

Artículo original

Análisis comparativo de sensores para flujo de hidrogeno

Comparative analysis of sensors for hydrogen flow

Luis Enrique y Fauroux⁽¹⁾, Omar Jorge Degaetani⁽²⁾, Marcelo Adrián Juárez⁽³⁾

⁽¹⁾Universidad Nacional de La Matanza
lfauroux@unlam.edu.ar

⁽²⁾Universidad Nacional de La Matanza
odegaetani@unlam.edu.ar

⁽³⁾Universidad Nacional de La Matanza
mjuarez@unlam.edu.ar

Resumen:

En el contexto de la utilización de hidrógeno para celdas de combustible, es que este trabajo realiza una comparativa de las distintas técnicas disponibles actualmente en el mercado. La problemática radica en que el hidrógeno es un gas incoloro e inodoro, más liviano que el aire, que posee un rango de inflamabilidad, que puede formar mezclas explosivas con el aire, y que también puede reaccionar violentamente con materiales oxidantes, que se quema con llama invisible, y que puede provocar la fragilización de materiales, entre otras cualidades. Por estos motivos, los altos costos de estos controladores importados, y la falta de producción nacional, es que resulta necesario conocer las fortalezas, y debilidades, relativas entre cada método, con el objeto de sentar las bases para un potencial desarrollo local de estos controladores.

Abstract:

In the context of the use of hydrogen for fuel cells, this work makes a comparison of the different techniques currently available on the market. The problem lies in the fact that hydrogen is a colorless and odorless gas, lighter than air, which has a range of flammability, which can form explosive mixtures with air, and which can also react violently with oxidizing materials, which burns with invisible flame, and that can cause the embrittlement of materials, among other qualities. For these reasons, the high costs of these imported controllers, and the lack of national production, it is necessary to know the relative strengths and weaknesses of each method, in order to lay the foundations for a potential local development of these controllers. .

Palabras Clave: *Sensor, Flujo, Hidrógeno*

Key Words: *Sensor, Flow, Hydrogen*

Colaboradores: *Ignacio Zaradnik, Leandro Jaimes Soria*

I. CONTEXTO

El impulso que ha tomado el hidrógeno como vector energético, ha motivado diversas investigaciones alrededor de las metodologías de producción, desarrollo de materiales, su aprovechamiento, etc. Es en este contexto que merecen un análisis los medidores de flujo, ya que se trata de un gas potencialmente peligroso.

II. INTRODUCCIÓN

El hidrógeno es un gas de baja densidad, incoloro, inodoro, que puede reaccionar violentamente con materiales oxidantes, formar mezclas explosivas con el aire, autoinflamarse a los 560°C, posee un rango de inflamabilidad (% de volumen en el aire) de 4 a 77 %, quemándose con una llama invisible [1]. Estos y otros detalles deben tenerse en cuenta al momento de evaluar la instalación de equipos que generen, almacenen y/o usen hidrógeno gaseoso a presión y el entorno donde se ubiquen. El hidrógeno gaseoso se difunde rápidamente aumentando la turbulencia del aire, lo que a su vez produce un aumento de la tasa de dispersión del hidrógeno gaseoso. Por otro lado, el hidrógeno tiene otras propiedades que también pueden suponer riesgo si no se las tiene en cuenta, es un potente agente reductor, y en contacto con óxidos metálicos se oxida y produce calor. También daña o es inadecuado para ser utilizado con muchos materiales que se usan normalmente en válvulas, tuberías y juntas. Al contrario que con otros gases comprimidos, al disminuir la presión de hidrógeno aumenta su temperatura, en términos físicos, el hidrógeno tiene un coeficiente de Joule-Thomson negativo a temperatura ambiente. Cuando se libera hidrógeno desde un contenedor a alta presión, el resultado es que este

aumento de temperatura puede contribuir a la ignición. El hidrógeno forma mezclas explosivas con muchos gases, incluidos el cloro y otros halógenos. Por otra parte, difunde fácilmente a través de muchos materiales convencionales que se usan en las tuberías y válvulas a través de agujeros que son lo suficientemente pequeños como para retener de forma segura a otros gases [2].

Considerando estas características, y otras más, se realizó un análisis comparativo entre las tecnologías actualmente disponibles en el mercado.

