



PRUEBAS DE UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA CON UN SISTEMA MECATRÓNICO ADAPTADO PARA EL CONTROL DE LOS DOSIFICADORES

TESTS OF A SEEDER AND FERTILIZER MACHINE WITH A MECHATRONIC SYSTEM ADAPTED TO CONTROL THE DISPENSERS

Julio Torres-Sandoval¹, Eugenio Romantchik-Kriuchkova^{*2}, Ireneo L. López-Cruz²,
Gilberto de J. López-Canteñs² y Micaela de la O-Olán¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México, Texcoco, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (eugenior@correo.chapingo.mx)

RESUMEN

Las máquinas sembradoras-fertilizadoras utilizadas en el campo mexicano usan sistemas mecánicos para el accionamiento de los dosificadores. En países desarrollados estos sistemas se están reemplazando por sistemas mecatrónicos implementados en máquinas de dosificación variable. Los sistemas mecatrónicos tienen la ventaja de que su desempeño no se afecta por las condiciones del suelo y cubierta vegetal, además de la facilidad para realizar los cambios de la dosis de aplicación de insumos, al permitir realizarlos de manera continua y en tiempo real. Sin embargo, tienen la desventaja de su elevado costo de adquisición. Este estudio presenta los resultados de prueba de laboratorio de un sistema mechatrónico desarrollado con hardware y software libre de bajo costo y adaptado a la sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N del fabricante Sembradoras del Bajío S. A. de C.V. El dosificador de semilla se probó con semilla de maíz, bajo el estándar de la banda engrasada descrito en la norma ISO 7256-1:1984. Los resultados muestran buena calidad de distribución de la semilla a frecuencias de rotación del disco semillero de 0.524 a 2.199 rad s⁻¹, al obtener índices de calidad de alimentación $\geq 90\%$, pérdida de semilla y de multiplicidad inferiores al 6 % y precisión < 18 %. Los dosificadores de fertilizante y pesticida se probaron con base a la norma NMX-O-222-SCFI-2004, con fertilizante comercial UREA, al utilizar cinco frecuencias de rotación en el intervalo de 0.524 a 3.77 rad s⁻¹ y de 1047 a 14,661 rad s⁻¹, respectivamente, con diferentes aberturas de la compuerta de salida. Para el caso del dosificador de fertilizante se obtuvo una dosis de aplicación de 3 a 562 kg ha⁻¹ con el mejor desempeño al utilizar aberturas de la compuerta $\leq 50\%$, mientras que el dosificador de pesticida presentó un desempeño excelente, con el cual se obtuvo una dosis de aplicación de 0.004 a 16.4 kg ha⁻¹.

Palabras clave: calidad de la dosificación, cámara de succión, dosificadores, pruebas de desempeño, sistemas mechatrónicos.

SUMMARY

The sowing-fertilizing machines used in the mexican field use mechanical systems to drive the feeders. In developed countries, these systems are being replaced by mechatronic systems applied in variable dosing machines. Mechatronic systems have the advantage that their performance is not affected by the conditions of the soil and vegetation cover, in addition to the ease of making changes in the dose of input supplies, by allowing them to be carried out continuously and in real time. However, they have the disadvantage of their high acquisition cost. This study presents the laboratory test results

of a mechatronic system developed with low-cost free hardware and software, and adapted to the Model LC-U-N seeder-fertilizer from the manufacturer Sembradoras del Bajío S. A de C. V. The seed dispenser was tested to the standard of the corn seed greased belt described in ISO 7256-1:1984. The results show good seed distribution quality at rotation frequencies of the seed disk of 0.524 to 2,199 rad s⁻¹, obtaining feeding quality indexes $\geq 90\%$, seed loss and multiplicity less than 6 % and precision < 18 %. The fertilizer and pesticide dispensers were tested based on the mexican standard NMX-O-222-SCFI-2004, with commercial UREA fertilizer, using five rotation frequencies in the range of 0.524 to 3.77 rad s⁻¹ and 1047 to 14,661 rad s⁻¹, respectively, with different openings of the outlet gate. In the case of the fertilizer dispenser, an application dose of 3 to 562 kg ha⁻¹ was obtained with the best performance when using gate openings $\leq 50\%$, while the pesticide dispenser presented excellent performance, with which it was obtained an application rate of 0.004 to 16.4 kg ha⁻¹.

Key Words: dosers, dosing quality, mechatronic system, performance tests, suction chambe.

INTRODUCCIÓN

Las máquinas sembradoras-fertilizadoras de dosificación variable, usadas en agricultura de precisión, reemplazan los sistemas mecánicos (basados en una rueda motriz y transmisión por cadenas y engranes) por sistemas mechatrónicos (SM) para accionar los dosificadores. Estos sistemas permiten realizar la aplicación variable de los insumos, cambios en la dosis de aplicación en tiempo real y de forma continua y, además, no son afectados por las condiciones del suelo, lo que permite trabajar a mayores velocidades de aplicación en campo (Jianbo et al., 2014). En México este tipo de sistemas no han sido usados o investigados.

