

Ajuste digital del cero y el intervalo de medida en un transmisor con salida analógica

A. Hernández;¹ J. Ramírez;² E. Charry;³

1 Facultad de Ingeniería Eléctrica. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE, Ciudad de La Habana, Cuba.

2 Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE, Ciudad de La Habana, Cuba.

3 Laboratório de Sistemas Integráveis. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo USP, São Paulo, Brasil

RESUMEN / ABSTRACT

Por lo general, los transmisores de presión se fabrican para ser utilizados en un intervalo fijo de medición. Contar con un transmisor de rango variable representa una ventaja notable para muchos usuarios interesados en trabajar en diferentes intervalos de medición.

Con la realización de este trabajo se obtuvo un transmisor de presión con salida analógica que permite ser ajustado digitalmente en cero e intervalo de medida según las necesidades de cada usuario. Para ello fue necesario partir de un algoritmo básico de compensación y calibración, y desarrollar e implementar un procedimiento matemático a fin de lograr el ajuste digital del intervalo deseado utilizando un microprocesador. También se diseñaron y analizaron las principales funciones que debe realizar un programa de obtención de coeficientes básicos y un programa de usuario. Este último es el que permite entre otras opciones conectarse al transmisor desde una PC y cambiar el rango de medición del mismo.

Palabras claves: ajuste digital, transmisor, microprocesador.

In general, the transmitters of pressure are manufactured to be used in a fixed interval of measurement. To have a transmitter of variable range represents a remarkable advantage for many users interested in working in different measurement intervals.

With this work a transmitter of pressure was obtained with analogical output that allows to be adjusted digitally in zero and span to each user's necessities. To obtain this it was necessary to start from a basic algorithm of compensation and calibration, and to develop and to implement a mathematical procedure in order to achieve the digital adjustment of the desired interval using a microprocessor. These were also designed and analyzed the main functions that should carry out a program for obtaining basic coefficients and user's program. This last one is the one that allows among other options to be connected to the transmitter from a PC and to change the range of measurement of it.

Key words: digital setting, transmitter, microprocessor.

INTRODUCCIÓN

Los sensores de presión tienen un amplio uso en la industria siendo de las primeras y más exitosas aplicaciones comerciales en Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS).¹ Dentro de estos sensores, los formados por piezoresistores se han desarrollado notablemente en los últimos años, debido fundamentalmente a ser el silicio el material más utilizado en la fabricación de circuitos integrados.

La mayoría de los sensores necesitan ser corregidos para eliminar características no deseadas como la no linealidad y la sensibilidad dependiente de otros parámetros, si se quiere obtener un mínimo de precisión en la medición. La gran variación de la sensibilidad y del corrimiento inicial (offset) con la temperatura y otras variables son las principales desventajas que poseen.²

Con el objetivo de compensar y calibrar los sensores de presión piezoresistivos, eliminar las variaciones de sus parámetros con la temperatura y ajustar aquellos parámetros

que difieren de su valor de diseño, son utilizados los circuitos de acondicionamiento de señal.³

Una de las formas más novedosas de corregir estos parámetros es utilizar un DSSP (Digital Sensor Signal Processor), el cual elimina las características no deseadas en el dominio digital. Para la realización de este trabajo se utiliza el MAX1464, de MAXIM, que contiene entre otros dispositivos un sensor de temperatura, un convertor analógico-digital, el CPU y un convertor digital-analógico de salida 0.5V a 4.5V.⁴ En la figura 1 se muestra su diagrama funcional simplificado.

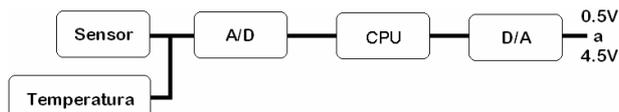


Figura 1

Diagrama funcional simplificado del DSSP MAX1464.

En el proceso de corrección de las características no deseadas del sensor se pueden distinguir dos etapas fundamentales: una es la calibración y compensación de las características del transmisor y la otra es la corrección del mismo. La etapa de caracterización se realiza fuera del MAX1464. Todo el algoritmo de caracterización y corrección del transmisor utilizado en este trabajo está desarrollado en el programa MathCAD13.

