

Medición de caudal Coriolis en flujos bifásicos: Explorando problemas y soluciones en el diseño del tubo de flujo.

Autor: Ing. Fabian R. Robin

Abstracto:

Desarrollo de nuevos transmisores digitales para Caudalímetros Másicos por efecto Coriolis. Mediante la implementación de sofisticados softwares de control puede corregirse los desfasajes vibratorios de los tubos sensores de los caudalímetros por efecto Coriolis y mantener en estado de vibración resonante el dispositivo, aún en las condiciones más adversas de medición, que para estos caudalímetros significa la medición bifásica (líquido + gas).

Se tratarán:

- Resena histórica de la tecnología.
- Aspectos técnicos en general: descripción de los dispositivos y bases de la tecnología de medición bifásica. Diferencias entre la tecnología analógica tradicional y la nueva tecnología digital.
- Estudios realizados por los grupos de investigación de la Oxford University, donde se desarrolló la tecnología.
- Mejoras en la medición de caudal másico. Ensayos en laboratorio para medición de caudal en procesos batch.

UN POCO DE HISTORIA:

Cuando a comienzos de los 80 apareció en el mercado el primer caudalímetro másico por efecto Coriolis, se gestó una verdadera revolución tecnológica en la medición de caudal, muy bienvenida por usuarios en la industria en general. La medición directa de caudal másico, sin necesidad de compensación de presión y temperatura, junto a la posibilidad de tener en un mismo dispositivo una medición directa de densidad y temperatura, abrió las puertas de un sinnúmero de aplicaciones en todos los campos industriales.

Muy pronto aquellos primeros equipos demostraron muchas virtudes y también grandes falencias: eran muy precisos en la medición de caudal y densidad, pero tenían altos costos de instalación y puesta en marcha (había que garantizar su total aislamiento de vibraciones y ruidos), había serias restricciones de uso en la industria alimenticia, manejaban pérdidas de carga importantes debido a la geometría de sus tubos en U y no podían utilizarse eficientemente con fluidos muy viscosos o no Newtonianos.

Con el paso de los años, el estudio de las aplicaciones y el continuo avance de la tecnología electrónica, permitieron a los fabricantes mejorar los diseños, resolver las limitaciones del producto y agregar funcionalidad a los equipos. Así fue como en el mercado aparecieron caudalímetros más inmunes a las vibraciones de cañerías, algunos fabricantes lanzaron dispositivos de tubo recto, que disminuían la pérdida de carga, los hacia aptos para aplicaciones en la industria alimenticia; otros ofrecieron equipos con capacidad de medir líquidos con sólidos disueltos, gases y, por inferencia de densidad, determinar contenido de alcohol o azúcares en una solución acuosa.

Más cerca en el tiempo, la evolución tecnológica permitió contar con transmisores y procesadores digitales más poderosos lo que se tradujo en equipos de mayor capacidad de manejo de información, precisión y menores consumos de energía.

PROBLEMAS SIN SOLUCION:

Los múltiples ensayos de performance desde los comienzos de los primeros prototipos hasta en la actualidad confirman que la tecnología Coriolis para la medición de caudal másico no ha podido resolver correctamente la medición de flujos bifásicos (gas / líquido).

En primer lugar cabe indicar que es muy difícil mantener la oscilación del tubo sensor en el caso de flujos bifásicos (normalmente se considera un flujo como bifásico cuando se encuentra entre un 2 y un 20% de gas en volumen), incluso con muy bajos porcentajes de volumen de gas. En efecto, cuando ingresa un flujo bifásico en el tubo sensor, se verifica un cambio brusco de la frecuencia característica de vibración del tubo, produciéndose un desbalance de fuerzas internas y en consecuencia un corrimiento del cero del instrumento. En esta situación generalmente los dispositivos pierden su condición de referencia y dejan de medir correctamente, y solamente recuperan la condición operativa óptima, cuando se retira del tubo sensor hasta la última burbuja de gas.