Li et al. (2015) realizaron pruebas de campo con un SM para el control del dosificador neumático de semilla a velocidades de siembra en el intervalo de 9 a 12 km h⁻¹ con semilla de maíz, con el que obtuvieron un índice de calidad de alimentación mínimo del 89.93 % e índices de

pérdida de semilla y precisión máximos de 5.08 % y 18.92 %, respectivamente. Jiajia *et al.* (2014) experimentaron con presión negativa en un sistema neumático de dosificación, con semilla de colza y diferentes frecuencias de rotación (FR) del disco semillero (DS). Sus resultados indican que por cada presión de vacío probada la calidad de distribución de la semilla disminuía al incrementar la FR del DS y que con el aumento de la presión de vacío se logró trabajar con mayores FR del DS con un desempeño aceptable del dosificador. Jianbo *et al.* (2014), en pruebas de campo, obtuvieron un comportamiento similar con la variación de la velocidad de siembra al utilizar semilla de haba y un DS de 20 orificios, pero se reduce la calidad de distribución de la semilla con el incremento de la velocidad de siembra (reflejado en un incremento de la FR del DS) y al modificar la velocidad de 1 m s⁻¹ a 2 m s⁻¹ el índice de calidad de alimentación pasó de 85.83 a 80.8 y el índice de falla de 5 a 10.83 %.

Sartori *et al.* (2015) encontraron que, para un dosificador de fertilizante tipo helicoidal, el error entre los valores objetivo y real de la dosis de aplicación de fertilización disminuye conforme se incrementa la frecuencia de rotación del dosificador, con errores de 8.3 % a 0.419 rad s⁻¹ y <1.5 % a 2.513 rad s⁻¹. Reyes *et al.* (2011) identificaron una variación en la dosis de aplicación del fertilizante (en kg ha⁻¹) por el cambio de la frecuencia de rotación del dosificador (rad s⁻¹) y con el dosificador calibrado el error máximo fue 7 % entre la dosis de aplicación objetivo y la dosis real. Forouzanmehr y Loghavi (2012) usaron urea y súper fosfato triple y variaron la velocidad de avance de la máquina y la dosis y concluyen que tanto la velocidad de avance como la dosis de aplicación tuvieron un efecto significativo sobre la precisión (porcentaje de desviación entre las dosis reales y objetivo), pero no hubo efecto del tipo de fertilizante. Garcia *et al.* (2014), a través del control del flujo máscico del dosificador accionado por un motorreductor de CD, obtuvieron en la prueba de banco un CV de 6.32 a 13.18 %. Además, ellos mencionan que Garcia *et al.* (2012), con un dosificador helicoidal accionado por un motor de CD, obtuvieron un CV aproximado de 20 % y que, en condiciones similares, Camacho-Tamayo *et al.* (2009), obtuvieron un CV de 32 %.

El objetivo del presente estudio fue realizar la prueba de laboratorio para caracterizar el desempeño de un cuerpo de la sembradora-fertilizadora modelo LC-U-N del fabricante mexicano Sembradoras del Bajío S. A. de C. V., a la cual se le adaptó un sistema mecatrónico (SM) desarrollado en la Universidad Autónoma Chapingo, para controlar el funcionamiento de los dosificadores. Con esto se valida el desempeño de la máquina con las ventajas significativas que le da el SM adaptado con respecto al

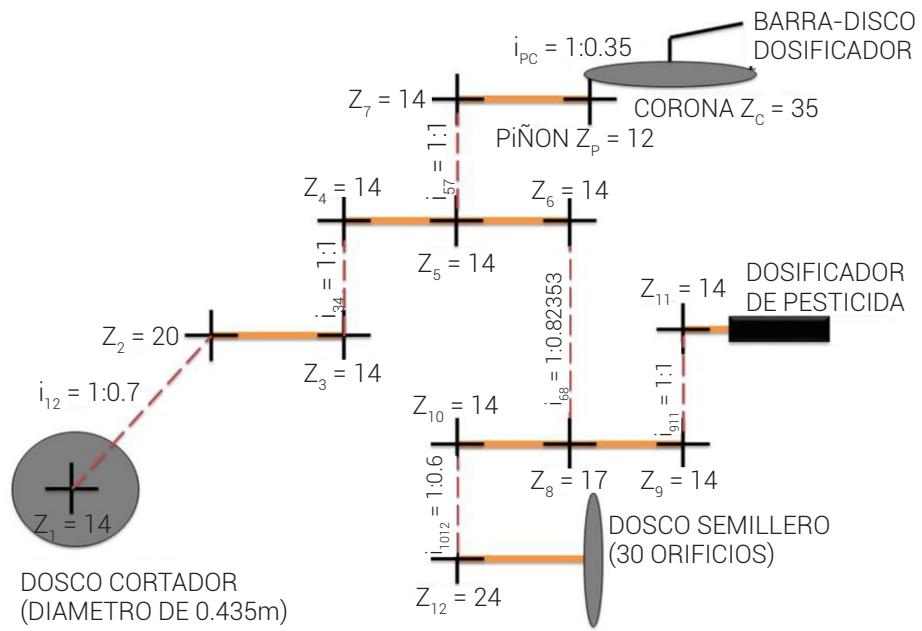
sistema mecánico original, haciendo posible su fabricación y comercialización, lo que permitirá mejorar la calidad al realizar las labores de siembra, fertilización y aplicación de pesticidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

