

ARTÍCULO ORIGINAL

Diseño, construcción y calibración de un transductor de fuerza tipo S

Design, construction and calibration of force transducer type S

Alexander Laffita Leyva¹, Ernesto Ramos Carbajal², Armando García de la Figal Costales³,
Pedro A. Valdés Hernández⁴ y Raúl Torres Cepero¹

RESUMEN. Se diseñó, construyó y calibró un transductor de fuerza tipo S en el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) de la Universidad Agraria de La Habana (UNAH), sobre la base del análisis de tensiones y deformaciones, concentración y uniformidad de las deformaciones unitarias en la zona de colocación de los extensómetros, empleando el análisis numérico por el método de los elementos finitos. El valor máximo del esfuerzo normal equivalente brindado por el programa profesional Solid Works versión 2010, según el criterio de resistencia Von Mises, está dentro del límite de proporcionalidad del material seleccionado con un factor de seguridad de 7,05 garantizando la linealidad durante los regímenes de carga y descarga a los cuales será sometido, un nivel de sensibilidad de salida igual a 0,456 mV/V encontrándose dentro del rango recomendado para este tipo de transductor así como un bajo efecto de histéresis. El valor de la pendiente de la calibración con tres repeticiones de carga y descarga es de 0,0386 N/mV y un error de $\pm 0,024$ N. Del análisis del procesamiento estadístico se determinó que para valores de la fuerza de tracción superiores a 5,8 N los errores cometidos se encuentra en el orden del 2,8% y a partir de valores superiores a 29,5 N los errores se encuentran por debajo del 1%.

Palabras clave: transductor; elementos finitos, calibración, diseño.

ABSTRACT. In the Center of Agricultural Mechanization (CEMA) of the University Agrarian of Havana (UNAH) was design, built and calibrate a force transducer type S, it was developed above the base of analysis of tensions and deformations at the zone of placement of the extensometers, applying the method of finite elements. The maximum value of normal equivalent strain bring up by the program Solid Work applying Von Mises criteria it was within the limit of proportionality the material selected with a safety factor of 7,05. Achieve linearity and sensibility levels during the process of charge and discharge within the range recommended for this type of transducer as well as a low effect of hysteresis. The value of the slope and error of curve of calibration was 0,0386 N/mV and 0,024 N.

Keywords: Transducer, finite elements, calibration, design.

INTRODUCCIÓN

Los transductores de fuerza son ampliamente usados en el campo de la industria y las investigaciones, presentando muchas configuraciones en equipos comerciales. Básicamente están compuestos por: una pieza monolítica conocida como

elemento elástico y por extensómetros eléctricos que permiten medir, en el área de colocación de los mismos, los niveles de deformación, preferiblemente uniformes, que experimenta el transductor bajo la acción de una fuerza aplicada. Estos son diseñados para que a fuerzas relativamente bajas permita altos niveles de deformación siendo precisamente el elemento elástico

Recibido 20/12/10, aprobado 30/01/12, trabajo 17/12, artículo original.

¹ Ing., Esp., Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria, Autopista Nacional km 23 ½, Carretera de Tapaste, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, E-✉: alexl@isch.edu.cu

² M.Sc., Esp., Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria.

³ Dr. C., Prof.Tit., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas.

⁴ Dr. C., Prof. Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas.

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor

el componente más crítico del transductor (Martínez, 2008), (Omegadyne, Inc., 1996).

La información acerca de los detalles para la construcción de dichos elementos elásticos es poco divulgada, siendo su diseño por métodos tradicionales extremadamente difícil por presentar configuraciones complejas para estos tipos de cálculos (Martínez, 2006a). El uso de modernos software CAD-3D para acometer el diseño de estos transductores garantiza al Centro de Mecanización Agropecuaria crear las bases de un know how propio para su construcción siendo el diseño y calibración el objetivo fundamental del presente trabajo.

MÉTODOS

La investigación se lleva a cabo en el Laboratorio de Tensometría del Centro de Mecanización Agropecuaria de la Universidad Agraria de La Habana. Se utilizó el software de diseño por elementos finitos Solid Works, versión 2010 para el dimensionado el transductor de fuerza, estableciéndose una carga máxima de 150 N utilizada por Rivero (2009) y como material acero AISI 1045. Se establecen las condiciones de fronteras, lo que se muestra en la figura 1 y se realiza el mallado paramétrico del modelo digitalizado.