Ante este panorama resulta todo un desafío obtener lecturas exactas de caudal y densidad con un caudalímetro másico Coriolis en fluidos bifásicos, tratándose de un flujo continuo, pulsante o en una condición de vaciado o llenado del tubo sensor (que ocurre en las operaciones de descarga y carga de productos).

SOLUCION A LA MEDICION DE FLUJO BIFASICO:

Ante estas dificultades operativas, es muy importante tener un transmisor de flujo que cumpla con ciertos requisitos fundamentales:

- Debe tener una muy alta respuesta dinámica. Los flujos bifásicos tienen una característica ineludible: su inestabilidad, las burbujas de gas y el líquido fluyen desordenadamente, inclusive en forma de “olas” (también conocido como slug flow). La necesidad de controlar la vibración resonante en estas condiciones extremas, hace imprescindible que el transmisor de caudal necesite información del tubo sensor con mucha más rapidez que en el caso de los transmisores normales.
- Necesita controlar las bobinas impulsoras (encargadas de mantener la oscilación permanente del tubo sensor, también llamados drivers) para mantener operando el tubo durante una condición de flujo bifásico. Si electrónicamente, mediante un apropiado sistema de control, el transmisor puede controlar la oscilación de los drivers con alta sensibilidad (aun en las condiciones extremas de flujo pulsante o bifásico), el problema clave en la utilización de caudalímetros másicos Coriolis en cualquier aplicación esta absolutamente resuelto.

Los medidores Coriolis convencionales no son capaces de mantener de manera confiable la operación del tubo sensor y generar mediciones exactas en estas condiciones extremas. Además, pueden transcurrir decenas de segundos después de volver a un flujo monofásico antes de que se pueda reestablecer la prestación nominal del instrumento.

La demanda de una solución a estos problemas ha impulsado a algunos fabricantes a probar distintas tecnologías. Pero quizás haya sido el advenimiento de la era digital y la miniaturización de la electrónica de microprocesadores la que aportó el paso más importante para el desarrollo de herramientas que solucionan definitivamente estas limitaciones.

El procesamiento digital de señales o DSP (Digital Signal Processing) permite eliminar fuentes de interferencias y ruidos de diferentes fuentes, corregir y modular señales de respuesta y aumentar las velocidades de procesamiento.

CRITERIOS DE DISEÑO DEL TUBO SENSOR:

Una vez encontrada la solución tecnológica de control, pasemos a definir los parámetros de un buen diseño de los tubos sensores de caudal:

Drivers de impulso:

La disposición más común es tener una sola bobina impulsora o *driver*, en el punto medio de la sección de medición del tubo sensor. Sin embargo, algunos medidores Coriolis utilizan dos *drivers*, lo cual ofrece una ventaja relativa en aspectos generales, pero importante en el caso de una medición de flujo bifásico. Dos drivers permiten un control mas fino de la vibración correcta del tubo sensor, adaptándose mejor a las variaciones bruscas de flujo bifásico.

Además teniendo en cuenta consideraciones de seguridad intrínseca que limitan la energía máxima de impulso (corriente y tensión) que se puede suministrar a un medidor con un solo *driver* en condiciones de elevada amortiguación, un segundo *driver* duplica la energía que se puede usar para mantener operando el tubo de flujo sin violar los límites corriente en una condición de seguridad intrínseca. Esto, a su vez, lleva a un mejor control del tubo sensor, a una mayor amplitud de oscilación y, por lo tanto, a una mejor relación señal / ruido comparando con lo que se logra utilizando un único *driver* que opera en un tubo sensor por lo demás idéntico.

Flujo dividido:

Otra opción de diseño está en elegir entre un solo camino continuo a través del tubo sensor o dividir el flujo. Las divisiones, o cambios súbitos en el tamaño del tubo sensor, son puntos potenciales de provocar cavitación del fluido.

