



Compensación y calibración de transmisores de presión piezorresistivos de alto desempeño de forma simultánea

Cesar A. Mayor¹, Edgar Charry¹, Rodrigo Reina Muñoz², Jorge Ramírez Beltrán³, Edgar Charry Rodríguez¹

1- Laboratório de Sistemas Integráveis, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo LSI-USP

2-Universidade Federal do ABC – UFABC

3- Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. CUJAE

RESUMEN

Se presenta un sistema para la optimización del tiempo de calibración y compensación de sensores de presión piezorresistivos para aplicaciones de automatización y control, compensando diversas fuentes de error como temperatura y no linealidad. El sistema permite la automatización del proceso de calibración y compensación térmica de los transmisores usando como base el chip MAX1464 de MAXIM, por medio de un sistema de medición y programación múltiple creado a partir de la interfaz desarrollada por el fabricante del chip y modificada para adecuarla a las necesidades específicas. Esto permite la adquisición de señales en una única computadora para hasta 16 transmisores simultáneos. El tiempo fue reducido en aproximadamente 6 horas por cada transmisor adicional. En el caso de 16 transmisores el sistema sin multiplexado requeriría 114 horas mientras que el sistema con multiplexado requiere 24 horas para efectuar el proceso completo, representando una disminución de 78,9 % en el tiempo total del proceso. Los transmisores usando este sistema presentan un TEB (*Total Error Band*) menor que 0,1 % FS, mostrando que el sistema permite que los transmisores producidos cumplan con características de desempeño iguales a las alcanzadas por el sistema de compensación simple. Este proceso obedece rigurosamente a normas internacionales para transmisores para uso en sistemas de control de procesos industriales, específicamente, la norma IEC 60770.

Palabras clave: Sensores para automatización, instrumentación, calibración de sensores, compensación de error.

Abstract

A system is presented for time optimization of calibration and compensation process of piezoresistive pressure sensors for automation and control applications, with compensation of several error sources, specially, temperature dependencies and nonlinearity. This system enables the automation of the process based on the MAX1464 of MAXIM through a multiple measuring and programming system made from the interface developed by the manufacturer of the chip and modified according with specific needs. It enables the acquisition of signals on a single computer for up to 16 simultaneous transmitters, improving the total process time. The total process time has been reduced by about six hours for reach additional transmitter. In the case of 16 transmitters, the system without multiplexing would take 114 hours, while with multiplexing takes only 24 hours, representing a decrease of 78.9 % in the total processing time.

The transmitters using the multiplexing system have TEB less than 0.1 % FS. It means that the designed system allows pressure transmitters to have performance characteristics equal to those achieved by the original system. The process of calibration and compensation strictly follows international standards for use in industrial process control systems, e.g. IEC 60770 standard.

Keywords: Sensors for automation, instrumentation, sensor calibration, error compensation.

INTRODUCCIÓN

Los transmisores de presión son elementos de medición que pertenecen al área de automatización industrial. Los sensores objeto de estudio en este trabajo son sensores de presión piezorresistivos con acondicionamiento de señal para obtener una salida en corriente a dos hilos de 4-20mA. En los dispositivos estudiados, el proceso de calibración y compensación de la señal del sensor de presión es realizado de forma completamente digital, utilizando el chip MAX1464 que es un ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) de acondicionamiento de señal [1]. La producción de un transductor de presión con base en un sensor piezorresistivo debe tener en cuenta varios factores relacionados con la exactitud para hacer con que la medición de la variable del proceso y su correspondiente representación eléctrica sean próximas al valor real. En la siguiente sección serán ilustrados los factores relacionados con la exactitud del sistema. Esas fuentes de error son inherentes al transductor, pero la magnitud del error de cada una puede depender de las entradas principales como también de otras entradas del sistema.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la Figura 1 son ilustrados los factores relacionados con la exactitud del sistema.

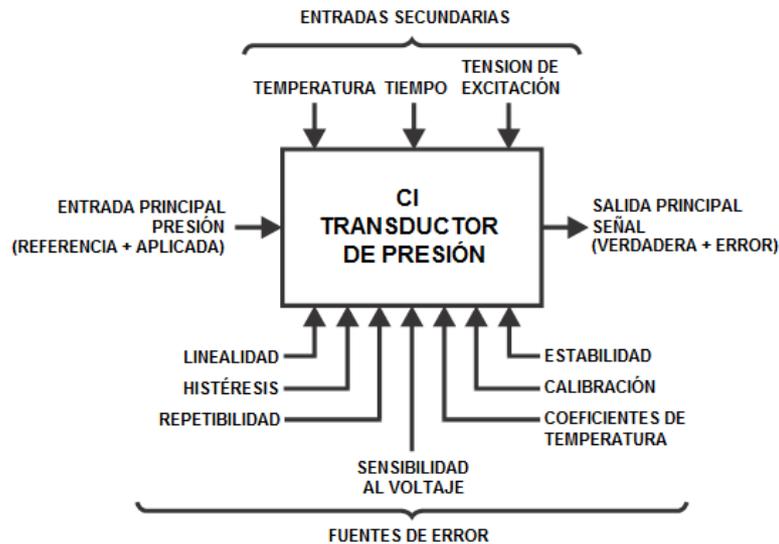


Figura 1. Parámetros de desempeño del transductor relacionados con la exactitud [2].

El objetivo es producir un transmisor en conformidad con las normas internacionales para transmisores para uso en sistemas de control de procesos industriales IEC 60770 [3],[4].

Esta norma establece métodos de ensayos uniformes para la evaluación del desempeño de transmisores con señales de salida eléctricos o neumáticos, definiendo los factores relacionados con la exactitud (estabilidad, histéresis, repetibilidad, linealidad, dependencia de temperatura, etc.) para obtener las características de error total. Las superficies ilustradas en las figuras 2 y 3 también son conocidas como *Total Error Band* (TEB), o sea, la menor banda de error que cubre todos los valores de error en función de la presión y de la temperatura dentro del rango de operación.

