

# LA TEORÍA DE CONTROL EN SISTEMAS DE MEDICIÓN DE ALTA EXACTITUD

M. E. Bierzychudek  
INTI Física y Metrología, Unidad Técnica Electricidad, Laboratorio de Patrones Cuánticos  
marcosb@inti.gov.ar

## Introducción

Las mediciones más exactas generan y utilizan conceptos y tecnologías extremadamente novedosas. Su asimilación es un procedimiento que requiere muchos recursos económicos y humanos para garantizar la ausencia de errores. Este necesario y ortodoxo enfoque de trabajo podría explicar la no utilización por parte de la comunidad metrológica de las teorías de control modernas de sistemas dinámicos. Lo cual es curioso, ya que los lazos clásicos de realimentación son exhaustivamente utilizados en los sistemas de medición.

Este trabajo busca revertir esta situación, presentando los beneficios de aplicar la teoría de control moderna en sistemas de medición. El documento se organiza de la siguiente manera, en primer lugar, se explica el nuevo enfoque de diseño y un conjunto de especificaciones para los lazos de control en metrología. Luego se discutirá brevemente tres casos de aplicación, dos corresponden al análisis y control de puentes de medición de resistencia basados en comparadores criogénicos de corriente (CCC) y el tercero busca optimizar la generación de señales arbitrarias con un sistema Josephson pulsado.

## La dinámica en los sistemas de medición

El estudio de la estabilidad y dinámica de un sistema de medición puede parecer innecesario, más aún la aplicación de teoría de control modernas, ya que las mediciones suelen ser realizadas cuando el sistema se encuentra en régimen estacionario. Dicho estado se define según la incertidumbre de medición requerida y la constante de tiempo del sistema. Sin embargo, existen variables ruidosas que están fuera del control del usuario y aquellas componentes con frecuencias dentro del ancho de banda de medición pueden generar errores importantes. Por ejemplo, el ruido de baja frecuencia afecta las mediciones en corriente continua (cc) y sus efectos son reducidos con la técnica de inversión, moviendo la frecuencia de medición desde cc hasta algunos mHz. Además, los sistemas pueden presentar no-linealidades o resonancias, que se suelen concentrar en los

detectores del sistema por ser elementos de gran ganancia e intrínsecamente no-lineales. En presencia de ruido, distorsiones o señales de alto slew-rate, estos dispositivos pueden rectificar componentes de alta frecuencia, degradar su desempeño, sobrecargarse o incluso saturar. Por estas razones, el estudio y control de la dinámica del sistema se torna importante para mejorar la repetibilidad de las mediciones y la facilidad de uso. Lo cual involucra un cambio en el enfoque de diseño de los sistemas de medición, ya que en este trabajo se estudia a los sistemas en un gran ancho de banda y en régimen transitorio, incluso aquellos destinados a mediciones en cc.

## Objetivo del lazo de control en metrología

En la metrología los lazos de realimentación se suelen implementar con el único objetivo de llevar a cero la lectura del detector en la frecuencia de medición, manteniendo la estabilidad del sistema realimentado. En cambio, el enfoque propuesto impone más requerimientos al controlador para lograr reducir la incertidumbre tipo A e incrementar la facilidad de uso del sistema. Se detallan a continuación algunos objetivos generales.

1. Eliminar la señal de diferencia en la frecuencia de medición para anular la lectura del detector. Se requiere un controlador con gran ganancia, idealmente infinita, en dicha frecuencia.
2. Rechazar las perturbaciones externas, como la frecuencia de línea y sus armónicos, y reducir el piso de ruido en la entrada del detector para mejorar su desempeño. Esta especificación requiere que el controlador posea una gran ganancia en el ancho de banda de las distorsiones a eliminar.
3. Rechazar señales de alto slew-rate que puedan saturar al detector. Esta especificación es similar a la anterior, pero incluye a las señales de entrada al sistema.
4. Aumentar el ancho de banda del sistema para permitir invertir la polaridad más rápido y así disminuir los efectos del ruido de baja frecuencia. Entonces, el ancho de banda del controlador debe ser mayor a la frecuencia

mínima para la cual la incertidumbre tipo A es dominada por ruido blanco.

5. Garantizar la estabilidad del sistema a lazo cerrado y frente a posibles cambios en los parámetros del sistema.

### Comparador criogénico de corriente de dos terminales

El primer caso de estudio es un puente de medición basado en un CCC, diseñado para calibrar resistores con valores nominales entre 100 kΩ y 1 GΩ [1]. Se logró modelar el comportamiento dinámico del sistema con una familia de modelos, la figura 1 presenta una comparación con el sistema real. Además, se diseñó un controlador basado en  $H^\infty$ , con el cual se obtuvo mediante simulaciones una apreciable mejora en el rechazo a ruido.