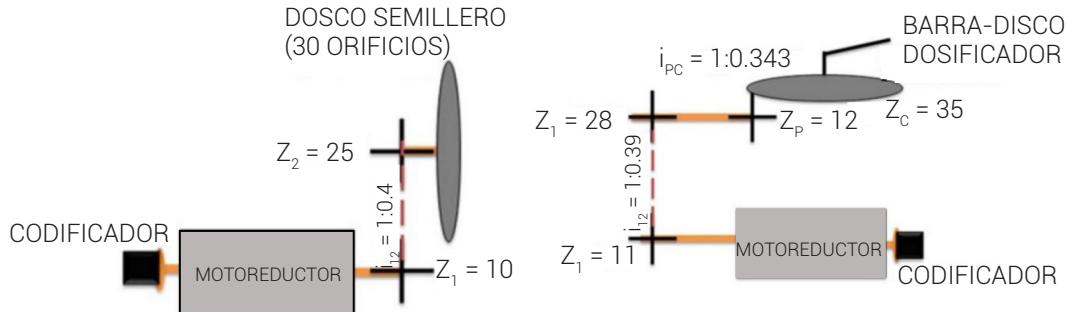
La sembradora-fertilizadora modelo LC-U-N es una máquina diseñada para trabajar bajo condiciones de labranza de conservación y utiliza un sistema de distribución de semilla neumático por presión de vacío. Cada cuerpo presenta un dosificador de semilla, fertilizante y pesticida, los cuales originalmente se accionan por un disco cortador que funciona como rueda motriz y un sistema de transmisión mecánico por cadenas y engranes. En la Figura 1A se muestra un esquema del sistema de transmisión. Esta forma de accionamiento se reemplazó al adaptar el SM diseñado.

Para accionar al dosificador de semilla (Figura 1B y 3D) se utilizó un motor de 24 VCD, de la marca Currie Technologies, Modelo Electro Drive XYD-18a y un codificador Modelo E6B2-CWZ3E del fabricante Yumo Corporation. Para generar la presión de vacío en la cámara de succión (Figura 3D), el sistema usa una turbina con motor eléctrico de 110 a 120 V de corriente alterna (VCA) de 2.2 kW y compuerta accionada por un servomotor modelo TowerPro MG995. En el accionamiento, el dosificador de fertilizante (Figura 1C y 3B) utiliza un motorreductor de 24 VCD a 350W y un codificador Modelo E6B2-CWZ3E. En el accionamiento del dosificador de pesticida se utilizó el motorreductor de 24 VCD modelo EMG49, con codificador integrado de 980 pulsos por giro. La flecha del motorreductor se acopló directamente a la flecha del dosificador, como se muestra en las Figura 2 y 3C.

El SM hace uso de los siguientes conceptos: el aplicado por Moaid y Hashim (2013), quienes utilizan un maestro y múltiples esclavos (basado en microcontroladores), para controlar la velocidad de dos motores de CD, de la técnica modulación por ancho de pulso para modificar la velocidad o frecuencia de rotación de la flecha del motor (Atul *et al.*, 2012) y del control PID para alcanzar y mantener el valor deseado de la variable controlada (Saranya y Pamela, 2012). Para la implementación de este control algunos autores hacen uso de microcontroladores en conjunto con software como LabView (Pratap *et al.*, 2014) o Matlab/Simulink (Allam *et al.*, 2016), en los que se implementan los algoritmos de control. En esta investigación se utilizó la plataforma de desarrollo arduino de hardware y software libre con licencia de código abierto, basada en placas con microcontroladores, en los que se implementaron directamente los algoritmos de control.



A) Diagrama del sistema de transmisión mecánico.



B) Dosificador de semilla.

C) Dosificador de fertilizante.

Figura 1. Diagrama del sistema de transmisión original y modificado para los dosificadores.

Descripción del sistema mecatrónico

El SM (Figura 2) consta de lo siguiente: un módulo maestro, basado en la placa arduino mega que utiliza al microcontrolador Atmega2560 y cinco módulos esclavos, basados en el arduino uno que utiliza el microcontrolador Atmega328P. Cada módulo del SM funciona como una unidad de procesamiento y control.

A continuación se describe de manera breve el funcionamiento de cada módulo. El módulo maestro controla el funcionamiento general del SM y con ello los módulos esclavos a través del protocolo de comunicación I2C (Inter Integrated Circuit). Para la aplicación de insumos en campo el usuario debe introducir al SM a través del módulo maestro, con un teclado matricial y una pantalla LCD 20x4, la información distancia entre semillas deseada, número de celdas del DS, presión de vacío en la cámara de succión (PVCS),

cantidad de fertilizante dosificado por cada giro del dosificador, cantidad de pesticida dosificado por cada giro del dosificador, distancia entre surcos y diámetro de la rueda de velocidad. Los módulos esclavos realizan las siguientes funciones: 1) El Módulo esclavo 1 utiliza un arduino uno y un codificador modelo E6B2-CWZ3E; este último se fija a una rueda que al desplazarse junto con la sembradora permite medir la velocidad de avance de la máquina; 2) El Módulo esclavo 2 consta de un arduino uno, codificador incremental modelo E6B2-CWZ3E, módulo de potencia y un motorreductor; éste módulo se encarga de controlar la FR del DS mediante un control PID, toma como base la velocidad de desplazamiento de la sembradora y la distancia de siembra deseada; 3) El Módulo esclavo 3 tiene los mismos elementos que el módulo esclavo 2 y controla la frecuencia de rotación del dosificador de fertilizante mediante un control PID; éste módulo toma como base la velocidad de desplazamiento de la máquina y la dosis de aplicación deseada; 4) El