El comportamiento de la salida de un sensor piezorresistivo sin compensación y calibración es ilustrado en la Figura 2. El objetivo del proceso de calibración y compensación es disminuir el error de salida y obtener una superficie similar a la mostrada en la Figura 3.

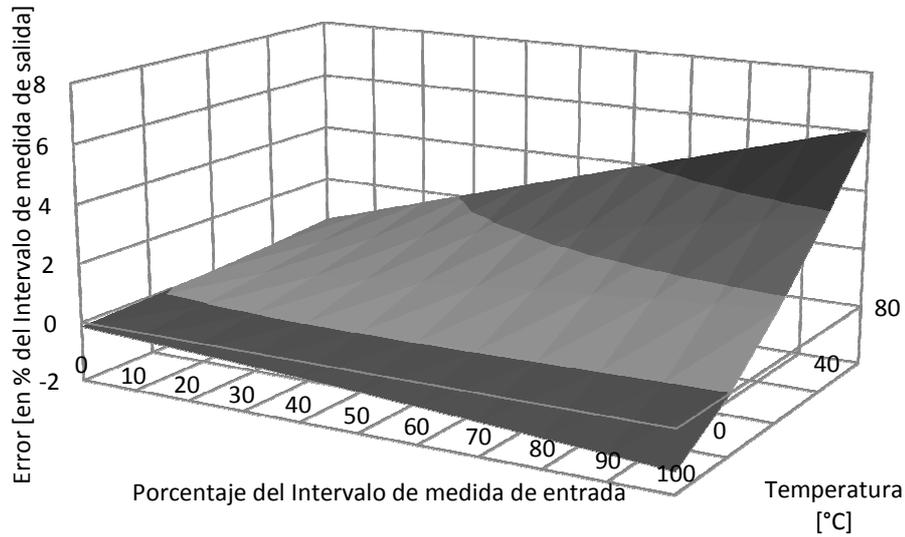


Figura 2. Sensor sin calibración y compensación: salida contra entrada en % del intervalo de medida y contra temperatura.

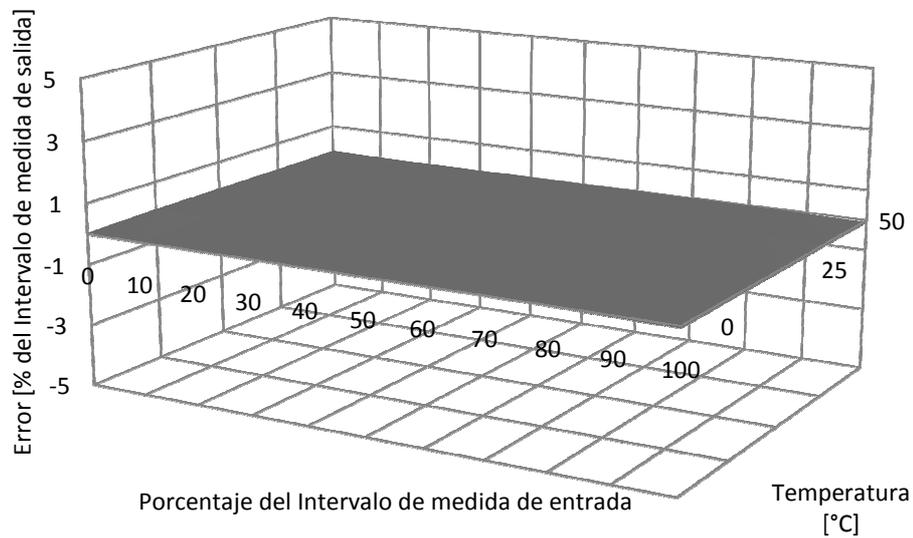


Figura 3. Sensor calibrado y compensado: error en la salida contra entrada en % del intervalo de medida y contra temperatura.

PROCESO DE CALIBRACIÓN Y COMPENSACIÓN

El proceso de corrección de las características del sensor está dividido en dos etapas fundamentales: Una de ellas es ejecutada durante la fabricación del transmisor y consiste en obtener en una bancada de calibración los coeficientes que corrigen las características del sensor y del MAX1464. Estos coeficientes son específicos para cada conjunto sensor-MAX1464. El segundo momento es ejecutado cuando el transmisor está midiendo y consiste en ejecutar en tiempo real las funciones de corrección de los datos medidos por el sensor y entregar en la salida el resultado de la medición corregida usando los coeficientes que fueron calculados en la fase de calibración y compensación [5].

Los transmisores pasan por una fase de adquisición de datos a tres temperaturas y tres presiones, tomando datos del conversor Analógico Digital (*Analog to Digital Converter* - ADC) del sensor de presión, del ADC del sensor de temperatura y también tomando datos para dos puntos de corriente de la salida correspondientes a dos valores de configuración del conversor Digital Analógico (*Digital to Analog Converter* - DAC), para generar una matriz como la ilustrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de mediciones del proceso de calibración y compensación.

	Pmin	Pmed	Pmax	Temp	Iout1	Iout2
Tmin	Adc1,1	Adc1,2	Adc1,3	Tadc1	Iout1,1	Iout1,2
Tmed	Adc2,1	Adc2,2	Adc2,3	Tadc2	Iout2,1	Iout2,2
Tmax	Adc3,1	Adc3,2	Adc3,3	Tadc3	Iout3,1	Iout3,2

Las temperaturas y presiones a las que son sometidos los transmisores en el proceso de medición son las que determinan el rango de operación. Por ejemplo, si el objetivo del transmisor es entregar una salida calibrada y compensada de 0 bar a 10 bar para funcionar en un ambiente con temperaturas entre 0°C y 50°C, los valores para Tmin, Tmed, Tmax, Pmin, Pmed y Pmax serían:

Tmin = 0°C, Tmed = 25°C, Tmax=50°C

Pmin = 0 bar, Pmed = 5 bar, Pmax=10 bar

Para adquirir los datos es usada una interfaz de usuario en Labview (interfaz del propio fabricante del chip MAX1464). La interfaz permite configurar y leer los registros del MAX1464, con acceso a las lecturas del ADC y consiguiendo también configurar el DAC para obtener cualquier salida deseada dentro de los límites permitidos.

