

**Diseño de estaciones
de trabajo modulares
para caracterización y
obtención de curvas de
respuesta en sensores**

**Design of modular work
stations to obtain and
characterize response
curves in sensors.**

Para citar este artículo / To reference this article
/ Para citar este artículo: Caro Anzola, E. W. (2015).
Diseño de estaciones de trabajo modulares para
caracterización y obtención de curvas de respuesta
en sensores. *Ingenio Magno*, 6, pp. 90-99.

Edward Wilder Caro-Anzola

Universidad Pedagógica y Tecnológica
de Colombia, Facultad de Ingeniería,
Escuela de Ingeniería Electrónica
edward.caro@uptc.edu.co

Recepción: 13 de Abril de 2015
Aceptación: 23 de Septiembre de 2015

Resumen

Entre las diferentes actividades que se presentan en la enseñanza de la instrumentación electrónica, se destaca el trabajo práctico sobre sensores, lo que determina en gran medida el diseño de los sistemas de adquisición de datos y acondicionadores de señal; sin embargo, al desarrollar los modelos matemáticos característicos, se presentan no linealidades que limitan el uso del sensor a un rango de operación mucho menor que el especificado por un fabricante en particular. Teniendo en cuenta el grado de confiabilidad de un sistema de instrumentación basado en sensores, se pretende implementar un dispositivo que integre varias funciones de trabajo para guías prácticas de laboratorio, lo que durante años de observación en el aula se ha mostrado como una falencia, tal como lo acredita la práctica académica del autor de este artículo.

El uso adecuado de nuevas tecnologías, como las tarjetas SoC embebidas junto a circuitos de acondicionamiento específicos, permite el desarrollo de módulos para la actividad guiada desde el área de sensores analógicos y digitales. El proyecto muestra los conceptos de confiabilidad, sensibilidad, resolución y precisión desde la implementación de un sistema de registro y visualización de curvas de comportamiento y ecuaciones de error sobre una plataforma Arduino®-Raspberry Pi® extensible mediante módulos extraíbles e intercambiables. Se plantean así cuatro módulos de trabajo en las áreas de instrumentación, potencia eléctrica, procesamiento de señales y sistemas digitales. Para el presente documento se muestra parte del desarrollo del módulo de instrumentación, junto a un ejemplo explicado sobre un sensor de fuerza caracterizado para la determinación de su comportamiento en una aplicación biomédica.

Palabras clave: acondicionamiento, caracterización, confiabilidad, error, sensores, *system-on-chip*.

Abstract

Among the different activities in the teaching of electronic instrumentation is the emphasis on practical work with sensors which determines to a large extent, the design of acquisition systems and the signal conditioning. However, the development of mathematical models result in nonlinearities which limit the use of the sensor to a range of operation much lower than the one specified by the manufacturer. Taking into account the confidence degree of an instrumentation system based on sensors, the goal of this research is the implementation of a device that integrates several working functions for practical laboratory guidelines which do not exist until now in the classroom. The adequate use of new technologies like System-on-Chip (SoC) cards embedded with specific conditioning circuits, allow the development of modules for guided activities with analogue and digital sensors. This project shows the concepts of reliability, sensitivity, resolution and precision with the implementation of a registration system and visualization of behavioral curves and error equations on the Arduino®-Raspberry Pi® platform. This platform allows for the addition and exchange of modules. Four working modules are planned in the areas of instrumentation, electrical power, signal processing, and digital systems. This document shows part of the development of the instrumentation module together with an explained example of a force sensor characterized for the determination of its behavior during biomedical applications.

Keywords: conditioning, characterization, reliability, error, sensors, *System-on-Chip*.

1. Introducción

Algunos factores que obligan a realizar cambios en el tipo de respuesta de un sensor se basan en su ambiente de trabajo. Fenómenos como temperatura, humedad, ruido electromagnético o perturbaciones aleatorias modifican puntos de operación basados en el comportamiento del dispositivo. Esto último se traduce en un aumento en el error de los datos o las señales de información que entrega el sensor.

