



TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL DE MUY ALTA PRECISIÓN Y ESTABILIDAD

Alejandro Rafael García Ibarra^{1,2}, Arturo Hernández González^{2,3}, Jorge Ramírez Beltrán^{2,3},
Rodrigo Reina Muñoz^{2,4}, Edgar Charry Rodríguez^{1,2}

1-Laboratório de Sistemas Integráveis da EPUSP;

2- Microssistemas Integrados Híbridos de Pressão Industrial Ltda;

3-Instituto Superior Politécnico José Antônio Echeverría. Cujae;

4-Universidade Federal do ABC.

RESUMEN

Este trabajo presenta un novedoso diseño para la fabricación de transmisores industriales de presión de tipo diferencial piezorresistivo con salida analógica a dos hilos de 4-20mA. Los dispositivos usan un DSSP (procesador digital de señal del sensor) para realizar la compensación térmica para temperaturas desde 0°C hasta 80°C. La calibración para la medición de la presión diferencial se realiza en el intervalo de 0 a 25bard [1 bard = 10⁵Pa diferenciales] y la presión de línea utilizada varía desde 0 hasta 7barg [1 bard = 10⁵Pa relativos a la presión atmosférica]. Los transmisores desarrollados permiten la lectura de diversas variables industriales como la presión diferencial, la presión relativa y la presión absoluta y tienen un TEB (*Total Error Band*) menor que 0,15% FSO (*Full Scale Output*).

Palabras clave: sensor de presión diferencial piezorresistivo, acondicionamiento de señales, transmisor de presión diferencial, precisión, total error band.

ABSTRACT

This work presents the fabrication of piezoresistive differential pressure transmitters with analog output two-wire 4-20 mA. The devices use a DSSP (Digital Signal Processor Sensor) to achieve temperature compensation at temperatures from 0°C to 80°C and differential pressure calibration range from 0 bard to 25 bard [1 bard = 10⁵ Pa differentials] and line pressure range from 0 to 7barg [1 bard = 10⁵ Pa above atmospheric pressure]. The transmitters measure several industrial variables: differential pressure, relative pressure and absolute pressure. The transmitters have a TEB (total error band) less than 0.15 percent of full scale output.

Key words: piezoresistive differential pressure sensor, signal conditioning, differential pressure transmitter, accuracy, Total Error Band.

Keywords: Differential pressure sensor, signal conditioning, differential pressure transmitter, precision, total error band.

INTRODUCCIÓN

Un transmisor de presión diferencial es un dispositivo básico para medir flujo, nivel y detección de fugas. Además de esto, los transmisores de presión diferencial tienen aplicaciones en la medición de presiones diferenciales, relativas y absolutas. Es decir, es un dispositivo fundamental en el área de la automatización.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar transmisores diferenciales de presión utilizando sensores piezorresistivos OEM (*Original Equipment Manufacturer*), que tuvieran un TEB mejor que 0,15% FSO y con gran estabilidad.

El trabajo que aquí se presentase desarrolló en el Laboratorio de Sistemas Integrables (LSI) que pertenece a la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo (EPUSP) en Brasil. Actualmente Brasil importa la mayor parte de transmisores de presión diferencial piezorresistivos, dado que este tipo de instrumento se fabrica en dicho país. Los transmisores de presión que se producen en Brasil utilizan principalmente sensores capacitivos y esto tiene un efecto negativo en el precio del producto al ser mucho más costosos que los piezorresistivos.

El Laboratorio de Sistemas Integrables de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo (LSI-EPUSP) en cooperación con una empresa (1) desarrolló un proyecto para cumplir con el objetivo planteado en este trabajo y obtener un transmisor de presión diferencial con las características antes mencionadas para la medición de flujo, nivel y la detección de fugas. El encapsulamiento del sensor fue fabricado de acero inoxidable lo que le permite resistir presiones de línea de hasta 200 barg en ambientes industriales agresivos.

La calibración y compensación (C&C) del sensor son realizadas de forma completamente digital utilizando la tecnología DSSP (*Digital Sensor Signal Processor*). Esta tecnología permite obtener precisiones mejores que 0,15% FSO para el intervalo de temperaturas desde 0°C hasta 80°C. Durante la C&C de los transmisores se utiliza un algoritmo ya reportado de aproximación por polinomios para la corrección de la señal del sensor de presión. Los datos experimentales que caracterizan el comportamiento de los transmisores se obtienen en un banco de calibración conformado principalmente por cámaras climáticas con control de humedad y calibradores de presión.

El procedimiento de C&C de los transmisores de presión fue implementado por el grupo de investigación tecnológica del LSI-EPUSP. Este procedimiento fue validado a través de la fabricación y caracterización de diferentes tipos de transmisores de presión piezorresistivos que posteriormente se utilizaron en aplicaciones de campo en la industria en general.

La señal de salida del sensor de presión se procesa digitalmente y se acondiciona al patrón de comunicación de 4-20mA mediante el proyecto consolidado de un convertidor de tensión a corriente. La dependencia térmica de este convertidor también es compensada por el algoritmo.

Como resultado de este trabajo fueron fabricados 10 transmisores diferenciales de presión para el intervalo desde 0 barg hasta 25 barg y presiones de línea desde 0 barg hasta 7 barg. Estos transmisores fueron compensados para las temperaturas desde 0°C hasta 80°C y caracterizados utilizando los procedimientos descritos en las normas internacionales IEC 60770 y BS 6174.

A partir de la caracterización fue determinado un TEB (*Total Error Band*) mejor que 0,15% FSO. El TEB incluye los errores de histéresis, repetibilidad, no linealidad, TCS (*Thermal Coefficient Span*) y TCO (*Thermal Coefficient Offset*).

CONSTRUCCIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL PIEZORRESISTIVO CON SALIDA ANALÓGICA 4-20mA.

En la construcción del transmisor se utilizó un sensor diferencial de presión basado en el principio piezorresistivo. Este sensor fue alimentado con corriente para disminuir la dependencia térmica de su señal de salida. El sensor puede ser utilizado en un intervalo de presión diferencial de 0 hasta 35 barg y resiste una presión de línea de hasta 200 barg. A través de un circuito electrónico y de un proceso de calibración y compensación el transmisor es compensado para las temperaturas de 0 a 80 °C y calibrado en el intervalo de presión diferencial de 0 a 25 barg y depresión de la línea de 0 hasta 7 barg. El acondicionamiento y procesamiento digital de la señal de salida del sensor se desarrollan dentro de un sistema basado en un DSSP. El acondicionamiento y procesamiento de señales estarán constituidos de tres etapas fundamentales: conversión analógica-digital, calibración y compensación en temperatura y conversión digital-analógica. La señal de corriente de 4-20mA es generada por una fuente de corriente controlada por tensión. El diagrama esquemático del transmisor de presión diferencial se muestra en la figura 1.

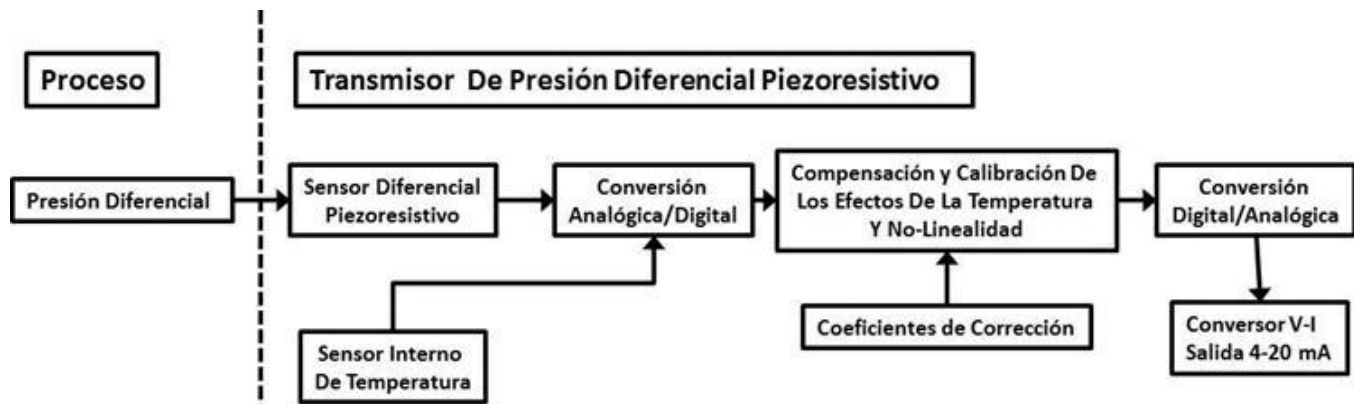


Figura 1: Diagrama esquemático del transmisor de presión diferencial

HARDWARE

SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL: FUNDAMENTOS

El sensor de presión diferencial tiene la misma configuración que los sensores de presión relativa y absoluta, donde las presiones de referencia son la presión atmosférica y la presión cero absoluto (2). Para el caso del sensor de presión diferencial, la presión de referencia se sustituye por un nuevo valor de presión. La figura 2 muestra la configuración interna de un sensor de presión diferencial piezoresistivo. En esta figura se observan los dos puertos de entrada de presión P_1 y P_2 , y el elemento sensor piezoresistivo fabricado sobre una membrana de silicio protegido por un gel de silicona.