Más importante aún es el tema de la repetibilidad. Una división puede llevar a una asimetría en la distribución del gas entre los dos caminos del tubo de flujo. Esto puede tener dos consecuencias potenciales. Primero, cualquier desbalance se traduce en un control más difícil del tubo sensor. Segundo, si los factores de montaje de un caudalímetro y el sistema de cañerías (longitud del tramo recto anterior al medidor, orientación de las curvas de las cañerías de proceso, presión y caída de presión) afectan la simetría del flujo bifásico dentro del caudalímetro, puede resultar más difícil desarrollar una estrategia general de corrección de mediciones que pueda utilizada en distintas aplicaciones.

Geometría del tubo de flujo:

Los caudalímetros Coriolis de tubo de flujo recto tienen buena aceptación gracias a su reducida caída de presión y diseño compacto. Sin embargo, en comparación con un tubo de flujo curvado normal, las señales de sensor provenientes de un tubo recto tienen mayor frecuencia, menor amplitud y menor diferencia de fase. En otras palabras, tienen una peor relación señal / ruido.

Si se mantiene la oscilación del tubo de flujo durante un flujo bifásico, es a costa de una reducción de la amplitud de la oscilación en hasta un orden de magnitud en dicha condición

extrema. El flujo bifásico, por lo tanto, también induce un mayor nivel de ruido en las señales de sensor.

Con un diseño de tubo curvado, se puede reducir la amplitud de sensor nominal de 300 mV en un flujo monofásico a hasta 30 mV con un flujo bifásico. Un diseño de tubo recto puede arrancar con una amplitud de sensor normal de 30 mV, que se puede reducir a sólo 3 mV. Por supuesto que estos reducidos niveles de señal dificultan la extracción de señales de medición de buena calidad y tampoco aseguran una oscilación continua del tubo sensor.

GENERACION DE LA SENAL DE IMPULSO:

La operación de un caudalímetro másico Coriolis depende de la correcta oscilación del tubo sensor, que es controlada por la(s) señal(es) de impulso que genera el transmisor. La oscilación del tubo sensor (tal como indican las señales del sensor) es sinusoidal y, en consecuencia, caracterizada en términos de frecuencia, fase y amplitud.

¿Qué significa una operación óptima del tubo sensor? Uno de los criterios es que el tubo sensor debe oscilar a su frecuencia natural de vibración con una amplitud constante. Esta vibración depende de la masa global del tubo sensor y, por lo tanto, es función de la densidad del fluido de proceso. Normalmente, los algoritmos de medición suponen una amplitud constante de oscilación en el intervalo de cálculo, de modo que la estabilidad de la amplitud es relevante para la calidad de medición.

Para lograr una oscilación a la frecuencia natural, la fuerza de impulso del driver debe estar desfasada 90° respecto del movimiento de vibración. El detector de uso más común, es una simple bobina electromagnética, que en realidad mide velocidad. En consecuencia, la señal de sensor ya está desfasada 90° respecto del movimiento del tubo sensor.

Una señal óptima de impulso debería tener la misma frecuencia de oscilación y fase que la señal del tubo sensor, con la amplitud de impulso elegida de modo de mantener constante la amplitud de sensor.

Adaptar la salida de impulso a la fase exacta de la señal del detector no es tan sencillo. Por supuesto, se lo puede lograr si también se adapta la oscilación. Si esto no es posible, las consecuencias dependen del grado de corrimiento de fase. En el caso de pequeños niveles de corrimiento de fase y con condiciones benignas de proceso, el efecto es relativamente menor: la señal de impulso extrae más alimentación que si estuviera totalmente en fase.

Con un corrimiento de fase más importante entre *driver* y sensor, la oscilación pasa a ser forzada y no natural. Los requerimientos de energía de impulso se tornan cada vez más elevados y la frecuencia de impulso puede correrse de su valor natural. Finalmente, en el caso de grandes corrimientos de fase, el medidor puede cesar de vibrar (atascamiento) o comienza a oscilar en otro modo de vibración a una frecuencia donde el corrimiento de fase está más cerca de un múltiple entero de 360° .

