

## Calibración de sensores para la determinación de potencia aplicada a la labranza vertical vibratoria

Juan Guillén Sánchez<sup>1</sup>  
Santos Gabriel Campos Magaña<sup>2§</sup>  
Carlos Sánchez López<sup>1</sup>  
Óscar Manuel González Brambila<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencias de la Ingeniería- Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. (jguillens3@hotmail.com; drcarlossl@yahoo.com). <sup>2</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buena Vista Saltillo, Coahuila, México. Tel: 0052 844 4 11 03 23. (camposmsg@hotmail.com). <sup>3</sup>Operaciones del Centro de Tecnología Avanzada- CIATEQ, oscarm.gonzalez@gmail.com.

§Autor para correspondencia: camposmsg@hotmail.com.

### Resumen

Un dispositivo fue desarrollado para evaluar los consumos de energía en la labranza vertical vibratoria del tipo inducida, para determinar el consumo de energía requerido para lograr la roturación del suelo. El equipo está conformado por un transductor octagonal de anillo extendido (OAE), una estructura de soporte, un mecanismo oscilatorio, un cincel roturador de suelo y un sistema hidráulico para el accionamiento. El presente trabajo considera, la calibración en laboratorio de los sensores del octagonal de anillo extendido que permite medir la fuerza horizontal y fuerza vertical durante la roturación del suelo, el sensor para medir la frecuencia del timón vibratorio y el sensor de torque que permite medir el par que se consume por el mecanismo oscilatorio para la ruptura del suelo. Los resultados de calibración del transductor (OAE) para la fuerza vertical, se tuvo una constante de calibración de  $75.00 \text{ N mV}^{-1}$  con una linealidad de 99.8%, para la fuerza horizontal una constante de  $47.74 \text{ N mV}^{-1}$  con una linealidad de 99.7% y para el transductor de torque una constante de  $0.4538 \text{ Nm mV}^{-1}$  con una linealidad de 98.8%, garantizando alta confiabilidad y precisión de las mediciones de fuerzas y torque.

**Palabras clave:** consumo de energía, maquinaria agrícola, subsolador vibratorio, transductor octagonal.

Recibido: marzo de 2018

Aceptado: junio de 2018

## Introducción

El trabajo se enfoca en la reducción del consumo de energía en el uso de implementos agrícolas de labranza primaria, específicamente en un multicultivador vibratorio. La estructura del trabajo, en primer lugar, explica en qué consiste el multicultivador vibratorio y posteriormente se presenta la calibración de los sensores.

Para efectos de implementación se ha utilizado un multicultivador desarrollado en el departamento de diseño de nuevos productos de la Empresa Tecnomec Agrícola. Se le llama multicultivador, porque permite realizar: subsoleo, barbechado vertical, y desterronado. Según Cadena *et al.* (2012) éste multicultivador fue evaluado por el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), con excelentes resultados en aspectos como disturbación del suelo, tamaño de agregados, demanda de potencia y consumo de combustible.

Campos *et al.* (2015a) y Campos *et al.* (2015b) modificaron el multicultivador colocando timones someros en la parte frontal y timones de mayor longitud en la parte trasera. En los timones de la parte trasera se utilizaron aletas de diferentes tamaños para aumentar la superficie disturbada. Utilizando la teoría de profundidad crítica en equipos de labranza, las pruebas de campo realizadas con este acomodo les permitieron demostrar que los consumos de energía se pueden disminuir.

Por otra parte, Campos *et al.* (2015a) han realizado trabajos de investigación relacionados con labranza inteligente, donde se utilizaron sistemas de información geográfica y de localización global (GPS) para mapear el terreno que se requiere preparar, en base a este mapa, se rotura el suelo a profundidad variable dependiendo de su dureza, redundando en la variación del consumo de energía.

Shahgoli *et al.* (2009) y Shahgoli *et al.* (2010) han reportado que,  $-22.5^\circ$  fue el ángulo de oscilación óptimo para la reducción de la fuerza de tiro y ahorro de potencia. En su estudio sobre la optimización de la frecuencia oscilatoria en labranza vibratoria, los timones fueron oscilados con una amplitud de  $\pm 69$  mm y un ángulo de oscilación de  $27^\circ$  usando una velocidad de avance de 3 km/h. La frecuencia de oscilación se varió desde 1.9 a 8.8 Hz. Hubo una frecuencia óptima cercana a los 3.3 Hz que minimizó la potencia total del motor requerida para operar el subsolador. Al comparar con un equipo de labranza rígido se estimó una reducción de potencia del motor arriba de 26%. Adicionalmente, realizó una simulación para calcular el comportamiento dinámico del sistema tractor-subsolador oscilatorio enfocado en las vibraciones del asiento del operador. Sahay *et al.* (2009) demostraron el efecto en la profundidad de trabajo al inducir vibración en el implemento agrícola.

