

ANÁLISIS DINÁMICO IN SITU DE TRANSMISORES DE PRESIÓN CAPACITIVOS

Cristina Montalvo¹, Miguel Balbás², Agustín García-Berrocal³ y Juan Blázquez⁴

1- Amerpren, ETSI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Ríos Rosas, 21, 28003 Madrid, España, cristina.montalvo@upm.es

2, Amerpren, ETSI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Ríos Rosas, 21, 28003 Madrid, España, miguel.balbas@upm.es

3-Amerpren, ETSI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Ríos Rosas, 21, 28003 Madrid, España, agustín.garciaberrocal@upm.es

4- División de Fisión Nuclear, CIEMAT. Avda. Complutense, 22; 28040 Madrid, España, juan.blazquez@upm.es

Palabras clave: Vibraciones aleatorias, análisis de ruido, tiempo de respuesta, función de transferencia.

Resumen

Los sensores de presión capacitivos tipo Rosemount son ampliamente utilizados en las centrales nucleares para la medida de la presión, el caudal y el nivel. Están unidos a las líneas de proceso de la central mediante líneas sensoras siendo el mantenimiento del sistema sensor-línea fundamental para mantener la seguridad en la planta. La vigilancia in situ del sistema en su conjunto, sensor-línea, se suele realizar mediante la medida del tiempo de respuesta del transmisor de presión con las técnicas de análisis de ruido. Sin embargo, determinadas averías como la pérdida de aceite de su cámara interna no son detectables por medio de la medida del tiempo de respuesta, ya que éste apenas varía su valor en una fase incipiente del síndrome. No obstante, la mejora de la descripción dinámica del sensor podría servir para detectar dichas averías. En laboratorio se ha demostrado que la función de transferencia del sistema sensor-línea puede tener más de un polo real, y en consecuencia, el modelo de tres polos (dos polos complejos conjugados y uno real) utilizado hasta ahora en otros trabajos podría sustituirse por uno de cuatro o incluso cinco. En este trabajo se propone utilizar técnicas de vigilancia in situ basadas en el análisis de ruido y en el Dynamic Data System para ampliar la descripción dinámica del sensor y con ello mejorar las posibilidades de diagnóstico de averías como el síndrome de la pérdida de aceite del sensor en fases incipientes. Se han analizado varias medidas de planta con la metodología propuesta y se muestran los resultados obtenidos.

1. Introducción

Los sensores capacitivos de presión tipo Rosemount son ampliamente utilizados en las Centrales Nucleares [1].

La adecuada medida de la presión garantiza la seguridad en las plantas.

Para la vigilancia de los sensores es necesario medir su tiempo de respuesta in situ [2] y se suele realizar mediante las técnicas de análisis de ruido por medio de la respuesta a la rampa del sensor.

El análisis de ruido requiere de un modelo dinámico previo del sistema sensor-línea sensora que se ha representado en la literatura con funciones de transferencia de tres polos [1,3-5]; un par de polos complejos conjugados asociados al acoplamiento entre la línea y el sensor [6], y uno real, que caracteriza la dinámica interna del sensor [5].

Por tanto, el polo real de la función de transferencia del sensor-línea sensora determina fundamentalmente el valor del tiempo de respuesta [5] y en definitiva el comportamiento dinámico interno del sensor.

Como consecuencia de medidas realizadas en laboratorio [7,8], se ha comprobado que la función de transferencia debería contener más de un polo real, lo que implica que el comportamiento dinámico interno del sensor no está completamente definido con un único polo real.

En este trabajo se propone encontrar el cuarto polo de la función de transferencia en planta por medio del DDS [9,10] y el análisis de ruido. Dicho polo es real y está vinculado a la parte interna del sensor.

Con esta metodología se puede mejorar la descripción de la dinámica interna del sensor utilizando técnicas que se pueden aplicar in situ en la planta y no únicamente en laboratorio.

2. Modelos anteriores de los sensores de presión capacitivos

Un sensor de presión capacitivo está formado por una membrana de aislamiento unida a una línea sensora. En el interior del sensor hay un material de baja compresibilidad, el aceite de silicona, que reduce la presión terminando en una membrana sensora unida a las armaduras de un condensador[2,11,12].

En la literatura se encuentran varios modelos de sensores de presión capacitivos [13-15]. Cuando la línea sensora es menor que la mitad de la longitud de la onda de presión, es suficiente utilizar modelos como el que se muestra en la Figura 1 [6].