El sistema de adquisición de datos de la empresa MAXIM (fabricante del MAX1464) permite realizar el proceso de calibración y compensación para un único transmisor de presión por vez, y ese proceso toma aproximadamente dos horas y media para cada temperatura, sumando un total de aproximadamente 7 a 8 horas para el proceso completo de calibración y compensación de un único transmisor. Esto debido a que para poder obtener mediciones confiables es necesario esperar que todas las partes del transmisor (sensor, dispositivos electrónicos, conector al proceso y piezas de protección y aislamiento del medio) hayan alcanzado la estabilización térmica antes de efectuar las mediciones.

PROPUESTA DEL SISTEMA DE MULTIPLEXADO

Debido a la cantidad de tiempo empleado para compensar y calibrar cada transmisor de presión fue necesario diseñar un sistema de adquisición de datos que permitiese minimizar el tiempo de estabilización térmica y efectuar mediciones de varios transmisores de presión simultáneamente. El trabajo realizado en esta etapa es de vital importancia para la mejora del sistema y para incrementar el número de transmisores que pueden ser calibrados. Consiste básicamente en el diseño de un sistema de multiplexado así como el protocolo de comunicaciones para hacer el control con una interfaz de usuario en Labview.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE MULTIPLEXADO

El hardware diseñado efectúa el multiplexado de las señales necesarias para el proceso de compensación y calibración de los transmisores de presión objeto de estudio. Las señales multiplexadas son las siguientes: comunicación SPI (5 hilos: VDD, DGND, CS, DIO, SCLK) y alimentación del transmisor (2 hilos: positivo y negativo de la fuente de voltaje). Es importante mencionar que el negativo de la fuente de voltaje y el terminal GND de la comunicación SPI son señales diferentes debido a las características del hardware del transmisor de presión [6].

El sistema de multiplexado está preparado para utilizar los transmisores de presión con salida en corriente 4-20mA basados en el MAX1464. Estos son conformados por el sensor de presión, el MAX1464, los circuitos de acondicionamiento de señal y las conexiones y características mecánicas apropiadas para uso en procesos industriales, como ilustrado en la Figura 4.

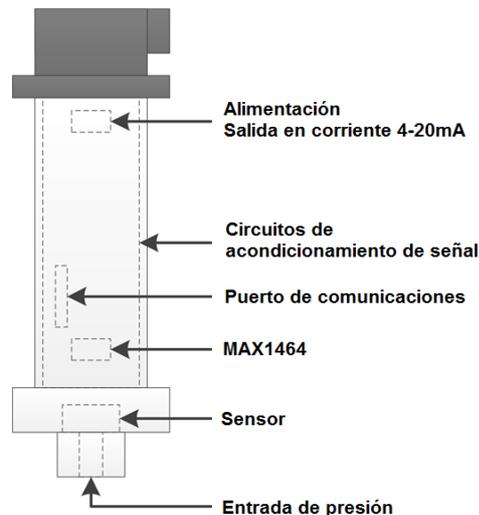


Figura 4. Ilustración del transmisor de presión con salida en corriente de 4-20mA.

Estos transmisores de presión son colocados en el sistema de control de presión, temperatura y humedad como ilustrado en la Figura 5. En la Figura 5 las conexiones en color negro representan los cables de alimentación, las conexiones en azul representan los cables de comunicación SPI de cada transmisor de presión y la conexión gris indica la entrada de aire presurizado. En la Figura 5 son ilustrados únicamente 4 transmisores de presión, más el sistema está preparado para 16 transmisores.

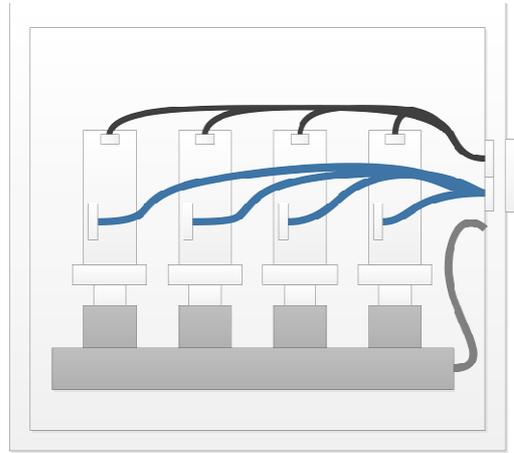


Figura 5. Ilustración de la cámara climática con los transmisores de presión y el sistema de distribución de presión de aire.

El montaje de los transmisores de presión dentro de la cámara climática, en conjunto con el sistema de multiplexado son ilustrados en la Figura 6. En la Figura 6 las conexiones en color negro representan los cabos de alimentación, las conexiones en azul representan los cabos de comunicación SPI de cada transmisor de presión, la conexión gris indica la entrada de aire presurizado, las conexiones en verde indican los cabos de comunicación RS232 entre el PC y los dispositivos y la conexión naranja indica la comunicación paralela generada por el PC para controlar el MAX1464. Esta comunicación es convertida para SPI para poder adecuarlas a las características de la puerta de comunicaciones de cada MAX1464.

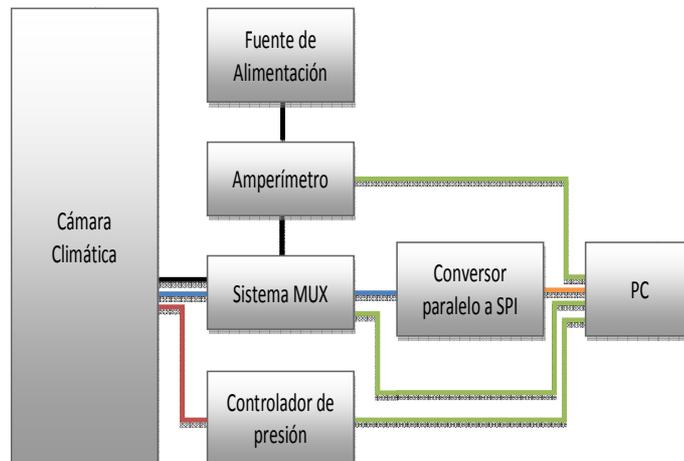


Figura 6. Montaje del sistema de multiplexado para calibración y compensación de los transmisores de presión.