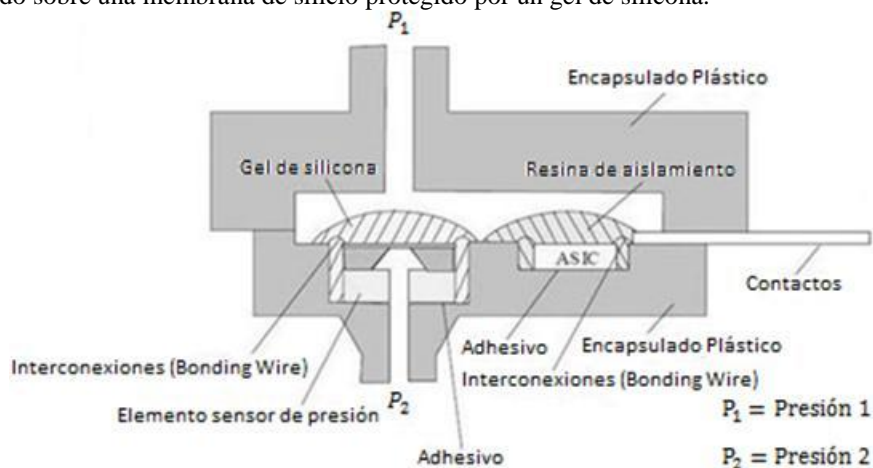


Figura 2: Configuración del sensor diferencial (2)

El funcionamiento de los sensores de presión diferencial está basado en dos reglas generales. La primera de estas reglas establece la máxima presión diferencial P_{max} la cual se define por las características físicas del sensor de presión (2). Esta regla se representa por las ecuaciones 1 y 2.

$$P_1 - P_2 < P_{max} \quad (1)$$

$$P_2 - P_1 < P_{max} \quad (2)$$

Donde P_1 y P_2 son las presiones aplicadas en los dos puertos del sensor de presión diferencial

La segunda regla está relacionada con la resistencia del encapsulado del sensor a una presión aplicada de forma simultánea en los dos puertos de entrada del sensor. Esto significa que ni P_1 ni P_2 pueden exceder un cierto valor de presión, como se muestra en la ecuación 3, donde el parámetro P_{System} representa la máxima presión del sistema o la máxima presión de línea.

$$P_1, P_2 \leq P_{System} \quad (3)$$

En algunos casos, la salida del sensor de presión no es solamente proporcional a la presión diferencial, sino también (en menor medida) a la presión de línea. Este último efecto es denominado como sensibilidad del sensor a la presión de línea.

Tipos de sensores diferenciales

Sensor de presión diferencial unidireccional

El sensor de presión unidireccional mide presiones diferenciales en un único sentido. Esto quiere decir que un puerto de entrada determinado siempre debe estar expuesto a la mayor presión y por tanto, solo se puede utilizar, cuando se conoce a priori cual es la presión más alta a medir. La presión diferencial para este tipo de sensor está dada por la ecuación 4. La deflexión de la membrana de un sensor de presión diferencial unidireccional se ilustra en la figura 3a.

$$0 \leq P_1 - P_2 \leq P_{max} \quad (4)$$

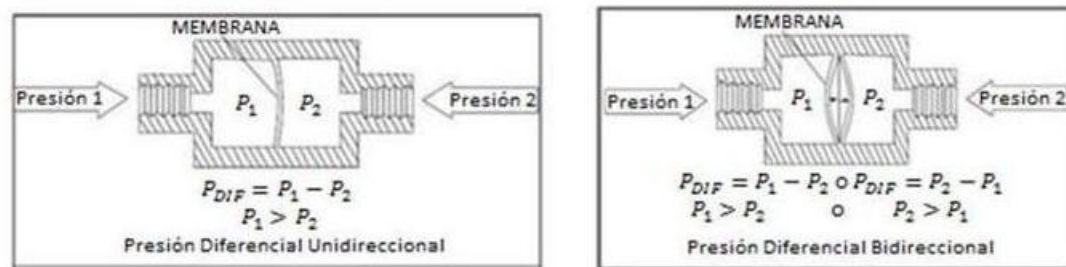


Figura 3: (a) Sensor de presión diferencial unidireccional. (b) Sensor de presión diferencial bidireccional(3)

Sensor de presión diferencial bidireccional

Este tipo de sensor de presión tiene la capacidad de medir presiones diferenciales positivas y negativas. Esto significa que la presión en uno de los puertos de entrada puede ser mayor o menor que la presión aplicada en el otro puerto del sensor(3). Las presiones P_1 y P_2 aplicadas al sensor bidireccional deben cumplir las condiciones de la ecuación 5

$$P_{min} \leq |P_1 - P_2| \leq P_{max} \quad (5)$$

Donde P_{min} y P_{max} son los valores mínimo y máximo del intervalo de presión del sensor diferencial. En la figura 3b se muestra la deflexión de la membrana de un sensor bidireccional.

Sensor de presión diferencial basado en dos sensores de presión absoluta

Este dispositivo de presión diferencial utiliza dos sensores de presión absoluta y la salida diferencial generada de forma indirecta. Este dispositivo es apropiado para ser utilizado en aplicaciones que requieren de alta presión en línea. Para este tipo de sensor diferencial, el requisito para su uso, es que la presión diferencial medida debe ser mayor que el 5% de la presión de la línea(4).

En la ecuación 6 se presenta el cálculo del error para este tipo de sensores de presión diferencial.

$$\text{Error de la presión diferencial (\% FSO)} = \frac{\text{Error de la presión de línea (\% FSO)}}{\text{Rango de presión de línea}} * \frac{\text{Rango de presión de línea}}{\text{Rango de presión diferencial}} \quad (6)$$

Sensor de presión diferencial utilizado en el transmisor

Para el desarrollo del transmisor de este trabajo fue seleccionado un sensor de presión diferencial piezorresistivo unidireccional el cual se muestra en la figura 4. La construcción integrada del sensor proporciona la posibilidad de la medición de presiones de línea con alta estabilidad y fiabilidad hasta 200 barg. Los lados de alta y baja presión están protegidos por diafragmas en acero inoxidable lo que le permite al sensor trabajar en ambientes agresivos. Internamente, la presión diferencial aplicada se transmite a un puente de Wheatstone piezorresistivo a través de un aceite de silicona(5).

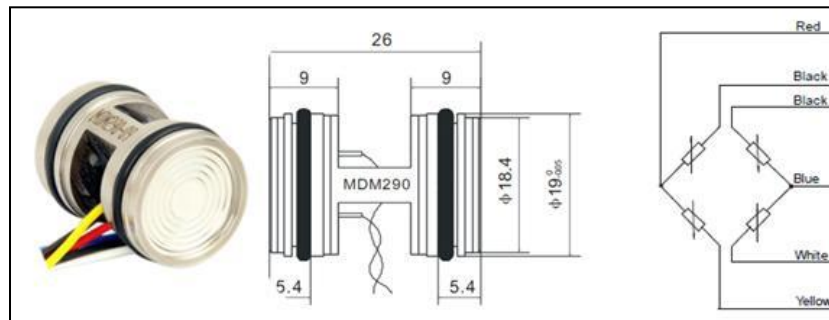


Figura 4: Sensor diferencial encapsulado y puente de Wheatstone piezorresistivo(5)

En las tablas 1 y 2 son especificados los intervalos de presión y las características de precisión del sensor de presión diferencial. Estas características y el bajo costo de este sensor fueron los criterios para su selección en la fabricación del transmisor de presión diferencial.

Tabla 1: Especificación de datos básicos del sensor

Parámetro	Valor.
Intervalo de Presión Diferencial	0-35 bard
Intervalo de Presión de Línea	0-200 barg
Corriente de Alimentación	1,5mA
Sobre-Presión Positiva	70bard
Sobre-Presión Negativa	10bard

Tabla 2: Especificaciones de las características de desempeño del sensor

Parámetro	Val. Min.	Valor Typ.	Valor Max.	Unidades
No linealidad		±0,15	±0,25	%FSO, BFSL
Histéresis		±0,05	±0,075	%FSO
Repetibilidad		±0,05	±0,075	%FSO
Estabilidad		±0,3	±0,5	% FSO/Año
Error Térmico del Cero		+1,0	1,2	%FSO, @25°C
Error Térmico del Intervalo de Medida		1,0	1,2	%FSO, @25°C
Offset			3	mV
Intervalo de Medida	190,4		191,5	mV
Imp. de Entrada	3		8	kΩ
Imp. de Salida	3,5		6	kΩ

ENCAPSULADO DEL SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL

El diseño del encapsulado del sensor de presión sigue la norma internacional BS EN 61518:2001 que especifica los materiales y las dimensiones de los diversos tipos de encapsulados utilizados en sensores diferenciales piezorresistivos. Este empaquetado fue fabricado por una empresa nacional brasileña permitiendo tener un producto mecánico de alta calidad y bajo costo. En la figura 5 se representa el sensor ya empaquetado en una estructura de acero inoxidable AISI 304 con conexiones al proceso $\frac{1}{4}$ "NPT (*National Pipe Thread*). Las dimensiones de este fueron: 8cm de longitud, 3cm de diámetro y 5cm de altura. Una de las funciones principales de este encapsulado es facilitar la conexión de los transmisores al proceso que se quiere medir(6).