Desarrollaron un equipo con transmisión modificada logrando inducir vibraciones en frecuencias entre 9-13 Hz y entre 15-35 Hz. Induciendo vibración la profundidad de trabajo fue de 15.3 cm mientras que al utilizar el mismo equipo sin vibración fue de 7.4 cm.

Wu y Song (2010) diseñaron un escarificador para praderas, el cual muestra un trabajo estable y disturbación efectiva con una velocidad de avance de 1 m/s y una frecuencia de vibración de 10.0 Hz. Por otro lado, Tong (2009), adoptó un mecanismo de escarificación profundo combinando pequeñas aletas vibratorias las cuales generan la vibración utilizando movimiento alternativo del timón por medio de un mecanismo de biela manivela. Li *et al.* (2009) desarrollaron un escarificador vibratorio profundo, compararon la resistencia a la tracción entre el modo vibratorio y el no vibratorio a una profundidad de 30 cm, la escarificación vibratoria profunda reduce efectivamente la resistencia a la tracción de 13% a 18%. Dong *et al.* (2010) utilizaron un mecanismo de rompimiento de suelo en pradera por medio de un dispositivo de vibración forzada, demostraron que existe un ángulo óptimo entre el timón y la dirección de roturación, para la reducción de la resistencia a la tracción.

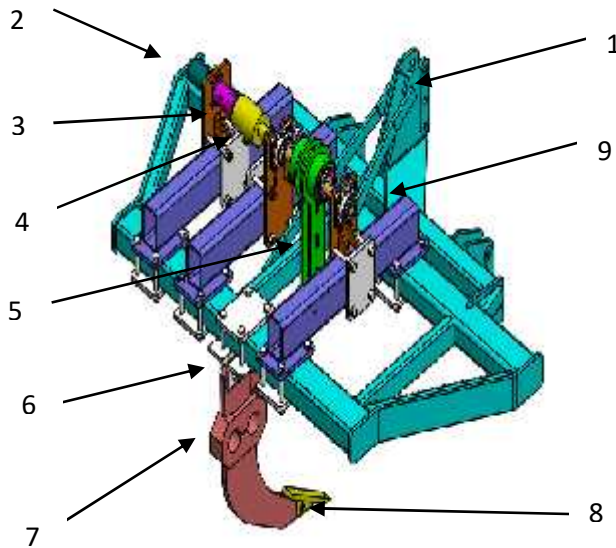
Zhao (2010) inventó un escarificador profundo el cual se comparó con un escarificador común, se redujo de manera significativa la resistencia a la tracción, el consumo de energía y se elevó la calidad de la disturbación profunda en una estructura similar de suelo y condiciones de trabajo.

Zhou (2009) linealizó la resistencia a la roturación, y concluyó por medio de cálculos dinámicos y pruebas repetitivas que la vibración reduce efectivamente la resistencia específica del suelo y la resistencia a la roturación. También, Lili *et al.* (2013) realizaron un análisis dinámico y experimental de un subsolador vibratorio, encontrando que las mejores condiciones de trabajo del implemento de labranza ISZ-160 son: velocidad hacia adelante de 0.2 m/s y la frecuencia de vibración de 10 Hz, la resistencia tractiva es baja y el efecto de roturación del suelo es bueno. En cierta posición de profundidad, al incrementar la velocidad se incrementa la resistencia tractiva. Cuando el tractor se desplaza muy rápido hacia adelante, la resistencia tractiva se reduce con una amplitud pequeña en la condición vibratoria comparado con la condición no vibratoria.

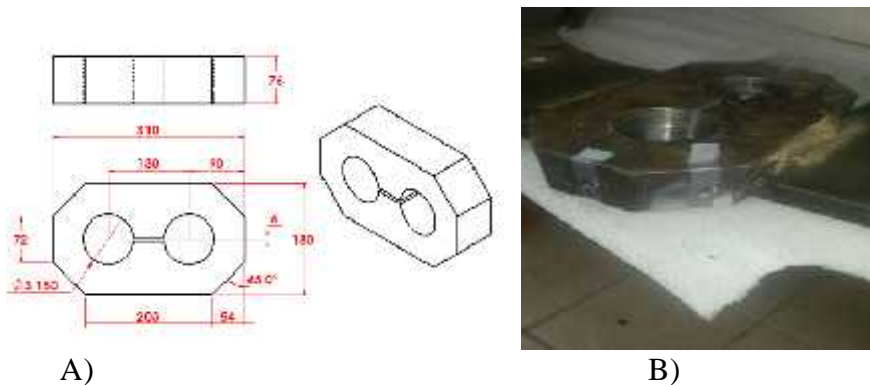
El alcance de este proyecto comprende la calibración de los sensores del octagonal de anillo extendido, sensor para determinar la frecuencia del timón vibratorio y el sensor de torque, con el objetivo de poder determinar el consumo de energía en un timón vibratorio utilizado en la labranza vertical.