El diagrama de bloques con las señales, la fuente de alimentación y la computadora está ilustrado en la Figura 7. En la Figura 7: (A) representa un multímetro en modo de medición de corriente, (MUX) representa el multiplexador diseñado, (TPPx) representa cada transmisor de presión y (Paralelo a SPI) representa el módulo de la MAXIM para hacer la conversión de paralelo a SPI.

Las señales multiplexadas son las correspondientes al protocolo SPI (5 hilos) y a la alimentación del transmisor (2 hilos). Para el SPI todos los voltajes están en el rango 0-5 V. El consumo de corriente en el transmisor no es influenciado por la conexión SPI visto que cuando son realizadas las mediciones, la puerta SPI no es usada; la misma es usada solo para configuración de los registradores o para programar la memoria Flash del MAX1464. Para la alimentación del transmisor los voltajes están entre 12-32 V. La corriente mínima es de 4 mA y la máxima es de 20 mA.

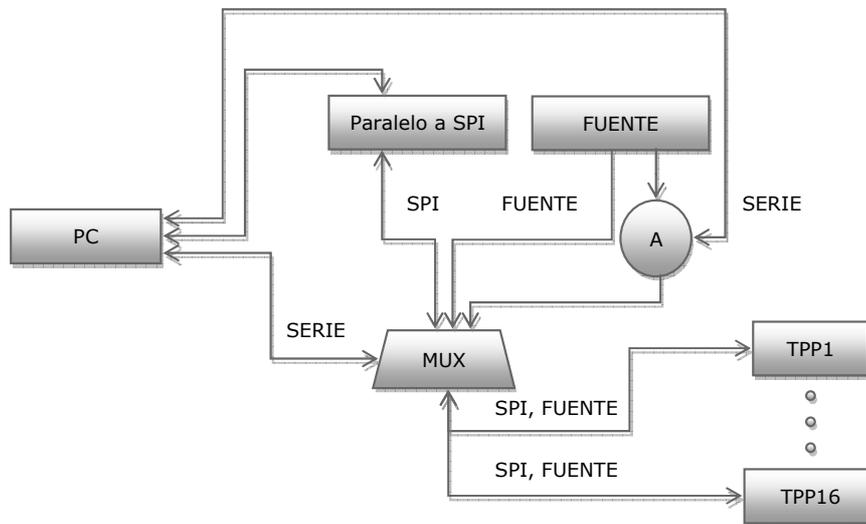


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de multiplexado

PROTOCOLO SERIAL EN EL MICONTROLIDADOR DEL SISTEMA DE MULTIPLEXADO

El protocolo de comunicaciones entre el sistema de multiplexado y la interfaz de usuario en Labview usa el estandar RS232. El diagrama de flujo del software elaborado en el microcontrolador del sistema de multiplexado es ilustrado en la Figura 8.

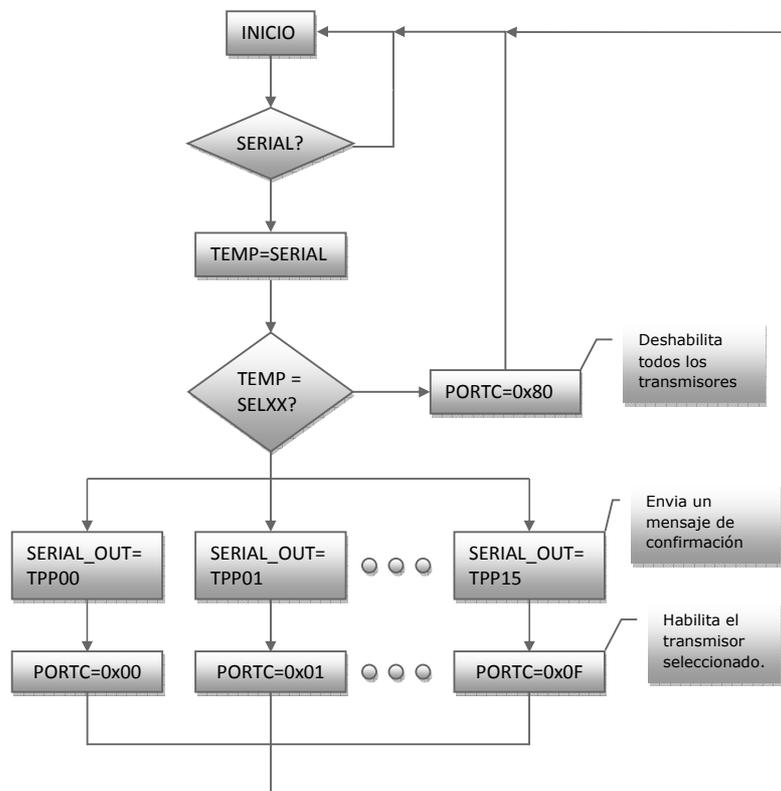


Figura 8. Diagrama de flujo del software programado en el microcontrolador del sistema de multiplexado.

El sistema propuesto permite una comunicación suficientemente rápida y confiable para enviar los datos de configuración, comandos y mensajes de estado y error entre el sistema multiplexador y la interfaz de usuario.

INTERFAZ DE USUARIO EN EL LABVIEW

La interfaz de usuario creada para expandir el proceso de calibración y compensación de un transmisor para 16 transmisores es la etapa crucial de este trabajo, pues implica modificar la interfaz de usuario suministrada por el fabricante del chip, de tal forma que sea posible aplicar el proceso de calibración y compensación para un número mayor de transmisores de presión en ambiente de programación Labview.

