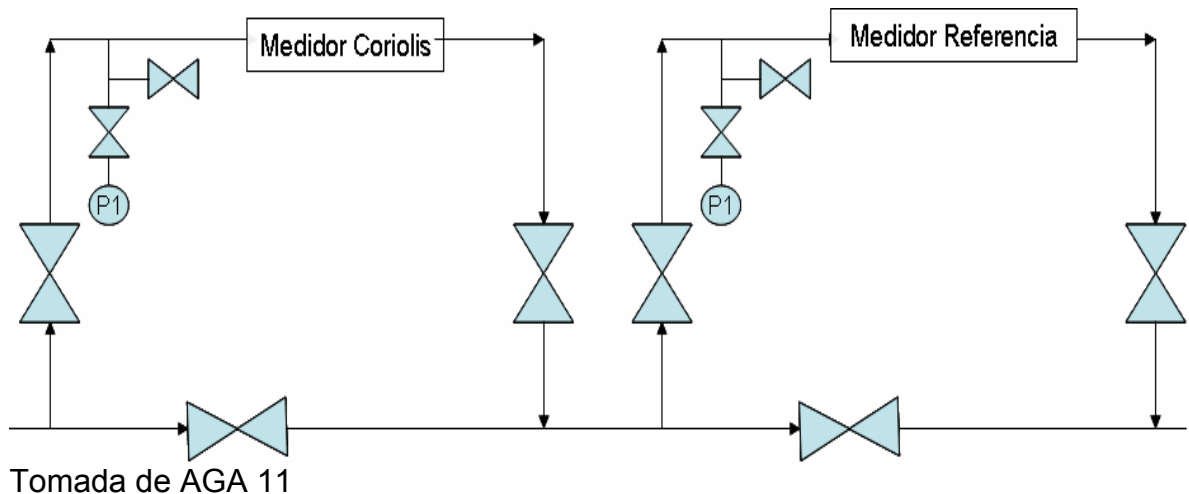
Una prueba de desempeño de campo verifica el desempeño del medidor a condiciones de operación de campo. Las condiciones de operación pueden afectar la exactitud y la repetibilidad del medidor. La prueba de desempeño de campo por lo general debería compensar estas influencias. Se requiere de un diseño específico para que el medidor Coriolis sea sensible a las influencias en las condiciones de operación. Las influencias más comunes que podrían afectar el desempeño de campo y que el operador debería tener en cuenta para su verificación son:

- Presión mecánica sobre el medidor.
- Variaciones del flujo.
- Configuraciones de tubería.
- Variaciones externas en presión y temperatura del fluido.
- Cambios de temperatura ambiente.
- Fase y composición del fluido.

Es importante para el operador y el diseñador establecer procedimientos para la prueba de desempeño del medidor previamente al diseño y la instalación del

sistema de medición en el campo. El sistema de tubería se debe diseñar de forma tal que sea de fácil acceso para que el operador pueda realizar la prueba de desempeño de campo. La figura 29 muestra un esquema del diseño que permite el acceso al módulo de medición para la realización de la prueba de desempeño de campo.

Figura 29. Configuración para la prueba de desempeño de campo



Cuando se utiliza un patrón de referencia para la realización de la prueba de desempeño de campo este debe ser trazable a un laboratorio de mediciones de reconocimiento nacional o internacional. La calibración del medidor de referencia debe realizarse a similares condiciones del medidor que se le va a realizar la prueba de desempeño de campo. En cualquier caso el medidor de referencia debe tener un límite de incertidumbre menor que el medidor de campo.

2.7 DIAGNÓSTICO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

El ambiente en que se encuentre un medidor de caudal es significativamente importante para el buen desempeño del mismo, por tal motivo el descuido o la imprudencia ante los factores de ambiente podrían generar problemas en el sistema de medición. Estos problemas pueden ser generados en el momento de operación del medidor.

Una variación brusca de temperatura muchas veces puede ser más nociva para un medidor que una temperatura alta o baja que se mantienen constantes. Los cambios en la temperatura ambiente pueden ocasionar efectos negativos tales como: alteraciones en la densidad o en la viscosidad del fluido, errores en calibración por transferencia de calor entre las paredes de la tubería y el ambiente,

alteraciones en los componentes eléctricos y electrónicos, daños que pueden ocurrir en componentes del medidor por la exposición sistemática tanto a altas como a bajas temperaturas y la posibilidad de condensación o de congelamiento de vapor de agua en las líneas de transmisión de presión. Estos efectos pueden evitarse instalando bandas eléctricas o camisas de vapor.

Cuando se tiene humedad se puede acelerar los procesos de corrosión atmosférica o electrolítica, y puede también dañar el aislamiento eléctrico del sistema de medición. Por otro lado, una humedad baja puede inducir a la presencia de electricidad estática. Aunque la humedad es un parámetro difícil de controlar, la causa de los problemas pueden ser alteraciones muy rápidas de la temperatura ambiente.

Las atmósferas hostiles son generalmente corrosivas debido a la presencia de SO_x, NO_x, compuestos Hidrógeno-Azufre o condiciones marinas. Esto puede originar corrosión en partes vitales de medidores de caudal, incluyendo contactos eléctricos, circuitos y componentes.

Los riesgos de fuego o explosión existen permanentemente, ocurren ocasionalmente, o solamente en caso de alguna eventualidad, entonces exclusivamente podrán utilizarse instrumentos certificados que deben ser intrínsecamente seguros o confinados en receptáculos a prueba de fuego.

Debido a que los medidores Coriolis poseen circuitos eléctricos o electrónicos, el desempeño puede verse afectado por campos eléctricos y magnéticos. Estos campos pueden generarse inadvertidamente debido a fuentes de iluminación, interferencia de las frecuencias de radio o también pueden tener como origen equipos eléctricos, inclusive cables de tensión. Cuando existe tal riesgo, es necesario instalar barreras de protección junto al medidor.

Los elementos primarios de medición son protegidos normalmente para soportar las condiciones climáticas externas, pero no siempre es el caso de los equipos secundarios. En la especificación del sistema de medición, este factor no puede pasarse por alto.

Algunos aspectos a considerar para el diagnóstico y solución de problemas son los siguientes:

Diagnóstico de problemas de cableado. Utilice los siguientes procedimientos para revisar la instalación del transmisor para detectar problemas de cableado.

- Revisión del cableado de la fuente de alimentación
- Revisión del cableado del sensor al transmisor
- Revisión de la tierra
- Revisión del lazo de comunicación HART

- Revisión de la interferencia de RF

Revisión del dispositivo receptor. Si usted recibe una lectura inexacta de frecuencia o de mA, podría estar utilizando un dispositivo receptor defectuoso. Utilice un dispositivo diferente para confirmar que la lectura de mA o de frecuencia que usted está recibiendo es exacta. Otro dispositivo receptor le ayudará a determinar si el problema existe en el dispositivo receptor o en el transmisor.

Ajuste de la dirección de sondeo. Si se establece la dirección de sondeo HART del transmisor a un número diferente de cero, la salida primaria de mA se fija a 4 mA. En esta situación la salida primaria de mA no reportará datos de la variable de proceso y no indicará condiciones de fallo. Si se establece la dirección de sondeo HART a cero, la salida primaria de mA reportará la variable primaria en una escala de 4–20 mA.

Revisión de la unidad de medición de caudal. El uso de una unidad de medición de caudal incorrecta puede ocasionar que el transmisor produzca niveles de salida no esperados, con efectos en el proceso no predecibles. Asegúrese de que la unidad de medición de caudal configurada sea correcta. Revise las abreviaciones; por ejemplo, g/min representa gramos por minuto, no galones por minuto.

Revisión del span de calibración. Una salida de mA saturada o una medición incorrecta de mA podría indicar que se ha configurado un valor incorrecto de 4 mA ó 20 mA para la salida de mA. Verifique que estos valores sean correctos y cámbielos si es necesario.

Revisión de la escala y del método de la salida de frecuencia. Una salida de frecuencia saturada o una medición de frecuencia incorrecta pueden ser debido a una escala y/o un método de la salida de frecuencia incorrecta. Verifique que la escala y método de la salida de frecuencia sean correctos y cámbielos si es necesario.

Revisión de la caracterización. Un transmisor que está caracterizado incorrectamente para su sensor podría producir valores de salida inexactos. Si el medidor de caudal parece estar operando correctamente pero envía valores de salida inexactos, la causa podría ser una caracterización incorrecta.

Revisión de la calibración. Una calibración inapropiada puede ocasionar que el transmisor envíe valores de salida no esperados. Si el transmisor parece estar operando correctamente pero envía valores de salida inexactos, la causa puede ser una calibración inadecuada.

Revisión de los puntos de prueba. Algunas alarmas de estado que indican un fallo del sensor o condición de sobrerango pueden ser causadas por problemas

diferentes a un sensor defectuoso. Usted puede diagnosticar el fallo del sensor o las alarmas de estado de sobrerango revisando los puntos de prueba del medidor de caudal.