## **Materiales y métodos**

Para determinar la potencia utilizada en actividades de labranza primaria aplicando vibración inducida, se utilizó un dispositivo cuyos timones puedan vibrar al menos en 3.3 y 4.9 Hz, también permite una amplitud de vibración de 60 y 70 mm. Este dispositivo está conformado por una estructura o chasis, un timón oscilatorio, un mecanismo oscilatorio de biela manivela, un motor hidráulico, una válvula reguladora de flujo y un transductor de torque. En las Figuras 1 y 2 se muestran los principales componentes del dispositivo utilizado.



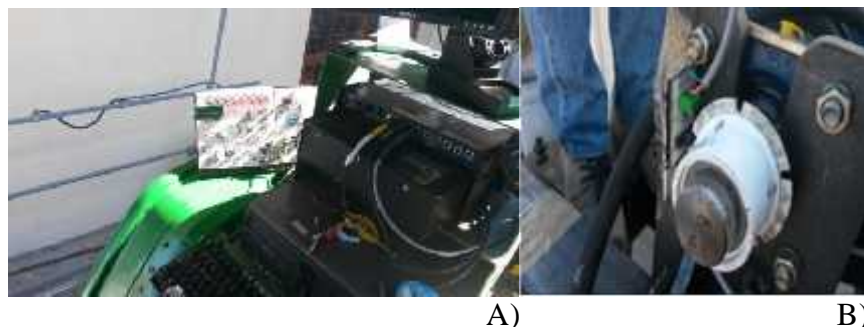
**Figura 1.** Vista isométrica del aparato de labranza vibratoria. 1) chasis; 2) motor hidráulico; 3) cople; 4) transductor de torque; 5) biela manivela; 6) timón o cinzel; 7) transductor oae; 8) pico; y 9) soporte ajustable de biela.



**Figura 2.** Transductor octagonal de anillo extendido (OAE); A) dimensiones del octagonal; y B) ubicación de galgas extensométricas.

El dispositivo experimental se monta al sistema de enganche de tres puntos de un tractor agrícola categoría II y el sistema oscilatorio es accionado por el sistema hidráulico del tractor. El chasis corresponde a la estructura del aparato en el cual se montan todos los componentes incluyendo el sistema de enganche de tres puntos. El mecanismo de biela manivela es el que ocasiona la oscilación del timón como se muestra en la Figura 1, este mecanismo se acciona por medio de un motor hidráulico de bajas revoluciones y alto torque, y la frecuencia de giro se controla por medio de una válvula reguladora de flujo. Adicionalmente, para medir el par que se genera en el momento de estallamiento del suelo, se colocó un transductor de torque entre el cople del motor hidráulico y el mecanismo oscilatorio.

Para medir la fuerza horizontal y vertical que ejerce el suelo sobre el timón al momento de la ruptura del suelo, se fabricó un transductor octagonal de anillo extendido (OAE) con las dimensiones que se muestran en la Figura 3. El transductor OAE se colocó unido al timón como se muestra en la Figura 1.

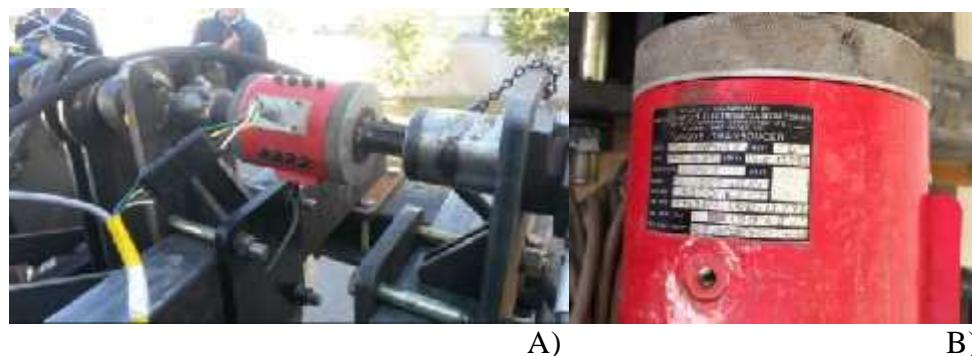


**Figura 3. Sensor para determinar la frecuencia de oscilación del timón vibratorio; A) tarjeta electrónica; y B) sensor montado sobre la flecha.**

El transductor OAE cuenta con galgas extensométricas marca Kyowa (tipo KFG-5-350-C1-11, Japón) para la determinación de la fuerza en las direcciones horizontal y vertical.

Para determinar la frecuencia de oscilación en tiempo real del aparato vibratorio, se desarrolló una tarjeta electrónica utilizando un sensor optoelectrónico infrarrojo de corte (modelo H21A1, EUA).

Para medir el par que se genera durante la ruptura del suelo, se utilizó un transductor de torque, facilitado por el INIFAP Campo Experimental Cotaxtla Veracruz, México, por gestión de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) Saltillo, Coahuila, México. El transductor de torque número de serie 52-E-73.792, fue diseñado y manufacturado por: British Hovercraft Corporation Ltd., Osborne, East Cowes. I.W. Figura 4, 5 y 6.