En el contexto de la apertura mundial al mercado chino, se ha encontrado una amplia variedad de sensores de dicha procedencia que el autor ha adquirido y trabajado en el laboratorio y que inundan el actual comercio de los accesorios para instrumentación. No obstante, se hace caso omiso a la presentación o referencia de características técnicas como precisión, resolución o sensibilidad, sin incluir la calidad, que ha sido probada usando como referencia dispositivos de casas fabricantes reconocidas en contraposición con fabricantes del área de Shenzhen en China, de donde proceden muchos sensores y material electrónico. Dicha información es necesaria en todo diseño instrumental y generalmente es ofrecida por marcas reconocidas en forma de un documento o una hoja técnica de datos (*datasheet*) como soporte para el diseñador.

Según lo anterior, se genera una premisa: contar con información sobre el funcionamiento de un determinado sensor, sin importar su procedencia y con condiciones diferentes a las expresadas por el fabricante, en un ambiente de trabajo no controlado. El sistema planteado aquí busca utilizar herramientas tecnológicas actuales, tales como las tarjetas integradas SoC, que trabajen en forma de unidades de control y procesamiento de datos, junto a sistemas de adquisición análogo-digitaes que sirvan de interfaz a sensores convencionales de tipo mecánico, óptico, acústico, térmico, magnético e hidráulico. Allí se simularán modos de operación definidos mediante la variación de parámetros externos

(señales a medir) e internos (ajuste y corrección de errores) (Christensen, Olesen y Kjær, 2005; Wolf, Jerraya y Martin, 2008). Esta plataforma permitirá la creación de guías prácticas de trabajo, así como la implementación de prácticas de laboratorio por parte del docente (de lo cual se brinda un ejemplo al final).

2. Marco teórico

Sin importar el tipo de sensor, se relaciona su función de trabajo a partir de la función de transferencia del sistema. Dicha relación paramétrica posee componentes físicos dependientes de la estructura intrínseca de cada sensor, que se expresan por la ecuación (1):

$$a_n \frac{d^n q_0}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} q_0}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 q_0 = b_m \frac{d^m q_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} q_i}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 q_i \quad (1)$$

Esta ecuación puede desarrollarse por el método clásico del operador diferencial D , de forma que se obtiene una aproximación a la solución general a partir de la superposición de las soluciones particular y complementaria expresada por la ecuación (2):

$$q_0 = q_{0p} + q_{0c} \quad (2)$$

Esta aproximación en la respuesta es aceptable en el marco en que se determinen los coeficientes de la solución particular, bajo restricciones de la señal de entrada. Suponiendo que se eliminan las no linealidades del sistema, es posible utilizar el recurso de la transformada de Laplace para obtener una función de transferencia operacional definida por la ecuación (3):

$$\frac{q_0}{q_i}(D) \triangleq \frac{b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_1 D + b_0}{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0} \quad (3)$$

La función de transferencia permite observar el comportamiento del sensor a partir del conocimiento de la señal de entrada acotada y la medición de la señal de salida, como una correlación de dichos valores. La evaluación de la confiabilidad y, por lo tanto, de la precisión de los datos se maneja desde el punto de vista estadístico, como una función de densidad de probabilidad, generalmente gaussiana (Doebelin, 1990), como se define en la ecuación (4):

$$f(i)_{datos} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{datos}} e^{-(i-\mu_{datos})^2/(2\sigma_{datos}^2)} \quad (4)$$

Por lo tanto, el comportamiento define una curva que puede representarse en un plano de referencia; los valores que intervienen serán entonces obtenidos dentro de un rango de trabajo en una cantidad de medidas que varían en función de los parámetros del sensor. Por ello se requiere contar con una recta de comparación teórica (dada por el fabricante) o una independiente (obtenida del mismo proceso de medición).

Para el caso en que se desconoce la curva de comportamiento, el segundo método es válido y suficiente siempre que el rango de confiabilidad sea alto (por encima de un 95%). De esta forma se obtiene una recta de comparación a partir del método de los mínimos cuadrados (4), como se observa en la ecuación (5):

$$q_0 = mq_i + b \quad (5)$$

Dicha recta es conocida como *curva de calibración* y permite determinar parámetros de linealidad y de error, al igual que el ajuste necesario para que en un sensor se pueda trabajar sobre una región lineal, o bien, buscar una forma de linealización en la respuesta bajo una señal de entrada determinada. Los parámetros m y b se calculan por iteraciones de regresión definidas en las ecuaciones (6) y (7):

$$m = \frac{N \sum q_i q_0 - (\sum q_i)(\sum q_0)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (6)$$

$$b = \frac{(\sum q_0)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_0)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (7)$$