III. DESARROLLO

En este trabajo se compararon las técnicas de medición por coriolis, electromagnetismo, ultrasonido, vortex, térmicos, y por diferencia de presión, considerando alimentar una celda de combustible de tipo óxido sólido (SOFC). Las pilas de combustible de óxido sólido (Solid Oxide Fuel Cells) están formadas únicamente por materiales sólidos, hecho que simplifica su funcionamiento con respecto al resto de pilas. Solamente existen dos estados, sólido y gaseoso, que interactúan en el interior de la pila. Las pilas de óxido sólido se desarrollaron gracias al descubrimiento de que el óxido de zirconio (ZrO_2), dopado con pequeñas cantidades de otros elementos, entre un 3% y un 8% Ytrio (como Y_2O_3), o bien óxido de cerio (CeO_2) dopado con un 10% de gadolinio (como GdO), y sometido a altas temperaturas (entre 600°C y 1000°C), se convertía en un buen conductor de iones, pero no de electrones [3]. Desde su invención en 1930, los materiales que forman las pilas SOFC han ido evolucionando, en los electrodos se usan otros óxidos sólidos compatibles con el electrolito, con el fin de asegurar un buen contacto y así la estabilidad de la pila.

Para el cátodo se usan sólidos mixtos de manganeso-estroncio-lantano o bien manganeso-estroncio-cobalto-hierro, mientras que para el ánodo se usa un material compuesto por un metal y un cerámico, *cermet*, de níquel como parte metálica y del propio material que forma el electrolito como parte cerámica. La elección de materiales en este tipo de pila que funciona a tan alta temperatura es crítica, ya que debe poseer capacidades de conducción iónica y eléctrica y capacidad electrolítica, y además ser capaz de soportar las condiciones extremas a las que se ve expuesto. Este aspecto, implica el uso de materiales más caros que los que componen las pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC). Las SOFC son alimentadas con aire en el cátodo e hidrógeno en el ánodo, aunque a causa de las elevadas temperaturas a las que opera, también puede alimentarse con gas natural. Una vez retirados los sulfuros que el gas pueda contener, es reformado por el propio efecto de la presión y la temperatura, convirtiéndose en monóxido de carbono e hidrógeno aprovechable por la pila, tal y como puede ocurrir en el ánodo de una pila MCFC. Gracias al efecto catalizador del níquel a altas temperaturas, las moléculas de hidrógeno se desprenden de sus protones y electrones. Estos últimos migrarán hacia el cátodo a través de un circuito externo, generando trabajo eléctrico y reaccionando con las moléculas de oxígeno una vez hayan llegado al cátodo. Es en este electrodo donde se forman los iones de oxígeno que atravesarán el electrolito en dirección al ánodo, donde se generará agua como residuo más el posible dióxido de carbono procedente del combustible empleado. Entre las consideraciones iniciales se encuentran el diámetro nominal de la tubería, la presión y la temperatura del proceso [3].

Esta información es de suma importancia porque se podría dar a la situación en la que no sea posible utilizar alguno de los sistemas considera a priori potencialmente viable.

Dado que el hidrógeno es una molécula tan pequeña, tiene una gran facilidad para penetrar la estructura de los aceros más utilizados, provocando la fragilización del material y la consecuente pérdida de ductilidad. Por esto es que se recomienda el uso acero inoxidable austenítico (304L y 316L), o aleaciones de Níquel-Cromo-Molibdeno (Alloy C22). De todos modos, se recomienda cambiar tanto el sensor como las cañerías, luego de una cierta cantidad de horas de operación. Cabe destacar que, para el sistema de almacenaje de hidrógeno, se utilizan otros materiales, incluso hasta tubos estándar de acero comercial, ya que llevan controles periódicos respecto a su integridad.

Existen en catálogo sensores, por efecto Coriolis, a la vez simultáneos, multivariantes, además de flujo másico, miden densidad, temperatura y viscosidad. Sin embargo, son muy sensibles a las vibraciones de las cañerías, y son de los más costosos, sin embargo, proporcionan perspectivas completamente nuevas para el control de procesos, el control de calidad y la seguridad de la planta. Es posible asimismo calcular el valor de otras características importantes a partir de las variables primarias medidas.