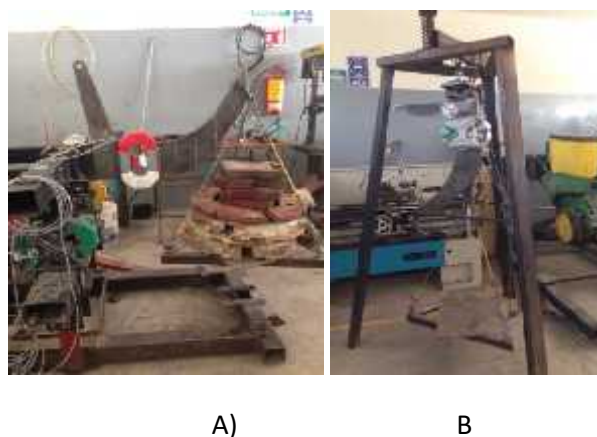
**Figura 4. Transductor de torque; a) montaje en el aparato; y b) placa de registro.**

La investigación de laboratorio se llevó a cabo durante el período de enero a octubre de 2015 en el departamento de Ingeniería Agrícola, ubicado  $25^{\circ} 21.52''$  latitud norte y  $101^{\circ} 50''$  longitud oeste y una altitud de 1 740.5 msnm, perteneciente a la UAAAN.

Para medir las fuerzas en la dirección horizontal y vertical simultáneamente, de forma independiente y con alta precisión, el transductor OAE se calibró estáticamente utilizando

ocho pesos de: 470.8, 470.8, 716.13, 716.13, 343.35, 343.35, 294.30, 294.30 N, de forma acumulada sobre la canastilla y de manera inversa la descarga, con 5 repeticiones en cada corrida. Este proceso se hizo tanto para la dirección de la fuerza horizontal como para la fuerza vertical.

El sistema de adquisición de datos utilizado en la calibración incluye: Daqbook2000, un acondicionador de voltaje modelo DBK43A, una computadora Dell Optiplex GX520 y el software DaqView.



**Figura 5. Calibración del transductor OAE para fuerza; A) horizontal; y B) vertical.**

Con la finalidad de medir el torque aplicado en el estallamiento del suelo se calibró el transductor de torque, para lo cual se utilizó el sistema de adquisición de datos Logbook360. La calibración se realizó con dos brazos de palanca de 0.65 y 0.85 metros y con 4 pesos de carga de 294.30, 294.30, 343.5, 343.5 N de forma acumulada y la descarga de manera inversa, con 5 repeticiones.



**Figura 6. Calibración del transductor de torque.**

Los datos obtenidos se cargaron en el software Minitab V16 y utilizando regresión lineal se obtuvieron las curvas y las constantes de calibración.

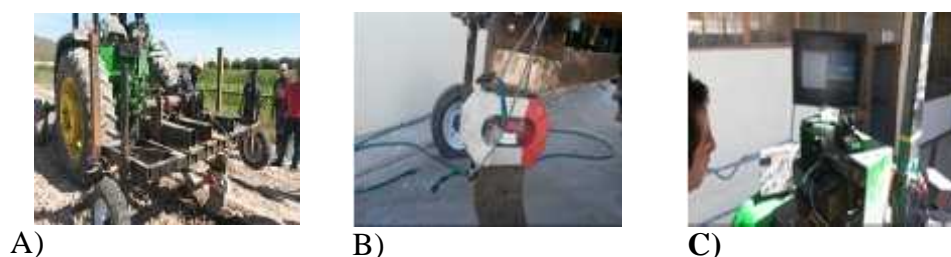
## Resultados y discusión

Los resultados se presentan en tres apartados que comprenden la construcción del aparato, calibración del sensor para determinar la frecuencia del timón oscilatorio y la calibración del transductor del octagonal de anillo extendido.

### Construcción del aparato

El aparato de labranza vibratoria se fabricó en el centro Investigación y Desarrollo Aplicado de Aguascalientes SC, en colaboración con Tecnomec Agrícola SA de CV, ambas localizadas en Aguascalientes, México.

En la Figura 7 se muestra el aparato de labranza vibratoria instrumentado, el transductor OAE que se utiliza para medir las fuerzas horizontal y vertical que ejerce el suelo sobre el cincel, el transductor de torque que se utiliza para medir el par requerido para el estallamiento del suelo, el sensor optoelectrónico infrarrojo para medir la frecuencia del mecanismo oscilatorio y el sistema de adquisición de datos el cual captura toda la información de los transductores en tiempo real y los almacena, para posteriormente ser analizados.



**Figura 7.** A) Aparato para labranza vibratoria; B) ubicación del transductor OAE; y C) sistema de adquisición de datos.