Como es posible tener gran cantidad de dispersión en los datos tomados en el sensor, se evalúan las desviaciones estándar de m y b , lo cual da como resultado el cálculo de los errores sobre el comportamiento deseado. Para el caso, se busca que sea la misma curva de calibración, como se define en las ecuaciones (8), (9), (10) y (11).

$$\sigma_b^2 = \frac{\sigma_{q_0}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_m^2 = \frac{N \sigma_{q_0}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (9)$$

$$\sigma_{q_0}^2 = \frac{1}{N-2} \sum (mq_i + b - q_0)^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{q_i}^2 = \frac{1}{N-2} \sum \left(\frac{q_0 - b}{m} - q_i \right)^2 \quad (11)$$

Por último, debido a los componentes de las variables que presentan características explicativas, se puede realizar un análisis de la varianza o tabla Anova a partir del modelo de efecto aleatorio. Esto se hace desde la premisa de que es posible tener una cantidad importante de perturbaciones sobre el sensor.

3. Materiales y métodos

La metodología es experimental-descriptiva y permite ubicar el trabajo sobre conceptos previos de la instrumentación aplicada a los sensores de forma tal que se comparen los datos obtenidos con los que expresa la literatura. Así es posible validar los comportamientos y su posterior visualización y registro.

La plataforma utiliza dos tipos de tarjetas de desarrollo. En primer lugar, el uso de sistemas microcontrolados referenciados como sistemas Arduino®, que permiten el manejo de las señales internas del módulo (interfaz HMI). Para el segundo caso, la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi®, que actúa como unidad de procesamiento central de todos los datos obtenidos, así como en la visualización de las curvas de comportamiento obtenidas, las curvas de ajuste y las curvas de correlación de error.

El uso de la Raspberry Pi no solo se limita a procesos internos, sino que sirve para aprovechar la potencia que tiene sobre el manejo de un sistema operativo que permite hacer extensibles operaciones de comunicación Ethernet, conectividad inalámbrica, exportación de video de alta resolución, alto poder de almacenaje a través de tarjetas SD y velocidad de procesamiento y operatividad GPIO (Brock, Bruce y Cameron, 2013). Un marco general del prototipo puede observarse en la figura 1:

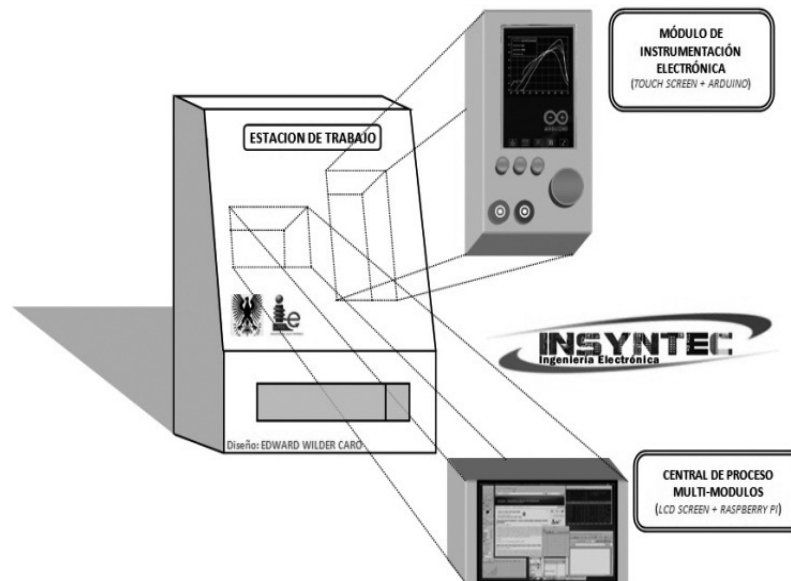


Figura 1. Detalle de la estación de trabajo y módulos extraíbles

Fuente: autor.

Los diferentes sistemas propuestos para el desarrollo del prototipo son de fácil consecución y presentan características idóneas, como lo es el uso de plataformas de programación basadas en *software* libre y recursos *creative commons*. Arduino y Raspberry Pi comparten estas facilidades, por lo que su aplicación académica es válida.