La interfaz de usuario fue elaborada para dar acceso a todas las funciones de configuración, medición, generación de coeficientes y programación del MAX1464, usando como base la interfaz de usuario para un único transmisor suministrada por la MAXIM. La Figura 9 ilustra el panel frontal de la interfaz de usuario ya modificada para el sistema con multiplexado. La inclusión de los 16 transmisores de presión puede ser vista en el lado derecho de la Figura 9.

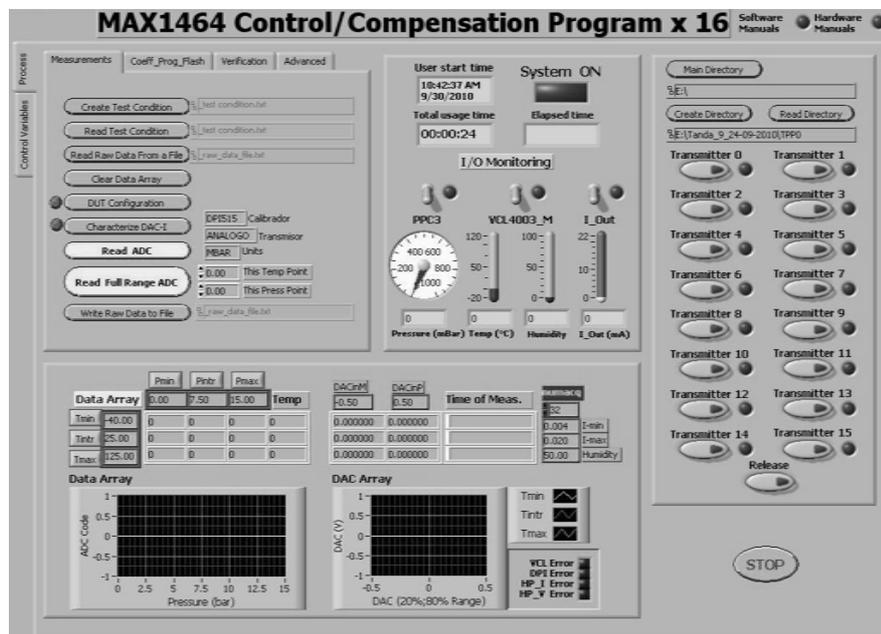


Figura 9. Panel frontal de la interfaz de usuario.

La interfaz de usuario está dividida en cuatro módulos que contienen todas las opciones necesarias para el proceso de calibración y compensación. El primer módulo contiene las opciones para efectuar las mediciones, la generación de coeficientes, programación, configuración y verificación. El segundo módulo contiene informaciones del proceso e indicadores del calibrador de presión, temperatura y humedad de la cámara climática y corriente de salida del transmisor de presión seleccionado. El tercer módulo contiene los controles para crear o leer carpetas de trabajo y para activar o desactivar cualquiera de las 16 salidas del multiplexador. El cuarto módulo contiene las matrices y gráficos de los datos medidos.

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN Y COMPENSACIÓN USANDO LA INTERFAZ DE USUARIO

Existen tres fases en el procedimiento de calibración y compensación. En la primera fase es realizada la configuración del sistema. La segunda fase corresponde a la adquisición de datos y en la tercera fase es realizada la generación de coeficientes y programación del transmisor.

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

En la fase de configuración del sistema el usuario tiene que crear las carpetas de trabajo de cada transmisor donde serán almacenados los archivos de condiciones de pruebas, mediciones, coeficientes generados y archivos HEX para programar el MAX1464. Posteriormente, deben ser configurados los registros de cada MAX1464 para cada transmisor de presión con los valores típicos. El valor del registro que configura la ganancia del PGA (Amplificador de Ganancia Programable) debe ser ajustado para obtener un mejor desempeño y maximizar el rango de operación del conversor ADC del MAX1464. Para eso debe ser seleccionada la temperatura para la cual la sensibilidad del sensor es mayor y aplicar presión máxima y mínima en un proceso iterativo hasta obtener la ganancia que maximice la salida del ADC. En la Figura 10 es ilustrado el diagrama de flujo de esta fase.

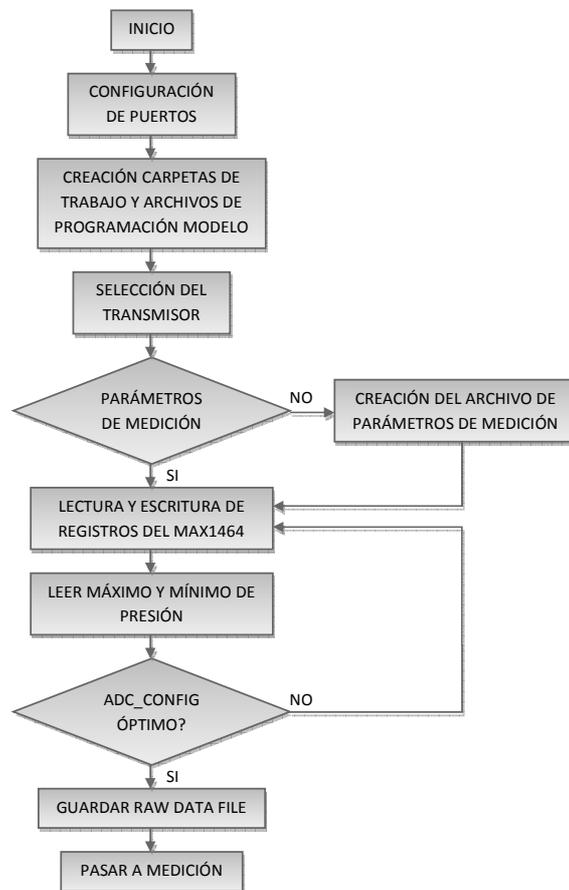


Figura 10. Diagrama de flujo de la configuración del sistema

PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

En la fase de mediciones el usuario debe ajustar los puntos de temperatura en la cámara climática y esperar la estabilización térmica para posteriormente hacer mediciones de las diferentes presiones y temperaturas del MAX1464 y del sensor de presión. Esta fase toma aproximadamente 2 horas y media para cada una de las tres temperaturas, dependiendo de la cantidad de transmisores de presión medidos. En la Figura 11 es ilustrado el diagrama de flujo de esta fase.