La técnica más común para generar una señal de impulso ha sido la realimentación positiva, donde la señal de sensor (que contiene las características deseadas de frecuencia y fase) es multiplicada por un factor de ganancia de impulso (por medios analógicos o digitales). La ganancia de impulso necesaria para mantener la amplitud deseada de oscilación se relaciona muy de cerca con la amortiguación en el tubo de flujo. Suponiendo un retardo despreciable en el circuito de realimentación analógica, esto asegura la adaptación de fase entre la entrada del sensor y la salida de impulso.

La realimentación positiva es fácil de implementar, pero aporta sólo un control parcial de la forma de onda de impulso y no puede impedir fácilmente la presencia de componentes indeseados en la señal de sensor.

El método alternativo es la síntesis de la forma de onda de impulso. En este caso, el transmisor calcula digitalmente una forma de onda de impulso, que puede ser una onda sinusoidal pura o una onda cuadrada. Las ventajas que ofrece con respecto a la realimentación positiva incluyen el control pleno de la forma de onda de impulso, pero el problema está en adaptar la fase de la señal de sensor en tiempo real.

BATCH DESDE VACIO:

Hay un buen número de procesos donde la elevada exactitud que ofrece la tecnología Coriolis de medición directa del caudal másico podría aportar importantes ventajas en la medición de *batches*. En muchos casos, sin embargo, no es tan práctico garantizar que el caudalímetro esté constantemente lleno de fluido. Y es posible que ocurran grandes errores en medidores Coriolis parcialmente llenos o en medidores vacíos con paredes del tubo sensor mojadas.

El *shock* hidráulico producido por una perturbación de flujo o un pico de presión de aire, puede traducirse en grandes errores de medición y atascamiento. En consecuencia, la mayoría de los fabricantes de caudalímetros Coriolis no pueden recomendar el uso de sus productos en aplicaciones *batch* a menos que se mantenga lleno el tubo de flujo.

En las pruebas con tubos sensores llenos se suele utilizar un divisor. Con un flujo estacionario ya establecido, el divisor controlado por el transmisor conmuta el flujo del lazo de recirculación a una balanza. Cuando se llega al flujo totalizado previsto, se conmuta de vuelta al lazo de recirculación y se toma nota del total final de la balanza. Este procedimiento tiene la ventaja de un caudal más o menos estacionario, pero introduce un error por repetibilidad, adicional al sistema ya que queda líquido residual (de masa indeterminada) en la cañería que lleva a la balanza ante cualquier variación entre *batches*.

En el caso de pruebas con *batches* desde vacío, se conmuta permanentemente el divisor para que alimente la balanza, mientras el transmisor controla el flujo simplemente conectando y desconectando la bomba. En el momento en que la cañería de salida se abre al aire cuando se desconecta la bomba, la gravedad drena el medidor Coriolis, comenzando así el siguiente *batch* desde vacío. Esta es la forma de más sencilla posible de implementar este tipo de pruebas.

En el caso de un *batch* desde lleno, la repetibilidad absoluta es aproximadamente constante en unos 3-4 g hasta *batches* de tan sólo 62 ms; a 31 ms, esta repetibilidad se eleva a 7 g. Como porcentaje del total del *batch*, esto varía desde 0,1% para un *batch* de 10 s hasta 10% para un *batch* de 62 ms.

En el caso de *batches* desde vacío con pruebas de 2 s o más, la repetibilidad absoluta permanece por debajo de 10 g; en *batches* más cortos, la prestación empeora.

Desde la perspectiva de la repetibilidad relativa, estos resultados sugieren que se puede obtener una repetibilidad de 1% en *batches* desde vacío para totales de *batch* correspondientes a 2 s o más con el caudal nominal.

FLUJO BIFASICO O CONTINUO:

Aun cuando el tubo sensor siga operando durante un flujo bifásico pulsante, es posible que se induzcan errores en la medición de caudal másico y densidad por la física de las burbujas que atraviesan el tubo vibrante. Sin embargo, los modelos teóricos sencillos sólo dan una aproximación de los errores que se observan en la práctica. Pero, si bien la magnitud de dichos errores puede ser elevada, los errores en sí son repetibles.