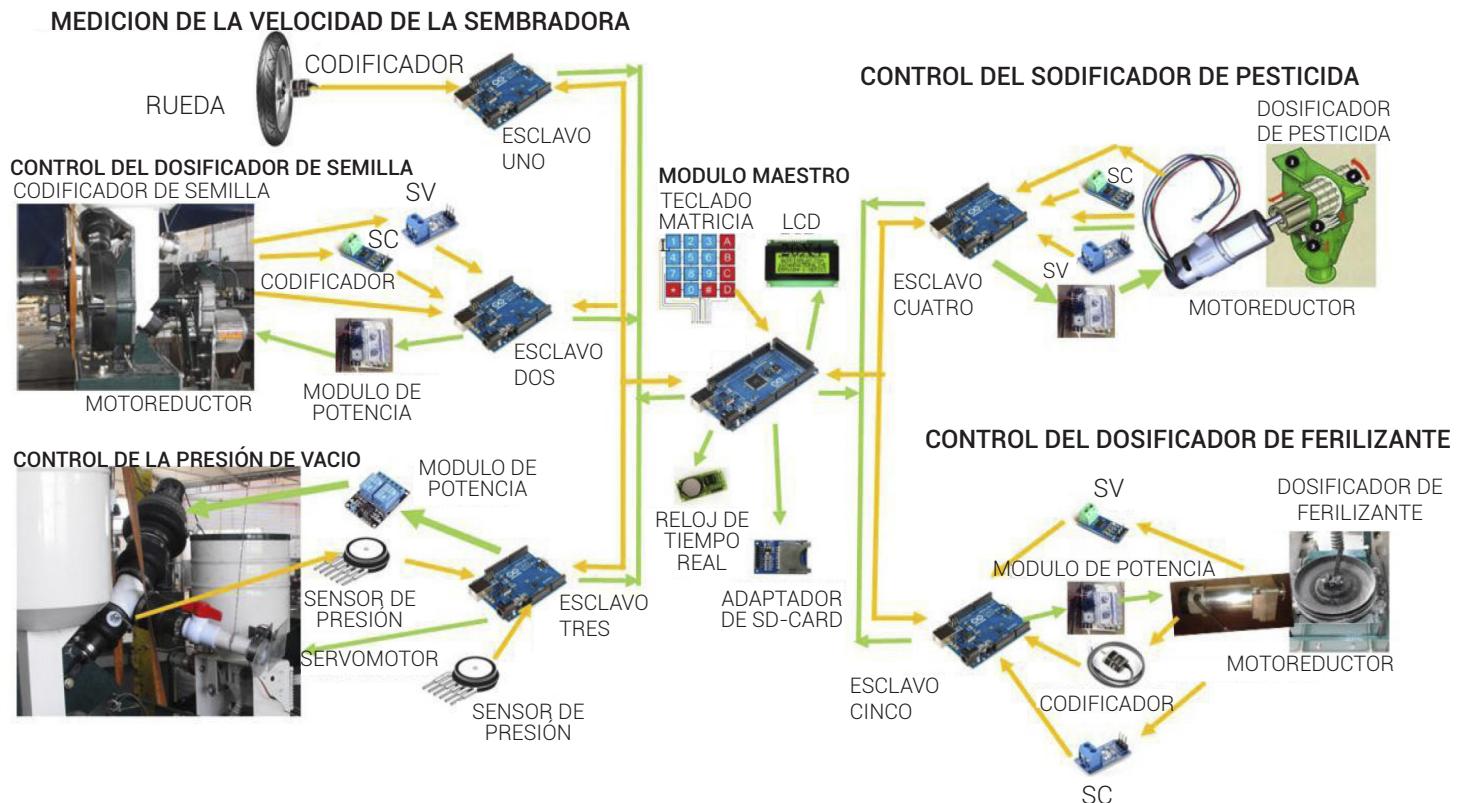


Figura 2. Sistema mecatrónico diseñado para la sembradora-fertilizadora.

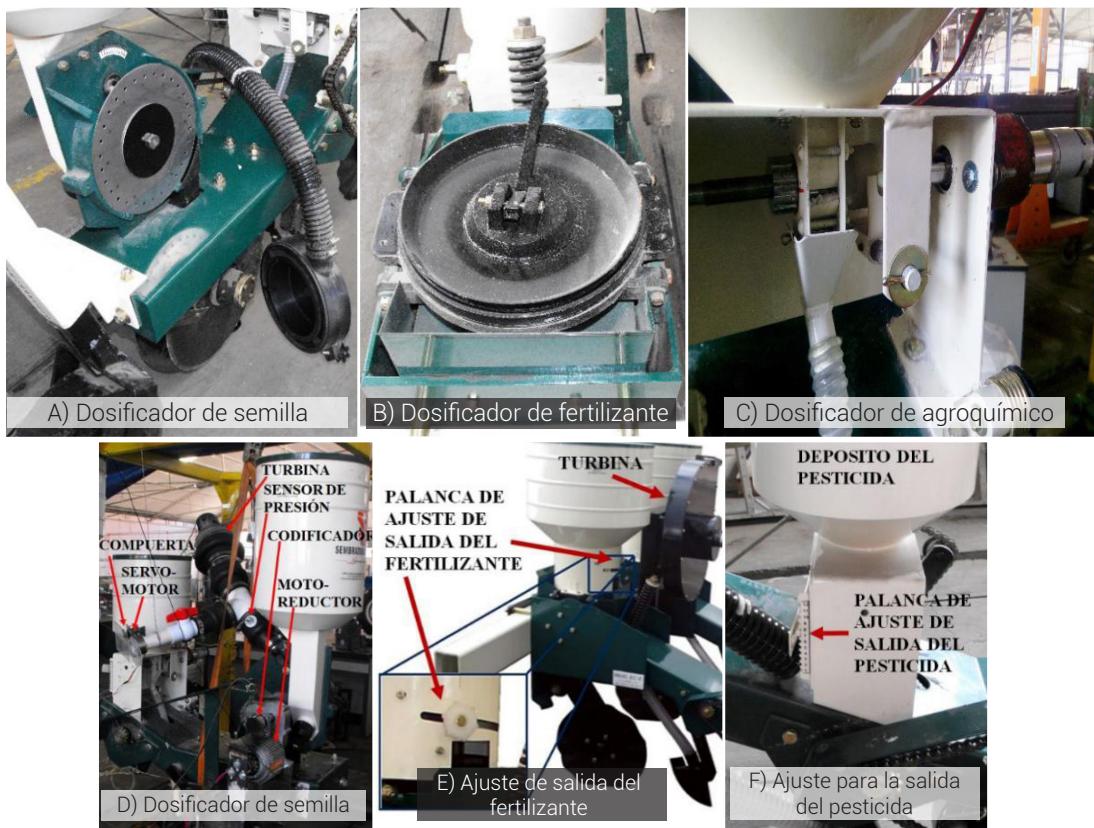


Figura 3. Dosificadores de la sembradora.