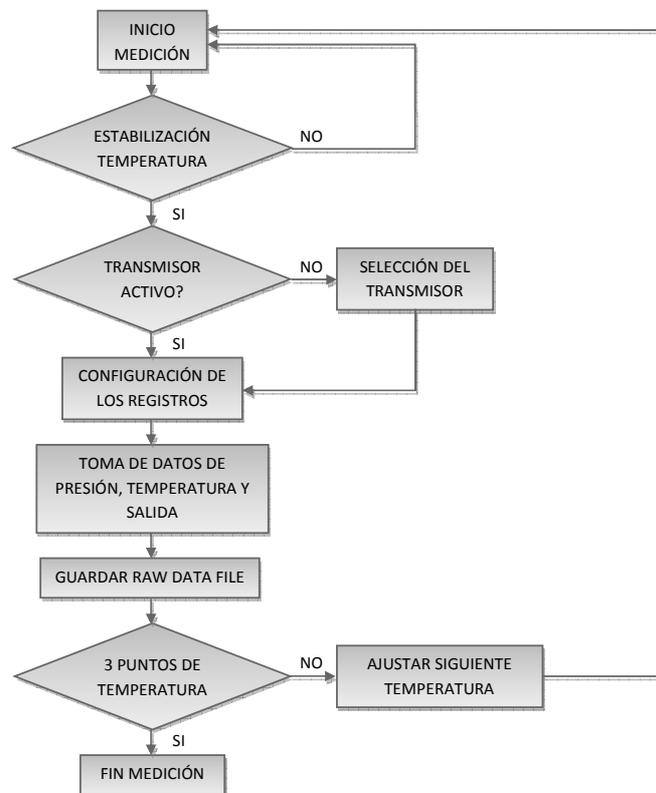


Figura 11. Diagrama de flujo del procedimiento de medición

GENERACIÓN DE COEFICIENTES Y PROGRAMACIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN

Esta fase exige que el archivo de mediciones *Raw data file* haya sido generado previamente, ya que contiene las mediciones de presión y temperatura y los valores de los registradores con que fueron realizadas esas mediciones. En la Figura 12 es ilustrado el diagrama de flujo de esta fase.

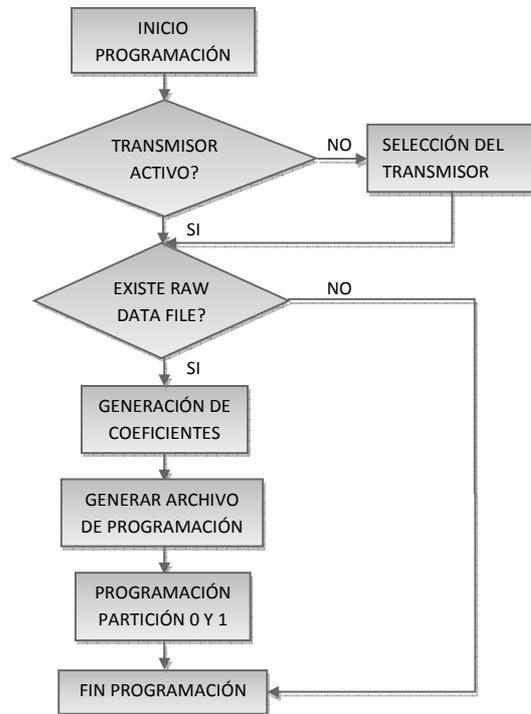


Figura 12. Diagrama de flujo de la generación de los coeficientes y programación del MAX1464

Los datos guardados en el archivo *Raw data file* son usados para generar los coeficientes de compensación y calibración para cada transmisor de presión. Estos coeficientes son incluidos en el archivo “HEX” de programación de cada MAX1464 para ser posteriormente programados, dejándolos listos para pruebas y funcionamiento normal.

RESULTADOS

Las pruebas para evaluar el sistema fueron realizadas con sensores de presión piezorresistivos antes y después de ser integrados con los circuitos de acondicionamiento de señal que conforman los transmisores de presión, y antes de pasar por el procedimiento de compensación y calibración, para poder comparar los resultados del procedimiento y del sistema desarrollado. Los sensores usados para las pruebas fueron sometidos al procedimiento de medición descrito en la norma IEC 60770, usando el software de adquisición de datos programado en Labview y sometiendo los sensores a condiciones controladas de temperatura y humedad. Fueron usados 4 sensores Keller PR 9FL, con rango de presión de 20 bar, sometidos a excitación constante de 1 mA. Las características de los 4 sensores antes de la calibración y compensación obtenidas siguiendo el proceso de medición están resumidas en la tabla 2.

Tabla 2. Características de los sensores medidos antes de calibrar y compensar.

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
No Linealidad [% intervalo de medida]	0.042	0.035	0.043	0.043
Histéresis [% intervalo de medida]	0.011	0.041	0.030	0.012
Repetividad [% intervalo de medida]	0.080	0.074	0.067	0.091
TCS [% intervalo de medida /°C]	0.094	0.089	0.089	0.096
TCO [% intervalo de medida /°C]	0.774	0.997	2.222	0.198
Error medio [% intervalo de medida]	1.118	0.697	0.666	1.018
Total Error Band [% intervalo de medida]	6.150	4.746	4.752	5.917

La Figura 13 ilustra el resultado de las mediciones de los sensores de presión antes del proceso de calibración y compensación. En esa figura, las diferencias entre las inclinaciones de cada reta así como el punto de origen de cada una de estas, muestra la fuerte dependencia que los sensores de presión piezorresistivos tienen en relación a la temperatura, y la grande necesidad de efectuar el proceso de compensación y calibración.