### Calibración del sensor del octagonal de anillo extendido

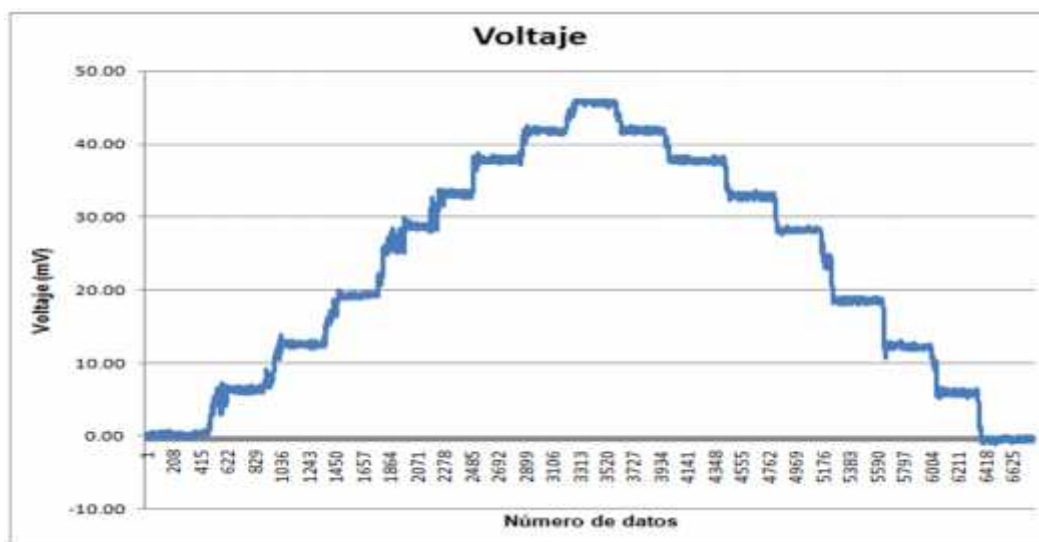
Para obtener la misma precisión de medición en los dos transductores, fue necesario uniformizar el coeficiente de constante por medio del ajuste de calibración en los 3 canales del amplificador que corresponden a cada sensor y ajustar la ganancia de entrada, el compensador y el voltaje de excitación. En los Cuadros 1 y 5 se pueden observar estos valores.

**Cuadro 1. Valores de voltaje para calibrar el transductor OAE.**

Sensor	Cable	Canal	Voltaje de excitación	Ganancia (V)	Escala (V)
Ortogonal	Negro-Azul	CH5	5.5	4.5	4.5
	Negro-Verde	CH6	5.5	4.5	4.5

En la Figura 8, se presenta la gráfica escalonada de la calibración del transductor OAE correspondiente a la fuerza vertical. En el Cuadro 2, se muestran las medias de los valores en  $mV$  de cada escalón generados por cada carga para determinar la ecuación de calibración para la fuerza vertical. En la Figura 9 se muestra la ecuación de regresión con la constante de

75.00 *mV* por *N*, con una linealidad de 99.8%, resultados muy similares obtuvieron Campos *et al.* (2015c).



**Figura 8. Ciclos de carga y descarga del transductor OAE durante la calibración con diferentes pesos para la fuerza vertical.**

**Cuadro 2. Relación de peso contra medias de voltaje con 5 repeticiones.**

Peso (N)	Media (mV)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
470.88	6.22	0.691	11.10
941.76	11.96	0.391	3.27
1412.64	18.48	0.63	3.41
2128.77	28.24	0.733	2.60
2472.12	32.42	0.798	2.46
2815.47	36.80	0.663	1.80
3109.77	40.98	0.887	2.16
3404.07	45.46	0.336	0.74
3109.77	41.72	0.581	1.39
2815.47	37.96	0.865	2.28
2472.12	32.76	0.564	1.72
2128.77	28.60	0.846	2.96
1412.64	19.16	0.472	2.46
941.76	12.38	0.545	4.40
470.88	6.46	0.477	7.39



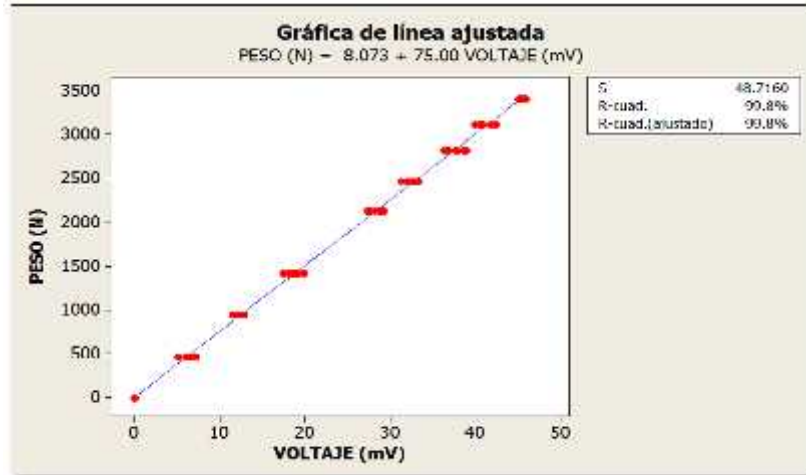


Figura 9. Linealidad en la calibración de fuerza vertical.