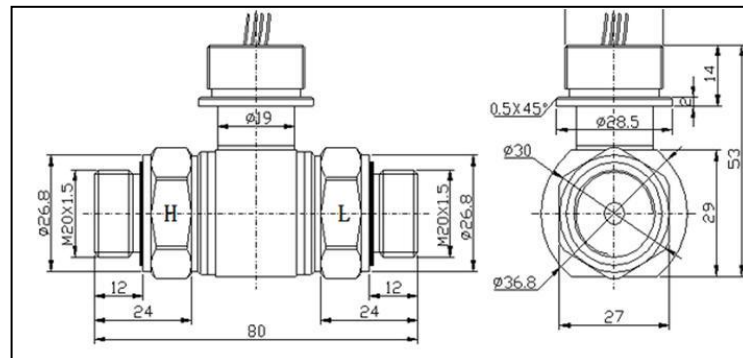


Figura 5: Carcasa en acero inoxidable del sensor de presión diferencial

ACONDICIONAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL DEL SENSOR DE PRESIÓN

Los circuitos de acondicionamiento de señal son utilizados con el fin de compensar y calibrar los sensores de presión piezorresistivos, eliminar las variaciones de sus principales parámetros sensibles a la temperatura y ajustar los parámetros que difieren de su valor de diseño. En la literatura ha sido reportada gran variedad de circuitos de acondicionamiento de señal con diferentes características y grados de complejidad.

Actualmente existen diversas formas de realizar el acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores de presión. Entre las más usadas se encuentran las que utilizan técnicas puramente analógicas, basadas principalmente en el uso de redes resistivas, amplificadores operacionales y diodos (7-8).

Otros circuitos de acondicionamiento de señal ampliamente utilizados son los que pertenecen al grupo de ASSP (*Analog Sensor Signal Processor*)(9), (10). Estos dispositivos se caracterizan principalmente por mantener la señal del sensor en formato analógico y realizar la corrección de la sensibilidad y el offset usando PGA (*Programmable Gain Amplifier*), DAC (*Digital to Analog Converter*), ADC (*Analog to Digital Converter*) y memorias no volátiles para grabar los coeficientes de corrección.

Una de las formas más novedosas para acondicionar las señales provenientes de sensores es mediante la utilización de DSSP (*Digital Sensor Signal Processor*)(11), (12). Estos dispositivos digitalizan la señal del sensor usando un ADC, la acondicionan y luego la convierten al formato analógico por medio de un DAC o la envían mediante una salida digital. Las ventajas que ofrecen estos dispositivos están estrechamente relacionadas con la variedad de opciones que ofrece la compensación digital, así como también la alta precisión que es posible obtener a su salida.

El acondicionamiento de señales del sensor de presión utilizado en este proyecto es realizado con técnicas DSSP. El circuito de acondicionamiento y procesamiento de señales está basado en el circuito DSSP MAX1464 el cual permite la compensación de las influencias de la temperatura sobre la señal de presión. En el diseño del transmisor utilizando este DSSP, además de colocarse las componentes externas que necesita este dispositivo, también fueron diseñadas: la fuente de corriente que alimenta el sensor, el convertidor tensión-corriente que genera la salida de 4-20mA y una fuente de alimentación para todo el circuito.

DSSP MAX1464

El MAX1464 es un chip ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) de acondicionamiento de señales, con alto nivel de integración, de bajo consumo de potencia y con varios canales de bajo nivel de ruido. El MAX1464 puede ser utilizado con sensores de salida única o de salida diferencial con sensibilidades desde 1 mV/V hasta 1 V/V (13). Este circuito permite la amplificación de la señal del sensor, su calibración, linealización y compensación entemperatura, lo que permite abordar un desempeño global, incluyendo también la repetibilidad de las mediciones, sin la necesidad de ningún componente externo de ajuste(14).

Diseño de la fuente de corriente del sensor de presión

En el diseño de la fuente de corriente que alimenta al sensor se utilizó uno de los amplificadores operacionales que se encuentra a disposición del usuario en el MAX1464. El consumo global del transmisor debe ser menor que 4mA y por esta razón se determinó el mayor valor de corriente de alimentación del sensor que permite cumplir esta condición(15), (16). Se diseñó una fuente de corriente de 470uA de tal forma que la tensión de salida del sensor estuviese dentro del intervalo de entrada del MAX1464.

Diseño del convertor tensión-corriente

El diseño del convertor tensión-corriente se basa en las referencias(17) y(18). Para el convertor tensión-corriente se usa también un amplificador operacional de los que posee integrado el MAX1464. En la elección del transistor se consideró la potencia máxima que este puede soportar a la máxima temperatura de operación del transmisor. Se seleccionó el transistor 2N3440. Para el cálculo de las resistencias que fijaron los parámetros de funcionamiento del convertor tensión-corriente.

Fuente de tensión del circuito electrónico

En la selección de la referencia de tensión para implementar la fuente de alimentación de todo el circuito tuvo que ser considerado el consumo de corriente del DSSP al momento de la grabación del *firmware*. Este valor puede alcanzar los 30mA y debe ser garantizado por la referencia de tensión que alimenta el circuito. Otro aspecto a ser considerado es que la tensión máxima en la entrada de la referencia fuese compatible con la máxima tensión de trabajo del transmisor, evitando tener que colocar componentes adicionales para reducir la tensión de entrada de la referencia de tensión(17). Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores fue seleccionada la referencia de tensión MAX15006B de MAXIM, la cual proporciona una tensión de salida 5V para el intervalo de tensiones de entrada de 4V a 40V (19). Las características de tensión de este regulador son compatibles con las necesidades de consumo y alimentación de los componentes de la placa electrónica usada en este trabajo.

CALIBRACIÓN Y COMPENSACIÓN: FUNDAMENTOS

En la mayoría de los sensores se necesitan corregir las características no deseadas como la no linealidad y la dependencia de la sensibilidad con la temperatura. En el caso específico de sensores de presión piezorresistivos estos presentan fundamentalmente no-linealidad, una salida diferente de cero (offset), dependencia térmica tanto del intervalo de medida como del offset y la necesidad de calibrar su salida para un intervalo determinado debido a las variaciones del proceso de fabricación de los sensores.

En este trabajo fueron utilizados dos algoritmos desarrollados por la MAXIM (20) que han sido modificados e implementados por el grupo de investigaciones de LSI-USP (21), (22) y (23). Uno de estos algoritmos fue utilizado para calibrar y caracterizar los transmisores de presión y otro para realizar la compensación del sensor utilizando la tecnología DSSP. El proceso de corrección de las características del sensor se divide en dos etapas fundamentales: una que se ejecuta *in factory*, es decir, durante la fabricación del transmisor y consiste en obtener en un banco de calibración los coeficientes específicos que corrigen las características del sensor y del circuito de acondicionamiento de señal. Para esto se utiliza un algoritmo de calibración que obtiene los coeficientes específicos para cada transmisor. La segunda etapa es ejecutada *in service*, o sea, cuando el transmisor está midiendo la presión y consiste en ejecutar en tiempo real las ecuaciones de corrección de los datos medidos por el sensor para después proporcionar a la salida el resultado de la medición compensado. Para este fin se utiliza un algoritmo de compensación que tiene como base la utilización de polinomios de segundo orden. Las correcciones a la señal del sensor son realizadas en el dominio digital y posteriormente se hace la de corrección del bloque de salida analógica del transmisor.

Este algoritmo fue implementado para el chip MAX1464 en específico. Las funciones de corrección son implementadas en la CPU del MAX1464 cambiando de un transmisor para otro los coeficientes de estas funciones, que fueron ya calculadas *in factory* (20), (21), (22). Los algoritmos de calibración y compensación están estrechamente relacionados.

Algoritmo de calibración de los transmisores de presión

Para obtener los valores de los coeficientes, los transmisores son caracterizados para determinar las características y variaciones tanto del sensor como de los diferentes subsistemas del circuito de acondicionamiento que pueden afectar la salida del transmisor (20). Para esto es utilizado un sistema de calibración constituido por una cámara climática con control de temperatura y humedad, dos calibradores de presión, un multímetro de alta precisión, una fuente de alimentación y un computador. El sistema utilizado para la calibración fue desarrollado por el grupo de LSI-EPUSP y está totalmente automatizado permitiendo calibrar de forma paralela hasta 16 transmisores de presión (21). En la figura 6 se muestra una representación del sistema de calibración.