En el proceso de calibración y compensación los transmisores son caracterizados a tres temperaturas diferentes y mediante un procedimiento matemático se logran obtener los coeficientes particulares que caracterizan a cada uno de ellos.

Posteriormente, estos coeficientes son grabados junto con las ecuaciones de corrección en el microprocesador del MAX1464, donde se implementa una compensación polinomial para obtener un valor corregido de presión.

Después de que se han grabado en el microprocesador las ecuaciones de corrección y los coeficientes particulares de ese transmisor, el dispositivo se encuentra listo para ser utilizado y de esta manera termina el proceso de compensación y calibración.

Cuando el transmisor se encuentra en funcionamiento obtiene un valor de presión compensado y corregido que posteriormente es escalado en la salida analógica 4-20mA.⁵ En este escalamiento se le asigna al mínimo valor de corriente en la salida el mínimo valor de presión para el cual fue calibrado el transmisor. De igual manera al máximo valor de corriente en la salida le corresponde la presión máxima para la cual fue calibrado el transmisor.

A la mayoría de los usuarios que utilizan estos transmisores les resulta de gran utilidad poder conectarlos a una computadora, y desde allí cambiarle el rango de medición a cada uno de ellos sin que se afecte la salida; además de leer los valores de presión obtenidos por estos.

El objetivo fundamental de este trabajo consiste en obtener un transmisor de presión que permita ajustar su rango de

medición por el usuario. Para ello es necesario desarrollar las siguientes tareas:

- Desarrollar en el programa MathCAD13 todo el algoritmo matemático que permite ajustar el rango de medición del transmisor, con el objetivo de validar el procedimiento y comprobar los resultados.
- Implementar y grabar en el microprocesador del MAX1464 el programa donde se ejecutarán las nuevas ecuaciones que ajustan el rango de medición una vez que el transmisor está en uso.
- Desarrollar un programa (Programa de obtención de coeficientes básicos) que calcule los coeficientes necesarios para ajustar el rango de medición del transmisor al rango original para el cual fue calibrado y que permita comunicarse con el MAX1464 para escribir estos coeficientes en direcciones específicas de la memoria de programa.

Desarrollar un programa (Programa de usuario) que se comunique con el MAX1464 y que permita a los usuarios cambiar el rango de medición del transmisor, para lo cual es necesario modificar el valor de algunos coeficientes grabados por el programa de obtención de coeficientes básicos en la memoria del microprocesador.

EL ALGORITMO DE COMPENSACIÓN Y CALIBRACIÓN NOCIONES SOBRE EL ALGORITMO ORIGINAL

El algoritmo original fue desarrollado por MAXIM.⁶ El objetivo principal de este algoritmo es calcular los coeficientes particulares que caracterizan a cada transmisor. Para ello es necesario caracterizar al transmisor a temperaturas y presiones diferentes, obteniendo de esta manera una matriz de datos experimentales.

A partir de los datos de esta matriz el algoritmo modela el comportamiento del transmisor, obteniendo así los coeficientes de compensación. En la figura 2 se presenta el diagrama en bloques del algoritmo de compensación y calibración.

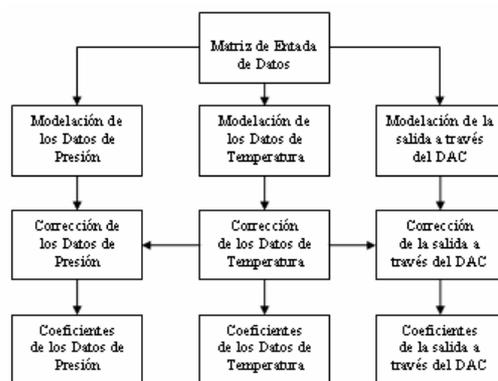


Figura 2

Diagrama en bloques del algoritmo de compensación y calibración.

MODIFICACIONES AL ALGORITMO ORIGINAL DESARROLLADO EN MATHCAD13

El algoritmo original permanece sin cambios hasta donde se obtiene una función que representa un valor corregido de presión. Esta función nombrada $nCPdata(T,P)$ se muestra en la figura 3. Ella hace corresponder a cada valor de presión del rango original de medición del transmisor uno que se encuentran entre -0.9 y +0.9 para representar así un valor de presión corregido.