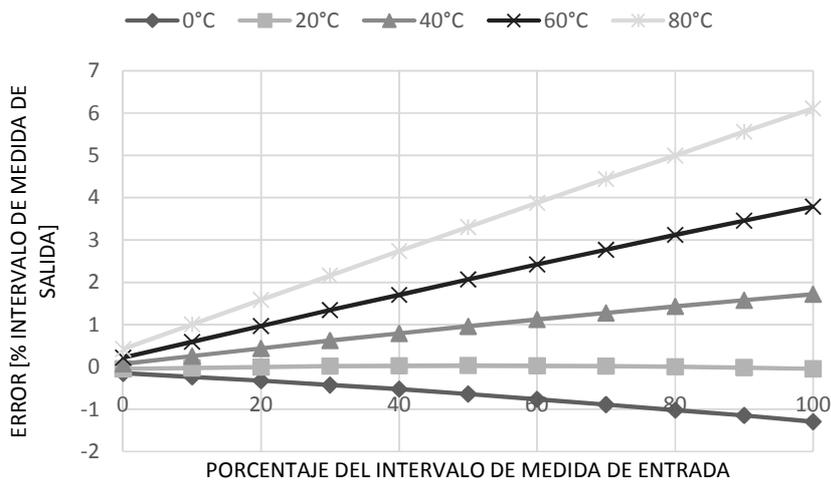


Figura 13. Salida del sensor comparada con la salida a la temperatura de referencia (20°C) vs entrada en porcentaje del intervalo de medida de entrada.

Las características de los 4 transmisores de presión después de pasar por el proceso de calibración y compensación obtenidas siguiendo el proceso de medición están resumidas en la tabla 3.

Tabla 3. Características de los transmisores de presión medidos después del proceso de calibración y compensación usando el sistema de multiplexado.

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
No Linealidad [% intervalo de medida]	0.022	0.024	0.020	0.026
Histéresis [% intervalo de medida]	0.028	0.016	0.012	0.011
Repetitividad [% intervalo de medida]	0.023	0.024	0.012	0.014
TCS [% intervalo de medida /°C]	0.001	0.001	0.001	0.001
TCO [% intervalo de medida /°C]	0.091	0.089	0.136	0.025
Error medio [% intervalo de medida]	0.059	0.076	0.081	0.062
Total Error Band [% intervalo de medida]	0.06	0.087	0.098	0.082

La Figura 14 muestra los resultados de las mediciones de los transmisores de presión compensados y calibrados usando el sistema de multiplexado. Es importante observar en la Figura 14 como la dependencia con la temperatura que el sensor piezorresistivo presenta, mostrada en Figura 13, es significativamente reducida con el transmisor compensado y calibrado y consecuentemente esto lleva a una grand disminución en los parámetros de desempeño del transmisor (Error medio, *Total Error Band*, etc.).

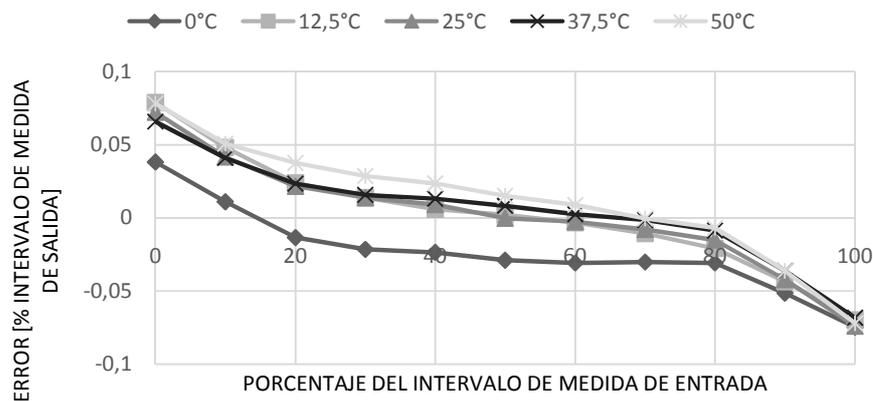


Figura 14. Error de la salida de los transmisores de presión comparada con la salida ideal después de ser calibrados y compensados con el sistema de multiplexado.

El tiempo total del proceso de calibración y compensación fue registrado comparando el sistema con y sin multiplexado. Los resultados son mostrados en la Figura 15. Como puede ser observado fue obtenida una reducción muy significativa en el tiempo total representando una disminución de aproximadamente 6 horas por cada transmisor adicional compensado y calibrado de forma simultánea con el sistema de multiplexado.

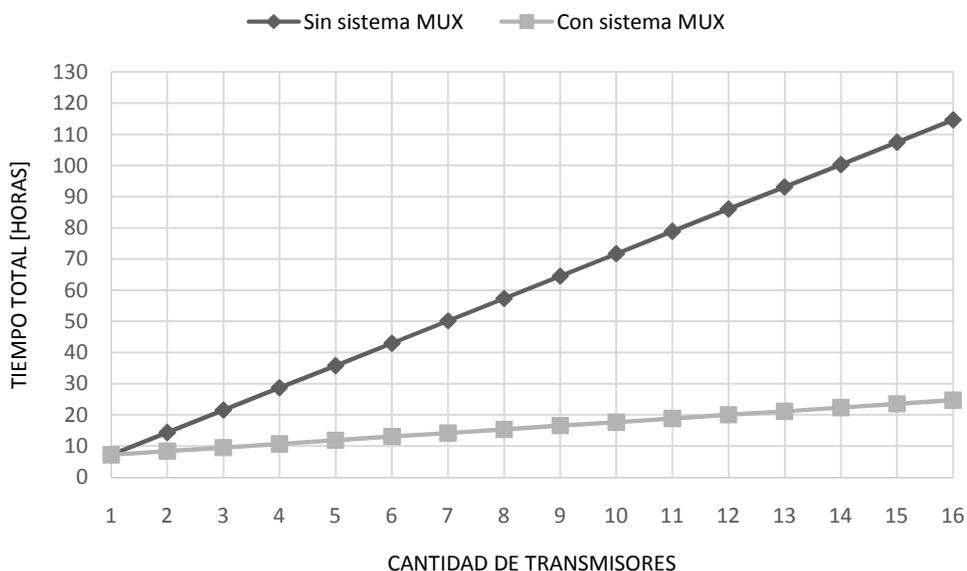


Figura 15. Tiempo total del proceso de compensación y calibración con y sin el sistema de multiplexado vs cantidad de transmisores.