Los sensores han sido seleccionados en función de su aplicabilidad en prácticas de laboratorio basadas en diferentes áreas de la ingeniería electrónica (Ronald y McBean, 1993), aunque son adaptables a otras líneas como la ingeniería de sistemas (Aminiam y Aminiam, 2007), la ingeniería de telecomunicaciones, la ingeniería mecánica o profesiones técnicas y tecnológicas similares (Rubey y Grant, 1988). Se han tenido en cuenta prácticas en temas de robótica, instrumentación, automatización,

tratamiento de señales, optimización de procesos y ciencias básicas.

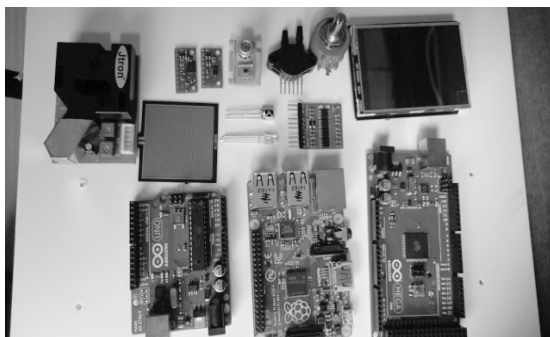


Figura 2. Sensores y tarjetas SoC para desarrollo del prototipo

Fuente: autor.

Tabla 1. Descripción técnica de dispositivos del módulo de instrumentación

Dispositivo	Descripción técnica general
Tarjeta Arduino Uno®	Hardware basado en el μC ATMEL ATmega328P; 6 entradas analógicas; 14 pines digitales I/O; 16 MHz; conexión USB, serial e ICSP; memoria de 32 kB; alimentación máxima a 20 voltios.
Tarjeta Arduino Mega®	Hardware basado en el μC ATMEL ATmega1280P; 16 entradas analógicas; 54 pines digitales I/O; 16 MHz; conexión USB, serial y UART; memoria de 128 kB; alimentación máxima a 20 voltios.
Tarjeta Raspberry Pi®	Hardware basado en el μP Broadcom ARM1176JZF-S tipo RISC de 32 bit; 8 GPIO; 700 MHz; conexiones RCA, HDMI, Ethernet RJ45, SPI, I ² C, UART y DSI; memoria de 256 MB; memoria externa SD; programación basada en Linux; alimentación máxima de 5 voltios.

Dispositivo	Descripción técnica general
Sensor MPX5010GSX	Sensor de presión neumática de silicio; con compensación térmica; rango de medida de 0 a 10 kPa; alimentación hasta 4,7 voltios.
Sensor FSR406	Sensor de fuerza tipo resistivo; cuerpo de película polimérica; rango de medida entre 0,1 y 10 N; resolución continua.
Sensor 128-C24	Encoder óptico de giro continuo; alimentación a 5 voltios; 128 pulsos/vuelta; doble canal separado; modulación en cuadratura; montaje vertical.
Sensor HDJD-S822	Módulo de detección de color; control de ganancia digital; salidas analógicas RGB; alimentación 5 voltios.
Sensor CMOS 32KM	Cámara CMOS con salida RCA; señal analógica RGB; resolución 728 × 488 px; alimentación máxima 5 voltios.
Sensor GP2Y0A02YK	Medidor de distancia IR; rango entre 20 y 150 cm; señal de salida analógica; alimentación a 5 voltios.
Sensor ECS1030-L72	Transformador de corriente 1:2000; medición hasta 30 amperios; linealidad 5%; precisión 2%.
Sensor Grove IMU 9DOF	Módulo de rastreo de movimiento de 9 ejes; interface I ² C; acelerómetro y giróscopo de salidas digitales; sensor magnético de efecto Hall.

Fuente: autor.

El trabajo sobre cada dispositivo se realiza inicialmente mediante la clasificación de los sensores que han de intervenir en el módulo. Utilizando como referencia la salida del elemento, se plantean los posibles circuitos que permitan la adaptación y el acoplamiento de las señales (Webster, 1999). Se escogen así aquellos que

presentan mayores prestaciones, como los circuitos integrados de Texas Instruments®, con sus series INAxxx, ISOxxx y ADSxxxx (tabla 1).

Dentro de los diseños planteados, se utilizan convertidores A/D tipo Sigma-Delta por su facilidad de acople a puertos GPIO y su velocidad y resolución en microcontroladores y microprocesadores (Morris, 2001). También se realiza aislamiento de las señales que intervienen en la interfaz a partir de circuitos ISOAMP análogos. Los sistemas de interfaz gráfica se componen de dos pantallas LCD tipo *touch* de 2,8 y 7", respectivamente, asociadas una a cada módulo para el

primer caso y una fija para la estación de trabajo.