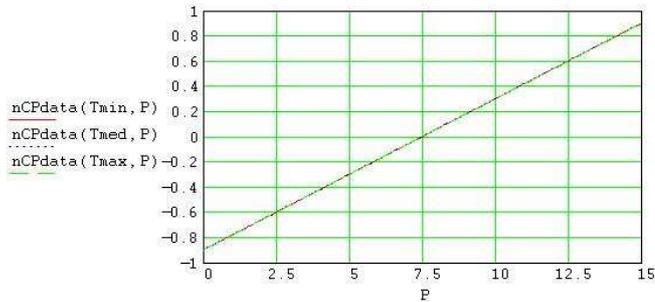


Figura 3
Función $nCPdata$ vs P para $Tmin$, $Tmed$ y $Tmax$.

Para ajustar el rango de medición del transmisor es necesario encontrar una nueva función similar a $nCPdata$ la cual debe estar centrada en cero, o sea, al ser evaluada en el valor medio del rango de medición deseado por el usuario debe obtenerse cero, por tanto se hace necesario desplazar una cantidad determinada a $nCPdata$ para que esto ocurra. Esta cantidad se nombra $MOffsetA$ y es el primer coeficiente que se utilizará para ajustar el rango de medición del transmisor. También deberá cumplirse que cuando esta función sea evaluada en los valores mínimos y máximos de presión a los cuales el usuario desea ajustar el rango de medición se obtengan los valores -0.9 y +0.9 respectivamente. Esto significa que es necesario multiplicar la función $nCPdata$ por un factor que se nombra $Factor$ y a partir de este valor se obtendrán otros dos coeficientes que permitirán realizar el ajuste.

Entonces, para obtener la nueva función similar a $nCPdata(T,P)$ que ajuste el rango de medición deseado por el usuario a valores entre -0.9 y +0.9 se debe sumar a la función $nCPdata$ el valor de $MOffsetA$ y posteriormente multiplicar el resultado por $Factor$.

PROGRAMA DE OBTENCIÓN DE COEFICIENTES BÁSICOS

Una vez que el transmisor fue caracterizado a diferentes temperaturas y presiones, y que fueron grabados en el microprocesador los coeficientes calculados para ese transmisor junto al programa que implementa la compensación polinomial; se procede a la ejecución del programa de obtención de coeficientes básicos.

Este programa se ejecuta desde la PC y determina cuales son los coeficientes que ajustan el rango de salida del transmisor al rango de presión para el cuál fue calibrado. A continuación se explicará cómo se obtienen estos coeficientes.

El programa necesita como datos de entrada el valor mínimo y el máximo de presión para el cuál fue caracterizado el transmisor, así como la unidad de medida en que este está expresado.

Con estos dos valores se calcula un coeficiente llamado $Pminr$ como se muestran en la ecuación (1).

$$Pminr = \frac{Pmin}{Pmax - Pmin} \quad \dots(1)$$

donde:

$Pminr$: presión mínima relativa al rango

$Pmin$: presión mínima

$Pmax$: presión máxima

Posteriormente el programa descompone este valor en un producto donde se relacionan los dos términos $nPminrshfts$ y $PPminr$ como se muestra en la ecuación (2).

$$Pminr = PPminr \cdot 2^{nPminrshfts} \quad \dots(2)$$

Los coeficientes $PPminr$ y $nPminrshfts$ son hallados mediante procedimientos matemáticos con el objetivo de descomponer al coeficiente $Pminr$ en otros dos coeficientes de valores menores que uno.