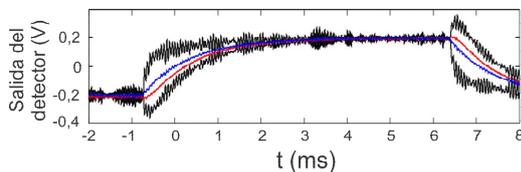


Figura 1: respuesta temporal a una onda cuadrada del sistema real (rojo) y el modelo nominal (azul). Se incluye en negro la respuesta de dos modelos extremos incluidos en la familia. Figura extraída de DOI: 10.1109/TIM.2015.2459472.

### Comparador criogénico de corriente de cuatro terminales

El siguiente puente CCC analizado fue construido por el instituto PTB en cooperación con la empresa Magnicon (<http://www.magnicon.com/>). El sistema puede medir resistores desde 1 Ω hasta 100 MΩ con incertidumbre en algunas partes en nΩ/Ω. En este caso se logró implementar un controlador diseñado por  $H^\infty$  de orden 4, frecuencia de muestreo de 100 kHz y 20 bits de resolución en la fuerza de control. El puente realimentado con el nuevo controlador logró equiparar la incertidumbre obtenida con el sistema original e incrementó hasta diez veces su rechazo a las distorsiones desde 0,1 Hz hasta 700 Hz, ver la figura 2.

### Sistema Josephson pulsado

Los sistemas de juntas Josephson operados con pulsos de corriente permiten generar formas de ondas arbitrarias con gran exactitud y baja distorsión. Uno de los desafíos con estos sistemas es la generación de un patrón de pulsos que minimice la distorsión. Se usa para esto la teoría de los moduladores  $\Sigma$ - $\Delta$  [2-3], que son sistemas realimentados. Sin embargo, la presente aplicación se diferencia del común de los casos en que se debe buscar el modulador óptimo para una única señal a reproducir. Por

lo tanto, si se estudian estos sistemas como a los moduladores  $\Sigma$ - $\Delta$ , se podrían descartar resultados óptimos. Esto se observa, figura 3, al caracterizar la relación señal-ruido del tren de pulsos para una dada señal según el orden y la robustez (norma infinita) del modulador. Resultados con norma mayor a 1,5 podrían ser descartados para un modulador  $\Sigma$ - $\Delta$ , mientras que son útiles para un sistema Josephson pulsado.

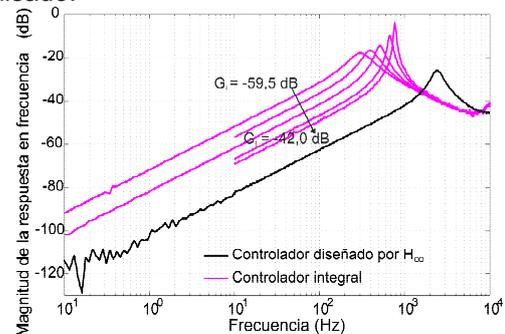


Figura 2: respuesta en frecuencia desde una entrada de distorsión hasta la salida del detector, menor magnitud involucra menores efectos de la distorsión. Para el controlador integral se muestran cinco curvas medidas con distintas ganancias ( $G_i$ ). Figura extraída de 10.1109/TIM.2017.2648898.

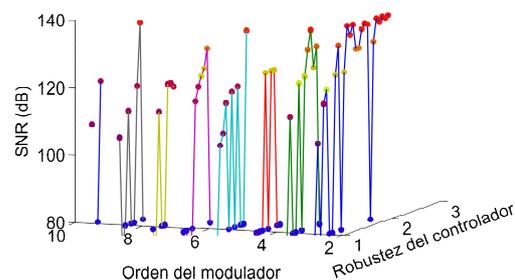


Figura 3: relación señal-ruido obtenida al simular un tren de pulsos para una señal senoidal de amplitud igual a la mitad de fondo de rango y frecuencia 10 kHz con moduladores de distinto orden y ancho de banda.

### Conclusiones

Los lazos de realimentación son parte indispensable de los sistemas de medición y su análisis metodológico puede dar resultados sobresalientes. Se presentaron tres casos de aplicación de la teoría de control en metrología y en todos ellos se pueden observar un incremento en el rechazo a ruido y distorsiones.

### Bibliografía

[1] F. L. Hernandez-Marquez, M. E. Bierzychudek, G. R. Jones Jr. and R. E. Elmquist, "Precision high value resistance scaling with a two-terminal cryogenic current comparator", Rev. Sci. Instrum. 85, 044701 (2014).  
 [2] O. F. Kieler, R. Iuzzolino and J. Kohlmann, "Sub- $\mu$ m SNS Josephson Junction Arrays for the Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer", IEEE Trans. On Applied Super., vol. 19, No 3, June 2009.  
 [3] R. Schreier, Gabor C. Temes, "Understanding Delta-Sigma Data Converters", November 2004, Wiley-IEEE Press.