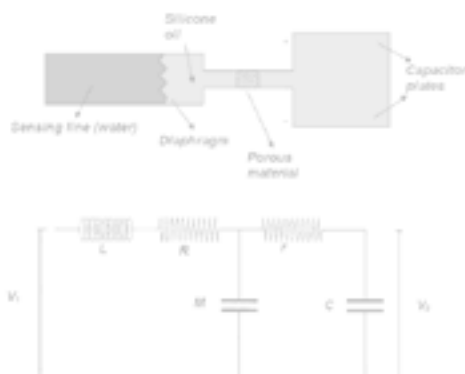


Figura 1: Esquema de un sensor de presión capacitivo tipo Rosemount y analogía eléctrica del mismo.

Los valores de la analogía eléctrica mostrada en la Figura 1 se pueden encontrar en la literatura y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de los parámetros de la analogía eléctrica del modelo del sistema sensor-línea

Sistema Mecánico	Sistema Eléctrico	Valores típicos (literatura)
Presión	Voltage	Pa
Volumen	Intensidad	m ³
Inercia de La línea sensora	Inductancia (L)	$5.55 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \text{m}^{-3}$
Fricción de la línea sensora	Resistencia (R)	$2.21 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \text{m}^{-3}$
Membrana de aislamiento	Capacidad (M)	$1.03 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{Pa}^{-1}$
Fricción de los microcanales internos	Resistencia (r)	$2.5 \times 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$
Membrana sensora	Capacidad(C)	$1.61 \times 10^{-12} \text{ m}^3 \text{Pa}^{-1}$

El modelo mostrado en la Figura 1 da lugar a una función de transferencia de tres polos: un par de polos complejos conjugados que corresponden al acoplamiento entre el sensor y la línea, y uno real, vinculado a la dinámica interna del sensor.

La PSD obtenida a través de una señal de planta procedente de un sensor de presión capacitivo se muestra en la Figura 2.

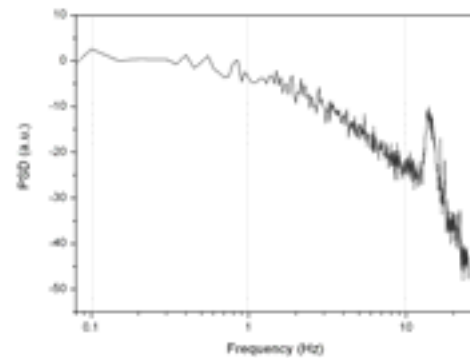


Figura 2: PSD de la señal de planta procedente de un sensor de presión capacitivo ubicado en un PWR.

El pico resonante corresponde al acoplamiento entre la línea sensora y el sensor y en consecuencia, su frecuencia de corte estará dada por la correspondiente al par de polos complejos conjugados de la función de transferencia. La dinámica interna del sensor está caracterizada por el tercer polo, que es real y que determina fundamentalmente el valor del tiempo de respuesta[5]. Por ello este tiempo de respuesta del sensor es la magnitud elegida para la vigilancia del mismo.

Cuando el sensor es llevado a un laboratorio, se puede medir su tiempo de respuesta evitándose así la presencia de la línea y del ruido de planta. La PSD del sistema dinámico (Figura 3) no mostraría el acoplamiento entre el sensor y la línea, sino únicamente la dinámica interna del sensor, caracterizada hasta este momento por un polo real.

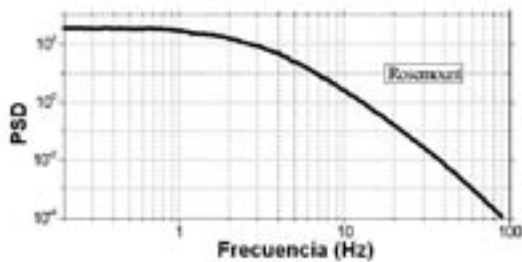


Figura 3: PSD de la señal de salida de un sensor de presión capacitivo tipo Rosemount sometido a un test de laboratorio.

Diversos tests realizados en laboratorio [7] han comprobado que la dinámica del sensor posee más de un polo real y, en consecuencia, la función de transferencia del sistema sensor-línea podría estar representada por cuatro polos: un par de complejos conjugados y dos polos reales.

3. Análisis de ruido y DDS

Las técnicas de análisis de ruido han sido y son de amplia utilización en la monitorización y diagnóstico de sensores y procesos en las Centrales Nucleares [15-17].

Las fluctuaciones presentes en las señales procedentes de los sensores y aparatos de medida contienen una información muy valiosa sobre el comportamiento dinámico de éstos [2].