Otros dos coeficientes son hallados de manera similar a la explicada anteriormente. Estos coeficientes se nombran $PInCPdata$ y $nInCPdatashfts$ y se obtienen a partir del coeficiente $InCPdata$ que representa el intercepto de la función $nCPdata$ con el eje de las ordenadas para una temperatura fija. Para calcular el valor de $InCPdata$ es necesario conocer la pendiente ($PnCPdata$) y un punto de la función $nCPdata$ y utilizar las ecuaciones (3) y (4).

$$PnCPdata = \frac{0.9 - (-0.9)}{Pmax - Pmin} \quad \dots(3)$$

$$InCPdata = 0.9 - PnCPdata \cdot Pmax \quad \dots(4)$$

Entonces a partir del coeficiente $InCPdata$ se obtienen $PInCPdata$ y $nInCPdatashfts$ relacionados por la ecuación (5).

$$InCPdata = PInCPdata \cdot 2^{nInCPdatashfts} \quad \dots(5)$$

Como este programa ajusta el rango de medición del transmisor al rango original para el cual fue calibrado, los coeficientes de ajuste siempre toman los siguientes valores:

$$MOffsetA = 0$$

$$Pfactor = 1$$

$$nPfactorshfts = 0$$

Una vez que el programa realiza estas operaciones se conecta con el transmisor a través de la interfaz serie que este posee y graba en direcciones específicas de la memoria de programa del microprocesador los siete coeficientes calculados ($nPminrshfts$, $PPminr$, $PInCPdata$, $nInCPdatashfts$, $MOffsetA$, $Pfactor$ y $nPfactorshfts$). También grabará en la memoria los datos particulares del transmisor como por ejemplo: el rango para el cual fue calibrado y la unidad de medida, el número de serie del transmisor, y otros que desee el usuario. Después que al transmisor le son grabados estos coeficientes ya se encuentra listo para ser utilizado en el rango original para el cual fue calibrado. Si se desea cambiarle el intervalo de medición al transmisor es necesario ejecutar el programa de usuario, que se explicará más adelante.

EL PROGRAMA DESARROLLADO EN EL MICROPROCESADOR DEL MAX1464

EL PROGRAMA ORIGINAL GRABADO EN EL MICROPROCESADOR DEL MAX1464

El programa original que posee grabado el microprocesador del MAX1464 se ejecuta una vez que el dispositivo se encuentra en funcionamiento. El microprocesador obtiene los datos de presión (S) y temperatura (T) de estos dos sensores y a partir de ellos, implementando la compensación polinomial, obtiene un valor de presión compensado y corregido (P) según la ecuación (6).

$$P(S, T) = A(T) \cdot S^0 + B(T) \cdot S^1 + C(T) \cdot S^2 \quad \dots(6)$$

Los coeficientes A(T), B(T) y C(T) dependen de la temperatura y son calculados mediante las siguientes ecuaciones (7), (8) y (9).

$$A(T) = A_0 \cdot T^0 + A_1 \cdot T^1 + A_2 \cdot T^2 \quad \dots(7)$$

$$B(T) = B_0 \cdot T^0 + B_1 \cdot T^1 + B_2 \cdot T^2 \quad \dots(8)$$

$$C(T) = C_0 \cdot T^0 + C_1 \cdot T^1 + C_2 \cdot T^2 \quad \dots(9)$$

Los coeficientes $A_0 \dots C_2$ fueron obtenidos en el proceso de calibración y compensación y posteriormente fueron grabados en la memoria de programa del microprocesador. La forma de las ecuaciones desarrolladas en el microprocesador es la

misma para todos los transmisores, lo que cambia de uno a otro son los coeficientes $A_0 \dots C_2$

Una vez que ya se ha obtenido un valor compensado y calibrado de presión se procede a escalarlo en el rango de salida analógica que utiliza el transmisor, y es en este punto donde se deben realizar las modificaciones pertinentes para lograr el ajuste del rango de medición de presión deseado por el usuario.

MODIFICACIONES AL ALGORITMO ORIGINAL

El algoritmo original que posee grabado el microprocesador del MAX1464 permanece sin cambios hasta que se obtiene el valor de $nCPdata$ y a partir de allí es que comienzan las modificaciones.

Para poder ajustar el rango de medición del transmisor el programa necesita los valores de los coeficientes grabados en las direcciones específicas de la memoria de programa por el programa de obtención de coeficientes básicos o por el programa de usuario. Es por ello que una vez obtenido el valor de $nCPdata$ el programa debe dar un salto a la dirección específica para cargar en registros los coeficientes de ajuste. Estos coeficientes de ajuste son: $MOffsetA$, $Pfactor$ y $nfactorshfts$.