Figura 6: Sistema de calibración de los transmisores de presión

Mediante un procedimiento matemático se obtienen los coeficientes y éstos son grabados como constantes en el programa que se ejecuta en la CPU del MAX1464 de cada transmisor. El diagrama esquemático del algoritmo de calibración se muestra en la figura 7. En este algoritmo, a partir de una matriz de datos obtenida experimentalmente, se modelan matemáticamente los datos del sensor de presión, del sensor de temperatura y del bloque de salida analógica. Posteriormente, se modela la corrección de los datos de la temperatura y con la función que representa la temperatura ya corregida se hace el modelado de la corrección de los datos de presión y del bloque de salida analógica. Partiendo de estos modelos es posible obtener los coeficientes necesarios para realizar la compensación de cada bloque del transmisor de presión utilizando el algoritmo descrito en (20).

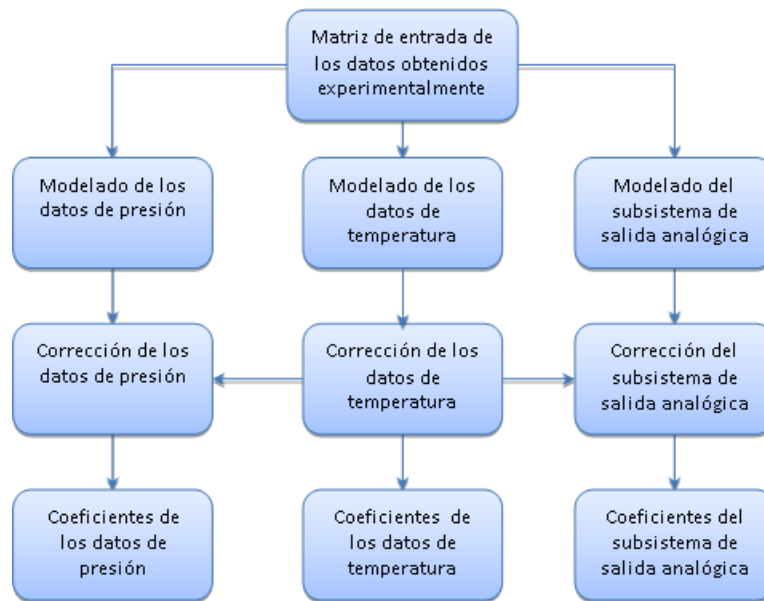


Figura 7: Diagrama esquemático del algoritmo de calibración de los transmisores

Para modelar el comportamiento del sensor de presión se utilizan nueve puntos obtenidos experimentalmente midiendo la señal de salida para tres presiones diferentes (P_{min} , P_{med} , P_{max}) a cada una de las tres temperaturas de referencia (T_{min} , T_{med} y T_{max}). De esta forma es obtenida mediante interpolación una función que depende de la presión y la temperatura, donde los nueve puntos son los nodos de la interpolación. Esta función representa el comportamiento del sensor de presión.

En un primer paso se modelan los datos de presión para cada temperatura independientemente para así obtener las funciones que caracterizan estos datos en cada temperatura. Posteriormente con estas tres funciones obtenidas para las tres temperaturas, se modela la variación de los coeficientes de cada una de estas funciones con la temperatura, para así obtener una función única que represente el comportamiento de los datos de presión con la temperatura y la presión. Como en ambos casos la interpolación se lleva a cabo con tres nodos, las funciones obtenidas son de segundo orden y como la función general obtenida depende de dos variables, esta representará una superficie en el espacio.

El objetivo de modelar los datos de temperatura es obtener una función que represente el comportamiento del sensor de temperatura partiendo de tres datos obtenidos en la salida del conversor ADC cuando este mide el sensor de temperatura. Con estos tres puntos medidos se obtiene una función de segundo orden que intercepta los nodos de interpolación. Esto significa una aproximación, pues a partir de sólo tres puntos se estima el comportamiento del sensor de temperatura en todo su intervalo de medición.

El bloque de salida analógica compuesto por el DAC y el conversor tensión-corriente (V-I) también debe ser modelado para conocer el comportamiento de este con la temperatura. En el algoritmo este es modelado como una línea recta donde los parámetros de la misma tienen dependencia térmica. De esta forma, se considera que los errores de linealidad que pueden introducir este bloque no necesitan ser corregidos. Para modelar este bloque se obtienen los valores de corriente en su salida para dos valores de referencia diferentes, colocados en la entrada del DAC a las tres temperaturas T_{min} , T_{med} y T_{max} .

El objetivo principal de este proceso de calibración es determinar los coeficientes independientes que caracterizan y compensan cada transmisor. La utilización de estos coeficientes en el MAX1464 hace posible obtener en la salida del transmisor 4 mA, cuando se aplica la presión mínima al sensor, así como también obtener 20 mA en la salida para la presión máxima, independientemente de la temperatura. Por lo tanto, es posible calibrar un sensor en un intervalo de presión inferior a la de él, ya que el proceso de calibración permite obtener los coeficientes para ajustar la corriente de salida entre 4 y 20 mA para el intervalo de presión deseado. En (21) se presentan los pasos que deben ser seguidos en el proceso de calibración de los transmisores de presión.

Algoritmo de compensación implementado en los transmisores de presión

En la literatura han sido reportados varios algoritmos para realizar el acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores de presión. La selección de un algoritmo en particular depende de las características de la señal de salida del sensor y de la capacidad del dispositivo inteligente que se utiliza en el proyecto.

Es importante entender la forma como se corrigen los errores de la señal del sensor de presión. Como puede verse en la figura 8, la CPU (*Central Processing Unit*) recibe los datos de los sensores de presión y temperatura en formato digital, antes del bloque de salida analógica. Dado que la corrección en tiempo real ocurre en la CPU, si en esta se corrigen solamente los errores del sensor de presión y de temperatura, cuando la señal es enviada al bloque de salida analógica, este degrada la corrección realizada por ser también sensible a la temperatura. Para que lo anterior no ocurra se debe caracterizar también el bloque de salida analógica para saber cómo este afectaría la señal. Entonces la CPU antes de enviar el dato al DAC, debe modificarlo en la misma magnitud pero en sentido contrario a como sería afectado por el bloque para obtener en la salida del mismo el valor deseado. Es decir, los errores de la señal de presión y la temperatura son corregidos después de que ocurren y los errores del DAC y el convertor V-I son corregidos antes de que ocurran (24).

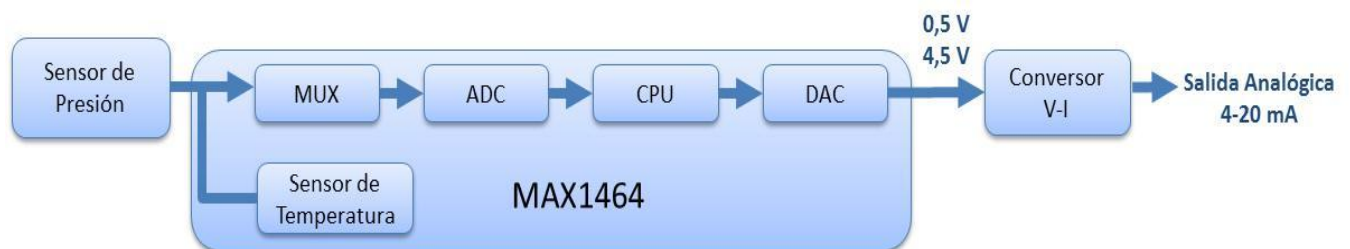


Figura 8: Diagrama esquemático del DSSP MAX1464

En el desarrollo de este trabajo fue utilizado un algoritmo ya reportado que se basa en una compensación por polinomios de segundo orden (20). Cuando el transmisor está en funcionamiento, el DSSP obtiene los valores de presión (P) y temperatura (T) y ejecuta una compensación polinómica para obtener el valor de presión compensado PC por medio de la ecuación 7.

$$PC(P, T) = X(T) + Y(T) * P + Z(T) * P^2 \quad (7)$$

Los coeficientes X , Y y Z son dependientes de la temperatura y tienen que ser obtenidos a través de las ecuaciones 8, 9 y 10.

$$X(T) = X_0 + X_1 * T + X_2 * T^2 \quad (8)$$

$$Y(T) = Y_0 + Y_1 * T + Y_2 * T^2 \quad (9)$$

$$Z(T) = Z_0 + Z_1 * T + Z_2 * T^2 \quad (10)$$

Los coeficientes $X_0, X_1, X_2, Y_0, Y_1, Y_2, Z_0, Z_1$ e Z_2 deben ser calculados y grabados previamente en la memoria de programa del DSSP durante el proceso de calibración y compensación del transmisor.

Para obtener una salida analógica compensada (SA) se debe realizar la compensación térmica del bloque analógico de salida (DAC y convertor $V-I$). El valor de salida analógica puede ser calculado utilizando la ecuación 11

$$SA(P, T) = W(T) * PC(P, T) + K(T) \quad (11)$$

Los coeficientes W y K dependen de la temperatura y pueden ser obtenidos utilizando las ecuaciones 12 y 13.

$$W(T) = W_0 + W_1 * T + W_2 * T^2 \quad (12)$$

$$K(T) = K_0 + K_1 * T + K_2 * T^2 \quad (13)$$

Los coeficientes W_0, W_1, W_2, K_0, K_1 y K_2 también deben ser calculados en el proceso de calibración y compensación del transmisor de presión.