En la Figura 10, se muestra la gráfica escalonada de la calibración del transductor OAE correspondiente a la fuerza horizontal, en el Cuadro 3 se muestran las medias de los valores en  $mV$  de cada escalón generados por cada carga para determinar la ecuación de calibración para la fuerza horizontal. En la Figura 11 se muestra la ecuación de regresión con la constante mencionada de  $47.74 mV$  por  $N$  con una linealidad de 99.7%, resultados similares obtuvieron Campos *et al.* (2015b).

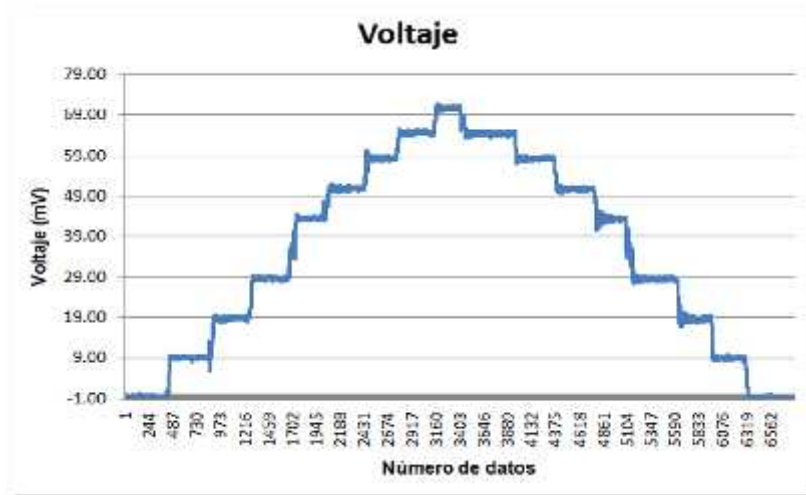
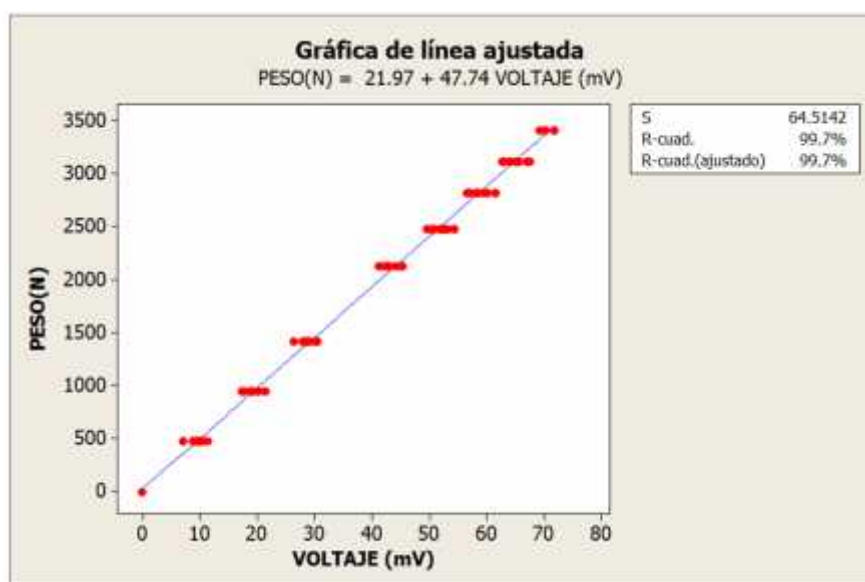


Figura 10. Ciclos de carga y descarga del transductor OAE durante la calibración con diferentes pesos para la fuerza horizontal.

**Cuadro 3. Relación de pesos contra medias de voltajes y sus 5 repeticiones de calibración.**

Peso (N)	Media (mV)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
470.88	9.58	0.626	6.54
941.76	18.08	1.377	6.29
1412.64	28.74	1.425	5.05
2128.77	42.58	1.524	3.58
2472.12	51.20	1.239	2.42
2815.47	56.86	0.713	1.25
3109.77	63.84	1.824	2.86
3404.07	70.56	1.163	1.65
3109.77	65.14	1.519	2.33
2815.47	59.58	1.307	2.19
2472.12	52.68	1.268	2.41
2128.77	44.90	0.464	1.03
1412.64	29.12	1.101	3.78
941.76	19.46	1.518	7.80
470.88	9.76	1.587	16.26



**Figura 11. Linealidad en la calibración de fuerza horizontal.**

**Calibración del sensor para determinar la frecuencia del timón vibratorio**

Para calcular la velocidad angular con la que gira la flecha que transmite la vibración, fue necesario instalar un encoder con cinco muescas por revolución. La calibración consistió en mandar una cantidad de pulsos y verificar que la pantalla LCD registrara la misma cantidad de pulsos enviados (Cuadro 4). Para evitar rebotes se colocó un capacitor cerámico 104.