Módulo esclavo 4 utiliza los mismos elementos y realiza las mismas funciones que el módulo esclavo 3, pero aplicado al dosificador de pesticida; 5) El Módulo esclavo 5 tiene un arduino uno, dos sensores de presión (Modelo MPX4115A), una unidad de potencia, una turbina eléctrica y el servomotor modelo MG995; este módulo se encarga de controlar la PVCS mediante un control proporcional integral (PI) y toma como referencia la presión de vacío deseada.

La prueba se realizó en el laboratorio del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el Campo Experimental el Horno en Chapingo, municipio de Texcoco, Estado de México, México.

Considerando que las sembradoras-fertilizadoras son operadas a velocidades de avance máximas de 12 km h^{-1} , con el sistema de accionamiento original de la máquina (Figura 1B) se pueden alcanzar las siguientes FR: disco cortador de $15.289 \text{ rad s}^{-1}$, DS de 7.540 rad s^{-1} , barra dosificadora de fertilizante de 3.665 rad s^{-1} y rodillo ranurado del dosificador de pesticida de 15.08 rad s^{-1} . Por lo anterior se caracterizó el desempeño de los dosificadores en el rango completo de operación. El dosificador de semilla se probó a cinco diferentes FR, cada una con cinco presiones de vacío y cinco repeticiones (Cuadro 1).

El nivel de semilla en la tolva (80 % de su capacidad como lo indica la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004) no fue utilizado como variable de importancia al considerar los resultados obtenidos por Bourges *et al.* (2016). Para el dosificador de fertilizante y pesticida la prueba se realizó a cinco diferentes FR, cada una a cuatro aberturas en la compuerta de salida de la tolva y cinco repeticiones (Cuadro 2).

Material de prueba

En la prueba del dosificador de semilla se utilizó maíz con longitud 12.5 mm, ancho 9.1 mm, espesor 4.8 mm, densidad aparente 791.3 kg m^{-3} , masa de 1000 semillas 388.4 g, humedad 14 % y grano dañado 0.85 %. Para el dosificador de fertilizante y pesticida se utilizó como material de prueba fertilizante comercial urea (46-0-0) con densidad aparente 766.8 kg m^{-3} , coeficiente de fricción estático de 30° , tamaño del grano menor a 5 mm y humedad del 0.22 %.

Instrumentos de medición y equipos utilizados

Dos básculas diseñadas con celdas de carga, que fueron ajustadas con pesas con calibración vigente de 1, 2, 3, 4 y 5 kg, obteniendo lecturas en las mediciones con una diferencia menor al $\pm 0.05\%$; un sensor de presión absoluta con errores de medición menores al 1.5 % y una banda transportadora con motorreductor y módulo electrónico de control de velocidad tipo PID.

Índices o medidas de desempeño del sistema

La prueba para caracterizar el desempeño del dosificador de semilla se realizó con base al método de prueba del estándar de la banda engrasada descrito en la norma ISO 7256/1-1984 (ISO, 1984). Los índices de calidad del desempeño del dosificador fueron estimados de acuerdo a la metodología propuesta por Kachman y Smith (1995), que de acuerdo a su investigación son los que mejor resumen el funcionamiento del mismo (Jianbo *et al.*, 2014; Jiangtao *et al.*, 2015). Además, se consideraron los estándares de calidad de distribución de la semilla establecidos en la China National Standard of Test Method (CHNS), indicados por Li *et al.* (2015): calidad de alimentación $\geq 85\%$, falla o pérdida de semillas $< 5\%$ y precisión $\leq 29\%$. Los anteriores

Cuadro 1. Condiciones de la prueba del dosificador de semilla.

Dosificador	FR (rad s^{-1})	PV (kPa)	VB (km h^{-1})	Repeticiones
Semilla	0.524 y 2.199	1.5, 2, 3, 4 y 5	4	5
	3.875	1.5, 2, 3, 4 y 5	6	5
	5.550 y 7.330	1.5, 2, 3, 4 y 5	7	5

FR: frecuencia de rotación, PV: presión de vacío, VB: velocidad de la banda.

Cuadro 2. Condiciones de la prueba del dosificador de fertilizante y pesticida.

Dosificador	FR (rad s^{-1})	AC (%)	Repeticiones	GD
Fertilizante	0.523, 1.257, 2.199, 2.827 y 3.665	25, 50, 75, 100	5	20
Agroquímico	1.047, 4.398, 7.540, 11.205 y 14.660	25, 50, 75, 100	5	30

FR: frecuencia de rotación, AC: abertura de la compuerta, GD: giros del dosificador.

estándares de calidad fueron utilizados debido a que en México no se han definido los valores de estos índices para poder compararlos con los resultados de las pruebas. Para evaluar la calidad de la dosificación de fertilizante y pesticida se usó el coeficiente de variación (CV), la irregularidad de entrega de la máquina y la irregularidad de entrega por cambio de velocidad establecidos en la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004 (SE, 2004), así como el método y especificaciones de calidad para estos índices.