Revisión del procesador central. Los procedimientos del procesador central están disponibles: usted puede revisar el LED del procesador central, el procesador central tiene un LED que indica diferentes condiciones del medidor de caudal. También puede realizar la prueba de resistencia del procesador central para revisar que éste no esté dañado.

Revisión del LED del procesador central. Para revisar el LED del procesador central:

- Mantenga el transmisor energizado.
- Quite la tapa del procesador central. No desconecte el cable de 4 hilos entre el procesador central y el transmisor.
- Revise el LED del procesador central con respecto a las condiciones descritas por el fabricante.
- Para regresar a operación normal, vuelva a colocar la tapa.

Prueba de resistencia del procesador central. Para realizar la prueba de resistencia del procesador central:

- Quite la tapa del procesador central.
- Desconecte el cable de 4 hilos entre el procesador central y el transmisor.
- Mida la resistencia entre los terminales 3 y 4 (RS-485A y RS-485B) del procesador central. La resistencia debe ser de 40 k Ω a 50 k Ω .
- Mida la resistencia entre los terminales 2 y 3 (VCD- y RS-485A) del procesador central. La resistencia debe ser de 20 k Ω a 25 k Ω .
- Mida la resistencia entre los terminales 2 y 4 (VCD- y RS-485B) del procesador central. La resistencia debe ser de 20 k Ω a 25 k Ω .
- Si cualquiera de las mediciones de resistencia son menores que las especificadas, es posible que el procesador central no se pueda comunicar con un transmisor o con un host remoto.

Revisión de las bobinas y del RTD del sensor. Los problemas con las bobinas del sensor pueden ocasionar varias alarmas, incluyendo fallo del sensor y varias

condiciones de fuera de rango. La prueba de las bobinas del sensor incluye la prueba de pares de terminal y la prueba para detectar cortos con la caja del sensor.

Algunos fabricantes de medidores Coriolis para gas natural, adicionalmente prestan servicio al cliente, exponiendo sus manuales de diagnóstico y solución de problemas. Como ejemplo de lo anteriormente dicho, las tablas 2 y 3 expresan los síntomas, causas y posibles soluciones de los problemas de procesos y de salida de miliamperios

Se sugiere que el usuario haga un registro de las variables de proceso bajo condiciones normales de operación. Esto con el fin de ayudarlo a reconocer cuándo las variables de proceso sean más altas o bajas de lo normal. Las características **fingerprinting** (huella digital) del medidor se puede utilizar para registrar los niveles actuales de doce variables de proceso.

Para la solución de problemas, hay que revisar las variables de proceso tanto bajo condiciones normales de caudal como con los tubos llenos pero sin flujo. A excepción de la variable caudal, se debe ver poco o nada de cambio entre las condiciones con flujo y sin flujo. Si se denota una diferencia grande, registre los valores y contacte al departamento de servicio al cliente, de su correspondiente fabricante.

Tabla 2. Problemas y soluciones de variables de proceso

SÍNTOMA	CAUSA	POSIBLE SOLUCIÓN
Caudal diferente de cero estable bajo condiciones sin flujo.	Tubería mal alineada.	Corrija la tubería.
	Válvula abierta o con fuga.	Revise o corrija el mecanismo de la válvula.
	Ajuste del cero del sensor incorrecto.	Vuelva a ajustar el cero del medidor de caudal.
	Unidad de medición inadecuada.	Revise la configuración.
	Cutoff (valor de corte) demasiado bajo.	Revise la configuración.
	Factor de calibración de caudal incorrecto.	Verifique la caracterización.
Caudal diferente de cero errático bajo condiciones sin flujo.	Interferencia de RF.	Revise que no haya interferencia de RF en el medio ambiente.
	Cable de 9 hilos puesto a tierra incorrectamente.	Verifique la instalación del cable de 9 hilos.
	Vibración en la tubería a un caudal cercano a la frecuencia de los tubos del sensor.	Revise el medio ambiente y quite la fuente de vibración.
	Válvula o sello con fuga.	Revise la tubería.
	Unidad de medición inadecuada.	Revise la configuración.

	Valor de amortiguamiento inadecuado.	Revise la configuración.
	Cross-talk en el sensor (transferencia de vibración resonante de un sensor a otro).	Revise que no haya un sensor con frecuencia de tubos similar a un dispositivo en el medio ambiente (± 0.5 Hz).
Lectura de temperatura muy diferente de la temperatura del proceso.	Fallo del RTD.	Revise si hay condiciones de alarma y siga el procedimiento de solución de problemas para la alarma indicada. Verifique la configuración de sondeo e inhabilite el sondeo para temperatura si es adecuado.
	Problemas con el cableado del sensor	Revise el cableado al sensor.
Lectura de temperatura un poco diferente de la temperatura del proceso.	Se requiere calibración de temperatura.	Realice la calibración de temperatura.
	Conexiones flojas en el cableado del sensor.	Revise el cableado del sensor.
	Corrosión en los tubos de caudal.	Purgue los tubos de caudal.
Lectura de densidad más alta de lo normal.	Tubo de caudal obstruido, parcialmente lleno o recubierto.	Revise la ganancia de la bobina drive y la frecuencia de los tubos.
	Valor de K2 incorrecto.	Verifique la caracterización.
	Slug flow.	Revise la alarma de slug flow.
	Valor de K2 incorrecto.	Verifique la caracterización.
	Erosión del sensor.	Contacte al fabricante.
Frecuencia del tubo más alta de lo normal.	Erosión del sensor.	Contacte al fabricante.
	Tubo de caudal obstruido, parcialmente lleno o recubierto.	Revise la ganancia de la bobina drive y la frecuencia del tubo. Purgue los tubos de caudal.

Tabla 3. Problemas y soluciones de salida de miliamperios.

SÍNTOMA	CAUSA	POSIBLE SOLUCIÓN
No hay salida de mA y no hay salida de frecuencia o la prueba de lazo falló.	Problema con la fuente de alimentación.	Revise la fuente de alimentación y su cableado.
	La condición de fallo estará presente si los indicadores de fallo se establecen a escala baja interna del cero.	Revise los ajustes del indicador de fallo para verificar si el transmisor está o no en una condición de fallo.
Salida de mA < 4 mA	Condición del proceso abajo del valor configurado para 4 mA.	Verifique el proceso. Verifique o cambie el valor de 4 mA.
	Condición de fallo si se ajusta en indicador de fallo a cero interno.	Revise los ajustes del indicador de fallo para verificar si transmisor está o no en una condición de fallo. Si está presente una condición de fallo, revise el registro de alarmas activas.

	Cableado abierto.	Verifique todas las conexiones.
	Dispositivo receptor de mA defectuoso.	Revise el dispositivo receptor de mA o intente con otro dispositivo receptor de mA.
	Circuito de salida defectuoso.	Revise el dispositivo receptor de mA o intente con otro dispositivo receptor de mA.
No hay salida de frecuencia	Condición del proceso abajo del cutoff.	Verifique o cambie el cutoff.
	Condición de fallo si se ajusta el indicador de fallo downscale a cero interno.	Revise los ajustes del indicador de fallo para verificar si el transmisor está o no en una condición de fallo. Si está presente una condición de fallo, revise el registro de alarmas activas.
	Slug flow.	Revise la alarma.
	Caudal de dirección inversa respecto al parámetro configurado para dirección de caudal.	Verifique el proceso. Revise el parámetro de dirección de caudal. Verifique la orientación del sensor. Asegúrese de que la flecha de dirección de caudal ubicada en la caja del sensor concuerde con el caudal de proceso.
	Dispositivo receptor de frecuencia defectuoso.	Revise el dispositivo receptor de frecuencia o intente con otro dispositivo receptor de frecuencia.
	Nivel de salida no compatible con el dispositivo receptor.	Verifique que el nivel de salida y el nivel requerido de la entrada receptora sean compatibles.
	Circuito de salida defectuoso.	Pruebe la salida.
	Configuración incorrecta para ancho de pulso.	Verifique el ancho de pulso.

3. ANÁLISIS DEL ESTADO TECNOLÓGICO DEL MEDIDOR CORIOLIS

En el presente capítulo se pretende realizar un análisis de la tecnología del medidor de flujo másico tipo Coriolis para gas natural, teniendo en cuenta aspectos generales como: penetración en el mercado nacional e internacional, factores que intervienen en la exactitud del medidor y el principio de funcionamiento; aspectos comparativos y aspectos técnicos.

3.1 GENERALIDADES

La tecnología del medidor Coriolis surge para dar medición al caudal másico directamente y esto es una de las ventajas que presenta este tipo de medidor, ya que así se evita las consideraciones de otras variables como presión, temperatura, viscosidad y densidad como actuantes directamente en la medición de la masa de fluido. Esto no quiere decir que las mencionadas variables no incidan de una u otra forma en la medición, como se detallará más adelante.

No se puede negar que el medidor Coriolis es complejo y que ha requerido una avanzada tecnología para su aplicación, desde su fabricación de la parte física hasta la implementación de su parte electrónica; no cualquier fabricante llega a tener un resultado de exactitud en la fabricación de este medidor. Existen Coriolis de alto costo como también de costos intermedios, siendo la diferencia la confiabilidad ofrecida por el grado de desarrollo tecnológico.