Posteriormente el programa adiciona al valor de $nCPdata$ el de $MOffsetA$ y multiplica el resultado por $Pfactor$ y por $2^{nfactorshfts}$, obteniendo así un nuevo valor de presión corregido y escalado.

PROGRAMA DE USUARIO

Cuando el transmisor se encuentra en uso resulta de gran utilidad para el usuario tener un programa que le permita interactuar con el mismo. Mediante el programa de usuario se puede mostrar en pantalla el valor de presión calculado por el microprocesador en la unidad de medida deseada por el usuario, así como una serie de gráficos en los que se ofrece información sobre las mediciones. También brinda la posibilidad de conocer el rango de presión y temperatura a la que trabaja el transmisor.

Una de las ventajas más importantes que proporciona el programa es que el usuario puede cambiar el rango de medición del transmisor ajustando el cero y el intervalo de medida del mismo sin que se afecte el formato de salida. Por ejemplo, un transmisor que fue calibrado para medir presiones en el rango de 0 a 15 PSI con una salida 4-20mA puede ser utilizado para medir un rango de presión de 0 a 13.5 PSI manteniendo la salida 4-20mA con un error menor que el 0.1%.

Cada transmisor posee una etiqueta donde se encuentra reflejado, entre otros parámetros, el rango original para el cual trabaja el transmisor de presión, por tanto el usuario conoce cual es este rango.

A continuación se explica el procedimiento desarrollado por el programa de usuario para lograr el ajuste.

Para ajustar el rango de medición de un transmisor sin que se afecte el formato de salida del transmisor, el usuario debe introducir en el programa de usuario a que por ciento del intervalo de medida original desea ajustar el nuevo intervalo de medida, así como en que por ciento del intervalo de medida original desea poner el valor mínimo del rango.

Supongamos que disponemos de un transmisor que fue calibrado para trabajar en un rango de 0 a 15 PSI obteniendo a la salida 4-20mA y deseamos utilizarlo en un rango de 0 a 13.5 PSI manteniendo la salida 4-20mA. Entonces el rango de medición deseado posee un 90% del intervalo de medida original y el valor mínimo de este rango será ubicado en el 0% del intervalo de medida original. El usuario debe escribir estos valores en el programa de usuario.

Una vez que el usuario introduce estos datos el programa de usuario divide estos valores entre 100 para trabajar con números cercanos a uno como se muestra en las ecuaciones (10) y (11).

$$AlcaN = \frac{\%Alca}{100} \quad \dots(10)$$

$$MinN = \frac{\%Min}{100} \quad \dots(11)$$

Es importante señalar que el %Alca puede ser hasta de 105%, o sea un 5% más grande que el intervalo de medida original para el que fue calibrado el transmisor, siempre que la sobre presión que admita el sensor lo permita. También puede tomar valores negativos en caso de que el usuario desee invertir el rango de salida.

Después de obtenidos estos valores el programa de usuario se conecta mediante la interfaz serie al MAX1464 y lee los cuatro coeficientes (nPminrshfts, PPminr, PInCPdata y nInCPdatashfts) que se necesitan para calcular los nuevos valores de los otros tres coeficientes (MOffsetA Pfactor y nPfactorshfts) que se utilizan para ajustar el rango de medición del transmisor de presión. Estos coeficientes se encuentran siempre en direcciones específicas de la memoria de programa y fueron grabados allí en el proceso de calibración y compensación utilizando el programa de obtención de coeficientes básicos.

Una vez que el programa de usuario obtuvo los valores de los coeficientes calcula el nuevo valor del coeficiente MOffsetA utilizando la ecuación (12).

$$MOffset\% = - \left[1.8 \left(\frac{AlcaN}{2} + MinN + \dots + PPminr \cdot 2^{nPminrshfts} \right) + InCPdata \right] \quad \dots(12)$$

A continuación se explica como se obtuvo esta expresión.