Así, por medio de la autocorrelación de las señales y utilizando las ecuaciones de Yule-Walker [18] se pueden obtener modelos autorregresivos de los sensores:

$$x_j = \sum_{k=1}^n x_{j-k} a_k + \varepsilon_j, \quad j = 0, \dots, N$$

siendo a_k los coeficientes autorregresivos del modelo AR, ε_j el ruido blanco de entrada y x_j la señal de salida del sensor. Por tanto, un cierto sistema dinámico queda caracterizado por una serie de coeficientes que están relacionados con la función de transferencia del sistema y en consecuencia con los polos de ésta. El orden del modelo se puede obtener por el criterio de Akaike [19].

Si se conoce el modelo dinámico asociado a un determinado sensor, se puede encontrar la función de transferencia del mismo prescindiendo del orden del modelo dado por Akaike. Esta metodología se denomina DDS [9,10] [10,20,21] y en el caso que nos ocupa, se podría encontrar el cuarto polo de los sensores capacitivos de presión ajustando la PSD de la planta a un modelo de 4 autorregresivos. De esta manera se puede ampliar la vigilancia de la dinámica interna del sensor y lo que es más, se pretende alcanzar en planta el mismo grado de detalle de la dinámica interna del sensor que se pueda obtener en laboratorio.

Es preciso mencionar que en muchas ocasiones no es posible dar con la función de transferencia del sistema y se debe variar el tiempo de muestreo de la señal hasta dar con aquel que dé lugar a un modelo autorregresivo con un número de coeficientes igual al número de polos del sistema dinámico. No obstante, encontrar el tiempo de muestreo adecuado puede ser en muchos casos una tarea difícil y tediosa. A esta problemática se le añade el hecho de que las señales de planta contienen ruido de proceso

que en muchos casos es difícil de filtrar y cuya dinámica no se conoce a priori.

4. Análisis de ruido y DDS

En este trabajo se han analizado tres señales de tres sensores capacitivos tipo Rosemount de un PWR con un tiempo de muestreo de 20 ms. En la Figura 4 se representa una de las señales analizadas.

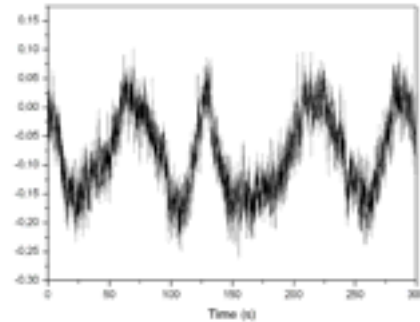


Figura 4: Señal de planta procedente de un sensor de presión capacitivo tipo Rosemount

Como se puede observar existe una componente de baja frecuencia que debe ser filtrada. Realizando un filtrado digital pasa-altos se obtiene la señal representada en la figura 5.

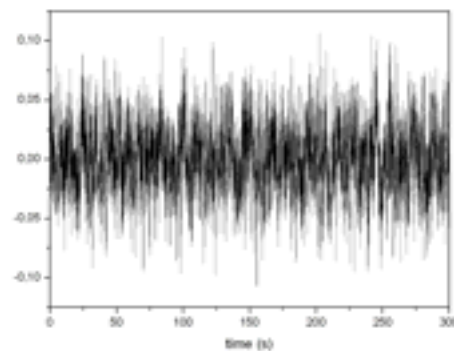


Figura 5: Señal de la figura 4 filtrada digitalmente con un filtro pasaaltos.

Aplicando la metodología del DDS se puede realizar un ajuste autorregresivo de las señales con 4 coeficientes autorregresivos con el objetivo de encontrar el cuarto polo, de índole real y asociado a la dinámica interna del sensor.

En la figura 6, se muestra el resultado del ajuste de la PSD de la señal procedente del sensor.

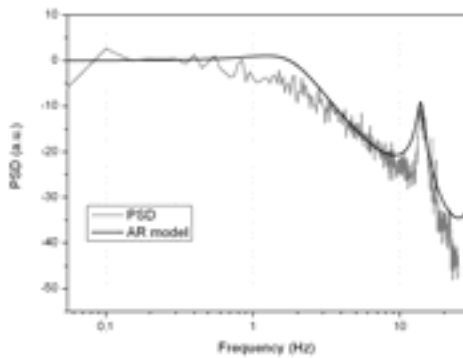


Figura 6: PSD de la señal de un sensor capacitivo tipo Rosemount y ajuste autorregresivo con 4 coeficientes.

Tal y como se puede observar en la figura, el ajuste con 4 autorregresivos no es suficiente. En este momento pueden ocurrir dos cosas: que se necesite variar el tiempo de muestreo para obtener el cuarto polo o que por el contrario no se haya eliminado completamente el ruido procedente de la planta y por eso el ajuste con cuarto coeficientes es insuficiente. De hecho al obtener los polos asociados a dicho ajuste, se obtienen cuatro complejos, en vez de dos complejos y dos reales.