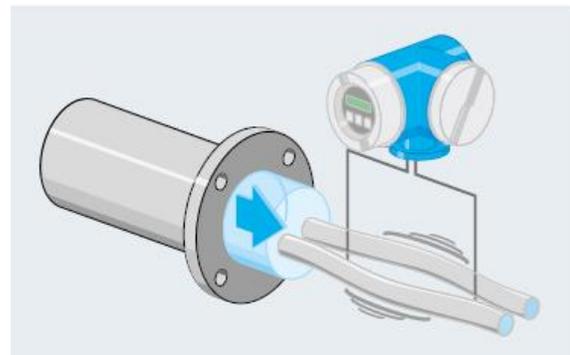


Fig. 1. Sensor por Coriolis

Se basan en los principios de la mecánica del movimiento, cuando el fluido de proceso ingresa en el sensor, se divide, una bobina impulsora provoca que los tubos oscilen a su frecuencia de resonancia natural [4]. A medida que los tubos oscilan, el voltaje generado en cada bobina pick-off produce una onda sinusoidal. Esto indica el movimiento de un tubo en relación con el otro. La diferencia de fase entre las dos ondas sinusoidales se denomina Delta-T, la cual es directamente proporcional al flujo másico y de esta manera podemos medirlo. El principio de medición es independiente de las propiedades físicas del fluido y del perfil de caudal, no son necesarios tramos rectos de entrada/salida [5]. A diferencia de otros controladores miden directamente el flujo másico, lo cual parece otorgarles una ventaja respecto a los sistemas de medición volumétricos. Los sistemas volumétricos traen menor precisión debido a que este tipo de medición requiere de controladores de lógica programables (PLC o DCS) para obtener un valor aproximado de la masa y debido a que el hidrogeno es un gas tan liviano se generan errores (por las mediciones y errores de cálculo) de hasta del 10% respecto al valor real de la masa. La capacidad de medir directamente el flujo másico permite que el sistema Coriolis ofrezca una precisión con errores de $\pm 0.1\%$ de la masa real [4].

Los caudalímetros por ultrasonido miden confiablemente flujo volumétrico de una amplia variedad de gases, y líquidos, sin importar la conductividad eléctrica, la presión, la temperatura, o la viscosidad. En aplicaciones que requieren precisión trazable y garantizada, se prefiere la utilización de sensores por ultrasonidos en línea. Los

sensores "clamp-on", en cambio, se instalan en la pared exterior de la tubería y, por consiguiente, permiten también mediciones temporales o montaje a posteriori. Estos sensores no provocan caídas de presión, poseen una larga vida útil, aunque una baja precisión comparada [4][6].

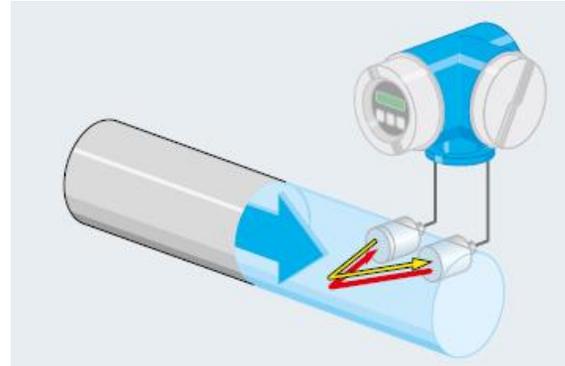


Fig. 2. Sensor por Ultrasonido

Una alternativa efectiva respecto a las técnicas de medición tradicionales, para cuando se requiera un amplio rango de respuesta, es el controlador de flujo másico por dispersión térmica, ya sea para el control de procesos, monitorización de consumo y abastecimiento, detección de fugas, o monitorización de redes de distribución. Utilizando versiones de inserción, también es posible medir caudales de gas en tuberías muy largas o en conductos rectangulares. Este sistema utiliza dos sensores de temperatura, uno que mide la temperatura del fluido y otro al que está siendo calentado. A medida que el fluido fluye a través del medidor el sensor que esta precalentado es enfriado, a mayor velocidad del fluido mayor va a ser este efecto. La corriente eléctrica necesaria para mantener la temperatura en el sensor genera un diferencial con una relación directa con el flujo másico. El igual que los por Coriolis, los hay multivariantes, y permiten medir flujo másico y temperatura, no necesitan mantenimiento debido a que no tiene partes móviles. La precisión de estos

sistemas se encuentra aproximadamente en los $\pm 0.5\%$ [4]. No se requiere compensación de la presión o la temperatura, poseen una excelente sensibilidad del extremo inferior, y una rápida reacción a las fluctuaciones del caudal. Como característica de complejidad sobresale el hecho de dar una respuesta no lineal.