El coeficiente MOffsetA es el valor de la función nCPdata evaluada en el punto medio del rango deseado por el usuario multiplicado por -1, o sea:

$$MOffset\% = -(PnCPdata \cdot Lmed + InCPdata) \quad \dots(13)$$

donde:

PnCPdata: es el valor de la pendiente de nCPdata

Lmed: punto medio del rango deseado por el usuario

InCPdata: intercepto de la función nCPdata con el eje de las ordenadas para una temperatura fija

El valor de Lmed se puede obtener mediante la ecuación (14)

$$Lmed = \frac{Lmax - Lmin}{2} + Lmin \quad \dots(14)$$

Donde Lmax y Lmin son los valores de presión máximo y mínimo respectivamente deseados por el usuario y estos se definen como:

$$Lmin = MinN \cdot (Pmax - Pmin) + Pmin \quad \dots(15)$$

$$Lmax = AlcaN \cdot (Pmax - Pmin) + Lmin \quad \dots(16)$$

Sustituyendo (15) y (16) en (14) se obtiene que:

$$Lmed = \frac{AlcaN \cdot (Pmax - Pmin)}{2} + \dots + MinN \cdot (Pmax - Pmin) + Pmin \quad \dots(17)$$

Extrayendo factor común (Pmax-Pmin) se obtiene la siguiente expresión (18):

$$Lmed = (Pmax - Pmin) \cdot \left(\frac{AlcaN}{2} + \dots + MinN + \frac{Pmin}{Pmax - Pmin} \right) \quad \dots(18)$$

Pero como:

$$\frac{Pmin}{Pmax - Pmin} = Pminr = PPminr \cdot 2^{nPminrshfts} \quad \dots(19)$$

Entonces, se puede escribir:

$$L_{med} = (P_{max} - P_{min}) \cdot \left(\frac{AlcaN}{2} + MinN + \dots + PP_{min} r \cdot 2^{nP_{min} rshfts} \right) \dots(20)$$

La pendiente de nCPdata (PnCPdata) se puede calcular utilizando la ecuación (3). Sustituyendo las expresiones (3) y (19) en (13) y simplificando se demuestra la validez de la ecuación (12).

El programa de usuario después de determinar el coeficiente MOffsetA calcula el valor de los coeficientes Pfactor y nPfactorshfts. Para ello primero se calcula al coeficiente Factor y después se descompone según la ecuación (2). Para calcular el valor del coeficiente Factor se utiliza la expresión (21).

$$Factor = \frac{1}{AlcaN} \dots(21)$$

A continuación se demuestra de donde procede esta expresión.

El coeficiente Factor es el valor por el que hay que multiplicar la función nCPdata desplazada en MOffsetA para obtener una nueva función que tiene un intervalo de -0.9 a +0.9. Este coeficiente se obtiene hallando la relación entre dos pendientes como se muestra en la expresión (22).

$$Factor = \frac{P_{endA}}{P_{nCPdata}} \dots(22)$$

En la expresión anterior P_{endA} representa el valor de la pendiente que imponen los límites máximo y mínimo del rango de medición deseado por el usuario, o sea, esta pendiente se define según la expresión (23):

$$P_{endA} = \frac{0.9 - (-0.9)}{L_{max} - L_{min}} \dots(23)$$

Sustituyendo (15) y (16) en (23) se obtiene la ecuación (24)

$$P_{endA} = \frac{0.9 - (-0.9)}{AlcaN \cdot (P_{max} - P_{min})} \dots(24)$$

El coeficiente PnCPdata se obtiene utilizando la ecuación (3). Sustituyendo (24) y (3) en (22) y simplificando se demuestra la validez de la ecuación (21).

Posteriormente el programa de usuario descompone el coeficiente Factor en los coeficientes PFactor y nPfactorshfts según la expresión (25).

$$Factor = PFactor \cdot 2^{nPfactorshfts} \dots(25)$$

De esta manera ya se han calculado los tres coeficientes necesarios para ajustar el rango de medición del transmisor de presión (MOffsetA, PFactor y nPfactorshfts).

Una vez calculados los tres coeficientes de ajuste, el programa de usuario reescribe estos valores en las direcciones específicas de la memoria del microprocesador del MAX1464. Después de realizada la operación anterior el transmisor ya se encuentra listo para ser usado en el rango deseado por el usuario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para comprobar el funcionamiento de todo el procedimiento descrito en este trabajo y validar los resultados se utilizará un transmisor de presión 4-20mA y las herramientas MathCAD13 y MAX1464 Debugger. Es útil aclarar que el procedimiento descrito en este trabajo puede aplicarse a otros tipos de sensores, no necesariamente de presión, que pueden trabajar con el MAX1464.