Para determinar los parámetros operativos de la máquina se utilizaron las ecuaciones 1 y 2.

Dosis de aplicación de fertilizante o pesticida (Q), en kg ha⁻¹:

$$Q = \frac{3.6 q_i n_{di}}{6 d_s v_s} \quad (1)$$

donde n_{di} : FR del dosificador del insumo (rev min⁻¹ equivalente a $\pi/30$ rad s⁻¹); q_i : cantidad de fertilizante que tira el dosificador en un giro (g rev⁻¹); d_s : distancia entre surcos (m) y v_s : velocidad de avance de la sembradora (km h⁻¹).

Distancia entre semillas ajustado o teórico (d_{es}), en m:

$$d_{es} = \frac{60v_s}{3.6 n_{ds} c_d} \quad (2)$$

donde n_{ds} : FR del DS (rev min⁻¹); c_d : número de celdas del DS (adimensional) y v_s : velocidad de avance de la sembradora (km h⁻¹).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dosificador de semilla

El mejor desempeño del dosificador de semilla, de acuerdo a los resultados obtenidos que se muestran en el Cuadro 3, se obtuvieron a bajas FR del DS (0.524 y 2.199 rad s⁻¹) al seleccionar la PVCS adecuada cumpliendo con las exigencias establecidas en las especificaciones de calidad de la norma CHNS. Sin embargo, a FR del DS mayores o iguales a 3.875 rad s⁻¹ el desempeño del dosificador se considera deficiente considerando la misma norma. Los resultados de la prueba siguen la misma tendencia obtenida por Jiajia *et al.* (2014) y Jiambo *et al.* (2014), donde el índice de calidad de alimentación disminuye y el de falla crece, conforme se incrementa la frecuencia de rotación del DS. Los resultados obtenidos por Jiajia *et al.* (2014) cumplen con los estándares de la CHNS a bajas frecuencias de rotación del DS ≤ 3.142 rad

s⁻¹. Sin embargo, los de Jiambo *et al.* (2014) no lo logran, lo cual puede deberse al tipo y propiedades de la semilla utilizada (haba). La tendencia en la mayoría de los casos, acerca del índice de multiplicidad y el índice de falla, es que el primero aumenta y el otro disminuye con el incremento de la PVCS o de manera inversa (Cuadro 3).

El mejorar la calidad de distribución de la semilla se hace más complicado al incrementar la FR del DS con los ajustes de la PVCS y del mecanismo para eliminar semillas múltiples (enrazador). Lo anterior debido a que, como sucedió en esta prueba a FR del DS ≥ 3.875 rad s⁻¹, el ajuste del enrazador para eliminar las semillas múltiples y por la velocidad a la cual se mueven las semillas, un pequeño roce entre la semilla y el enrazador provoca la caída de la misma dejando celdas sin semilla en el disco.

Dosificador de fertilizante

Con base en los resultados obtenidos (Cuadro 4), se observa que a la misma abertura de la compuerta de salida del fertilizante (ya sea del 75 o 100 %) el incremento de la frecuencia de rotación del dosificador de fertilizante (FRDF) provoca un incremento en la cantidad de fertilizante tirado por cada giro del dosificador, siendo más reducido este efecto a una abertura de la compuerta del 50 % y manteniéndose más uniforme a una abertura del 25 %. Es decir, el mejor desempeño del dosificador de fertilizante se alcanza a aberturas de la compuerta de salida del 25 y 50 %.

En cuanto a la uniformidad de entrega del dosificador entre repeticiones (consistencia en la dosificación de la máquina), al mantener las mismas condiciones de operación o de ajuste de la máquina se mantiene una adecuada uniformidad (Cuadro 5). Lo anterior se refleja en los valores inferiores obtenidos en la mayoría de los casos para el CV al 5 % y para la irregularidad de entrega al 10 %.

Forouzanmehr y Loghavi (2012), al usar una máquina de dosificación variable que utiliza un SM para accionar los dosificadores de fertilizante, encontraron que la velocidad de avance de la máquina (reflejada en la FR del dosificador) tuvo un efecto significativo sobre la dosis de aplicación real. Los resultados de nuestro estudio son similares cuando se usan aberturas de la compuerta de salida de fertilizante del 70 % o superiores. Al evaluar la uniformidad de entrega del dosificador de fertilizante, Reyes *et al.* (2011) obtuvieron un CV máximo de 3.74 %, García *et al.* (2014) de 6.32 a 13 %, García *et al.* (2012) 20 %, Camacho *et al.* (2009) 32 % y Kim *et al.* (2008) 12 %. Estos valores superaron en la mayoría de los casos los CV en nuestra investigación, que tuvieron un máximo de 5.7 %.

Cuadro 3. Resultados de la prueba de uniformidad de distribución de la semilla.