El control del impulso es crítico para mantener operando el tubo sensor, pero también es importante corregir los errores de medición inducidos. Los resultados de las pruebas con *batches* desde vacío han demostrado que es posible lograr una buena repetibilidad aun con *batches* de corta duración, mientras se está tratando de mejorar las técnicas de corrección de las mediciones de caudal másico y densidad en el caso de un flujo bifásico continuo.

BIBLIOGRAFIA:

The two phases of Coriolis flow (Enero / 2005) – Manus Henry (Engineering Science Department de la Univesidad de Oxford – Inglaterra), Hoi Yeung (Department of Process and Systems Engineering de la Universidad Cranfield – Inglaterra), Wade Mattar (Especialista del Flow Department de Invensys Foxboro, Foxboro, Mass – Estados Unidos).

Quantifying and specifying the dynamic response of flowmeters (Conferencia Tecnica ISA 2002 – Chicago) – D. Wiklund and M. Peluso (Engineering Science Department de la Univesidad de Oxford – Inglaterra)

A neural network to correct mass flow errors caused by two-phase flow in a digital Coriolis mass flowmeter (Trabajo presentado en Elsevier – Flow Measurement and Instrumentation / Diciembre / 2001) – M. Henry y equipo del Engineering Science Department de la Universidad de Oxford)

Solución a la medición de flujo bifásico con caudalímetros másicos (Marzo / 2003) – Ing. Fabian R. Robin. Publicado en la Revista Instrumentación y Control Automático No. 116.

AUTOR:

ING. FABIAN R. ROBIN

39 años

Ingeniero Químico, egresado de la UTN FRBA

Especialista en Instrumentación y Mediciones en Invensys Systems Argentina

Conferencias en UTN, UBA, AADECA, O&G y Jornadas de Nivel y Caudal, sobre instrumentación de campo y temas varios, desde 2000 hasta la actualidad.