Para aplicaciones en gas natural el medidor Coriolis ha tenido significativo desarrollo, y lo más posible es que la reciente publicación de noviembre de 2003, del reporte N° 11 de la Asociación Americana del Gas (AGA), incidirá en un gran crecimiento de este medidor.

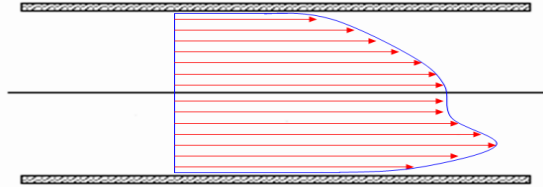
El desarrollo que ha tenido el medidor Coriolis ha sido en gran parte debido a las ventajas presentadas, tales como exactitud, fiabilidad, relativo bajo costo y en general facilidad de aplicación.

La exactitud del medidor Coriolis es un aspecto que lo hace atractivo, ya que alcanza buenos niveles expresados por incertidumbres alrededor del 0.5%. Esto los hace ideales para la transferencia de custodia y otros usos industriales que requieren de adecuada exactitud. La mayoría de las instalaciones en transferencia de custodia no deben exceder de 1% en la exactitud. Hay algunos aspectos que contribuyen con la baja incertidumbre del Coriolis como son:

- La poca influencia de la distorsión del perfil de velocidades (ver figura 30), contrario a los medidores por diferencial de presión y los medidores tipo turbina.

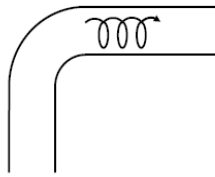
Hay que agregar que los errores ocasionados por la distorsión del perfil de velocidades son de difícil detección y cuantificación.

Figura 30. Perfil de velocidades distorsionado

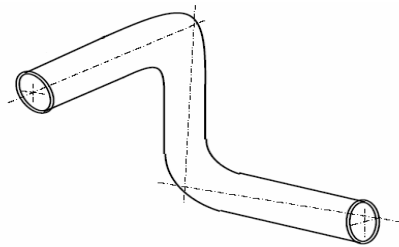


- La poca influencia de la rotación producida por las curvas, los codos, las válvulas, entre otros (figura 31); y el remolino (swirl) producido por dos curvas subsecuentes posesionadas en planos diferentes aguas arriba del medidor de caudal (figura 32).

Figura 31. Esquema de los efectos de rotación y desplazamiento



-Figura 32. Esquema de flujo helicoidal



- La viscosidad es influyente en el número de Reynolds y éste a su vez influye en los aspectos mencionados anteriormente de perfil de velocidades, rotación y remolino; de lo cual se puede concluir que la viscosidad es una variable que poco interviene en la exactitud del medidor Coriolis.
- La presión y la temperatura de operación no inciden directamente en la medición de caudal, ya que lo que se está midiendo en primera instancia es la masa y no el volumen. La temperatura se debe medir no con el fin de tener en cuenta su afectación al flujo, sino para corregir la constante de rigidez del tubo y de esta forma disminuir la incertidumbre de medición, debido a este motivo.

- Por no tener partes intrusivas ni móviles no hay desgastes, que con el tiempo provoquen fuentes de error.

Además de la adecuada exactitud debido a los aspectos mencionados anteriormente, se tiene una alta fiabilidad del medidor Coriolis, que debido a no tener partes que se desgasten, casi no requiere de mantenimiento rutinario, aspecto que alarga la vida útil del medidor. El medidor Coriolis prácticamente puede medir el flujo de cualquier sustancia, así sea corrosiva, debido a que las partes en contacto con el fluido se dejan construir de materiales adecuados correspondientes al tipo de flujo.

El alto alcance de medición (mal llamado rango de caudales de mínimo a máximo) se logra por la baja pérdida de presión a caudal máximo, ya que no existe restricción de orificio ni partes móviles.

Un aspecto del avance de la tecnología Coriolis se ve reflejado en la medición de flujo bifásico, la cual ha sido bastante discutida en congresos, pero que en la actualidad, a través de prueba de desempeño, se están viendo los resultados de incremento de exactitud.

La industria del gas natural comprimido (CNG) se ha desarrollado en gran parte por el uso del gas para aplicaciones en vehículos, debido a menores niveles de contaminación presentados en la combustión. La ventaja del medidor Coriolis sobre los demás medidores, para ser usado en CNG, es que mide directamente el caudal másico, no incidiendo para su exactitud las variaciones de presiones dadas cuando se hace la carga de gas natural en los tanques vehiculares.

Según el pronóstico quinquenal desde el año 2003 al año 2008, realizado por el grupo de investigación ARCO, el medidor Coriolis tendrá un incremento del 53 % en su producción. Esto obedece a la gran prospectiva que presentan estos tipos de medidores para gas natural, debido a los resultados de exactitud y versatilidad que han obtenido; además del reconocimiento que ha hecho la Asociación Americana del Gas (AGA) a los medidores Coriolis a través de la publicación del reporte AGA N° 11.

Según pronósticos, para el año 2015, la cadena productiva de gas en Colombia será competitiva en el entorno nacional e internacional, fruto de la existencia de reservas y de la consolidación de un tejido social que facilita la generación y aplicación de conocimientos en los negocios actuales y en la diversificación de los usos del gas; como ejemplo sobresaliente de esto, se tiene la política de masificación del gas natural vehicular. Acorde a lo anteriormente mencionado, lo más posible es que se vaya a incrementar el uso del medidor Coriolis en Colombia, lo que conllevaría, aun más, a una adecuada implementación de esta tecnología.

El contenido del reporte AGA N° 11 está bien fundamentado en las especificaciones del medidor Coriolis para gas natural, y con razón, ya que fue el resultado de la contribución que hicieron los usuarios del gas, fabricantes, organizaciones de investigación en medición de flujo y consultores independientes. Es y será gran apoyo para la adecuada aplicación del medidor Coriolis y para su continuo desarrollo. Solo hay que hacer algunas observaciones de forma y de carácter didáctico, en cuanto a la estructuración del contenido y la redacción de algunos apartes.

- Principio de funcionamiento. No hay duda que el hombre en el desarrollo tecnológico aplica principios de las ciencias, aun aquellos que nunca se imaginó en qué iban a ser aplicados. Coriolis no se imaginaría que el principio de la aceleración que lleva su nombre, trascendiera más allá de una aplicación mecánica en cuanto al movimiento de los cuerpos.

De un medidor de flujo, lo primero que se debe conocer es su principio de funcionamiento, para así saber cuales son los parámetros que intervienen en los resultados de la medición y para analizar aquellos factores que pueden influir en dichos parámetros. De esta forma se pueden tomar las precauciones necesarias; por ejemplo, en el medidor Coriolis se debe atender a una precisa medición del desfase de tiempo en el movimiento del tubo sensor; se debe atender también a factores que influyen en la constante de rigidez del tubo, como pueden ser la temperatura, la presión, las fuerzas descompensadas en la instalación, entre otros.

La deflexión ocasionada por el flujo sobre el tubo es muy pequeña y por lo tanto también los tiempos tomados por el sensor, en microsegundos. Lo que significa que el desarrollo tecnológico de este medidor no hubiera progresado sin la presencia de los avances electrónicos ni de los avances en los procesos de fabricación para un tubo homogéneo en el material y preciso en sus dimensiones. Concordante con esto, se prefiere tener más masa y/o más velocidad del fluido dentro de los tubos del sensor, hasta cierto límite, para que haya más deflexión y así hacer una medición más exacta. Esto último se logra aumentando la densidad del fluido o sacrificando caídas de presión para pasar el flujo a más velocidad.

La tecnología Coriolis diseña medidores con alta frecuencia de oscilación, para evitar incrementos de incertidumbres causadas por las posibles vibraciones en la tubería.

Gracias al principio de medición de Coriolis, se puede expresar la medición directamente del flujo másico y no del caudal volumétrico, lo que conlleva a disminuir incrementos de incertidumbres por las influencias de otros factores tales como presión, temperatura y perfiles de flujo.

3.2 CONVERSIÓN DE CAUDAL MÁSIKO A CAUDAL VOLUMÉTRICO

La medición del flujo másico realizada con el medidor Coriolis se da con aceptable exactitud, debido al desarrollo que ha tenido la tecnología en la aplicación del principio de Coriolis en la medición.

Es una verdadera lástima que las mediciones de flujo se expresen en caudal volumétrico estandarizado y no en caudal másico, para que de esta forma se pudiera totalizar la masa independientemente de la composición y condiciones del gas. Esto hace que se tenga que convertir la medición de caudal másico en caudal volumétrico, perdiéndose así el atractivo en cuanto a la exactitud que tiene el medidor Coriolis para medir directamente el caudal másico.

Para convertir la medida del caudal másico a caudal volumétrico hay que aplicar la siguiente ecuación:

$$q_v = q_m / \rho_b$$

Donde 'q_v' es el caudal volumétrico, 'q_m' es el caudal másico y 'ρ_b' es la densidad del gas natural a condiciones estándar. Por lo tanto la densidad estándar del fluido debe ser una variable a medir, para poder hacerse la anterior conversión.