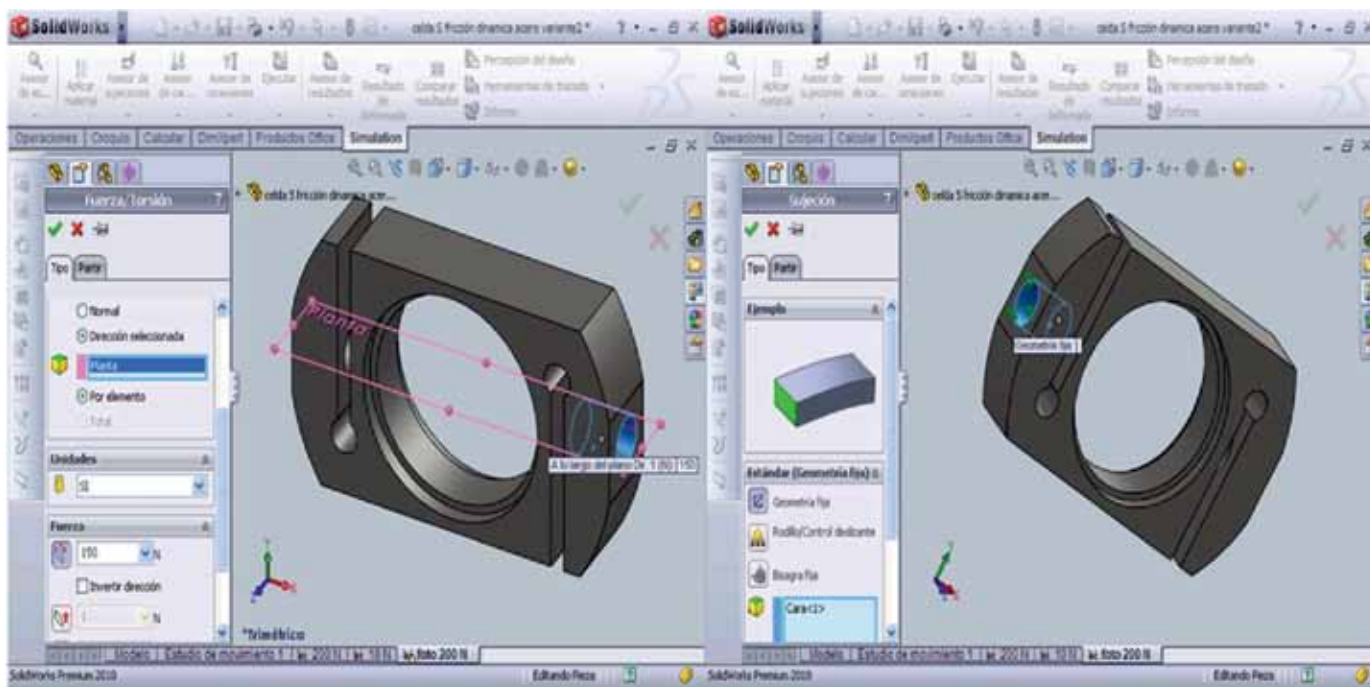


FIGURA 1. Dimensionado y condiciones de fronteras.

Durante la comprobación de la resistencia mecánica del transductor se utiliza el criterio de las máximas tensiones de Von Mises, que se basa en la teoría de la máxima energía de corte ó teoría de la energía de distorsión máxima y se obtiene el factor de seguridad, a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\sigma_{\text{límite}}}{\sigma_{\text{Von Mises}}} \quad (1)$$

Los parámetros de salida obtenidos fueron ajustados mediante cambios en las dimensiones del transductor, de manera tal, que para la carga máxima aplicada los parámetros de salida se encuentren dentro del límite proporcional del material (en el caso de las tensiones normales equivalentes) y dentro de las exigencias de sensibilidad de salida (deformaciones unitarias) apropiados para el procesamiento de las señales en indicadores digitales comerciales (mV/V).