**Cuadro 4. Velocidad y frecuencia de oscilación del cincel.**

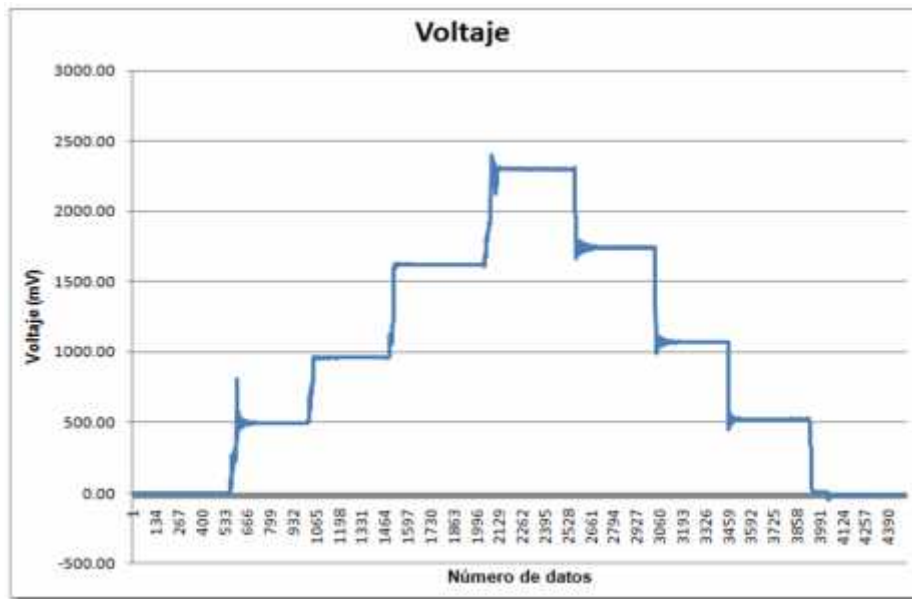
Tiempo (s)	Núm. de pulsos	Frecuencia (Hz)	RPM
10	147	2.94	176.4
10	148	2.96	177.6
10	149	2.98	178.8
10	148	2.96	177.6
10	149	2.98	178.8

**Calibración del sensor de torque**

En la Figura 12, se puede observar la deformación en *mV* generada a partir del ascenso y descenso de cuatro pesos con un brazo de palanca de 0.85 *m*, en el Cuadro 6 se muestra la magnitud del torque (*Nm*), que generó la deformación, versus el valor medio del voltaje (*mV*) censado con cinco repeticiones de calibración. En la Figura 13 se muestra la ecuación de regresión con la constante de 0.4538 *mV* por *Nm* con una linealidad de 98.8%.

**Cuadro 5. Valores de voltaje para calibrar el transductor de torque.**

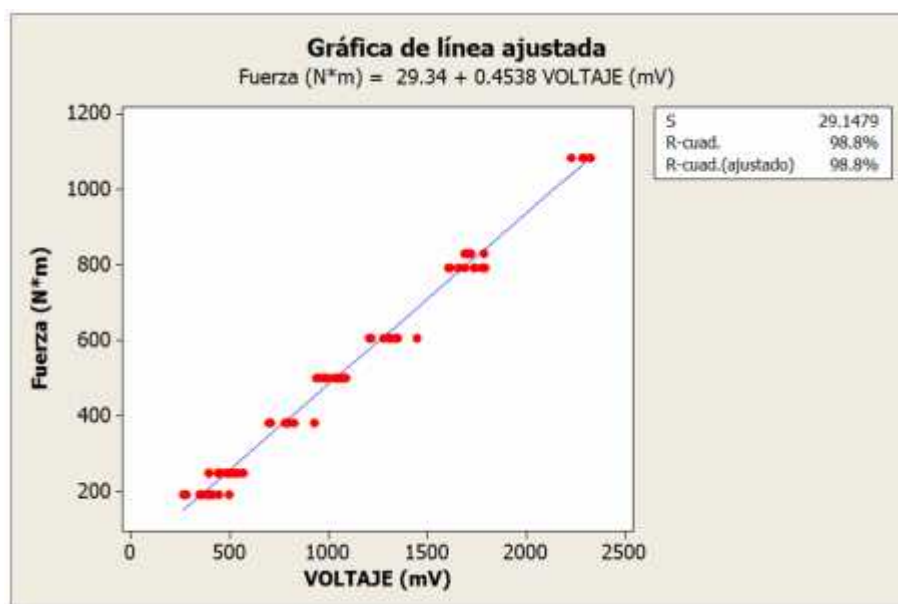
Cable	Voltaje de excitación (V)	Ganancia (V)	Escala (V)
Blanco- amarillo	2.5	2.5	2.5