Los sensores por caracterizar y que servirán de base para el presente prototipo son¹: sensor de presión de aire MPX5010GSX, sensor de fuerza FSR406, sensor óptico Honeywell 128-C24, sensor de color HDJD-S822, cámara CMOS 32KM, sensor infrarrojo de proximidad GP2Y0A02YK, potenciómetro de precisión Bourns 3590P-2-203L, sensor de corriente tipo *Split Core* ECS1030-L72, sensor monitor de rastreo GROVE IMU 9DOF y tarjeta de adquisición de señales EMG Muscle Sensor V3 (figura 2).

4. Resultados

Desde los parámetros de trabajo de cada sensor, se han observado variaciones significativas y relevantes entre el comportamiento de trabajo nominal y el que se genera en los límites inferior y superior del rango de medida. Los valores de salida de los sensores análogos presentan no linealidades saturadas que no son perceptibles cuando el elemento presenta características resistivas, pero son pronunciadas con sensores marcadamente inductivos y capacitivos (figura 3).

¹ Se enumeran, mas no forman parte del presente reporte, a excepción del sensor de fuerza.

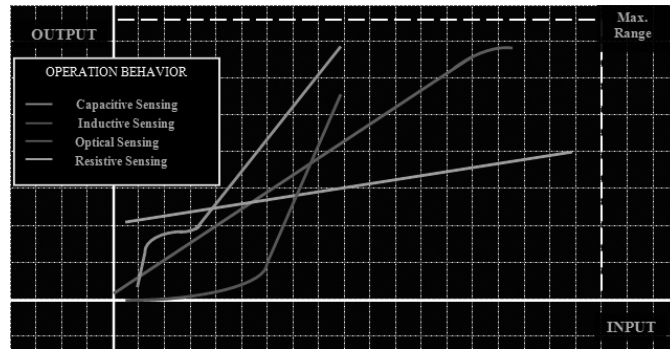


Figura 3. Relación del comportamiento en trabajo nominal

Fuente: autor.

Ante este tipo de respuestas, se tienen regiones lineales definidas que serán utilizadas para declarar el rango de trabajo dinámico; sin embargo, se incluye un 5% adicional para los sistemas que presenten pendientes grandes en razón a la velocidad de respuesta y a los cambios $\Delta_{\text{SALIDA}} \Delta_{\text{ENTRADA}}$ superiores a 1.

En razón al uso de los diferentes métodos de cálculo y aproximación de las variables de error y linealidad correlacionadas, se toma como parámetro de inicio a un sensor de fuerza resistivo, que se supone será utilizado en una aplicación médica. Para el caso de la caracterización del sensor FSR406 de la empresa Interlink Electronics, se tiene que la variable por medir será la presión generada por el cuerpo de una persona en estado sedente, y allí se tiene en cuenta la distribución de la fuerza por unidad de área y la elevación del centro de masa para cambios posturales o simplemente para ponerse de pie.

Este estudio ha sido de vital importancia para el diseño de múltiples sistemas clínicos, como los cojines antiescaras o los soportes ergonómicos para personas que deben mantener esta postura (este es el caso de los conductores o el personal que presta atención al público).

El estudio también ha fundamentado la investigación y el desarrollo en campos como la biomecánica, la biónica, la rehabilitación y la industria de objetos ergonómicos.

Con base en estudios sobre la región de la cadera, se encuentra una dependencia de la postura y la elevación del centro de masa hacia la concentración de las zonas de presión de los tejidos, aproximadamente hacia el eje axial marcado por la columna vertebral (Clauser, McConville y Young, 1969). Si se asume una concentración de la masa sobre el sensor de aproximadamente 45 mmHg, se tiene la caracterización descrita para personas entre 50 y 110 kg.

Con dichas bases teóricas se realiza el procedimiento experimental a partir del acondicionamiento del sensor, cuya curva de respuesta basada en las hojas técnicas del fabricante se observa en la figura 4 (Interlink Electronics, s. f.)