Para seguir conservando el grado de exactitud con el cual se iba realizando la medición de flujo hasta el momento de la medición de caudal másico, se debe tomar con exactitud el valor correspondiente de la densidad del gas natural. De no ser así, los resultados de caudal volumétrico y de volumen total, suministrados por el medidor Coriolis serán de poca confiabilidad.

La mayoría de los medidores Coriolis para gas natural no miden la variable densidad, por lo que se hace necesario suministrar su valor a la tarjeta procesadora. El valor de la densidad ha sido previamente obtenido con análisis cromatográfico, con un densímetro o con un medidor de gravedad específica. Un medidor Coriolis de este tipo es el que se encuentra en los equipos surtidores de gas natural marca GALILEO.

La composición del gas natural para un determinado uso no es constante, debido a los cambios en las fuentes de suministro, como por ejemplo, que provenga de una planta mezcladora de dos corrientes de gas natural de composiciones diferentes. Esto conlleva a tener que ajustar el valor de la densidad estándar siempre que haya cambiado su valor, situación que incrementa el costo y la facilidad de operación de la medición de flujo.

Solartron-Mobrey con más de 60 años de experiencia en la medición de densidad, ha logrado introducir al mercado medidores de densidad y gravedad específica de gas natural para transferencia de custodia y para usos industriales. Algunas

referencias de estos medidores son el 7812 y el 3098, los cuales cumplen las normas ISO 5167 y AGA 3.

La tecnología de medición de densidad se fundamenta en el principio de relacionar la frecuencia de vibración del tubo sensor con la masa del fluido contenido en éste. La densidad de un gas es más difícil de obtener que la de un líquido, ya que la masa del gas contenida en el tubo sensor es mucho menor que la del líquido y por lo tanto se incrementa el error de la medición. Por tal motivo la tecnología mencionada tendrá que seguir desarrollando equipos más sensibles en la medición de densidad.

Debido a lo anteriormente dicho, medir la densidad del gas natural con el mismo medidor Coriolis, implicaría un diseño más desarrollado del medidor y por lo tanto más costoso. Para algunas aplicaciones, medir densidad con el medidor Coriolis se hace más difícil y los costos del medidor se saldrían del alcance del mercado; por ejemplo, en aplicaciones con densidades relativas bajas en la corriente de gas, los medidores Coriolis pueden tener una limitante para realizar mediciones exactas de densidad, en líneas de presión inferiores a 5 bar (72.5 psig).

Algunos fabricantes de medidores Coriolis tales como Micro Motion y Solartron-Mobrey están diseñando medidores Coriolis con medición de densidad del gas natural. Aunque algunos institutos como el IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Brasil), expresan haber obtenidos resultados con aceptable exactitud en la medición de la densidad con el medidor Coriolis de Micro Motion, la tecnología de esta medición aun se sigue probando y desarrollando.

3.3 COMPARACIÓN CON OTROS MEDIDORES

Todo medidor de flujo presenta ventajas y desventajas que se deben tener en cuenta en un análisis comparativo, de tal forma que se obtengan pautas de elección para una aplicación específica. A continuación se expresarán algunos aspectos de los medidores, a través de los cuales se pueden hacer correspondientes comparaciones entre el medidor Coriolis con algunos otros.

- **Tamaños.** En cuanto a diversidad en tamaños salen aventajados los medidores de presión diferencial, los magnéticos y los de turbina, que abarcan un rango de tamaños de $\frac{1}{4}$ pg – 30 pg. El medidor Coriolis tiene tamaños desde $\frac{1}{8}$ pg hasta 6 pg.

- **Exactitud.** Esta es una característica distinguida en los medidores Coriolis, que se expresa a través de una incertidumbre alrededor del 0.5%. El medidor ultrasónico presenta incertidumbres hasta del 0.3%. El medidor de presión diferencial, y específicamente el de placa de orificio, tiene una alta incertidumbre, entre 0.8% y 1%; los usuarios de Colombia creen que por este motivo y con la aparición de los medidores ultrasónicos y de Coriolis, el medidor de placa de orificio ha quedado obsoleto y que hay que dar paso a las nuevas tecnologías;

pero no es así, ya que el medidor de placa de orificio tiene sus ventajas en lo simple y económico, y más bien se le está trabajando mucho en el mejoramiento de su exactitud.

- Repetibilidad. Esta cualidad es sobresaliente en los medidores Coriolis y en los de turbina; los de Coriolis tienen repetibilidad del orden de 0.05%, los de tipo turbina, que son utilizados como patrón, tienen excelente repetibilidad, de hasta $\pm 0.02\%$ y los de uso industrial hasta $\pm 0.25\%$. La repetibilidad de un ultrasónico es de $\pm 0.2\%$ para caudales desde transición a máximo y de $\pm 0.4\%$ para caudales desde mínimo a transición.
- Caída de presión. Es de destacar que la caída de presión en los medidores Coriolis, ultrasónicos, magnéticos y de vórtice, es baja, debido a que no tienen partes móviles ni son intrusivos. El medidor de turbina aunque es intrusivo presenta baja caída de presión; por ejemplo, para turbinas de 2 pg a máximo caudal es del orden de 0.5 KPa y para las de 24 pg de hasta 1.5 KPa. El medidor de placa de orificio, sí tiene una alta caída de presión, estando entre el 50% y el 90% de la diferencia de presión causada como variable para inferir la medición de caudal.
- Requerimiento de mantenimiento. Aquellos medidores que no son intrusivos, y mejor aún, que no tienen partes móviles, requieren un mínimo de mantenimiento, tal como el medidor Coriolis; esto es otra gran ventaja que posee sobre los demás medidores y así lo han expresado los usuarios. El medidor de placa de orificio es de fácil ejecución de mantenimiento, dado que presentan dos cámaras o compartimentos para el reemplazo del orificio. Este medidor, por ser intrusivo, el coeficiente de descarga sufre cambios graduales debido al desgaste en los bordes afilados de la placa. Los medidores de desplazamiento positivo son de alto mantenimiento, así como los de turbina, por tener partes móviles.
- Dirección del flujo. Los medidores Coriolis y ultrasónico aventajan también a los otros medidores porque permiten la medición en ambos sentidos del flujo.
- Caudal volumétrico o caudal másico. De los medidores que se están comparando, el Coriolis es el único que mide directamente flujo másico, lo cual es conveniente porque el valor de caudal másico se puede convertir en caudal volumétrico, sin necesidad de medir presión y temperatura del proceso.
- Alcance de medición. Los medidores Coriolis tienen alcance de medición de 100:1 con exactitud aceptable, pero lo más común es del orden de 25:1 para mayor exactitud. Los ultrasónicos tienen también alto alcance de medición de 50:1 o más, debido a su baja caída de presión. El medidor de turbina mide desde 0.02 m³/h a 25500 m³/h, y las relaciones máximo/mínimo más comunes se hallan entre 10:1 y 100:1.

- Perfil del flujo. Para los medidores Coriolis prácticamente el perfil de flujo no es una variable que incida en la exactitud de la medición del flujo másico, ya que no se está infiriendo una velocidad del flujo, como para acondicionar a que el perfil de velocidades a través del medidor tenga una determinada característica exigente. Esto sí ocurre para los medidores de platina de orificio, de ultrasonido, de vórtice, magnético, entre otros, que necesitan de rectificadores de flujo cuando éste es distorsionado.

La incertidumbre de un medidor es el resultado de las influencias de los factores que intervienen en la medición. Para el medidor Coriolis, a algunos de estos factores, tales como: presión, temperatura, perfil de velocidades del flujo, intrusión, partes móviles, se les ha reducido su efecto. Es por ello, que de la anterior comparación se puede deducir el porqué de la aceptable exactitud del medidor Coriolis, cuando mide flujo másico.

3.4 ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS TÉCNICOS DEL MEDIDOR CORIOLIS

En esta sección se analizará cómo se encuentra la tecnología del medidor de flujo másico Coriolis, en cuanto a los aspectos técnicos y su correspondiente información a la que pueda acceder un usuario, para dar mejor uso al medidor. Se tendrán en cuenta los aspectos de selección, de condiciones de operación, requisitos, instalación, calibración, operación, mantenimiento y los problemas presentados.

- Condiciones de operación y requisitos del medidor. Es muy conveniente tener en cuenta las condiciones de operación especificadas y los requisitos dados por el fabricante, quien sabe las características de diseño del medidor, necesarias para un buen desempeño y un menor deterioro. Teniéndose en cuenta las condiciones de operación se comienza a asegurar la adecuada selección del medidor Coriolis para garantizar su eficiente funcionalidad. En caso de no ser así, se van a presentar falencias, juzgándose de esta manera a la tecnología del medidor Coriolis.