La ubicación de los extensómetros en la celda se optimizó a partir del criterio de obtener ubicaciones con máximos valores de las deformaciones, así como su distribución uniforme, conformando un puente completo con máxima ganancia y autocompensado térmicamente. El voltaje de salida para un puente extensométrico de 120 Ω se determinó utilizando

la ecuación (Godwin, 1975), (Kyowa Electronic Instruments Instruction Manual, 1973), (Martínez, 2008).

$$e_{\text{sal}} = \frac{E_{\text{ex}} \cdot K \cdot \sum \varepsilon_{\text{prom}}}{4} \quad (2)$$

donde:

E_{ex} - voltaje de excitación del puente (3 V);

K - factor de los extensómetros ($K=2,1$).

$\varepsilon_{\text{prom}}$ - deformación longitudinal unitaria promedio en la dirección de colocación de los extensómetros (μstrain).

Se llevó a cabo la calibración estática utilizando el esquema de un muelle elástico, según se muestra en la Figura 2, sin considerar la fricción interna. Se utilizó un amplificador tensométrico, masas de 100 y 500 g y una balanza de plato modelo PH-10I13Y con una apreciación: de 5 g.

Procedimiento estadístico

Se realiza un análisis descriptivo, utilizando el software Microsoft Excell 2010, para las deformaciones unitarias en las zonas de colocación de los extensómetros, determinando

la media aritmética (ϵ_{prom}), desviación estándar, el intervalo de confianza con una probabilidad del 90% según criterio de la t de student para un error relativo máximo del 10 % (Miller *et al.*, 2007).

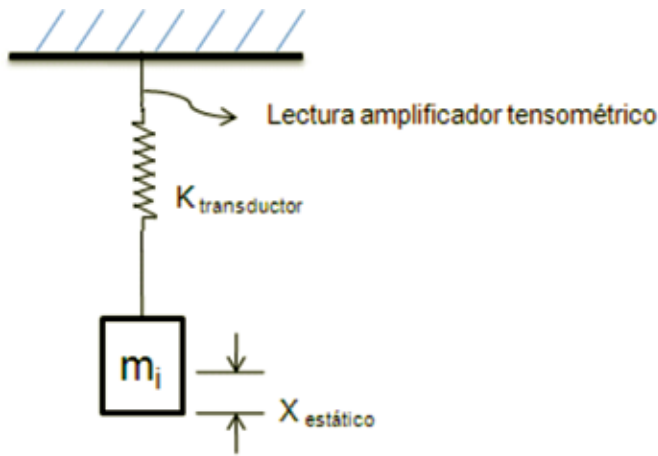


FIGURA 2. Esquema de la calibración.

El cálculo del error de la calibración del transductor se realiza según García de la Fígal (2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de las tensiones y deformaciones

En la Figura 3 se muestra la distribución de las tensiones normales equivalentes, observándose que en la zona de colocación de los extensómetros se generan los esfuerzos máximos en el orden de los 69 MPa. Se obtuvo un factor de seguridad de 7,05 con lo cual se garantiza la linealidad durante los regímenes de carga y descarga del transductor, así como un bajo efecto de histéresis.

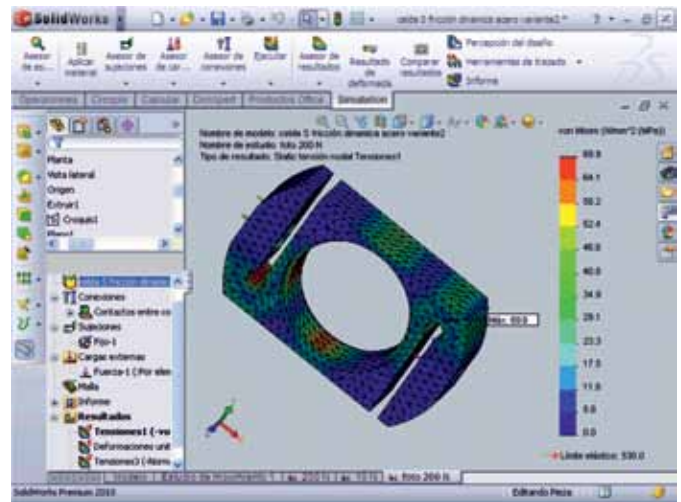


FIGURA 3. Distribución de tensiones normales equivalentes según el criterio de resistencia Von Mises.