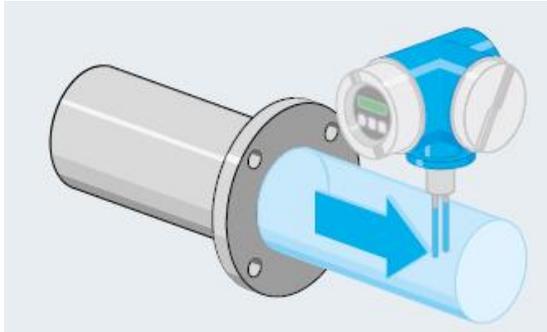


Fig. 3. Sensor por Dispersión térmica

Los transmisores por presión diferencial con sensores de presión piezorresistivos y membrana metálica soldada, o sistema electrónico de presión diferencial, o sello separador, se utilizan principalmente en la industria de proceso. Este tipo de sensores utilizan sistemas como el tubo Venturi y el tubo Pitot para medir una diferencia de presión que está relacionada con el caudal que pasa por el tubo [7]. Este sistema puede ser utilizado para el hidrógeno y toleran condiciones extremas de hasta 420 bar y 1000 °C.

El sistema electrónico de presión diferencial elimina los componentes mecánicos tradicionales, lo que mejora la disponibilidad y fiabilidad de los procesos, además de ser económicos [4]. Se requieren tres elementos esenciales para diseñar un medidor de flujo de presión diferencial. El elemento primario crea una caída de presión a través del medidor de flujo al introducir una restricción en la tubería, y esta restricción diseñada permite que la ecuación de Bernoulli se utilice para calcular la tasa de flujo. La caída

de presión se mide mediante un elemento secundario, un transmisor de presión diferencial, mientras que los elementos terciarios consisten en todo lo demás dentro del sistema, como tuberías de impulso y conectores. Las placas orificio se utilizan ampliamente en la industria del petróleo y el gas para medir gases, líquidos e incluso fluidos con una pequeña cantidad de segunda fase. Los componentes comunes de un sistema de medición de orificios incluyen el accesorio, la placa y el soporte de la placa. La placa junto con la parte adyacente de la tubería y las conexiones de presión constituyen el elemento principal. Rentable y sencilla, esta tecnología ofrece alta precisión sin calibración y es fácil de usar y solucionar problemas. Los elementos primarios de presión ofrecen muchos diseños y opciones para diversos tamaños de líneas y caudales. Las opciones incluyen placas de orificio estándar y de acondicionamiento, tubos pitot promediados, tubos Venturi, boquillas de flujo, conos y cuñas. Cada opción presenta beneficios, tales como un control de proceso más estricto, varias configuraciones de montaje, alta precisión, fácil instalación, bajo costo de mantenimiento, pérdida de presión permanente reducida y opciones de sensor de temperatura integral para penetraciones de proceso reducidas.

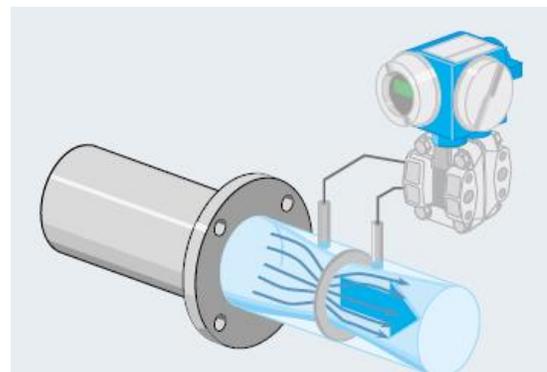


Fig. 4. Sensor por Presión diferencial

En este caso ocurre lo mismo que con los térmicos, es necesario saber el diámetro nominal aproximado que vamos a utilizar para poder elegir un equipo, es de considerar el no alcanzar la velocidad de detonación.

Los controladores de flujo tipo Vortex que realizan medición de caudal utilizan el efecto Von Karman donde al pasar el fluido por un cuerpo escarpado aparecen vórtices que generan un diferencial de presión. El cuerpo escarpado es una barra de vertido donde los vórtices oscilan a frecuencias específicas, conociendo la geometría de la barra y el área transversal de la tubería podemos medir el caudal. Lo interesante de este sistema es que de los Vortex es que resiste la fragilización por hidrogeno además de que tiene un umbral favorable respecto a las temperaturas. Aunque también utilizarán un sensor de presión y temperatura para lograr una medición compensada del caudal másico [4].