Dado que el ruido de la planta está en un rango de frecuencia muy similar al de los polos del sistema sensor-línea, un filtrado sería una solución arriesgada ya que podría eliminar parte de la información dinámica del sensor.

Por tanto, se ha decidido que el ajuste debe realizarse con 6 coeficientes que darían lugar a seis polos; un par de polos complejos conjugados vinculados al ruido de planta (ruido de proceso, difícil de eliminar por filtrado), un par de complejos conjugados que representan el acoplamiento entre el sensor y la línea neumática y, por último, un par de polos reales vinculados a la dinámica interna del sensor. En la figura 7 se muestra el resultado del ajuste y en la tabla los polos reales obtenidos en cada sensor, así como los tiempos de respuesta asociados a las frecuencias de corte de éstos.

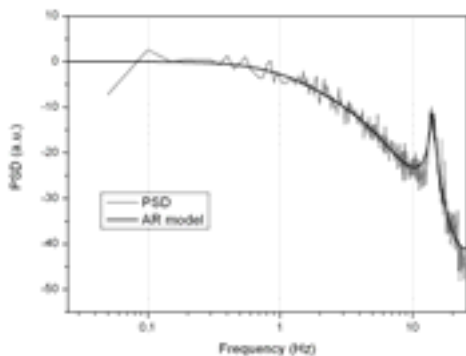


Figura 7: PSD de la señal de un sensor capacitivo tipo Rosemount y ajuste autorregresivo con 6 coeficientes

Tabla 2: Polos reales obtenidos de cada sensor y los tiempos de respuesta.

	Polo real 1	τ_1 (s)	Polo real 2	τ_2 (s)
Sensor 1	6.5987	0.1515	96.3488	0.0104
Sensor 2	5.26	0.1901	155.73	0.0064
Sensor 3	6.95	0.1431	136.98	0.0073

5. Discusión de resultados

Los tiempos de respuesta mostrados en la tabla son muy parecidos a los valores encontrados en la literatura. Hay un polo de baja frecuencia cuyo tiempo de respuesta determina fundamentalmente el tiempo de respuesta del sistema sensor-línea. El otro polo, el cuarto, tiene una contribución pequeña al tiempo de respuesta y su frecuencia de corte está en el rango de la del pico de la PSD; es decir, la frecuencia del par de polos complejos conjugados que representan el acoplamiento entre el sensor y la línea.

También se ha obtenido el tiempo de respuesta de los tres sensores mediante la respuesta a la rampa. En la figura se muestra la respuesta a la rampa del modelo AR obtenido del primer sensor analizado. Los valores obtenidos a través de la respuesta a la rampa se muestran en la tabla 3 junto con los tiempos de respuesta obtenidos por medio de la obtención de los polos.

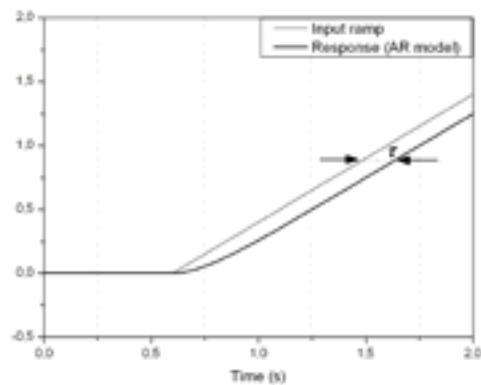


Figura 8: Tiempo de respuesta del primer sensor obtenido mediante la respuesta a la rampa.

Tabla 3: Tiempos de respuesta obtenidos por medio de la respuesta a la rampa (τ) y por medio de la obtención de los polos (τ_1 y τ_2)

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
τ_1 (s)	0.1515	0.1901	0.1431
τ_2 (s)	0.0104	0.0064	0.0073
τ (s)	0.1526	0.1857	0.14

La metodología del DDS no mejora la medida del tiempo de respuesta pero sí distingue que éste tiene dos contribuciones diferentes, tal y como se ha comprobado en laboratorio y que probablemente representen partes físicas distintas del sensor. De esta manera, la descripción del sensor se ve ampliada y al comprobarse que se puede obtener el cuarto polo en planta, al igual que en laboratorio, las posibilidades de vigilancia y diagnóstico del sensor y la línea pueden mejorarse.

6. Conclusiones

Se ha encontrado el cuarto polo de un sensor capacitivo tipo Rosemount aplicando la metodología del DDS. Los tiempos de respuesta asociados a los polos reales son acordes con los valores de la literatura procedentes de tests realizados en laboratorio.