Los resultados del estudio de deformaciones longitudinales unitarias en el eje x (ξ_x) se muestran en la Figura 4, apreciándose en coloración roja las zonas de máximas deformaciones sometidas a tracción.

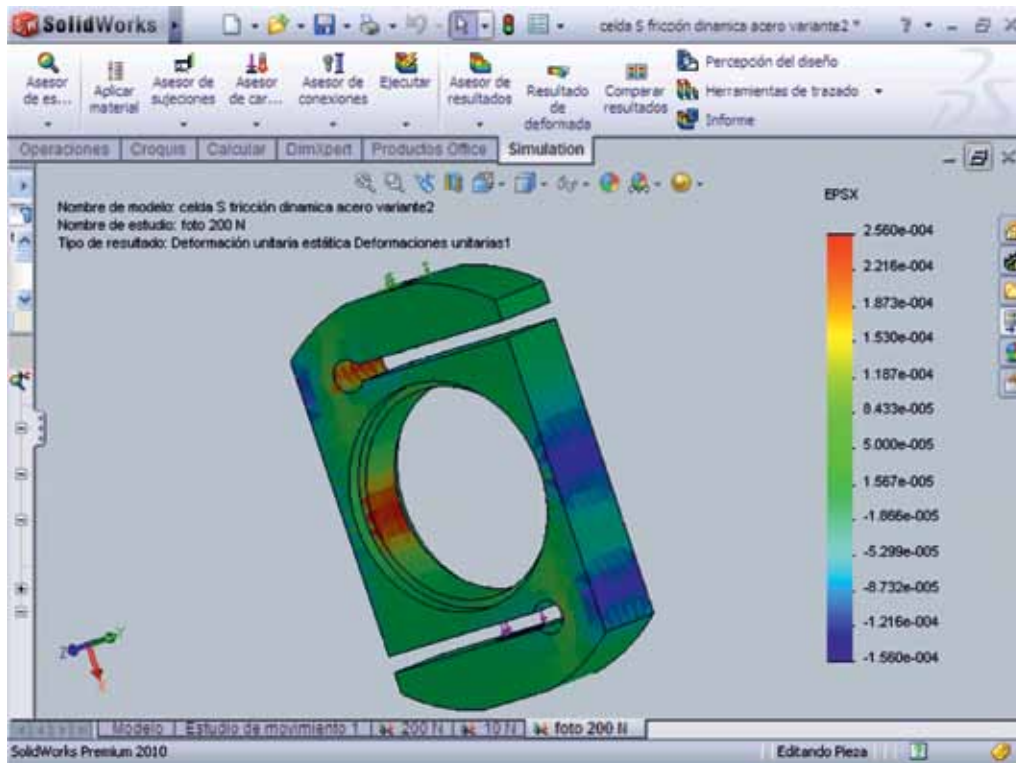


FIGURA 4. Distribución de las deformaciones longitudinales unitarias en la dirección del eje x .

En la Figura 5, se muestran las deformaciones longitudinales unitarias a lo largo del eje y (ξ_y), la coloración azul muestra las zonas de máximas deformaciones sometidas a compresión, indicando el lugar donde será factible la colocación de los extensómetros en el transductor de fuerza.