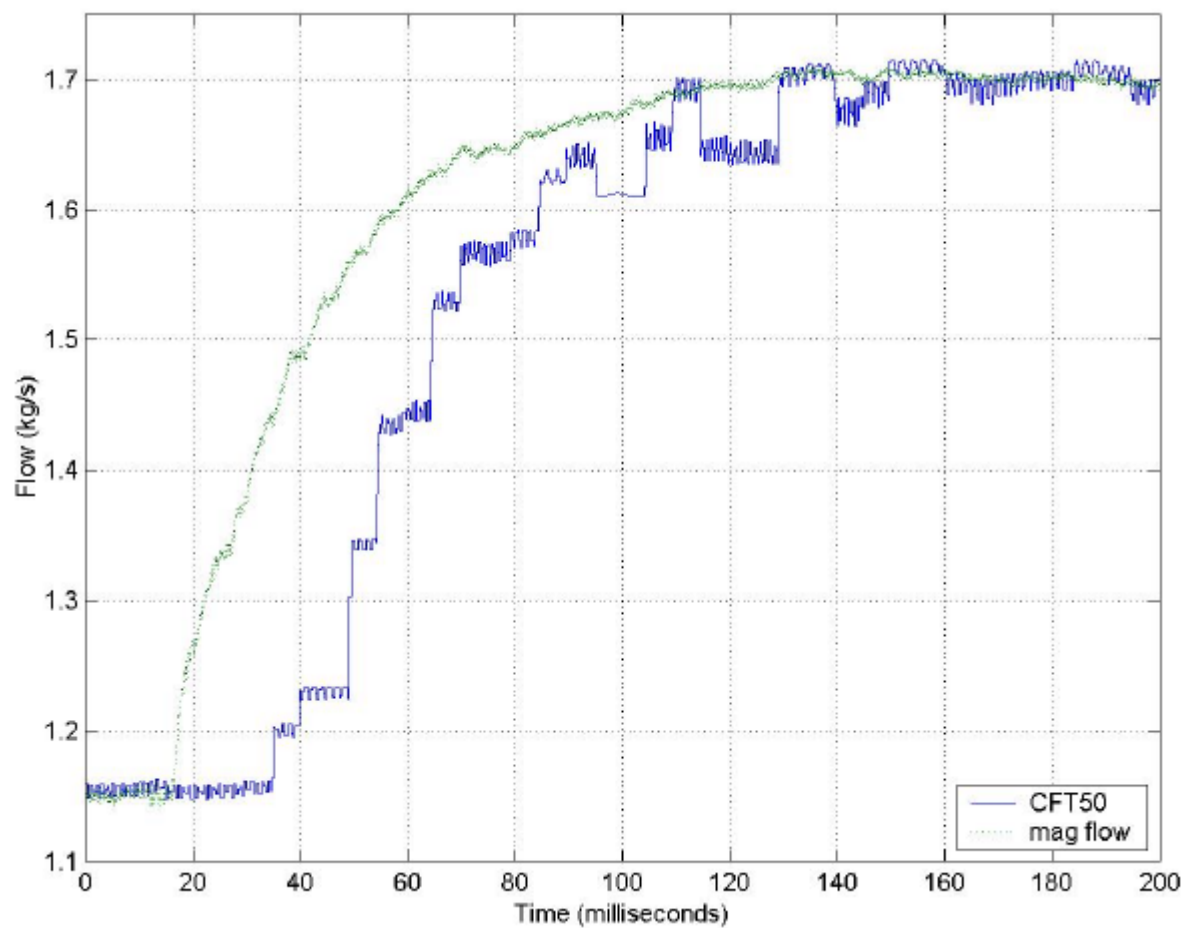


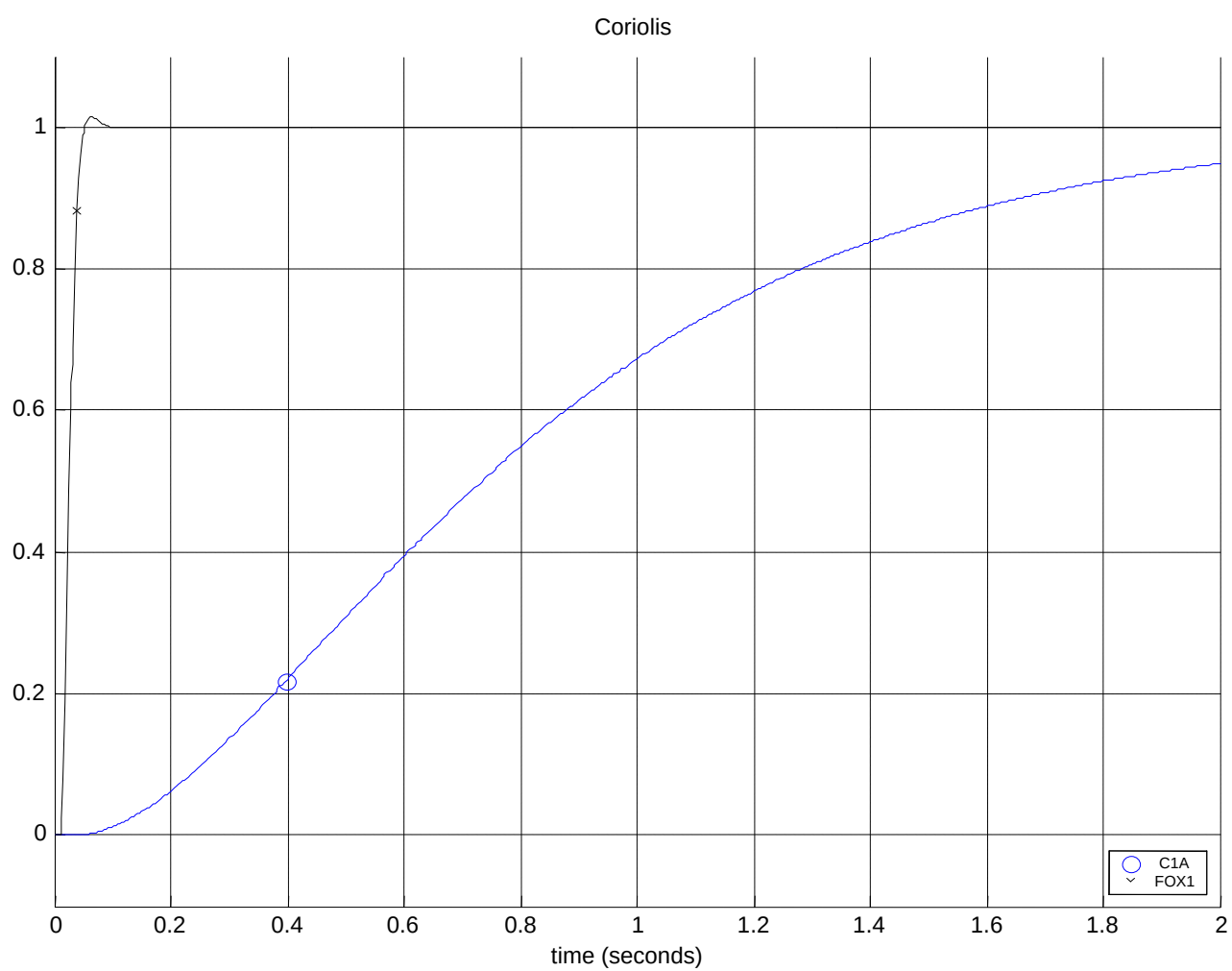
Diagrama de Respuesta Dinámica.