El MAX1464 Debugger es un programa desarrollado por MAXIM, mediante el cual se puede establecer comunicación con el MAX1464.⁷ Permite realizar varias operaciones como por ejemplo: leer y escribir en los puertos y registros más importantes, escribir en la memoria de programa del microprocesador, descargar en un archivo el contenido de la memoria de programa etc.

Otra de las posibilidades que ofrece el MAX1464 Debugger es que desde él puedes ejecutar paso a paso el programa grabado en la memoria del microprocesador, de manera tal que se pueden observar los valores obtenidos en cada operación.

Utilizando MathCAD13 se simuló las operaciones realizadas por el programa de obtención de coeficientes de ajuste de rango de salida y el programa de usuario. La tabla 1 muestra una relación de valores de los coeficientes obtenidos para un transmisor que fue calibrado originalmente para trabajar en un rango de 0 a 15 PSI. Los casos mostrados se seleccionaron para ejemplificar como funciona el procedimiento y poder validar los resultados.

Después de realizadas las modificaciones al programa grabado en el microprocesador del MAX1464, es utilizado el MAX1464 Debugger para escribir los coeficientes de ajuste de rango de salida en las direcciones específicas de la memoria de programa. Para comprobar y validar el procedimiento de ajuste digital del cero y el intervalo de medida de un transmisor, a este se le imponen diferentes valores de presión y temperatura a diferentes rangos y se analizan las corrientes obtenidas a la salida.

Tabla 1 Coeficientes obtenidos en MathCAD13							
No.	Cero (%)	Intervalo de Medida (%)	Rangos		Coeficientes (hexadecimal)		
			Presión (PSI)	Corriente (mA)	MOffsetA	Pfactor	nPfactorshfts
Caso 1	0	100	0-15	4-20	0000h	0001h	0000h
Caso 2	100	-100	0-15	20-4	0000h	FFFFh	0000h
Caso 3	0	90	0-13.5	4-20	0B85h	471Ch	0001h
Caso 4	10	90	1.5-15	4-20	0F47h	471Ch	0001h
Caso 5	0	50	0-7.5	4-20	399Ah	0001h	0001h
Caso 6	50	50	7.5-15	4-20	C666h	0001h	0001h

* En las tablas de la 1 a la 7 los por cientos son relativos al intervalo de medida original.

En las tablas de la 2 a la 7 se observan los diferentes resultados obtenidos para un transmisor que fue calibrado en un rango original de 0 a 15 PSI y se le cambia su rango según los casos mostrados en la tabla 1.

Tabla 2 Resultados experimentales para el caso 1				
Presión	Valor (psi)	Corriente Esperada (mA)	Corriente Obtenida (mA)	Error (%)
Pmin	0	4	4	0
Pmed	7.5	12	11.9993	0.004375
Pmax	15	20	19.9973	0.016875

Tabla 3 Resultados experimentales para el caso 2				
Presión	Valor (psi)	Corriente Esperada (mA)	Corriente Obtenida (mA)	Error (%)
Pmin	0	20	20.0003	0.001875
Pmed	7.5	12	12.0009	0.005625
Pmax	15	4	4.003	0.01875

Tabla 4 Resultados experimentales para el caso 3				
Presión	Valor (psi)	Corriente Esperada (mA)	Corriente Obtenida (mA)	Error (%)
Pmin	0	4	4	0
Pmed	6.75	12	11.9993	0.004375
Pmax	13.5	20	19.9967	0.020625

Tabla 5 Resultados experimentales para el caso 4				
Presión	Valor (psi)	Corriente Esperada (mA)	Corriente Obtenida (mA)	Error (%)
Pmin	1.5	4	3.9995	0.003125
Pmed	8.25	12	11.9988	0.0075
Pmax	15	20	19.9967	0.020625

Tabla 6 Resultados experimentales para el caso 5				
Presión	Valor (psi)	Corriente Esperada (mA)	Corriente Obtenida (mA)	Error (%)
Pmin	0	4	4.0005	0.003125
Pmed	3.75	12	11.9993	0.004375
Pmax	7.5	20	19.9989	0.006875