La exigencia que la Asociación Americana del Gas hace con respecto de los requisitos del medidor Coriolis, hará que el fabricante cumpla una meta de calidad, reflejada en el buen servicio prestado y en los resultados de la medición con Coriolis. Es por ello que se expresa, que esta Asociación ha contribuido con el avance de otros medidores de caudal, como el de turbina y el ultrasónico. El usuario será un gran beneficiado con las aplicaciones que haga en cuanto a las condiciones de operación y requisitos, pero para lograrlo debe estar bien documentado y al tanto de las publicaciones de los fabricantes.

La información existente referente a condiciones de operación es adecuada, ya que está bien fundamentada en principios físicos. Por ejemplo, la presión máxima de operación está relacionada con la resistencia de los materiales, mientras que la

presión mínima se fundamenta en las ecuaciones del gas real y de flujo másico, así:

$$\rho = P.M / R.Z.T$$

$$W = V.A. \rho$$

Donde: 'ρ' es la densidad del gas, 'P' es la presión, 'M' es la masa molecular del gas, 'Z' es el factor de compresibilidad, 'T' es la temperatura, 'W' es el flujo másico y 'A' es el área del tubo del medidor. En las ecuaciones anteriores se puede ver la importancia de tener una presión mínima de tal forma que la densidad sea suficientemente alta; esto con el fin de que al transportar un flujo másico determinado, la velocidad del gas adquiera un valor que no conlleve a elevadas caídas de presión.

Aunque, para la tecnología Coriolis, la configuración de la tubería aguas arriba y los perfiles de flujos no son tan influyentes en el desempeño del medidor Coriolis, se deben evitar los perfiles distorsionados, si se puede lograr fácil y económicamente; en caso contrario el usuario debe recurrir al fabricante para que evalúe los efectos del perfil de flujo sobre la exactitud del medidor.

- Selección. Es otro aspecto importante a tener en cuenta en los medidores Coriolis, ya que la inversión realizada es alta y por otro lado hay que garantizar la buena exactitud del medidor, así como su funcionalidad de la forma más eficiente. Existe literatura sobre la selección del medidor Coriolis que se puede obtener en el reporte AGA 11, en información dada por el fabricante o en general, en escritos específicos y genéricos como resultados de congresos y estudios hechos. Esta literatura expone los criterios a tener en cuenta en la selección de un medidor Coriolis, dando breve explicación que debe ser entendida por un profesional que posea fundamentos en los temas de flujos y medición de caudal. Cabe destacar la importancia del criterio y la experiencia del usuario, como también la capacitación que pueda obtener, para dar adecuada aplicación a la selección del medidor coriolis.
- Instalación. Existe información acerca de la instalación del medidor Coriolis dada por el reporte AGA N° 11 y por fabricantes, cuyo fin es la protección y el buen desempeño del medidor. Por otro lado, las consideraciones para la instalación surgen también de las experimentaciones realizadas y de evaluación de los problemas surgidos debidos a una inadecuada instalación.

Cuando no se tienen en cuenta los procedimientos de instalación, se sacrifica la exactitud y la integridad física del medidor. Como ejemplo de esto, existen evidencias en el departamento de Santander (Colombia) de la inoperabilidad del medidor Coriolis debido a inadecuadas instalaciones realizadas, tales como: orientación del tubo del sensor con la "U" al contrario de lo sugerido, dando como

resultado altos errores en la medición; y la falta de puesta a tierra del sistema eléctrico, ocasionando daño en la tarjeta electrónica del sensor.

- Calibración. Existe la necesidad de calibrar cualquier tipo de medidor, entre ellos el Coriolis, para verificar si las mediciones que se están realizando son las indicadas dentro de un rango de aceptación.

Algunos fabricantes expresan que el medidor Coriolis no necesita calibrarse, ya que viene calibrado de fábrica, sin embargo esto parece más bien una expresión publicitaria, que aventaja al medidor Coriolis, y no una realidad válida para toda circunstancia. Si se sabe que un vehículo automotor es ajustado para que opere a determinadas condiciones climáticas, similarmente se podría pensar, que un medidor Coriolis debe calibrarse con reales condiciones de operación para verificar la calibración inicial de fábrica, para así tener pautas o referencias de las incidencias de diferentes factores de operación sobre el desempeño del medidor.

Teniendo en cuenta la sensibilidad del medidor a las condiciones de operación, el usuario está en su derecho de dudar si la calibración dada por el fabricante es adecuada. Es necesario que el fabricante dé información acerca de los resultados de calibración, para que así se tenga una referencia de la exactitud del medidor y se empiece a archivar su historia.

Para poder cuantificar las variaciones en la medición de flujo, causadas por los cambios en las condiciones de operación y dependiendo del diseño mismo del medidor, habría que experimentar en campo e ir comparando resultados. En la medida de que esto se haga, la tecnología del medidor Coriolis se aventajará, siempre y cuando el fabricante vaya mejorando sus diseños y realizando calibraciones en fábrica con resultados más reales. De esta forma se obtendrán medidores Coriolis para gas natural, para los cuales se afirme que sus calibraciones hechas en fábrica son aceptables como para ponerlos a funcionar directamente en ciertos rangos de operación.

Definitivamente la tecnología Coriolis para gas natural es relativamente reciente, por lo tanto aun no se ha tenido la suficiente experiencia para confirmar en campo las calibraciones que fueron realizadas en laboratorio, como para expresar afirmaciones referentes a la alta exactitud de este medidor.

En países desarrollados en mediciones de flujos, las dudas si las calibraciones hechas en fábrica son aceptables, son relativamente fáciles de resolver a través de la realización de la calibración del medidor en campo. Pero en países sin la infraestructura en mediciones de flujos, como Colombia, se debe recurrir mucho a la experiencia del fabricante o de una entidad acreditada, para que se encarguen de las calibraciones de los medidores Coriolis para gas natural, tanto en un inicio como posteriormente a intervalos requeridos de tiempos.

En el caso que haya diferencia en los resultados de calibración, el usuario y el fabricante deben ponerse de acuerdo para encontrar las causas que influyeron en la diferencia, como pueden ser la instalación, las condiciones de operación, el medidor mismo o tal vez una irregular calibración.

El hecho de que el fabricante atienda al usuario de menor conocimiento en mediciones de flujos y específicamente en mediciones con Coriolis para gas natural, a través del servicio postventa, la tecnología de este medidor se va a ver favorecida, debido a la obtención de un mayor mercado. La atención al usuario, en cuanto a calibraciones, puede darse a través de asesorías, de capacitación o directamente ser realizadas por el fabricante.

La calibración realizada a través del método “con patrón de referencia”, aplicado a medidores Coriolis para gas natural, se hace indispensable en usos de transferencia de custodia o en procesos industriales con alto caudal, debido a que se tienen las ventajas de poderse ejecutar múltiples pruebas en un período de tiempo relativamente corto y usar el mismo gas de operación como medio de calibración. Para el caso de los usos en procesos industriales, se podría simular diferentes condiciones de operación dadas en el proceso, para estudiar el comportamiento del medidor Coriolis ante los cambios de éstas.

El método gravimétrico para la calibración del medidor Coriolis, puede ser aplicado en la industria del gas natural comprimido para vehículos. Esto debido a que se puede realizar una medición directamente de la masa en los mismos tanques de los vehículos, sin necesidad de diseñarlos, fabricarlos ni mantenerlos, para este fin. Este sistema de calibración ofrece una exactitud aceptable, siempre y cuando se tome la medición de masa adecuadamente y se introduzca el verdadero valor de densidad del gas. Como ejemplo de lo anteriormente dicho, en las estaciones de gas vehicular de la ciudad de Bucaramanga (Colombia) se utiliza el sistema gravimétrico, ya que resulta más económico y sencillo de aplicar.

Es válida la recomendación que AGA 11 hace referente a que los medidores deben recalibrarse varias veces en determinados períodos, ya que esto asegura su buena exactitud. Los períodos de recalibración deben ser determinados por el usuario o asesor, según su experiencia en metrología y con conocimiento en el instrumento a ser recalibrado, además del seguimiento del comportamiento del medidor. Por ello es importante llevar organizadamente la hoja de vida del medidor Coriolis.

La tecnología Coriolis, a partir de su principio de funcionamiento, ha obtenido medidores sin partes móviles ni partes intrusivas que influyan en la exactitud de la medición; por tal motivo se tienen períodos más largos de recalibración, conllevando a disminuir costos.

En conclusión, el usuario o su asesor debe realizar una calibración en campo con condiciones de operación, eligiendo un método adecuado, para verificar la exactitud del medidor que fue expresada por el diseñador como resultado de la calibración en fábrica. Después de haber realizado la calibración inicial y con fundamento en su experiencia en metrología, además del conocimiento específico del medidor Coriolis en sí, el usuario decide cuando hará la primera recalibración. Debido a la tecnología aun no probada totalmente del medidor Coriolis para gas natural, hay que comenzar a correlacionar los resultados de las mediciones con los factores que influyen en la exactitud del medidor Coriolis, de manera que con estas pruebas se adquiera experiencia, para ir mejorando sus subsiguientes períodos de recalibración.