Ante la imposibilidad de filtrar la señal adecuadamente, ya que se puede eliminar la información dinámica del sensor, el ajuste autorregresivo debe contemplar también la componente no eliminada, que se trata de un par de polos complejos conjugados, por tanto, el ajuste debe tener 6 autorregresivos (2 vinculados al acoplamiento sensor-línea, 2 a la dinámica interna del sensor y 2 al ruido de proceso).

Esta metodología supone una ampliación en la descripción in situ del sensor, obteniéndose parámetros dinámicos del mismo que hasta ahora sólo se habían adquirido en laboratorio bajo condiciones especificadas. Así, las posibilidades de vigilancia y diagnóstico se mejoran.

Referencias

- [1] A García-Berrocal, JM Chicharro, M Balbás, J Blázquez. "Non-linear noise analysis from a capacitive pressure transmitter", *Mechanical Systems and Signal Processing*. 18 (2004) 187-197.
- [2] HM Hashemian, *Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants*, Springer, Berlin, 2006.
- [3] A García-Berrocal, JM Chicharro, M Balbás, J Blázquez. "A fuzzy logic approach for noise signal reconstruction: Application to pressure sensors", *Mechanical Systems and Signal Processing*. 19 (2005) 501-508.
- [4] JM Chicharro, A García-Berrocal, M Balbás, J Blázquez. "Pressure transmitter surveillance using quaternion numbers", *Mechanical Systems and Signal Processing*. 16 (2002) 1083-1091.
- [5] J Blázquez, J Ballestrín. "Pressure transmitter surveillance: the dominant real pole case", *Prog.Nuclear Energy*. 29 (1995) 139-145.
- [6] J Barbero, J Blázquez, O Vela. "Bubbles in the sensing line of nuclear power plant pressure transmitters: the shift of spectrum resonances", *Nucl.Eng.Des.* 199 (2000) 327-334.
- [7] O Glöckler. "Reactor noise measurements in the safety and regulating systems of CANDU stations", *Prog.Nuclear Energy*. 43 (2003) 75-82.
- [8] O Glöckler, *Estimating the Response Times of SDS Pressure/Flow Transmitters and Their Sensing Lines via In-Situ At-Power Noise Measurements in Bruce-B Unit 6*, Report No.NK29-REP-63700-00001- R. (2000).
- [9] SM Wu, MC Hsu, MC Chow. "The determination of time constants of reactor pressure and temperature sensors: the dynamic data system method". *Nucl.Sci.Eng.* 72 (1979) 84-96.
- [10] MC Hsu, *On line identification of reactor dynamic characteristics from operating data analysis via Dynamic Data System methodology*, (1979).
- [11] HM Hashemian, *Sensor performance and reliability, Connecting People and Ideas in Automation and Control*, USA, 2005.
- [12] HM Hashemian, DW Mitchell, RE Fain, KM Petersen, *Long term performance and aging characteristics of nuclear plant pressure transmitters*, (1993).
- [13] C Montalvo, A García-Berrocal, J Blázquez, M Balbás. "The Hilbert transform as a quality control tool in capacitive pressure transmitters", *Mechanical Systems and Signal Processing*. 24 (2010) 1025.
- [14] K Lin, KE Holbert. "Applying the equivalent pi circuit to the modeling of hydraulic pressurized lines", *Math.Comput.Simul.* 79 (2009) 2064-2075.
- [15] K Lin, KE Holbert. "Blockage diagnostics for nuclear power plant pressure transmitter sensing lines", *Nucl.Eng.Des.* 239 (2009) 365-372.
- [16] J Ortiz-Villafuerte, R Castillo-Durán, G Alonso, G Calleros-Micheland. "BWR online monitoring system based on noise analysis", *Nucl.Eng.Des.* 236 (2006) 2394-2404.
- [17] HM Hashemian, J Jiang. "Using the noise analysis technique to detect response time problems in the sensing lines of nuclear plant pressure transmitters", *Prog.Nuclear Energy*. 52 (2010) 367.
- [18] MB Priestly, *Spectral Analysis and Time Series*, Academic Press Ltd, London, 1981.
- [19] H Akaike. "A new look at the statistical model identification", *Automatic Control, IEEE Transactions*. 19 (1974) 716-723.
- [20] S.M. Wu. "Dynamic Data System-a new modelling approach". *Transactions ASME*. 991 (1977).
- [21] S.M. Wu, C. Hsu, M.C. Chow. "The determination of time constants of reactor pressure and temperature sensors: the Dynamic Data System (DDS) method", *Nucl.Sci.Eng.* (1979).