De esta forma, utilizando el algoritmo descrito anteriormente el MAX1464 realiza *in servicel* las correcciones de la no-linealidad, el offset, la ganancia de la señal del sensor de presión y la dependencia térmica de las características del sensor.

CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SALIDA DEL SENSOR Y DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Para realizar la caracterización de los sensores y los transmisores de presión diferencial fue usada la metodología descrita en las normas BS 60770-2:2011 y BS 61298-2:2008. Por medio de esta caracterización fue calculado el TEB que se compone de los parámetros de no-linealidad, histéresis, repetibilidad, TCO y TCS.

En esta metodología se recomienda para la evaluación del desempeño de estos dispositivos realizar entre 3y5 ciclos de presión en todo el intervalo de operación para valores crecientes y decrecientes. La cantidad y localización de los puntos de prueba deben ser considerados dependiendo del tipo de prueba deseado, del grado de precisión que se desea y de las características evaluadas. El número y la ubicación de puntos de prueba deben ser consideradas en función de la prueba deseada, el grado de precisión deseado y las características evaluadas (25), (26). En la tabla 3 se muestra la cantidad de ciclos de medición y el número y la ubicación de puntos de prueba recomendados, dependiendo de las necesidades.

Tabla3: Cantidad de ciclos de medición. Cantidad y localización de los puntos de prueba(25)

Tipo de prueba	Cantidad de los ciclos de medición	Cantidad de puntos de prueba	Localización de los puntos de prueba (% del intervalo de medida de entrada)
Evaluación de desempeño	3 o 5	6	0-20-40-60-80-100
Pruebas de caracterización		11	0-10-20-30-40-50-60-70-80-90-100
Prueba de rutina	1	5	0-25-50-75-100
Prueba de ejemplo			

Para los objetivos del proyecto se decidió realizar tres ciclos de presión. Cada ciclo comprendió una rampa positiva y una rampa negativa de presión, de tal forma que los valores de presión fueron variados en pasos de 20% desde 0 hasta el máximo valor de presión, es decir, 6 puntos de medición en la caracterización de los sensores de presión. En el caso de transmisores de presión fueron tomados cinco puntos en el intervalo total de presión con intervalos de 25%.

Con estos datos fue generada una tabla para cada punto de prueba en cada uno de los ciclos colocando los errores de salida de cada sensor. Estos errores son la diferencia entre el valor de salida y el valor ideal, expresados como porcentaje de la amplitud de la señal de salida (% FSO). Adicionalmente es colocada en esta tabla el promedio de los errores de las rampas positivas de los tres ciclos, de la rampa negativa y un promedio general obtenido a partir de las rampas positivas y negativas para cada punto de prueba. A partir de los datos de error de la tabla se calculan los parámetros de repetibilidad, histéresis y no-linealidad tanto en los sensores como en los transmisores de presión(25), (26). A continuación son definidos los parámetros de precisión, TCO, TCS y TEB.

Precisión

La precisión es dada como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la repetibilidad, histéresis y no linealidad (27). La precisión es expresada en por ciento de plena escala [% FSO] como se muestra en la ecuación 14.

$$Precisión[\%FSO] = \sqrt{No\ Linealidad^2 + Repetibilidad^2 + Histéresis^2} \quad (14)$$

Coeficiente de temperatura del offset (TCO)

El offset es la salida del transmisor a la temperatura de referencia cuando la presión aplicada es cero, es decir, es el desvío de la señal de salida cuando a la entrada hay cero presión. El offset varía con la temperatura. El coeficiente térmico del offset se define como la desviación máxima en la salida cuando la temperatura varía desde la temperatura de referencia (T_{ref}) hasta cualquier otra temperatura (T) en el intervalo de trabajo del sensor. Se especifica en % FSO. El cálculo del TCO puede ser establecido por la relación que se muestra en la Ecuación 15.

$$TCO[\%FSO] = \left(\frac{\text{Offset}(T) - \text{Offset}(T_0)}{T - T_0} \right) \quad (15)$$

Donde "Offset(T_0)" es el offset a la temperatura de referencia, " T " es la temperatura, " T_0 " es la temperatura de referencia y "TCO" es el coeficiente de temperatura del offset.

Coeficiente de temperatura del intervalo de medida (TCS)

El coeficiente de temperatura del intervalo de medida se define como la máxima desviación del intervalo de medida cuando la temperatura varía desde la temperatura de referencia (T_{ref}) hasta cualquier otra temperatura (T) en el intervalo de funcionamiento del transmisor y se especifica como % FSO. Para calcular el TCS se puede establecer la relación que se ilustra en la ecuación 16.

$$TCS[\%FSO] = \left(\frac{\text{Span}(T) - \text{Span}(T_0)}{T - T_0} \right) \quad (16)$$

Donde "Span(T_0)" es el intervalo de medida a la temperatura de referencia, " T " es la temperatura, " T_0 " es la temperatura de referencia y "TCS" es el coeficiente de temperatura del intervalo de medida.

TEB (*Total Error Band*)

El TEB se define como la máxima desviación de la salida con respecto a la función de transferencia ideal del dispositivo en los intervalos totales de presión y temperatura. El TEB incluye todos los errores debidos al offset, intervalo de medida, no linealidad, histéresis, no repetibilidad, coeficiente térmico del offset, coeficiente térmico del intervalo de medida e histéresis térmica (28). Por medio de la ecuación 17 se puede expresar de forma aproximada el valor del TEB, pero el verdadero valor de TEB para un transmisor determinado debe ser obtenido experimentalmente a partir de su propia definición.

$$TEB (\%FSO) \approx \sqrt{(\text{Precisión}^2) + (TCS^2) + (TCO^2)} \quad (17)$$

CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES SIN COMPENSAR Y CALIBRAR

En este proceso de caracterización fueron utilizados diez sensores de presión diferencial MDM290 de la empresa Microsensor en el intervalo de presiones diferenciales de 0 hasta 25 barg y con presión de línea de 7 barg. Los resultados obtenidos para estos diez sensores fueron similares debido a que todos pertenecen al mismo lote de fabricación. Por esta razón solo serán presentados los resultados para uno de los sensores caracterizados donde se evidencia el comportamiento típico de los mismos.

Las temperaturas de ensayo fueron de 0°C, 20°C, 40°C, 55°C y 70°C con tiempos de estabilización de 90 minutos (23). Se realizaron tres ciclos de medición de presión con seis puntos de prueba al 0, 20, 40, 60, 80 y 100% de la amplitud nominal de la presión diferencial.

Equipos utilizados:

Los tres ciclos de presión diferencial fueron controlados por dos calibradores de presión: el calibrador Druck DPI 515 y el calibrador Fluke PPC3.

El control de temperatura y humedad se hizo a través de la cámara climática Votch VCL 4003.

El sistema de excitación de los sensores estuvo conformado por una fuente de tensión AgilentE3640A en serie con una fuente de corriente KEITHLEY 2400. La corriente de excitación de los sensores fue de 1.5 mA DC (valor recomendado en la hoja de datos del fabricante de los sensores).

La medición de la tensión de salida de cada sensor se llevó a cabo por medio de cuatro multímetros digitales Agilent34401.

Todos los equipos utilizados en el ensayo tienen comunicación serial RS232 con un computador que usa una interfaz de usuario hecha en LabVIEW para controlar cada uno de los equipos y leer los datos de salida de los sensores de presión.

Mediciones

En la tabla 4Tabla4 están listados los datos de salida de un sensor de presión caracterizado. El comportamiento de los otros sensores fue muy similar. Utilizando estos datos son calculados los valores de precisión del sensor, los cuales serán presentados posteriormente.

Tabla4: Datos de tensión de salida de un sensor durante 3 ciclos de presión

Temperatura: 20 °C						
% Intervalo de medida de Entrada	Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
	Rampa de Subida [mV]	Rampa de Bajada [mV]	Rampa de Subida [mV]	Rampa de Bajada[mV]	Rampa de Subida [mV]	Rampa de Bajada[mV]
0	-8,59568	-8,60356	-8,61278	-8,61686	-8,57974	-8,62452
20	19,66924	19,707	19,70526	19,72362	19,70402	19,77588
40	47,91874	47,98878	48,05008	48,03876	48,04244	48,20158
60	76,15606	76,26576	76,46018	76,2627	76,33948	76,52368
80	104,47254	104,58888	104,66334	104,59626	104,63768	104,80018
100	132,7154	132,68224	132,92974	132,99906	132,95894	133,0409

En la tabla 5 y figura 9 se puede ver el comportamiento de la salida del sensor en el intervalo de temperatura de 0°C a 70°C. Se observa que existen desplazamientos del *offset* y del intervalo de medida con respecto a la temperatura, estos desvíos en la salida de tensión de los sensores serán compensados por el sistema de calibración y compensación del transmisor de presión.