Se puede concluir también que los periodos de recalibración para el medidor Coriolis en usos con gas natural, se pueden orientar con los métodos genéricos que se tienen para cualquier tipo de medidor, pero con el conocimiento previo del comportamiento del medidor Coriolis, acorde a su naturaleza y condiciones de operación.

- Operación y mantenimiento. Lo importante al operar y mantener un medidor es seguir al pie de la letra las instrucciones, para obtener una larga vida útil del medidor con un adecuado desempeño. El medidor Coriolis requiere de poco mantenimiento y esto es importante a tener en cuenta para las condiciones económicas actuales. El beneficio de no tener partes móviles y el bajo mantenimiento, en muchos casos, se constituye en la razón para justificar el alto costo inicial de esta tecnología.
- Problemas. Cada fabricante ofrece la información a cerca de los problemas que pueden surgir con el medidor Coriolis, en forma general y también para casos particulares de elementos constitutivos de un determinado modelo del medidor. Esta información es de gran valor para el usuario, ya que lo orienta para prevenir y solucionar inconvenientes del medidor Coriolis y así preservar la inversión realizada y tener mediciones confiables.
- Desempeño. La tecnología del medidor Coriolis se caracteriza por hacer mediciones desde valores pequeños, en gramos por hora, hasta altos valores en toneladas por minuto; su alcance de medición es amplio ya que la señal que se toma tiene comportamiento lineal. El medidor Coriolis tiene adecuada exactitud y así lo muestran sus curvas de desempeño; pero hay que hacer ver que a bajos caudales, tendiendo al valor mínimo, los errores se incrementan debido a la presencia de la estabilidad del cero, que es constante a través de todo el alcance de caudal.

En los medidores de menor tamaño se incrementa la exactitud, pero por otro lado se aumenta la caída de presión, así que, se tiene que buscar una relación de

caudales máximo y mínimo de tal forma que no se salgan de los rangos de caída de presión ni de errores permisibles en la medición de flujo másico.

Siendo el desplazamiento del cero, el causante de alto error a bajos caudales, la tecnología cuenta con un procedimiento para ajustar el cero a las condiciones de operación en la línea. Pero este ajuste puede ser levemente afectado por la temperatura, y es por ello que los fabricantes recomiendan que el cero se ajuste dentro de un límite de $\pm 10^{\circ}$ C respecto a la temperatura de operación.

En resumen: el diseño, la adecuada selección y el ajuste del cero, son factores que influyen en un adecuado desempeño del medidor Coriolis. Por ello no solo el fabricante influye en este desempeño, sino también el encargado de seleccionarlo y de ponerlo en marcha. Por otro lado el usuario debe instalarlo y mantenerlo según recomendaciones, para que el desempeño del medidor no se vea disminuido.

4. GUIA DE PROCEDIMIENTOS PARA EL USUARIO

Esta guía de procedimientos expresa los aspectos sobresalientes en los que un usuario debe estar fundamentado, para dar adecuada aplicación a la tecnología del medidor Coriolis. Aunque orienta al usuario, debe complementarse con la información dada en el capítulo 1 de marco teórico y en el capítulo 2 referente a aspectos técnicos del medidor Coriolis, como también con información específica dada por el fabricante. Si bien no es necesario, el usuario puede analizar la tecnología Coriolis, para estar más fundamentado en la realización de sus aplicaciones; en este caso necesita tener conocimientos de las tecnologías de flujos y de mediciones.

4.1 OBJETIVO

Orientar al usuario en la aplicación del medidor de flujo másico Coriolis para llevar a cabo las mediciones con exactitud y eficiencia.

4.2 GENERALIDADES

La tecnología del medidor Coriolis surge como una alternativa de medición de caudal y de volumen, a través de la medición de flujo másico, en el cual no se tiene en cuenta las variables presión y temperatura como incidentes directos en la medición de flujo. Es prácticamente la tecnología más reciente que, para aplicaciones en gas natural, sigue en prueba, aunque ya se dan muestras de resultados positivos de mediciones. De no ser así, esta tecnología no hubiera obtenido el reconocimiento que la Asociación Americana del Gas le ha hecho a través de la publicación de AGA N° 11 de noviembre de 2003.

Las características más sobresalientes de la tecnología del medidor Coriolis son las siguientes:

- Se mide directamente el flujo de masa, para luego convertirlo a caudal volumétrico y a volumen estandarizados, sin necesidad de medir presión ni temperatura de operación.
- Es necesario medir o introducir un valor de densidad para convertir de caudal másico a caudal volumétrico. Esto afecta su facilidad de aplicación, su exactitud o su costo.
- El principio de funcionamiento del medidor no requiere de partes móviles ni intrusivas, lo que lo hace durable y de fácil mantenimiento, disminuyéndose factores de incertidumbre y costos de operación.

- La caída de presión es baja, no perjudicando al proceso y obteniéndose alto alcance de medición.
- No tiene muy en cuenta los perfiles de flujo, descartándose así las instalaciones especiales.
- Medición en ambos sentidos de flujo.
- Facilidad en el uso, si existe orientación adecuada.
- Se disponen de tamaños de hasta 6 pulgadas.
- Es una tecnología de compleja fabricación y por lo tanto costosa inicialmente.
- Aceptable exactitud, gracias a la reducción de factores de incertidumbres.

La aceptación que ha tenido el medidor Coriolis se ha dado en gran medida por su exactitud, por el relativo mediano costo y por la facilidad de aplicación. La exactitud es el aspecto más significativo, que lo habilita para ser usado en aplicaciones industriales del gas natural, en transferencia de custodia y en gas natural vehicular.

Aunque el medidor Coriolis no es económico, el costo pagado inicialmente es recuperado con el ahorro de su producción a través del tiempo, debido a su exactitud y a su facilidad de instalación, uso y mantenimiento.

La tecnología del medidor de flujo másico Coriolis, en cuanto a información requerida por el usuario, tiene adelantos a través del reporte AGA N° 11 y de manuales específicos de fabricantes. En esta información se dan a conocer las pautas para la adecuada aplicación del medidor, teniéndose en cuenta aspectos de selección, instalación, condiciones de operación, requisitos, calibración, operación, mantenimiento y problemas presentados.

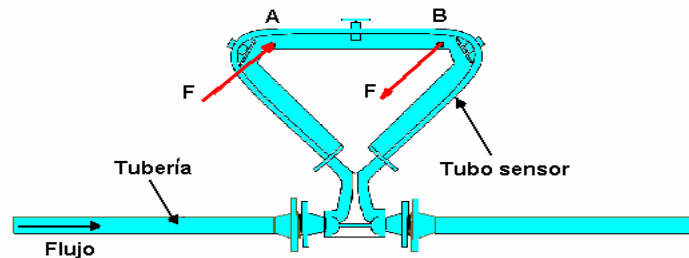
Se visualiza un buen futuro para el medidor de flujo másico Coriolis para gas natural, debido al continuo trabajo que se viene realizando en pro de su versatilidad y desempeño. Con la intervención de la Asociación Americana del Gas a favor del desarrollo de esta tecnología, se dispondrán medidores Coriolis más exactos y económicos.

4.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La medición se fundamenta en el principio de la aceleración de Coriolis, que aparece cuando un cuerpo se desplaza dentro de un sistema que tiene movimiento de rotación. El medidor Coriolis consiste en un tubo en 'U' (sensor),

como muestra la figura 33, oscilando alrededor del eje de la tubería, de tal forma que el fluido que se desplaza por el tubo se acelera con un determinado valor conocido a partir del principio de Coriolis. Esta aceleración del fluido causa fuerzas iguales y de sentidos contrarios, haciendo deformar al tubo sensor de manera que cause un desfase en el movimiento de los puntos 'A' y 'B' proporcional al flujo de masa circulante. Este desfase es medido con la diferencia de tiempos que toma el sensor y que le envía al transmisor para que procese la información.

Figura 33. Esquema del principio de funcionamiento



4.4 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Un medidor tipo Coriolis está compuesto por un sensor, un transmisor y en muchos casos, dispositivos periféricos para monitoreo, alarma y/o funciones de control (ver figura 34). Los elementos correspondientes al sensor detectan flujo, densidad y temperatura. El transmisor procesa las señales provenientes del sensor y suministra esta información como señal de salida.

Sensor. El tamaño y la forma pueden diferir, pero ciertos componentes son comunes para todos los modelos de sensores.

Tubos de flujo: son los elementos que están en contacto directo con el gas.

Sensor de movimiento (pick-off): los sensores de movimiento están instalados a la entrada y a la salida de cada tramo del tubo para medir el movimiento de cada uno de los extremos.