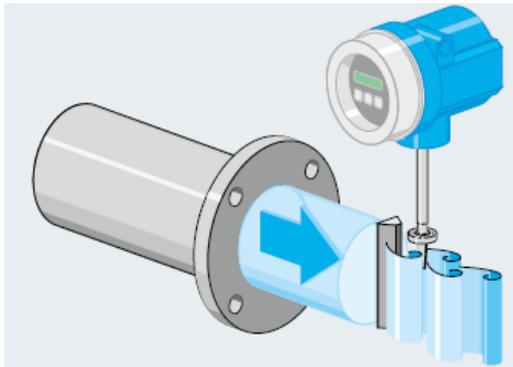


Fig. 5. Sensor tipo Vortex

IV. CONCLUSIONES

En primera instancia, por su sensibilidad, precisión, y el material de fabricación, los sensores por Coriolis parecen ser los más indicados. Sin embargo, tres aspectos condicionan su selección, la sensibilidad a las vibraciones, que hace necesario una mayor periodicidad de la verificación de su calibración, no se puede usar para medir

medios con menor densidad, como gas a baja presión. y su elevado costo de adquisición. En el proceso de eliminación continúan los sensores por Ultrasonido y los Vortex. En el caso de los primeros necesitan de la presencia d burbujas o partículas diminutas presentes en el flujo, además, estos medidores son de diseño más complicado en comparación con otros medidores, por lo que se requieren especialistas para su mantenimiento y reparación. En cuanto a los Vortex, tienen bajo rendimiento antivibraciones, las vibraciones externas pueden causar errores de medición en el medidor de flujo de vórtice, y es posible que ni siquiera funcionen correctamente. El choque de alta velocidad de flujo del fluido provoca vibraciones en el cuerpo del vórtice, lo que reduce la precisión de la medición. Los requisitos de tubería recta son altos cuando se monta el medidor de flujo Vortex, no es adecuado para mediciones de fluidos con un número bajo de Reynolds, además son muy costosos.

Los controladores por dispersión térmica, por el contrario, se utiliza solo para mediciones de gas, requiere secciones de entrada y salida, no es un problema, en el caso del hidrógeno, ni la condensación de humedad, ni la variación en el calor específico causado por cambios en la colocación del gas. Finalmente, los caudalímetros por diferencial de presión, los aspectos negativos son que la precisión no es la mejor y puede deteriorarse con el desgaste y la obstrucción, y que la capacidad de rango no es buena debido a una señal de presión diferencial no lineal, excepto los elementos de flujo laminar, pero estos no son los casos del hidrógeno, y al igual que los anteriores, su construcción es, relativamente, sencilla respecto de los tres mencionados en primer lugar, lo que

los hace menos costosos. Por lo que se sugiere avanzar en la investigación de estos dos tipos de sensores.

V. FORMACION DE RECURSOS HUMANOS

Cabe destacar la participación como alumno de Franco Kowalsky, quién integra el proyecto C2-ING-079, “Estudio de factibilidad para el desarrollo de un sistema mecánico y de control de flujos de gases para celdas de combustibles”, proyecto en el que el presente trabajo se halla enmarcado.

VI. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] Air Liquide. *Hoja de Datos de Seguridad. Hidrógeno comprimido*. San Isidro. Argentina. 2017.
- [2] Fernández-Bolaños Badía, C.. *Energética del hidrógeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro*. Sevilla: Departamento de Energética y Mecánica de Fluidos. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. 2005.
- [3] Delgado Ferrer, Eloi. *Estudio y modelización de una pila de combustible SOFC*. 2017.
- [4] Endress+Hauser. *Tecnología de medición de caudal para líquidos, gases y vapor*. Reinach, Suiza: Endress+Hauser. 2020.
- [5] Brown, G., Estrada, H., Augenstein, D. R., & Bergstrom, K. (2009). Estados Unidos *Patente n° US 2009/0151472 A1*.
- [6] Keilty, M. J., & Patten, A. T. (2003). Estados Unidos *Patente n° US 2003/0208325 A1*.
- [7] O'Keefe Controls Co. (2003). *Choked Flow of Gases*. Trumbull, Connecticut, Estados Unidos.

Recibido: 2022-06-07

Aprobado: 2022-08-03

Hipervínculo Permanente: <https://doi.org/10.54789/reddi.7.1.1>

Datos de edición: Vol.7 - Nro.1 - Art.1

Fecha de edición: 2022-08-10