Tabla5: Tensiones de salida del sensor de presión para el intervalo de temperatura de 0°C hasta 70°C

Temperatura[°C]	0°C	20°C	40°C	55°C	70°C
% intervalo de medida de entrada	Salida del sensor [mV]	Salida del sensor [mV]	Salida del sensor [mV]	Salida del sensor [mV]	Salida del sensor [mV]
0	0,34803	-8,60627	-9,12513	-9,66852	-8,38997
20	28,24889	19,71382	19,5135	18,89397	19,42397
40	56,10665	48,0406	48,1131	47,24068	48,12906
60	83,95341	76,30262	76,7155	75,68066	76,5475
80	111,76219	104,61697	105,22661	103,81621	105,01811
100	139,43476	132,9644	133,35123	132,24043	133,585

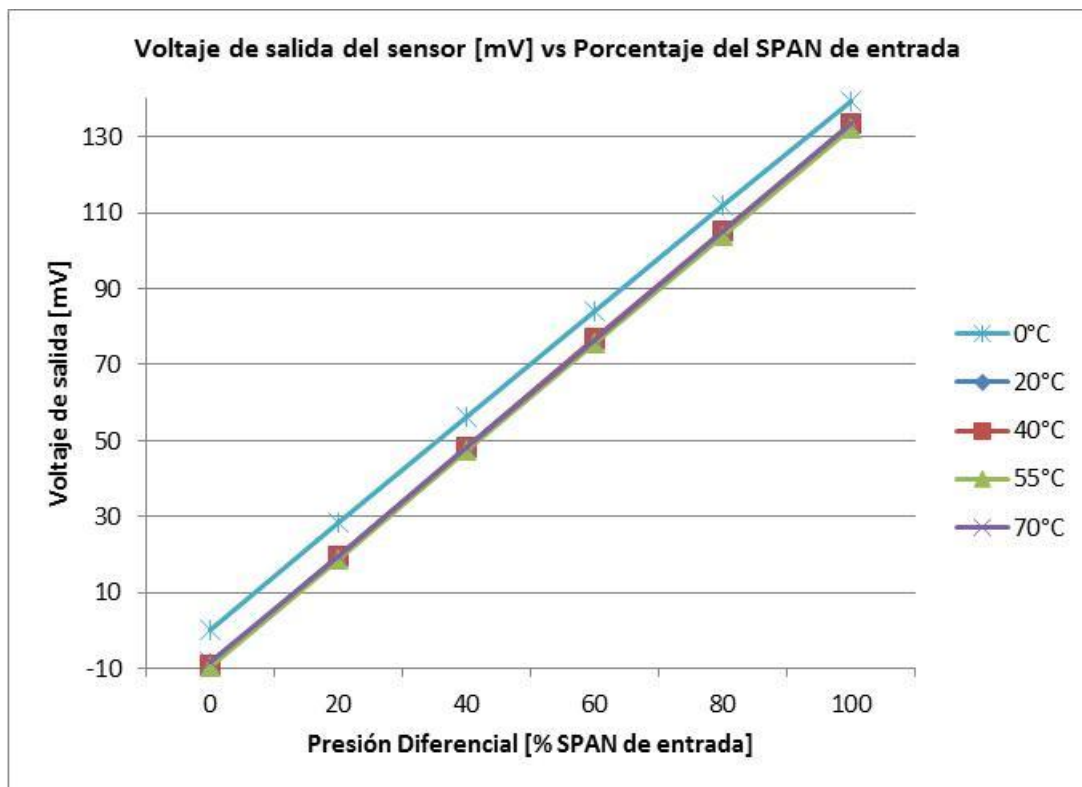


Figura 9: Tensión de salida del sensor vs Presión Diferencial en porcentaje del span de entrada

En la figura 10 se presenta la variación del error promedio del sensor con respecto a la presión diferencial (porcentaje de *span* de entrada) y a la temperatura. Este error fue calculado tomando como referencia la recta que mejor se ajusta a la salida real de los sensores para cada temperatura analizada. Por esta razón la diferencia entre la curva a 0°C y las otras en la figura 9, no se evidencia en la figura 10. Los valores más altos de error se encuentran en el intervalo de bajas presiones de 0 a 2,5 bard y en las temperaturas de 55 hasta 70°C. Estos datos muestran que el error del sensor de presión posee dependencia térmica

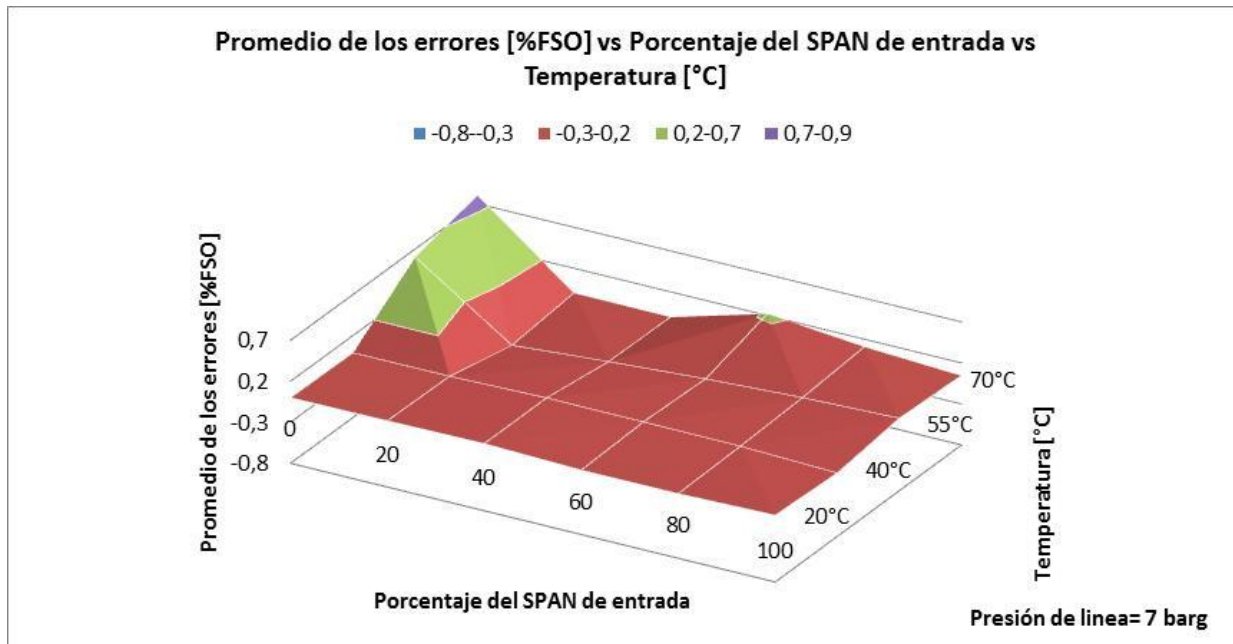


Figura 10: Variación del error [%FSO] vs Presión diferencial [porcentaje del *span* de entrada] vs Temperatura [°C]

Resultados

En la tabla 6 son listados los valores máximos de repetibilidad, histéresis y no-linealidad. Utilizando la ecuación 14 fue obtenida una precisión de 0,21% FSO la cual es menor que el valor especificado en la hoja de datos del sensor de presión.

Tabla6: Valores máximos de la No Linealidad, histéresis, repetibilidad

T=20°C	Valor Máximo
No Linealidad (%FSO*)	0,031
Histéresis (%FSO)	0,139
Repetibilidad (%FSO)	0,158
Precisión (%FSO)	0,214
*Respecto a la recta de mejor ajuste	

CARACTERIZACIÓN DE LOS TRANSMISORES DIFERENCIALES COMPENSADOS Y CALIBRADOS

En esta etapa fueron caracterizados diez transmisores de presión contruidos con los sensores anteriormente caracterizados que fueron compensados en temperatura desde 0°C hasta 80°C y calibrados en el intervalo de presión diferencial de 0bard a 25bardcon una presión de línea de 7 barg.Las temperaturas de prueba fueron 5°C, 27,5°C y 55°C con tiempos de estabilización de 60 minutos. Se llevaron a cabo 3 ciclos de medición de presión con 5 puntos de prueba al 0, 25, 50, 75, 100% de la amplitud del intervalo de presión diferencial. Esta caracterización fue realizada con los mismos equipos utilizados para la caracterización de los sensores de presión con la excepción de la fuente de corriente KEITHLEY,la cual fue sustituida por una fuente de tensión Agilent E3640A.

Mediciones:

En la tabla 7 se presentan las corrientes de salida de uno de los transmisores de presión a la temperatura de 27,5°C. Se puede observar que los resultados son altamente satisfactorios, indicando que el procedimiento de calibración y compensación es altamente eficiente.