Vel. Banda (km h ⁻¹)	FR (rad s ⁻¹)	PVCS (kPa)	DR (mm)	ICA (%)	ISF (%)	ISM (%)	Precisión (%)
4	0.524 (5 rpm)	1.5	444.4	96.4	3.6	0.0	8.7
		2.0	444.4	98.1	1.9	0.0	7.5
		3.0	444.4	90.8	1.5	7.7	10.7
		4.0	444.4	81.8	0.0	18.2	7.8
		5.0	444.4	80.0	3.6	16.4	8.5
4	2.199 (21 rpm)	1.5	105.8	88.1	8.1	3.8	17.1
		2.0	105.8	90.2	5.5	4.3	17.5
		3.0	105.8	78.7	4.5	16.9	16.7
		4.0	105.8	90.9	6.1	3.0	16.7
		5.0	105.8	90.7	2.9	6.4	17.8
6	3.875 (37 rpm)	1.5	90.1	74.5	16.8	8.7	20.3
		2.0	90.1	83.6	9.1	7.3	16.5
		3.0	90.1	75.8	13.3	10.9	23.7
		4.0	90.1	80.2	2.1	17.7	16.5
		5.0	90.1	72.0	9.5	18.5	24.5
7	5.55 (53 rpm)	1.5	75.8	59.1	25.7	15.2	23.2
		2.0	73.1	62.9	26.9	10.3	24.1
		3.0	71.9	73.5	16.4	10.1	23.5
		4.0	71.3	76.5	12.0	11.5	21.6
		5.0	71.4	60.0	20.5	19.5	25.7
7	7.330 (70 rpm)	1.5	72.7	55.2	32.0	12.7	21.7
		2.0	68.5	56.2	30.9	12.9	30.3
		3.0	73.0	62.7	13.6	23.7	24.9
		4.0	75.1	77.6	7.7	14.8	20.5
		5.0	74.4	72.9	4.3	22.7	22.0

FR: frecuencia de rotación; PVCS: presión de vacío en la cámara de succión; DR: distancia de referencia (ajustada entre semillas); ICA: índice de calidad de alimentación; ISF: índice de semilla faltante o pérdida de semilla; ISM: índice de semilla múltiple; rpm: revoluciones por minuto.

Cuadro 4. Fertilizante dosificado por cada giro de la barra dosificadora (g/rev).

FRDF (rad s ⁻¹)	Abertura de la compuerta (%)			
	25	50	75	100
0.523 (5 rpm)	108.6	141.8	142.7	180.2
1.257 (12 rpm)	104.2	147.7	157.8	194.4
2.199 (20 rpm)	97.7	155.6	167.8	208.0
2.827 (27 rpm)	102.2	164.4	192.7	223.5
3.665 (35 rpm)	95.6	164.4	228.4	262.6
Promedio (g rev ⁻¹)	101.6	154.8	177.9	213.7
CV (%)	5.1	6.5	18.9	14.8
IEPCV (%)	6.8	8.4	28.4	22.9

IEPCV: irregularidad de entrega por cambio de velocidad; CV: coeficiente de variación.

Dosificador de pesticida

La uniformidad de la dosificación por cambio de velocidad de la máquina, reflejado en el cambio de la FR del dosificador de pesticida, muestra una adecuada uniformidad de entrega en las diferentes posiciones de apertura de la palanca (Figura 5b), reflejado en un CV máximo de 5 % e irregularidad de entrega máxima de 6.5 % (Cuadro 6).

De acuerdo a los resultados con el SM, se obtuvo una adecuada uniformidad de entrega del dosificador entre repeticiones (Cuadro 7), reflejado en un CV máximo de 4.2 % e irregularidad de entrega de la máquina en la mayoría de los casos menor al 5 %. Con los resultados obtenidos, se puede decir que la magnitud de la velocidad angular del dosificador no afecta significativamente la cantidad dosificada de pesticida por cada giro del dosificador y que la uniformidad de entrega entre repeticiones o consistencia de entrega del dosificador es adecuada.

CONCLUSIONES

El sistema mecatrónico desarrollado permite reemplazar de manera exitosa el sistema mecánico original utilizando el accionamiento de los dosificadores de la sembradora-fertilizadora mediante el uso de software y hardware libre, con ventajas considerables como el permitir realizar cambios de la dosis de aplicación en tiempo real y de manera continua.

El dosificador de semilla presenta un desempeño aceptable a velocidades angulares menores a 2.2 rad s⁻¹ (21 rpm), conforme a las especificaciones de calidad definidas en la China National Standard of Test Method. El dosificador de fertilizante presenta un desempeño aceptable a aberturas de la compuerta de salida de fertilizante menores al 50%, mientras que el dosificador de pesticida lo cumple en todo el intervalo de aberturas de la compuerta y frecuencias de rotación a la cual se trabaja con la sembradora-fertilizadora, de acuerdo a la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004.

Cuadro 5. Uniformidad de entrega o dosificación del dosificador de fertilizante.

AP (%)	Índice	Frecuencia de rotación, rad s ⁻¹ (rpm)				
		0.523 (5)	1.257 (12)	2.199 (20)	2.827 (27)	3.665 (35)
25	CV (%)	0.8	1.8	1.4	1.5	5.7
	IEM (%)	2.1	4.4	3.3	3.5	12.3
50	CV (%)	2.6	1.8	3.0	4.7	4.0
	IEM (%)	6.9	4.6	7.5	11.0	10.3
75	CV (%)	1.7	4.1	3.6	3.8	2.6
	IEM (%)	4.5	11.0	8.3	9.3	6.6
100	CV (%)	1.6	1.3	1.1	0.6	4.2
	IEM (%)	3.8	3.6	3.0	1.5	9.6

AP : apertura de la compuerta; CV : coeficiente de variación de las muestras; IEM: irregularidad de entrega de la máquina.

Cuadro 6. Cantidad de pesticida dosificado por cada giro del rodillo acanalado (g/rev).