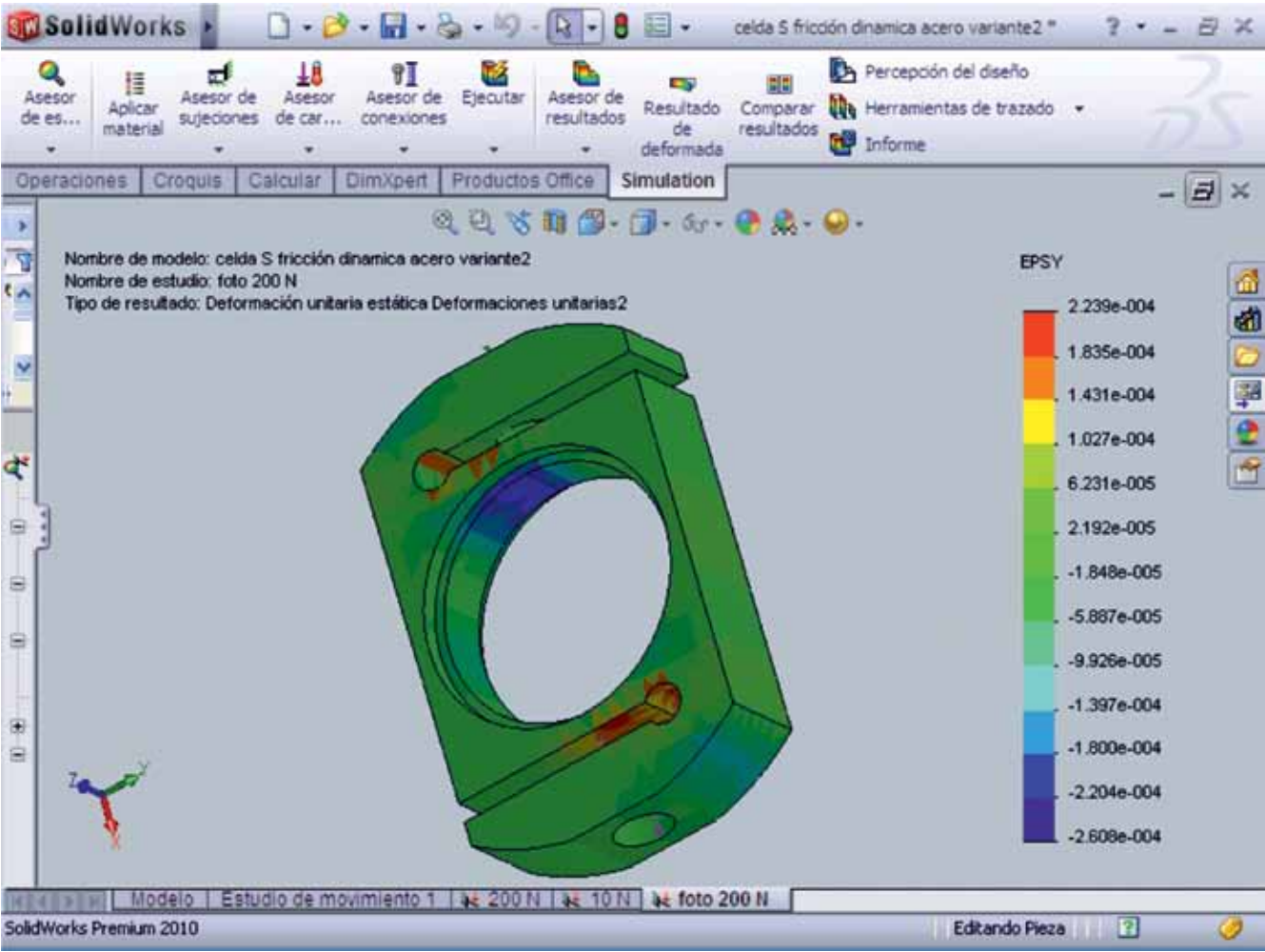


FIGURA 5. Distribución de las deformaciones longitudinales unitarias en la dirección del eje Y.

En la Tabla 1 se muestran los estadígrafos obtenidos del análisis descriptivo realizado a los valores de deformación longitudinal unitaria en cada zona de colocación de los extensómetros. Puede apreciarse que la sumatoria de los valores promedios de la deformación unitaria, en valores absolutos, se encuentra en el orden de los 869,16 μ strain, lo cual se corresponde con las recomendaciones internacionales para los extensómetros eléctricos cuyo intervalo máximo oscila entre 1000-1300 μ strain (Kyowa Electronic Instruments Instruction Manual, 1973), (Technical staff of measurement Group, Inc. 1988).

TABLA 1. Estadígrafos de la deformación longitudinal unitaria en la zona de colocación de los extensómetros

Estadígrafos	Deformaciones, μ strain	Tracción		Compresión	
		Zona 1	Zona 3	Zona 2	Zona 4
Promedio (ϵ_{prom})		231,903	231,666	-198,767	-206,861
Desv. Estándar		18,947	16,643	35,484	34,001
I.C. según t student, 99%		8,471	7,331	15,407	12,749
Error relativo (%)		3,653	3,165	-7,751	-6,163
I.C. según t student, 90%		5,259	4,555	9,580	7,979
Error relativo (%)		2,268	1,966	-4,820	-3,857

En la Figura 6 se puede apreciar la distribución de los valores de las deformaciones longitudinales unitarias obtenidas de cada zona.