Tabla 7: Corrientes de salida obtenidas en los tres ciclos de presión a 27,5°C

Entrada (% intervalo de medida)	Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
	Rampa de Subida [mA]	Rampa de Bajada [mA]	Rampa de Subida [mA]	Rampa de Bajada [mA]	Rampa de Subida [mA]	Rampa de Bajada [mA]
0	4,004	4,005	4,006	4,007	4,005	4,005
25	7,999	8,001	8,001	8,001	8	8,001
50	12,004	12,004	12,006	12,006	12,005	12,006
75	16,017	16,018	16,016	16,017	16,018	16,016
100	20,024	20,023	20,025	20,024	20,024	20,025

En la figura 11 se muestra el comportamiento del promedio de los errores con relación a la presión y la temperatura, para este gráfico se observa un error máximo de 0,15% FSO y valor mínimo de 0,02% FSO.

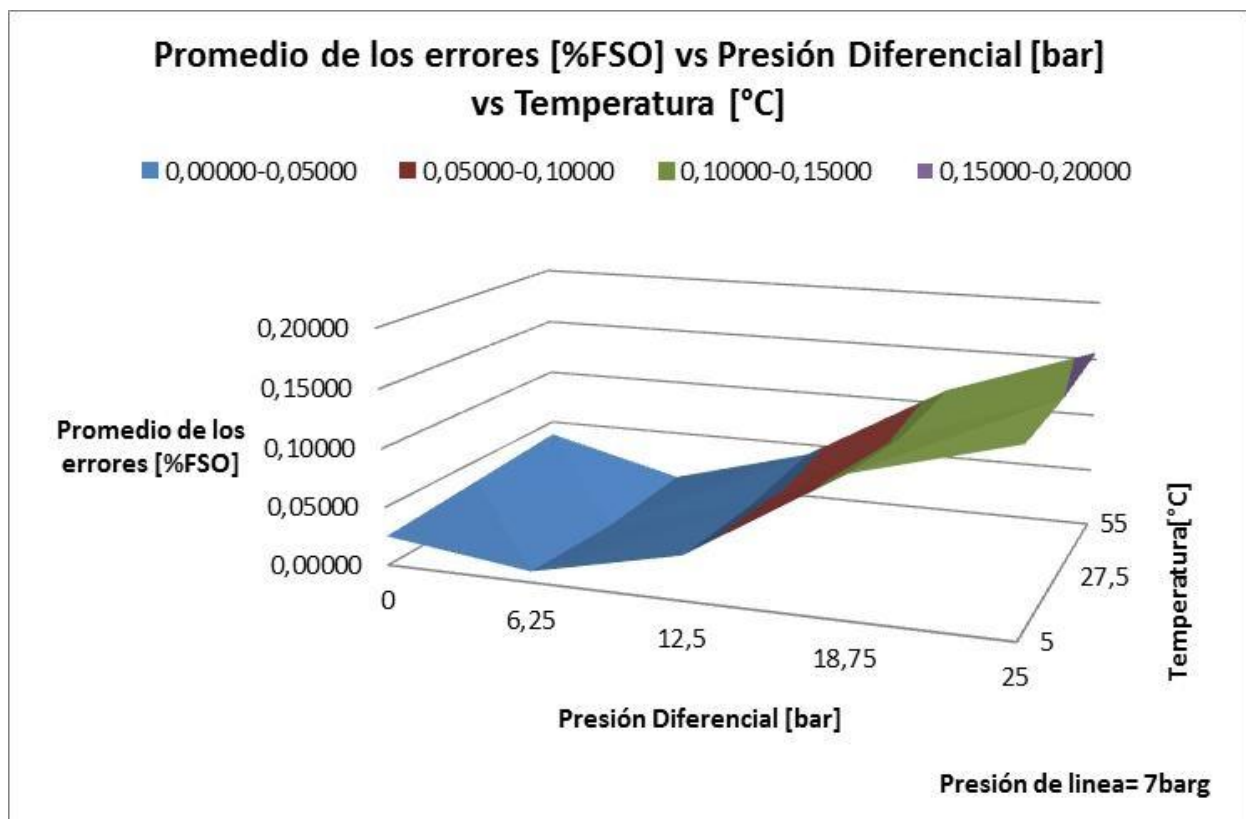


Figura 11: Promedio de los errores [%FSO] vs Presión Diferencial [bar] vs temperatura [°C].

Cálculo de los valores del TCO y el TCS

Para calcular las desviaciones del offset y del intervalo de medida con la temperatura fueron medidos los valores de salida en corriente a cero y máxima presión en las temperaturas de 5°C, 27,5°C y 55°C. Utilizando las ecuaciones 15 y 16 se obtuvieron los valores de TCO de 0,003[%FSO/25°C] y TCS de 0,031[% FSO/25 ° C] respectivamente.

El valor de TEB aproximado del transmisor de presión utilizando la ecuación 17 fue de 0,55% FSO. Para obtener un valor más real de TEB se utilizó el gráfico de la figura 11, resultando en un TEB de 0,15% FSO. Todos los datos utilizados en el cálculo del TEB se presentan en la tabla 8.

Tabla8: Parámetros máximos de no linealidad, histéresis y repetibilidad.

Temperatura=27,5°C	Valor Máximo
No Linealidad (%FSO*)	0,041
Histéresis (%FSO)	0,012
Repetibilidad (%FSO)	0,012
Precisión (%FSO)	0,045
TCO(% FSO/25°C)	0,003
TCS(%FSO/25°C)	0,031
TEB[%FSO] (Ecuación 17)	0,055
TEB-[%FSO] (Figura 11)	0,15
*Respecto a la recta de mejor ajuste	

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES Y DE LOS TRANSMISORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Al comparar los resultados obtenidos con los sensores y transmisores diferenciales, antes presentados en las tablas 6 y 8 respectivamente, se observa una mejora muy notable de la precisión, alcanzando el valor de 0,045% FSO en el transmisor, frente al 0,21% FSO del sensor.

Los valores de TCO=0,0032 [%FSO/25°C] y TCS=0,0312[%FSO/25°C] obtenidos muestran la poca dependencia térmica del offset y del intervalo de medida. Estos valores fueron obtenidos gracias a la eficiencia del algoritmo de calibración y compensación en temperatura.

En la tabla 9 se presentan las especificaciones del transmisor. En la figura 12 se muestran los transmisores de presión compensados y calibrados en temperatura.

Tabla9: Resultados del transmisor de presión diferencial

Alimentación	12-36 Volts
Salida	4-20 mA
Intervalo de presión diferencial	0→25 barg
Intervalo de presión de línea	0→7 barg
Sobrepresiones	70 barg, 10 barg-
Intervalo de temperatura compensada	0-80 °C
Precisión	≤ 0,05 % FSO
Total Error Band (Figura 11)	0,15% FSO
Material de construcción	Acero Inoxidable 304L
Grado de protección	IP65



Figura 12: Transmisores de presión diferencial C&C

MEDICIONES DE DERIVA DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN

Las mediciones del corrimiento de las lecturas de salida del transmisor fueron realizadas según la especificación BS 6174:1982. A través de estas mediciones fue determinada la estabilidad de la corriente del transmisor de presión a corto (*Start up drift*) y largo plazo (*LongTermDrift*).

Medición del corrimiento de Start-Up

El objetivo de esta prueba es establecer cual es el mayor corrimiento en la salida del transmisor de presión después de ser excitado. La prueba consiste en colocar el transmisor a temperatura ambiente (25 °C) durante 24 horas, luego de esto se excita el transmisor, después se aplica una presión diferencial del 10% del intervalo de medida y finalmente se realizan las lecturas de la corriente de salida a los 5 minutos, 1 hora y 4 horas. Este mismo procedimiento se repite para el 90% de la presión diferencial de entrada (29). El máximo corrimiento expresado como porcentaje de plena escala y obtenido durante todo el tiempo de la prueba determina el corrimiento de *Start-up* el cual se expresa por medio de la ecuación 18 (25).

$$\text{Corrimiento de Start - Up } [\% \text{FSO}] = \frac{I_{REF} - I_{ERROR \text{ MÁXIMO}}}{16} * 100 \quad (18)$$

Dónde I_{REF} es el valor de corriente obtenida a los cinco minutos de alimentado el transmisor, $I_{ERROR \text{ MÁXIMO}}$ es el valor de corriente más lejano al valor esperado (I_{REF}) que fue obtenido durante toda la prueba y 16 representa la diferencia de las corrientes máxima y mínima teóricas a la salida (20 mA-4mA=16mA).

Resultados

En la tabla 10 se presentan los valores de desviación, obtenidos para uno de los diez transmisores de presión. El corrimiento máximo medido durante la prueba fue de 0,025% FSO, lo que representa una alta estabilidad de la salida en corriente del transmisor a corto plazo.

Tabla 10: Corrimientos de *Start up* de un transmisor de presión diferencial de 25 bar para 1 hora y 4 horas

Entrada	5 min	1 hora	4 horas	Corrimiento Máximo
% Intervalo de medida	I ref [mA]	I [mA]	I [mA]	%FSO
10%	5,999	5,996	5,995	0,025
90%	18,418	18,418	18,419	0,00625

Medición del corrimiento de largo plazo

El corrimiento de largo plazo se determinó durante 10 días con una señal de presión igual al 90% del intervalo de medida. Los datos de las señales de entrada y salida fueron registrados cada día. La estabilidad se determinó mediante el cálculo del mayor corrimiento de los datos para el tiempo total de la prueba. Este parámetro es expresado usando la ecuación 18. La corriente de referencia medida en el primer día de la prueba fue de $I_{REF}=18,423\text{mA}$.