FR (rad s ⁻¹)	Abertura de la compuerta (%)			
	25	50	75	100
1.047 (10 rpm)	1.14	2.66	4.27	5.88
4.398 (42 rpm)	1.16	2.83	4.48	6.04
7.540 (72 rpm)	1.15	2.74	4.55	6.41
11.205 (107 rpm)	1.15	2.90	4.71	6.50
14.660 (140 rpm)	1.13	2.93	4.73	6.63
Promedio (g rev ⁻¹)	1.15	2.81	4.55	6.29
CV (%)	0.96	3.95	4.13	5.02
IEPCV (%)	1.4	5.5	6.1	6.5

IEPCV: irregularidad de entrega por cambio de velocidad; CV: coeficiente de variación.

Cuadro 7. Índices de desempeño del dosificador de pesticida (g/rev).

FR (rad s ⁻¹)	Índice	Posición de abertura de la palanca (%)			
		25	50	75	100
1.047 (10 rpm)	CV (%)	1.4	0.4	1.7	1.3
	IEM (%)	3.4	1.0	3.3	3.4
4.398 (41 rpm)	CV (%)	1.3	1.3	0.6	0.4
	IEM (%)	3.2	3.0	1.5	0.9
7.540 (72 rpm)	CV (%)	2.0	0.8	1.1	1.4
	IEM (%)	4.7	1.9	2.8	3.4
11.205 (107 rpm)	CV (%)	3.4	0.9	0.5	0.7
	IEM (%)	8.3	2.3	1.4	2.1
14.660 (140 rpm)	CV (%)	4.2	2.0	0.4	0.9
	IEM (%)	11.2	5.1	1.1	2.2

FR: frecuencia de rotación; CV: coeficiente de variación; IEM: irregularidad de entrega de la máquina.

BIBLIOGRAFIA

- Allam T, M. Raju and K. S. Sundeep (2016) Design of PID controller for DC motor speed control using Arduino microcontroller. *IRJET* 3: 791-794.
- Atul K. D., C. Nibbedita, S. Sashi and Y. Vinod (2012) PWM based automatic closed loop speed control of DC motor. *Int. J. Eng. Trends Technol.* 3: 110-112.
- Bourges G., S. Rossi, J. J. Eliach y M. A. Medina (2016) Evaluación experimental de un dosificador de semillas de precisión. V CAIM. Santiago del Estero, Argentina. pp. 881-891.
- Camacho-Tamayo J. H., A. M. Barbosa, N. M. Pérez, F. R. Leiva y G. A. Rodríguez (2009) Operational characteristics of four metering systems for agricultural fertilizers and amendments. *Engenharia Agrícola* 29:605-613, <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000400010>
- Forouzanmehr E. and M. Loghavi (2012) Design, development and field evaluation of a map-based variable rate granular fertilizer application control system. *Agric Eng Int. CIGR Journal.* 14:255-261.
- Garcia A. P., N. L. Cappelli and C. K. Umezu (2014) Electrically driven fertilizer applicator controlled by fuzzy logic. *Eng. Agric. Jaboticabal.* 34: 510-522.
- Garcia A. P., N. L. Cappelli and C. K. Umezu (2012) Auger-type granular fertilizer distributor: mathematical model and dynamic simulation. *Eng. Agric., Jaboticabal.* 32:151-163.
- ISO, International Standard for Organization (1984) ISO 7256-1:1984. Sowing equipment -Test methods -Part 1: single seed drills (precision drills). Suiza: International Standard for Organization.
- Jianbo Z., X. Junfang, Z. Yong and Z. Shun (2014) Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device. *IJABE* 7: 13-18.
- Jiangtao Qi, J. Honglei, L. Yang, Y. Haibo, L. Xinhui, Y. Lan, F. Xianzhen and Y. Yang (2015) Design and test of fault monitoring system for corn precision planter. *IJABE* 8: 13-19.
- Jiajia Y., L. Yitao, C. Jinling, Y. Song and L. Qingxi (2014) Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 7: 1-12.
- Kachman S. D. and J. A. Smith (1995) Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. *Trans. ASAE* 38: 379-387.
- Kim Y. J., H. J. Kim, K. H. Ryud and J. Y. Rheed (2008) Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production. *Biosystems engineering* 100:498-510, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.05.007>
- Li Y., H. Xiantao, C. Tao, Z. Dongxing, S. Song, Z. Rui and W. Mantao (2015) Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter. *IJABE* 8: 1-9.
- Moid D. S. and T. R. Hashim (2013) PIC 16F877A microcontroller based multiple DC motors controller. *Asian Transactions on Engineering* 3: 2221-4267.
- Pratap V., P. Neelam and K. Chandrakant (2014) Real time DC motor speed control using PID controller in LabView. *IJAREEIE* 3:12162-12167.
- Reyes A. J. F., D. F. Berrios A., R. A. Ortega B., E. Wilson D. y F. Flores J (2011) Calibración estática de un sistema de control automático de tasa variable de fertilizante. *Agrociencia* 46:51-62.
- Saranya M. and D. Pamela (2012) A real time IMC tuned PID controller for DC motor. *IJRTE* 1: 2277-3878.
- Sartori M. J. R., Di Raimo C., C. R. R. Costa, M. A. Montezuma and E. A. Capello de S. (2015) Study of an electromechanical system for solid fertilizer variable rate planting. *Afr. J. Agric.* 11:159-165. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.9349>
- SE, Secretaría de Economía (2004) Tractores, implementos agrícolas - sembradora neumática de precisión - especificaciones y método de prueba NMX-O-222-SCFI-2004, México.
- SE, Secretaría de Economía (2004) NMX-O-221-SCFI-2004. Tractores Implementos y Maquinaria Agrícola -Trilladoras de Frijol y Estacionarias- Especificaciones y Métodos de Prueba. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2004/nmx-o-221-scfi-2004.pdf> (Noviembre 2020).