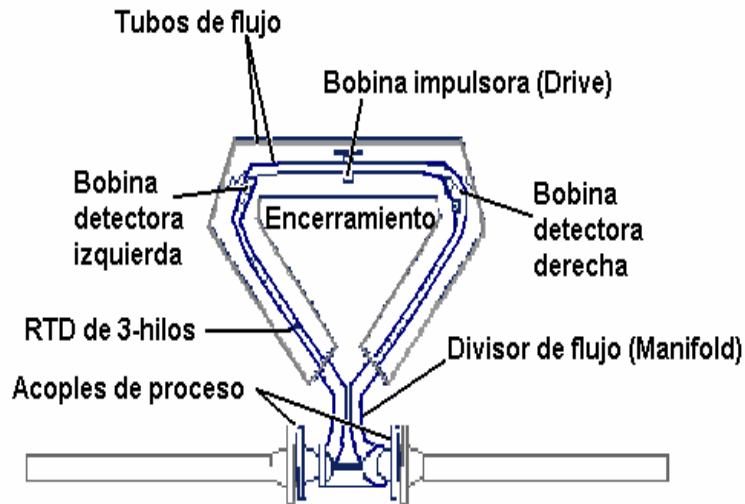
Sensor de temperatura: se fija en la superficie exterior de uno de los tubos para compensar la constante de elasticidad debido a los cambios de temperatura.

Divisor de flujo: en sensores que presentan una configuración de tubos en paralelo, las extremidades de la tubería son rígidamente conectadas por el divisor de flujo. El divisor permite que la mitad del flujo pase a través de cada tubo.

Caja de conexiones: los cables del excitador, sensor de movimiento, y el sensor de temperatura son pasados a través de un conducto de alimentación sellado a

una caja de enlace para realizar el cableado desde el sensor al transmisor electrónico.

Figura 34. Componentes del medidor Coriolis



4.5 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Se deben tener en cuenta las condiciones de operación de un medidor para su buen desempeño y un menor deterioro.

Calidad del gas. El usuario debe examinar las condiciones de operación y consultar con el fabricante para identificar materiales apropiados en contacto con el gas, cuando se presenten las siguientes condiciones: operación cerca de la temperatura del punto de rocío del hidrocarburo de la mezcla del gas natural, niveles totales de sulfuro y presencia de elementos halógenos en la mezcla del gas, por ejemplo: cloro, bromo, etc.

Presiones de operación. El fabricante especificará la presión máxima de operación por códigos estándar.

Temperatura del gas y del ambiente. Los sensores Coriolis deben operar en un rango de temperaturas de flujo de gas entre -40°F y 200°F , y la temperatura ambiente debe estar entre -13°F y 131°F . En caso de que las temperaturas sean diferentes a las mencionadas anteriormente, dirijase al fabricante para que esté proporcione las especificaciones adecuadas de la temperatura.

Condiciones del flujo de gas. El flujo másico y la presión de operación determinan los límites operacionales del caudal en un sensor Coriolis. El diseñador determinará el caudal esperado del gas.

Tubería aguas arriba y perfiles de flujo. Se debe consultar al fabricante quien facilitara los últimos resultados de pruebas de medidores, para evaluar como puede ser afectada la exactitud del medidor por una configuración particular en la instalación de las tuberías.

4.6 REQUISITOS DEL MEDIDOR

Se debe verificar que el fabricante haya cumplido todos los requisitos establecidos por el reporte AGA N° 11, considerados para el cuerpo del medidor y todas las partes que lo constituyen.

Los requisitos a tener en cuenta en el medidor de flujo másico Coriolis se refieren al cuerpo del medidor, a la electrónica, al software y a la calibración, sobresaliendo en ellos aspectos como la corrosión, seguridad eléctrica, aislamiento térmico, alarmas y reportes de pruebas. El cumplimiento de estos requisitos conlleva a un funcionamiento del medidor con alto desempeño y en forma segura y eficiente.

4.7 SELECCIÓN

Una adecuada selección garantizará la inversión realizada y el buen desempeño del medidor. El aspecto más importante a tener en cuenta en el tamaño de un medidor Coriolis es la relación existente entre la pérdida de presión y la exactitud del medidor. Las consideraciones para la selección son las siguientes:

- Diámetro de la línea de instalación.
- Rangos de presión y temperatura.
- Partes en contacto con el fluido.
- Velocidad del fluido.
- Composición del gas o densidad del gas a presión de operación mínima y temperatura de operación máxima.
- Pérdida de presión permisible y alcance de medición.
- Exactitud de medición requerida.

La selección será realizada por el fabricante o por un usuario capacitado en mediciones de flujo. Cuando el fabricante es el encargado de seleccionar el medidor, el usuario debe proporcionarle las condiciones de operación y la calidad que se requiere del medidor. Existe un método que orienta la selección del tamaño apropiado del medidor para una aplicación determinada, recomendado por AGA N° 11.

4.8 INSTALACIÓN

Los aspectos que se deben tener en cuenta en la instalación de un medidor Coriolis son: temperatura, vibración, ruido eléctrico, configuración de la tubería, montaje y orientación del sensor, adecuación para la puesta a cero, minimización de las influencias externas, puesta a tierra y filtración.

Cuando no se tienen en cuenta los procedimientos de instalación, se sacrifica la exactitud y la integridad física del medidor. Es por ello que se deben atender las recomendaciones de instalación del medidor Coriolis, dadas por el reporte AGA N° 11 y por fabricantes. Algunas sugerencias sobresalientes en la instalación del medidor son las siguientes:

- ◆ **Configuración de la tubería.** Debe hacerse un buen soporte de la tubería para minimizar los esfuerzos estructurales en el cuerpo del medidor.
- ◆ **Orientación.** El medidor debe ser orientado con los tubos apuntando hacia arriba o en posición bandera, para prevenir acumulación de líquidos.
- ◆ **Puesta a tierra.** El transmisor y el sensor deben ponerse tierra a través de la tubería, para prevenir averías.

4.9 PUESTA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Lo importante al operar y mantener el medidor Coriolis es seguir al pie de la letra las recomendaciones, para obtener una larga vida útil del medidor con un adecuado desempeño. Existen instrucciones de puesta en operación y mantenimiento consignados en los manuales dados por los fabricantes. La puesta en marcha del medidor, comprende el ajuste del cero, pruebas de entrada y de salida y ajuste de salida en miliamperios; el mantenimiento comprende verificaciones del cero del medidor, la verificación del sensor y la del transmisor y la revisión de la densidad.

Tenga en cuenta que cada fabricante debe ofrecer la información a cerca de los problemas que pueden surgir con el medidor Coriolis, en forma general y también para casos particulares de elementos constitutivos de un determinado modelo del medidor. Esta información le será de gran valor, ya que lo orientará para prevenir y solucionar inconvenientes del medidor Coriolis y así preservar la inversión realizada y tener mediciones confiables.

4.10 INFORMACIÓN DE INTERÉS

El fabricante debe estar preparado para dar respuesta al usuario acerca del hardware, del desempeño y de preguntas de la aplicación de algunos tópicos como los que se muestran a continuación:

➤ Medidores de flujo

- ◆ Tamaños disponibles.
- ◆ Materiales disponibles para tuberías y muchas partes en contacto con el gas.
- ◆ Materiales utilizados en el resto de la construcción.
- ◆ Límites de operación.
 - Máximo y mínimo caudal másico dentro de rangos de incertidumbre permisibles.
 - Rangos disponibles de temperatura y presión.
 - Límites de temperatura del fluido.
 - Límites de presión del fluido.
 - Límites de temperatura ambiente.
 - Límites de humedad.
 - Clasificación de códigos de seguridad.
 - Límites de la atmósfera corrosiva.
 - Limitación de los fluidos corrosivos.
- ◆ Desempeño.
 - Incertidumbres permisibles para el flujo másico
 - Método de calibración
 - Análisis de incertidumbre
- ◆ Efectos sobre el desempeño de:
 - Temperatura del fluido.
 - Presión del fluido en la entrada.
 - Variación de la densidad.
 - Variación de la viscosidad.
 - Efectos de la configuración de las tuberías aguas arriba y aguas abajo.

- Pulsación del flujo.
- Rangos de flujo.
- Cambios en la temperatura ambiente.
- Variaciones en el voltaje de la fuente y la frecuencia.
- Interferencia electromagnética (EMI).
- Vibración.
- Dos fases de flujo.
- Erosión por arrastre, impurezas, etc.
- Acumulación de los productos del gas.
- Tensión debido a la instalación.

◆ Requerimientos de instalación.

- Potencia de la fuente.
- Frecuencias de operación del sensor y resonancias.
- Procesos de conexión – acoplamiento.
- Requerimientos de montaje – peso, dimensión de los soportes.
- Autorización para mantenimiento.
- Orientación requerida.
- Montaje, vibración y limitaciones de choques.
- Recomendaciones del procedimiento de limpieza.
- Aislamiento térmico provisional.
- Máxima caída de presión permitida.
- Consideraciones hidráulicas.
- Pérdida de presión versus caudal acorde a la aplicación.
- Tamaño versus rango de flujo.

➤ **Transmisor**

- ◆ Salidas disponibles – ¿en cuáles referencias?
- ◆ Límites del voltaje de la fuente y de la frecuencia.
- ◆ Límites de la temperatura ambiental.
- ◆ Clasificación y aprobación de códigos eléctricos.
- ◆ Evaluación de encerramiento.
- ◆ Requisitos y límites de cableado.
- ◆ Diagnósticos remotos.

- ◆ Montados local o remotamente.

➤ **Opciones**

- ◆ Pantallas.
- ◆ Alarmas.
- ◆ Totalizadores.
- ◆ Salidas.