**Figura 12. Ciclos de carga y descarga del transductor de torque durante la calibración con diferentes pesos.**

**Cuadro 6. Torque ( Nm ) vs. Voltaje ( mV ) para el transductor de torque.**

Momento (Nm)	Media (mV)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
191.3	367.0	53.7	14.64
250.2	524.1	33.8	6.45
382.6	764.1	56.8	7.43
500.3	1 037.1	55.8	5.38
605.8	1 081.0	412.0	38.11
792.2	1 723.8	72.2	4.19
828.9	1 719.8	37.8	2.20
1084.0	2 290.0	39.4	1.72
792.2	1 685.1	54.9	3.26
605.8	1 292.8	98.1	7.58
500.3	1 009.5	48.5	4.80
382.6	782.6	93.1	11.89
250.2	459.3	42.7	9.29
191.3	371.4	102.2	27.51



**Figura 13. Linealidad en la calibración del torque.**

### Conclusiones

Según los objetivos planteados, se logró establecer la calibración de los transductores del multicultivador vibratorio para determinar las fuerzas horizontal y vertical en tiempo real que se ejerce sobre el timón durante el trabajo, en el mismo orden de ideas se calibró el sensor que se utiliza para medir la frecuencia de oscilación del timón y por último se calibró el transductor de torque. En la calibración de los transductores para la fuerza vertical se tiene una constante de calibración de  $75.00 \text{ N}\cdot\text{mV}^{-1}$  con una linealidad de 99.8%, para la fuerza

horizontal una constante de  $47.74 \text{ N}\cdot\text{mV}^{-1}$  con una linealidad de 99.7% y para el transductor de torque, una constante de  $0.4538 \text{ Nm}\cdot\text{mV}^{-1}$ . con una linealidad de 98.8%, garantizando alta confiabilidad y precisión de las mediciones de fuerzas, frecuencia y torque en tiempo real durante las pruebas de campo.

### Literatura citada

- Cadena, Z. M.; Campos, M. S. G.; López, S. A. y Zermeño, G. A. 2012. Configuración de herramientas de labranza vertical para reducir demanda de energía. *Terra Latinoam.* 30(1):279-288.
- Campos, M. S. G.; Cadena, Z. M.; Ramírez, F. G.; Pacheco, L. J. L.; Reynolds, C. M. A. y Valenzuela, G. J. R. 2015. An experimental determination of specific soil resistance of a Sandy loam soil using vertical soil tillage in the northeast of Mexico. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America.* 6(1):53-57.
- Campos, M. S. G.; López, L. J. A.; Cadena, Z. M.; Reynolds, C. M.; Cuervo, P. N. y Ramírez, F. G. 2015b. Desarrollo de un penetrómetro integrado con tecnología GPS-RTK para la generación de mapas de resistencia a la penetración del suelo. *Terra Latinoam.* 33(2):119-128.
- Campos, M. S. G.; Reynolds, C. M. A.; Cadena, Z. M.; López, L. J. A.; Cuervo, P. N. y Ramírez, F. G. 2015c. Desarrollo de un sistema integral de medición de fuerzas para la evaluación de implementos de labranza. *Terra Latinoam.* 33(2):139-149.
- Dong, X.; Song, J.; Wang, J.; Li, Y. and Wu, G. 2010. Working mechanism of vibration spacing scarifier for grassland. *Transaction of the CSAE.* 26(10):119-123.
- Gholamhossein, S.; Saunders, C.; Desbiolles, J. and Fielke, J. M. 2009. The effect of oscillation angle on the performance of oscillatory tillage. *Soil Tillage Res.* 104(1):97-105.
- Gholamhossein, S.; Saunders, C.; Desbiolles, J. and Fielke, J. M. 2010. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage. *Soil Tillage Res.* 106(2):202-210.
- Li, Y.; Liu, B.; Cui, T. and Zhang, D. 2009. Design and field experiment on 1SZ-460 lever-type subsoiler. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery.* 40:37-40.
- Sahay, C. S.; Thomas, E. V. and Satpathy, K. K. 2009. Performance evaluation of a novel power tiller operated oscillatory tillage implement for dry land tillage. *Biosy. Eng.* 102(4):385-391.
- Shahgoli, G.; Fielke, J.; Desbiolles, J. and Saunders, C. 2010. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage. *Soil Tillage Res.* 106(2):202-210.
- Shahgoli, G.; Saunders, C.; Desbiolles, J. and Fielke, J. M. 2009. The effect of oscillation angle on the performance of oscillatory tillage. *Soil Tillage Res.* 104(1):97-105.
- Tong, H. X. 2009. Development and application technology of vibratory subsoiler. *Farm Machinery Using & Maintenance.* 5:25-26.
- Wu, G. W. and Song, J. N. 2010. Design and experiment on vibration spacing scarifier for meadow. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery.* 41(2):42-46.
- Xin, L.; Liang, J. and Qiu, L. 2013. Dinamic analysis and experimental research of vibratory subsoiler system. *J. Theoretical Appl. Inf. Technol.* 48(2):1195-1201.
- Zhao, D. W. 2010. Research and design of vibrating subsoiler. *Agric. Sci. Technol. Equipment.* 190(4):29-30.
- Zhou, Y. 2009. Ploughing resistance and kinematics analysis of vibration fertilizer discharging mechanism. *Modern Agric. Machinery.* 10:74-76.