DISCUSIONES

Como puede ser observado comparando los resultados de las mediciones de las Tablas 2 y 3, y en las Figuras 10 y 11, los sensores antes de ser compensados y calibrados presentan una alta dependencia con la temperatura, como también presentan características como no linealidad e histéresis. En el caso de la no linealidad y de la histéresis es observado en la media una disminución de esos valores, pero el caso más notable es la disminución de la dependencia térmica de la sensibilidad y del offset. Para los sensores sin compensar y calibrar el error medio es de casi 1 % del intervalo de medida y el TEB llega hasta 6 % del intervalo de medida. Ya para las mediciones de los transmisores compensados y calibrados el error medio es aproximadamente 0,07 % del intervalo de medida, en cuanto el TEB no supera el 0,1 % del intervalo de medida.

Estos resultados coinciden con la disminución del TCO (coeficiente de temperatura del cero) y TCS (coeficiente de temperatura de la sensibilidad) debido al proceso de calibración y compensación. Para los sensores sin calibrar y compensar el TCO llega a alcanzar más de 2 % del intervalo de medida/ $^{\circ}\text{C}$ y el TCS alcanza 0,1 % del intervalo de medida/ $^{\circ}\text{C}$. Ya para los transmisores compensados y calibrados el TCO es de aproximadamente 0,1 % del intervalo de medida / $^{\circ}\text{C}$ y el TCS de aproximadamente 0,001 % intervalo de medida/ $^{\circ}\text{C}$, significando una disminución de la dependencia de los transmisores con la temperatura.

Los resultados de las características de los transmisores de presión calibrados y compensados usando el sistema de multiplexado son iguales a los obtenidos con el sistema original suministrado por la MAXIM (calibración y compensación de un único transmisor por vez), demostrando que el sistema diseñado no interfiere en las mediciones y permite que los transmisores de presión cumplan con las características de desempeño deseadas, o sea, mantener la salida con TEB menor que 0,1%FS.

PROBLEMAS ASOCIADOS A LAS MEDICIONES

En el procedimiento de medición se pueden presentar varios problemas debido a factores externos y de manipulación del transmisor que influyen la confiabilidad de los datos medidos. Estos problemas están relacionados principalmente con el tiempo necesario de estabilización térmica antes de efectuar la medición.

Las diferencias térmicas influyen principalmente en las mediciones de salida de corriente para cambios en los valores del DAC y las mediciones del ADC del sensor de temperatura.

CONCLUSIÓN

Los transmisores calibrados y compensados usando el sistema de multiplexado diseñado cumplen con las características de desempeño deseadas, iguales o mejores que las alcanzadas por el sistema de compensación y calibración simple (de un único transmisor de presión por vez).

El tiempo total del proceso de compensación y calibración de más de un transmisor fue reducido en aproximadamente 6 horas por cada transmisor adicional hasta un máximo de 16 transmisores simultáneos. En el caso de 16 transmisores el sistema sin multiplexado demoraría 114 horas comparado con 24 horas del sistema con multiplexado.

El sistema de multiplexado diseñado permite producir transmisores de presión con características de alto desempeño con una reducción muy significativa en el tiempo total del proceso.

Con futuras versiones del sistema de multiplexado sería interesante efectuar una verificación automática de la estabilidad de las mediciones en función del tiempo de estabilización térmica para evitar posibles errores y aumentar la confiabilidad de cada medición. También, sería interesante disminuir más la intervención del usuario para elevar el nivel de automatización del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero del *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq*, al *Laboratório de Sistemas Integráveis – LSI da Universidade de São Paulo*, y a La empresa *MEMS – Microsistemas Integrados Híbridos de Pressão Indústria y Comércio Ltda*,

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Maxim**, “MAX1464 Low-Power Low-Noise Multichannel Sensor Signal Processor Overview”, [Online] Disponible en: <http://data.sheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1464.pdf> [Acceso en 20 Febrero 2013], 2005.
2. **Honeywell** “Pressure Transducer Accuracy in Application”. Technical Note [Online] Disponible en: http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/pressure/technical/008111_1.pdf [Acceso en 20 Febrero 2013], 2004.
3. **CENELEC, BS EN 60770** – “Transmitters for use in industrial process control systems: Methods for performance evaluation, 1999”.
4. **CENELEC, IEC 61298 – 1**. “Process measurement and control devices - General methods and procedures for evaluating performance: General considerations”, 1995.
5. **Maxim**, “MAX1464 Signal-Conditioner, Sensor Compensation Algorithm, Application Note 3649”, [Online] Disponible en: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN3649.pdf> [Acceso en 10 Febrero 2013], 2005.
6. **Fernandes da Luz, S.**, “Microsistema transmissor de pressão piezoresistivo de 4-20mA de alta precisão.”, Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2006.

AUTORES

Cesar A. Mayor. Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. E-mail: cesar.augusto.mayor@usp.br.

Edgar Charry. Maestría en la Universidad de Melbourne, Australia. Ingeniero de desarrollo en Pro-Active Medical PtyLtd, PRO, Australia. E-mail: echarry@hotmail.com.

Rodrigo Reina Muñoz. Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Profesor adjunto de la Universidade Federal do ABC - UFABC, SP – Brasil. E-mail: rodrigo.muñoz@ufabc.edu.br.

Jorge Ramírez Beltrán. Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sao Paulo (USP). Brasil. Investigador del Centro de Investigaciones Hidráulicas del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CIH-CUJAE). E-mail: jramirez@cih.cujae.edu.cu.

Edgar Charry Rodríguez. Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Profesor-Investigador de la misma universidad. E-mail: charry@lsi.usp.br.