Tabla 7 Resultados experimentales para el caso 6				
Presión	Valor (psi)	Corriente Esperada (mA)	Corriente Obtenida (mA)	Error (%)
Pmin	7.5	4	3.9984	0.01
Pmed	11.25	12	11.9972	0.0175
Pmax	15	20	19.994	0.0375

Los errores mostrados en estas tablas de resultados son aquellos introducidos por el procedimiento matemático que se ejecuta en el microprocesador del MAX1464. Para poder diferenciar estos errores de aquellos que se introducen en la cadena de medición de presión se decidió aplicar la presión y

la temperatura de forma numérica durante la corrida paso a paso del programa aquí desarrollado. De esta forma se consiguió cuantificar los errores propios del procedimiento sin que estos fueran enmascarados por los de la cadena de medición que son del orden del 0.1 % del intervalo de medida, muy superior a aquellos que introduce el procedimiento aquí desarrollado.

El máximo error obtenido es del 0.0375 % del intervalo de medida. Este error es inferior en 2.6 veces al error que garantiza el MAX1464 que es del 0.1 % según sus especificaciones técnicas.⁴

CONCLUSIONES

Se logró desarrollar y validar a partir de un algoritmo básico de compensación y calibración, un procedimiento matemático en MathCAD13 que permite ajustar digitalmente el rango de medición de un transmisor de presión.

Se implementaron las nuevas ecuaciones de ajuste de rango en el microprocesador del MAX1464, comprobando con el programa MAX1464 Debugger cada una de las operaciones realizadas y los resultados obtenidos.

También fueron analizadas las funciones y operaciones que deben realizarse por el programa de obtención de coeficientes básicos y el programa de usuario que permite ajustar el rango de medición del transmisor al deseado por el usuario.

El resultado obtenido permite obtener un transmisor de presión con salida analógica al cuál se le puede ajustar digitalmente el cero y el intervalo de medida, característica que lo hace muy ventajoso para muchas aplicaciones.

Este procedimiento aquí desarrollado puede aplicarse a mediciones de otras magnitudes donde se utilice el MAX1464 y pudiera extenderse incluso a otros procesadores de señales.

REFERENCIAS

1. **BRYZEC, J.**, "Impact of MEMS technology on society". Sensors and Actuators A: Physical, Vol.56, pp.1-9,1996.
2. **KONRAD, B. AND ASHAUER, M.**, "Demystifying piezoresistive pressure sensors". Sensors Magazine, Vol.16, No.7, July 2, 1999

3. **RAMÍREZ, J.**, "Interface eletrônica para sensores de pressão piezoresistivos com tecnologia CMOS para ser utilizada em um sistema de biotelemetria", Tesis Doctorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2003
4. **MAXIM.** "MAX1464, Low-Power, Low-Noise Multichannel Sensor Signal Processor. Maxim Integrated Products. Rev. 0, 2005.
5. **F. DA LUZ, SIDNEY et. al.**, "Digitally Compensated 4-20 mA Pressure Transmitter". 4th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, March 7-9, 2008, Kuala Lumpur, Malaysia.
6. **MAXIM.** "MAX1464 Signal-Conditioner, Sensor Compensation Algorithm". Nota de aplicación 3649, Sep 23, 2005.
7. **MAXIM.** "MAX1464 Evaluation Kit datasheet". Maxim Integrated Products. Rev. 0, 2006.

AUTORES

Arturo Hernández González

Estudiante de 5to. año de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE.

Correo electrónico: arturo.hg@feestudiantes.cujae.edu.cu

Jorge Ramírez Beltrán

Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Auxiliar. Miembro del Grupo de Recursos Hidráulicos del Centro de Investigaciones Hidráulicas.

Correo electrónico: jramirez@cih.cujae.edu.cu

Edgar Charry Rodríguez

Doctor en Ingeniería Eléctrica. Profesor-Investigador y Coordinador del Grupo Mlcrossistemas Integrados de Pressão Monolíticos e Híbridos del Laboratorio de Sistemas Integraveis. Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo.

Correo electrónico: charry@lsi.usp.br