Los datos de las pruebas de estabilidad a largo plazo se presentan en la tabla 11. El mayor corrimiento obtenido de presión durante esta prueba fue de 0,0625% FSO, lo que muestra alta estabilidad en la salida del dispositivo a largo plazo. El ensayo no se realizó totalmente de acuerdo con la norma, la cual especifica que debe ser hecho por 30 días.

Tabla 11: Prueba de estabilidad de la salida del transmisor de presión a largo plazo

Condiciones		
Temperatura: 25°C. Humedad relativa: 50%		
Por ciento del intervalo de medida de entrada: 90%		
Presión de línea: 7 barg		
Día	Corriente del Transmisor[mA]	Corrimiento (%FSO)
1	18,423	0
2	18,428	0,031
3	18,429	0,037
4	18,428	0,031
5	18,433	0,062
6	18,428	0,031
7	18,427	0,025
8	18,425	0,012
9	18,427	0,025
10	18,418	-0,031

DISCUSIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS

El TEB 0,05% FSO en los transmisores diferenciales muestra la efectividad del proceso de calibración y compensación en todo el intervalo de temperatura utilizado. Este valor fue obtenido mediante cálculos numéricos (ecuación 17) y es una aproximación un tanto alejada de la realidad, pues fue comprobado gráficamente que el valor de TEB 0,15%FSO es consecuente con su definición. En las especificaciones del transmisor de presión se debe informar esta figura de mérito. Generalmente los fabricantes califican su transmisor solamente con el valor de la precisión.

Los valores de corrimiento a corto plazo de 0.025% FSO y largo plazo 0.0625%FSO muestran una alta estabilidad de la corriente de salida del transmisor de presión con el tiempo. Algunos fabricantes brindan estas características para calificar su transmisor.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este trabajo se obtuvo un diseño novedoso para transmisores de presión diferencial utilizando sensores piezorresistivos. Este diseño incluye la compensación térmica y la calibración de los transmisores utilizando DSSP, lo que permite obtener muy alta precisión y estabilidad a la salida del dispositivo. Fueron realizados varios experimentos basados en las normas internacionales IEC 60770 y BS 6174 que permitieron determinar las características de los transmisores fabricados.

El diseño del transmisor de presión diferencial con salida 4-20mA basado utilizando DSSP constituye una innovación, pues integra a la tecnología de medición de presión utilizando el principio piezorresistivo, el acondicionamiento de señales por DSSP y los algoritmos de calibración y compensación térmica. El sistema de calibración y compensación desarrollado por el grupo de investigación del LSI-EPUSP permite la fabricación de transmisores de presión con gran precisión y buena estabilidad a nivel industrial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado con el apoyo de la empresa MEMS Ltda. Agradecemos también a las siguientes instituciones: CNPq (Programa RHAE), FINEP (Programa de Microelectrónica), FAPESP (Programa PIPE) y a los laboratorios de la EPUSP (LSI y LME).

REFERENCIAS

- [1] A MEMS - *Microssistemas Integrados Híbridos de Pressão Indústria e Comércio Ltda.* Available: <http://www.mems-pressure.com/>
- [2] A. a. D. Sensors. (2008). *Modern pressure sensor technology Differential pressure sensors – an ambiguous term.* Available: <http://www.amsys.info/sheets/amsys.en.wp03.pdf>
- [3] A. a. D. Sensors. (2008). *Differential pressure sensing: an ambiguous term.* Available: http://www.amsys.info/sheets/amsys.en.aan505_e.pdf
- [4] K. DRUCK. *DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER BASED ON TWO ABSOLUTE SENSORS. PD39X.* Available: http://www.keller-druck.com/home_e/paprod_e/39x_e.asp
- [5] MICROSENSOR. (2011). *MDM290 Piezoresistive OEM Differential Pressure Sensor.* Available: http://www.microsensor.cn/micro/product_info_en.asp?id=98
- [6] CENELEC, "Mating dimensions between differential pressure (type) measuring instruments and flanged-on shut-off devices up to 413 bar (41,3 MPa)," ed: BSI Group, 2001, p. 18.
- [7] A. F. Gomes, "Calibração e compensação de sensores de pressão piezorresistivos," *Disertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.*
- [8] E. M. Boujamaa, B. Alandry, S. Hacine, L. Latorre, F. Mailly, and P. Nouet, "A Low Power Interface Circuit for Resistive Sensors with Digital Offset Compensation," presented at the 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Paris, 2010.
- [9] J. Y. Guoxiaobing, "Altitude and Speed Sensor with Digital Compensation Technique," presented at the IITAW '08. International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops, 2008. , Shanghai 2008.
- [10] D. H. P. Jorge Ramírez Beltrán, Edgar Charry Rodríguez, "Compensación térmica de la sensibilidad en sensores de presión piezorresistivos," presented at the IBERCHIP, Gaudalajara, Mexico, 2002.
- [11] J. Philip C., J. Abhay, S. Pramod, P. D. Ajayakumar, and K. Natarajan, "Signal Conditioner for MEMS based Piezoresistive sensor," presented at the 2010 5th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2010,, India, 2010.
- [12] Y. Chuan and L. Chen, "The Intelligent Pressure Sensor System Based on DSP," presented at the 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010.
- [13] S. F. d. Luz, "Microssistema transmissor de pressão piezoresistivo de 4-20mA de alta precisão," *Dissertação Mestrado, Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.*
- [14] M. Integrated, "Maxim Integrated. Low-Power, Low-Noise Multichannel Sensor Signal Processor," 2005.
- [15] S. F. d. Luz, "Projeto e Desenvolvimento de Transmissores de Pressão Piezoresistivos com Saída em Tensão nos Padrões Industriais " MEMS Ltda, São Paulo 2008.
- [16] M. Integrated. (2004). *Creating a Ratiometric Current Excitation in Sensors Using the MAX1464 Signal Conditioner.* Available: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3364.pdf>
- [17] J. R. Beltrán, "Projeto de um Transmissor 4-20 mA, à dois fios, a partir do chip MAX1463/MAX1464 da MAXIM," MEMS Ltda 2005.
- [18] M. Integrated. (2002). *Designing a 4-20mA Current Loop Using the MAX1459 Sensor Signal Conditioner.* Available: <http://www.datasheets.org.uk/MAX1459/Datasheet-081/DASF0036323.html>
- [19] M. Integrated. (2012). *40V, Ultra-Low Quiescent-Current Linear Regulators in 6-Pin TDFN/8-Pin SO.* Available: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX15006-MAX15007.pdf>

- [20] M. Integrated. (2005). *MAX1464 Signal-Conditioner, Sensor Compensation Algorithm, Application Note 3649*.
- [21] C. A. M. Herrera, "OBTENÇÃO EM LARGA ESCALA DE TRANSMISSORES DE PRESSÃO PIEZORESISTIVOS DE ALTO DESEMPENHO," Dissertação Mestrado, Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [22] M. Ltda, "Relatório do Transmissor de Pressão Piezoresistivo com Saída em Corrente " MEMS Ltda, São Paulo2008.
- [23] E. Charry, "Verificação dos limites térmicos do Transmissor de Pressão " MEMS Ltda, São Paulo2007.
- [24] J. R. B. Arturo Hernández González, Edgar Charry Rodríguez. (2009) Ajuste digital del cero y el intervalo de medida en un transmisor con salida analógica. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 9.
- [25] CENELEC, "IEC 61298 - 2. Process measurement and control devices - General methods and procedures for evaluating performance: Tests under reference conditions," ed: BSI Group, 2008.
- [26] CENELEC, "IEC 60770-2 - Transmitters for use in industrial - process control systems: Methods for inspection and routine testing," ed: BSI Group, 2011.
- [27] P. a. L. Instrumentation. *An Explanation of GP:50 Performance Specifications*. Available: <http://www.gp50.com/pdf/Application,%20Tech,%20Notes%20&%20Manuals/A5SL-TN4.00.pdf>
- [28] S. a. C. Honeywell. (2011). *Technical Note: Pressure Sensor Glossary of Terms*. Available: http://sensing.honeywell.com/pressure%20sensor%20glossary%20of%20terms_tn_008200-2-en_final_08jul11.pdf
- [29] B. Group, "Specification for differential pressure transmitters with electrical outputs," ed, 1982.

Autores

Alejandro Rafael García Ibarra, Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle, Colombia. Alumno de maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Email: alejandro3744@usp.br

Arturo Hernández González. Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba. Alumno de Doctorado Sandwich CUJAE-USP. Profesor Instructor de la CUJAE. E-mail:arturo@electric.cujae.edu.cu

Jorge Ramírez Beltrán, Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Investigador Auxiliar del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba. E-mail:jramirez@cih.cujae.edu.cu

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

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