4.11 ADQUISICIÓN DEL MEDIDOR CORIOLIS

Para adquirir a satisfacción el medidor Coriolis, tenga en cuenta las siguientes pautas:

- Tener fundamentos acerca de la tecnología Coriolis.
- Conocer las condiciones de operación.
- Solicite cotizaciones a distintos fabricantes, expresándoles los requerimientos de condiciones de operación, calidad y costos; se debe solicitar también información acerca de las condiciones de la compraventa, tales como: garantía, documentación, tiempo de entrega, asesoría, capacitación, actualizaciones de los equipos, instalación, calibración y mantenimiento. Estas cotizaciones deben incluir las características de cada equipo.
- Analice los diferentes aspectos técnicos y financieros que ofrece cada fabricante.
- Contáctese con el (los) fabricante(s) para finiquitar los detalles y así poder decidir la adquisición del medidor Coriolis.
- Luego de decidir y recibir el medidor, se debe verificar lo acordado en el contrato. Hay que revisar la documentación acorde a los requisitos del medidor, al igual que su estado. Debe existir correspondencia entre el medidor y la documentación.

- Para finalizar satisfactoriamente el recibido del medidor, debe realizarse la calibración del medidor Coriolis, según pautas dadas a continuación.

4.12 CALIBRACIÓN

Para saber si las mediciones que se realizan son confiables dentro de un rango de aceptación, se debe realizar el siguiente procedimiento:

- **Decida calibrar en campo.** Es necesario hacerlo, cuando se instale el medidor, para confrontar los resultados con la calibración del fabricante. Recuerde que las condiciones de operación pueden alterar el desempeño del medidor.
- **Asigne quién calibra.** La calibración la puede realizar el comprador a través de un personal calificado, o en su defecto asesórese del fabricante o de una entidad acreditada.
- **Cree la infraestructura necesaria.** Asesor y usuario deben decidir el método apropiado de calibración, para proseguir al montaje de la infraestructura.
- **Realice pruebas.** A través de estas pruebas, realice cálculos de flujo. Para esto tenga en cuenta la veracidad del valor de la densidad.
- **Disponga de información del fabricante.** Esto se debe hacer para comparar los resultados de calibración.
- **Llene la hoja de datos de prueba de campo.** Es necesario para llevar archivos.
- **Analice las discrepancias.** Estudie las diferentes posibilidades de las diferencias considerables con el vendedor, para llegar a un acuerdo de aceptación.
- **Planifique los periodos de recalibración.** Con la experiencia en metrología y con los resultados obtenidos después de la calibración inicial de campo, estime la fecha de la primera recalibración. Archive resultados que sirvan de fundamento para los subsiguientes periodos de recalibración.

4.13 HOJA DE DATOS DE PRUEBA DE CAMPO

Técnico. _____ Fecha de Prueba. _____

Localización de la Instalación. _____

Fabricante del Medidor Coriolis _____ Modelo N. _____

Serial N _____ Transmisor S/N _____

Salida de Corriente del Medidor (mA). _____ Voltaje. _____

Frecuencia. _____ Lectura Inmediata _____

Factor de Escala _____ **Hz/lbm.** **Factor Cero del Medidor** _____

Factor de Calibración del Fabricante _____ Factor del Medidor _____

DATOS DE PRUEBA

Presión De la Entrada psia. _____ Temperatura de Entrada °F. _____

Presión de Salida psia. _____ Temperatura de Salida °F. _____

Caudal indicado a la salida del medidor _____

Recopilación de Datos en Intervalos de 120 segundos como mínimo. _____

Por encima del cero _____ Por debajo del cero _____

Temperatura de Superficie. _____ Temperatura del Transmisor. _____

Notas: Ejemplo, vibración, ruido presente, pulsaciones, entre otras observaciones.

5. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

La realización de toda obra deja en el hombre una serie de experiencias y un incremento en su formación, en toda dimensión. Concordante con esto, en el desarrollo de la presente monografía se adquirieron, por un lado, y se afianzaron, por otro lado, habilidades y destrezas, para poder obtener, estructurar y analizar la información y presentar los resultados acerca del medidor de flujo másico Coriolis. Así, una vez más se comprobó que al principio de un proyecto, cuando solo se tiene una vaga idea, todo es desorden aun cuando se tenga toda la información alrededor; y lo que se debe hacer para llegar a cumplir satisfactoriamente los objetivos, es ser organizado, pensante, místico y activo.

Inicialmente se percibía en el ambiente, que no había suficiente información referente al medidor de flujo másico Coriolis, pero tal vez es algo aparente debido a que dicha información no aparece en los tradicionales libros, sino que hay que recurrir al recientemente publicado reporte AGA N° 11 y a la documentación muy específica dada por los fabricantes a través de Internet. Sin embargo, es más tedioso hacerse una idea general y fundamentada por medio de la red internacional que disponiéndose de un compendio acerca de la tecnología del medidor Coriolis.

El reporte AGA N° 11 está bien fundamentado, y con razón porque proviene del aporte de empresarios, de fabricantes y de usuarios del gas natural, conteniendo aspectos genéricos y también específicos del modo de aplicación del medidor Coriolis. Lo que sí le falta es más estructuración de tipo didáctico y mejorar aspectos del lenguaje inglés.

Se obtuvo un documento el cual contiene un marco teórico y una guía de procedimientos para el usuario, de tal forma que éste adquiera una fundamentación precisa y relativamente rápida, que contribuya a orientarlo en la adecuada aplicación del medidor de flujo másico Coriolis, en aspectos de selección, instalación, condiciones de operación, requisitos, calibración, operación, mantenimientos y problemas presentados.

La guía de procedimientos para el usuario fue elaborada con fundamentación en el marco teórico y con los resultados del análisis.

A través de la realización de esta monografía se consolidaron y pusieron en práctica muchos aspectos de los conocimientos vistos en el programa de Especialización en Ingeniería de Gas de la Universidad Industrial de Santander, de tal manera que se facilitó el acceso a la información y su correspondiente análisis.

BIBLIOGRAFÍA

AGA REPORT N° 3, Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids, American Gas Association, 1515 Wilson Boulevard, Arlington, VA 22209.

AGA REPORT N° 7, Measurement of Gas by Turbine Meters, American Gas Association, 1515 Wilson Boulevard, Arlington, VA 22209.

AGA REPORT N° 8, Compressibility Factors Natural of Gas and Other Related Hydrocarbon Gases, American Gas Association. 1515 Wilson Boulevard, Arlington, VA 22209.

AGA REPORT N° 9, Measurement of Gas by Multiphat Ultrasonic Meters, American Gas Association, 1515 Wilson Boulevard, Arlington, VA 22209.

AGA REPORT N° 11, Measurement of Natural Gas by Coriolis Meters, American Gas Association, 1515 Wilson Boulevard, Arlington, VA 22209.

Use of Coriolis Meters in Gas Applications, T. Phaten, G. Pawlas, 1995.

Choose The Right Material for Coriolis Mass Flow Meters, Brent Carpenter, 1990.

Comparative Performance Evaluation of Coriolis Mass Flow Meters, F.A.L van Laak 1000.

Compressed Natural Gas (CNG) Measurement, M. Butler, T. O'Banion, T. Patten, G. Pawlas, 1998.

Coriolis Flow Meters for Gas Measurement, Tim Patten, Gary Pawlas, 1995.

Coriolis Flow Meters: Industrial Practice and Published Information, R. C. Baker, 1994.

Coriolis Mass Flow Measurement, S. Nicholson, 1994.

Medidores de flujo másico y sus aplicaciones en la industria del gas, Centro Nacional de Metrología, Arturo David, Darío A, Loza Guerrero.

Infraestructura metrológica Colombiana, Inspecciones de estaciones de medición de gas natural comprimido vehicular (GNVC), García S, Luís Eduardo.
TERMODINÁMICA, Dr. Yunus A. Cengel, Dr. Michael A. Boles, McGraw – Hill, 1996

Introducción a la mecánica de fluidos, Robert W.
Medición de Flujo con Tecnología Coriolis. Curso 2003. Instrumentos y Controles S.A., Micromotion, Emerson.

Primera Jornada Técnica de Medición de Gas. Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, UIS. Septiembre de 2002. Bucaramanga, Colombia.

Segunda Jornada Técnica de Medición de Gas. Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, UIS. 2003. Bucaramanga, Bogotá y Barranquilla, Colombia.

Tercera Jornada Técnica de Medición de Gases. Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. Diciembre de 2004. Bogotá D.C. Colombia.

Fundamentos de Transporte de Gas “Medición de Gas”. Henry Abril Blanco. Mayo de 2005.

Disponible en Internet: www.foxboro.com

Disponible en Internet: www.sc.ehu.es/nmwmigaj/TURBINA.htm

Disponible en Internet: www.gas-training.com

Disponible en Internet: www.endress.com

Disponible en Internet: www.micromotion.com

Disponible en Internet: www.krohne-mar.com

Disponible en Internet: www.against.org

Disponible en Internet: www.flowsearch.com