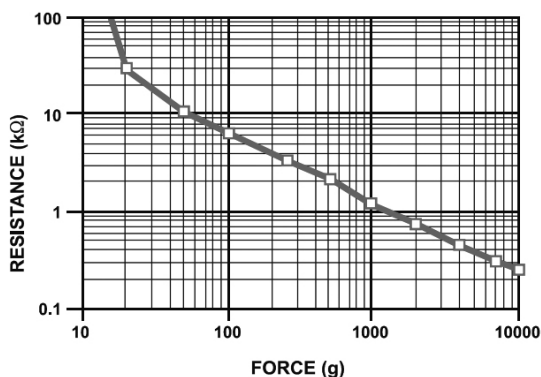


Figura 4. Respuesta del sensor de fuerza resistivo FSR406

Fuente: Interlink Electronics (s. f.).

El acondicionamiento es propuesto por el mismo fabricante mediante el circuito descrito en la hoja técnica de datos, como se puede observar en la figura 5.

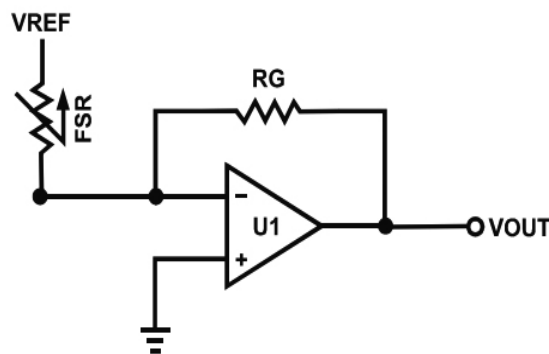


Figura 5. Acondicionador de señal mediante convertidor V-I

Fuente: Interlink Electronics (s. f.).

Con el dispositivo acoplado a su acondicionador se obtiene una respuesta en voltaje que servirá como señal de entrada al sistema digital. Desde la variable análoga se obtiene que para una resistencia R_G de 10 kΩ, la región lineal de trabajo para un peso definido entre 50 y 2500 gr está dada por la figura 6.

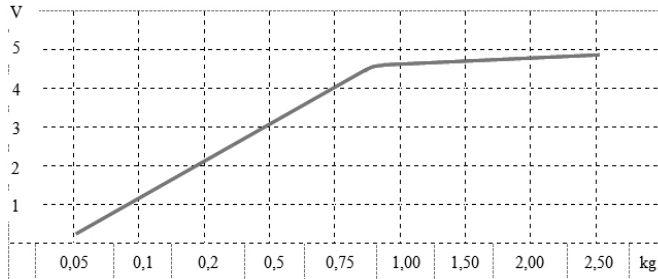


Figura 6. Respuesta en voltaje del sensor de fuerza resistivo

Fuente: autor.

Una vez determinada la viabilidad de una región lineal desde un voltaje de salida en el acondicionador, se procede a utilizar la caracterización del sensor. Dentro de un ensayo de 25 pruebas consecutivas se determina una precisión de aproximadamente 0,925, correspondiente a un error porcentual del 7,5%, que se encuentra dentro de los parámetros normales de incertidumbre.

El siguiente paso es determinar la curva de calibración a partir del método de los mínimos cuadrados. Esta curva se define por su linealidad independiente. La ecuación característica de este sensor viene definida por una función de transferencia de primer orden, si se toma la curva en todo el rango dinámico y de orden cero solo para la región lineal.

Como la idea es trabajar entre los máximos y mínimos permisibles, se asume como un sistema de primer orden a los valores característicos del sistema, que muestran un $\tau = 0,162$ y un parámetro de sensibilidad $k = 17,344$. Este comportamiento evidencia una amplia tendencia a la respuesta resistiva con pequeños parámetros capacitivos, debido al contacto deficiente entre las pistas resistivas del sensor para fuerzas por debajo de la región asintótica de la figura 4, esto es, por debajo de los 100 gr.

Asimismo se obtiene una ecuación de calibración q_0 con pendiente $m = 1,872$ V/g y $b = 0,27$ voltios. Para el error declarado entre la curva promedio obtenida y la curva de calibración calculada, se tiene un error en la pendiente de 0,56% y un error de coincidencia de 0,044%. Esto indica que tanto la curva de calibración como la curva de comportamiento son similares. La confiabilidad calculada es del 98,7%.