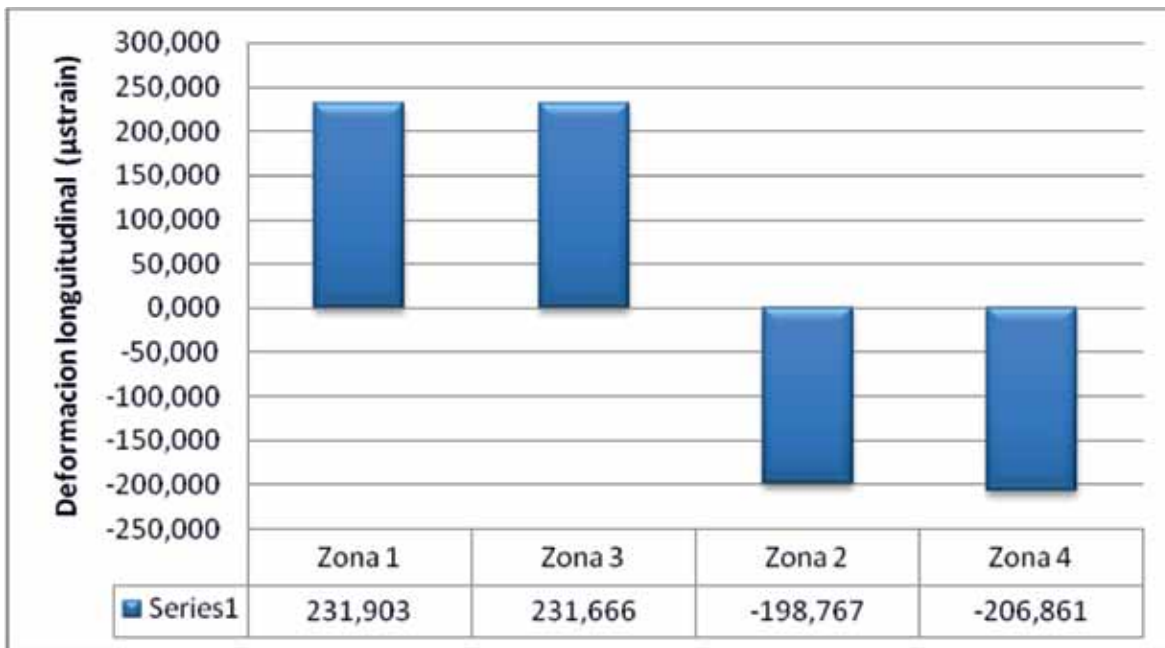


FIGURA 6. Valores de las deformaciones longitudinales unitarias en cada zona.

Determinación del voltaje de salida del puente de extensómetros

Según la expresión 2 el voltaje de salida del puente bajo carga máxima, resultó ser de 1,369 mV obteniéndose una sensibilidad de salida de 0,456 mV/V, la cual se encuentra en el intervalo recomendado (0,35...0,45) (Godwin, 1975), (Herrera *et al.*, 2007), (Martínez, 2006b).

Resultados de la calibración del transductor

En la Figura 7 se aprecia la curva de calibración estática, existiendo una fuerte dependencia lineal entre las variables al ser el coeficiente de correlación igual a la unidad.