Línea verde: Lectura de caudal de un caudalímetro electromagnético.

Línea azul: Típica respuesta de un transmisor digital de un caudalímetro coriolis.

Se verifica que el retraso de la respuesta a la variación de caudal es menor a 25 mseg.

Tiempo de respuesta, comparando un transmisor digital de última generación con un transmisor convencional:

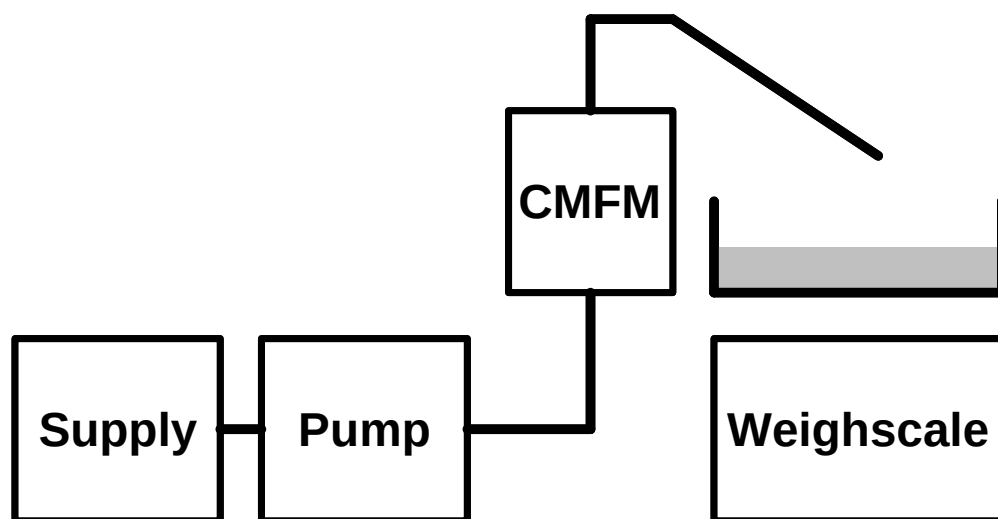


Ensayo de llenado y vaciado de tanque en un proceso batch



Se utiliza un caudalímetro de tubo sensor de 15 mm de diámetro y se procede a ensayos de comparación del totalizador del transmisor contra balanza calibrada, arrancando con el tubo totalmente vacío.

Esquema del ensayo



Supply: Tanque de reserva

Pump: Bomba

CMFM: Caudalimetro Másico Coriolis

Weightscale: Balanza Calibrada