5. Conclusiones

Una vez revisados los datos y corroborados con sensores similares, se observa la viabilidad tanto en la generación de los cálculos que caracterizan el sensor resistivo como en el registro de las debidas curvas de comportamiento, de calibración y de error dentro de la plataforma propuesta. Esto es así por cuanto con la programación adecuada, el usuario del dispositivo tendrá herramientas suficientes de análisis y evaluación del sensor con el que trabajará. Más aún, esto le permitirá emitir juicios de valor en el momento de validar la confiabilidad del sistema en cuanto a la adquisición y el

procesamiento de datos, disminuyendo la incertidumbre y aumentando la exactitud y precisión de los mismos.

El registro de las variables permite además la variación de los parámetros de entrada desde valores atípicos hasta perturbaciones controladas que simulan variaciones reales en ambiente de operación normal. Por lo tanto, la programación presenta un reto en el momento de definir las variables que pueden ser manipuladas en la caracterización del comportamiento dinámico, ya que se tendrán que asumir algoritmos adicionales de corrección y verificación de resultados. Estos procesos son situados convenientemente por el autor dentro de los métodos numéricos, específicamente regresiones lineales que podrán ser asumidas por el sistema operativo de la tarjeta Raspberry Pi.

La construcción gradual para cada sensor de un acondicionador de señal y del programa de caracterización utilizará como base el ejemplo sobre el sensor resistivo, con las variantes adecuadas en cuanto al comportamiento inicial y los rangos de trabajo; sin embargo, se plantea que se implementen mejoras a medida que el prototipo avance.

En cuanto a la fiabilidad que podría lograrse con el uso del sensor resistivo FSR406 para la construcción de plataformas de monitoreo de presión de tejidos contra superficies definidas como rígidas en el estudio biomecánico de personas sedentes, este vendrá demarcado por el correcto posicionamiento de sensores en una matriz de medición, además del sistema de soporte mecánico adecuado para generar una primera presión que permita superar el límite inferior que obliga a la no linealidad en la lectura. Este procedimiento se delega al diseñador del dispositivo.

Cabe resaltar que si se tiene cuidado en dicho diseño, la confiabilidad de las lecturas puede ser aproximadamente de un 94 a 96%.

Agradecimientos

El autor agradece al cuerpo docente de la Escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en Tunja, y a su director Óscar Mauricio Hernández, por permitir y favorecer el proceso en la actividad de desarrollo tecnológico e investigación formativa desde los semilleros Insyntec, Sperd, Matris2 y Robótica UPTC.

Referencias

Aminiam, M. y Aminiam, F. (2007). A modular fault-diagnostic system for analog electronic circuits using neural networks with wavelet transform as a preprocessor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(5), 1546-1554.

Brock, J. D. Bruce, R. F. y Cameron, M. E. (2013). Changing the World with a Raspberry Pi. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 29(2), 151-153.

Christensen, J. F. Olesen, M. H. y Kjær, J. S. (2005). The industrial dynamics of open innovation-evidence from the transformation of consumer electronics. *Research Policy*, 34 (10), 1533-1549.

Clauser, C. E. McConville, J. T. y Young, J.W. (1969). *Weight, volume and center of mass of segments of the human body*. Estados Unidos: National Technical Information Service, Aerospace Medical Research Laboratory.

Doebelin, E. (1990). *Measurement systems: application and design* (4.ª ed.). Nueva York: McGraw-Hill.

Interlink Electronics (s. f.). *FSR Force Sensing Resistor, integration guide and evaluation parts catalog*.

Morris, A. (2001). *Measurements and instrumentation principles* (3.ª ed.). Óxford: Butterworth-Heinemann.

Northrop, R. (2005). *Introduction to instrumentation and measurements* (2.ª ed.). Nueva York: Taylor & Francis.

Ronald, V. y McBean, Sr. (1993). *Instrumentation system with multiple sensor modules providing calibration date information*. Recuperado de: <https://www.google.com/patents/US5365462>.

Rubey, W. A. y Grant, R. A. (1988). Design aspects of a modular instrumentation system for thermal diagnostic studies. *Review of Scientific Instruments*, 59(2), 265-270.

Webster, J. (1999). *The measurement, instrumentation and sensors Handbook*. CRCnetBASE 1999.

Wolf, W. Jerraya, A. A. y Martin, G. (2008). Multiprocessor System-on-Chip (MPSoC) Technology. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 27(10), 1701-1713.