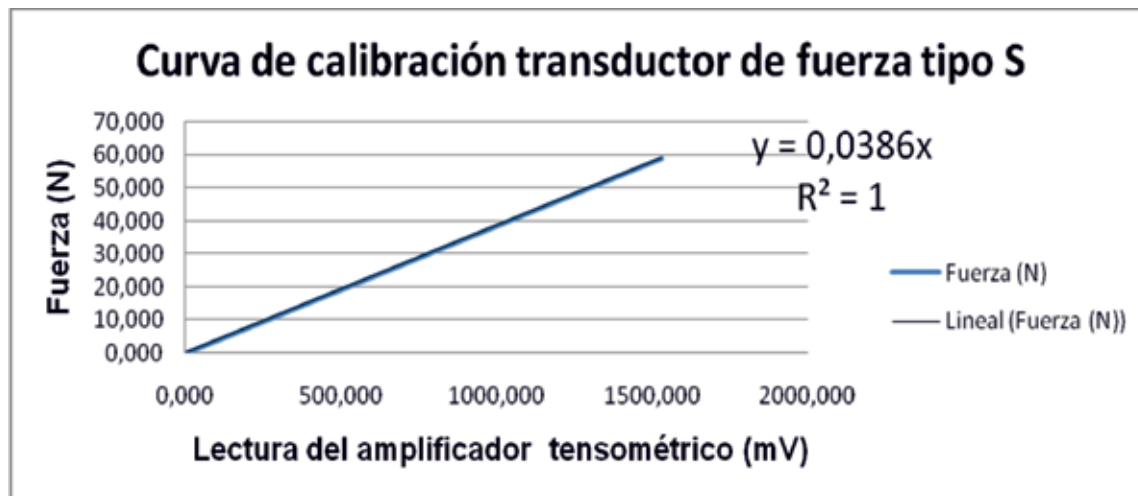


FIGURA 7. Curva de calibración estática del transductor de fuerza tipo S.

El error de la calibración del transductor fue de 0,024 N por lo que la ecuación general para determinar la fuerza tractiva se muestra a continuación:

$$F_c = 0,0386 \times V \pm 0,024 \quad (3)$$

donde:

V- lectura tomada del amplificador tensométrico, mV;

F_c - valor de la fuerza de tracción en Newton aplicada en el transductor, N.

CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño y construcción de un transductor de fuerza tipo S con un coeficiente de seguridad igual a 7,07 garantizando linealidad durante los regímenes de carga y descarga del transductor.
- Se obtuvo para el diseño una sensibilidad de salida igual a 0,456 mV/V encontrándose dentro del rango recomendado para este tipo de transductor.
- Se obtuvo la ecuación lineal de dependencia funcional entre la fuerza aplicada y las deformaciones con un valor de la pendiente igual 0,0386 N/mV.
- Se determinó el error de la calibración igual a 0,024 N.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GARCÍA DE LA FIGAL, C. A.: *Análisis de Incertidumbre*, 8pp., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Mayabeque, Cuba, (reseña), 2011
2. GODWIN, R. J.: "An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 20: 347-352, 1975.
3. HERRERA, S. M.; E. LÓPEZ; A. SÁNCHEZ; O. GONZÁLEZ y C. IGLESIAS: *Estudio de nuevos materiales para la construcción de Órganos de trabajo empleados en la labranza de suelos Abrasivos*, 106pp., Informe de proyecto, Universidad Agraria de La Habana, Cuba, 2007.
4. KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS INSTRUCTION MANUAL: *Strain Gage and Temperature Sensor*. Kyowa Electronic Instruments CO., LTD. Japan, 1973.
5. MARTÍNEZ, R. A.: *Contribución a la modelación matemática conceptual dirigida al cálculo de parámetros en procesos de aplicación en la agricultura*, 419pp., **Tesis (presentada para obtener el título de Doctor en Ciencias)**, Universidad Agraria de La Habana, Cuba, 2006.
6. MARTÍNEZ, R. A.: *Software para el cálculo de barras de cargas para básculas electrónicas*, Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria, La Habana, 2006.
7. MARTÍNEZ, R. A.: *Sistema de medición. Aplicación Ingeniería Mecánica Agrícola*, 52pp., Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Mecanización, La Habana, (reseña), 2008.
8. MILLER, I. R.; J.E. FREUND y R. JOHNSON: *Probabilidad y estadística para ingenieros*, Tomo II, Editorial Félix Varela, La Habana, 2007.
9. OMEGADYNE, INC.: *Omegadyne Pressure, Force, load, Torque Data Book*, USA, 1996.
10. RIVERO, P. Y.: *Fundamentación de los Parámetros de Diseño de una Sonda para la medición del Índice de Cuña del Suelo*, 66pp., **Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero en Mecanización Agropecuaria)**, Universidad Agraria de La Habana, 2009.
11. TECHNICAL STAFF OF MEASUREMENT GROUP: *Strain Gage Based Transducers, Their Design and Construction*. Measurements Group, Inc., Raleigh, North Carolina, 27611, ISBN 0-9619057-0-0, USA, 1988.

