



SISTEMA MECATRÓNICO PARA CONTROLAR EL DOSIFICADOR DE SEMILLA Y PRESIÓN DE VACÍO DE UNA SEMBRADORA-FERTILIZADORA

MECHATRONIC SYSTEM FOR CONTROLLING THE SEED DISPENSER AND VACUUM PRESSURE OF A PLANTER-FERTILIZER

Julio Torres-Sandoval¹, Eugenio Romantchik-Kriuchkova^{2*},
Irineo L. López-Cruz² y Gilberto de J. López Canteñes²

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

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

*Autor de correspondencia (eromantchikk@chapingo.mx)

RESUMEN

Los dosificadores de semilla de las sembradoras son componentes que determinan en gran medida la calidad de siembra; de manera general, éstos son accionados por un sistema de transmisión mecánica-rueda motriz, los cuales tienen el inconveniente de ser afectados en su funcionamiento por las condiciones del suelo, cubierta vegetal y velocidad de siembra, que influyen en el deslizamiento de la rueda motriz o provocan vibraciones y bloqueos del sistema de transmisión ocasionando mala calidad de siembra. Las sembradoras más avanzadas utilizan sistemas mecatrónicos que eliminan estos problemas. En el presente trabajo se desarrolló un sistema mecatrónico para controlar la frecuencia de rotación del disco semillero y presión de vacío del dosificador de semilla, el cual se adaptó y probó en una sembradora-fertilizadora neumática. El sistema está basado en microcontroladores para manejar la densidad de siembra mediante cambios en la frecuencia de rotación del disco semillero accionado por un motorreductor, utilizando la técnica Modulación por Ancho de Pulso (PWM por sus siglas en inglés) y control Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Con un método similar se controla la presión de vacío mediante un servomotor que ajusta la apertura de una compuerta en la línea de succión de la turbina. Con el sistema desarrollado se logró alcanzar la dosis de siembra deseada en aproximadamente 1.5 s con un error de control en estado estable de $\pm 5\%$ a frecuencias de rotación del disco semillero de 21, 53 y 70 r/min y presiones de vacío de 1.5 a 4 kPa. Con presión de vacío de 5 kPa o frecuencia de rotación del disco semillero de 37 r/min el error se incrementa a $\pm 10\%$, y para 5 r/min a $\pm 20\%$. El error de control de la presión de vacío fue de $\pm 10\%$ para presiones de 1.5 a 5 kPa. Se logró desarrollar un sistema mecatrónico eficiente para controlar el sistema neumático dosificador de semilla.

Palabras clave: Control PI y PID, dosificador de semilla, microcontrolador, PWM.

SUMMARY

Seed dispensers of the seeders are components that largely determine the quality of planting; in general, these are driven by a mechanical transmission-drive wheel system, which has the drawback of being affected in its operation by soil conditions, vegetation cover and planting speed, which influence the sliding of the drive wheel or cause vibrations and blockages of the transmission system causing poor planting quality. The most advanced seeders use mechatronic systems that eliminate these problems. In the present work a mechatronic system was developed to control the rotation frequency of the seed disc and vacuum pressure of the seed dispenser, which was adapted and tested in a pneumatic seeder-fertilizer. The system is based

on microcontrollers to manage planting density by changing the rotation frequency of the seed disk driven by a geared motor, using the Pulse-Width Modulator (PWM) technique and the Proportional-Integral-Derivative (PID) control. A similar method controls the vacuum pressure by means of a servo motor that adjusts the opening of a gate in the turbine suction line. With the developed system it was possible to reach the desired planting dose in approximately 1.5 s with a control error in steady state of $\pm 5\%$ at rotation frequencies of the seed disc of 21, 53 and 70 r/min and vacuum pressures of 1.5 to 4 kPa. At vacuum pressures of 5 kPa or seed disc rotation frequency of 37 r/min the error increases to $\pm 10\%$, and for 5 r/min to $\pm 20\%$. The vacuum pressure control error was $\pm 10\%$ for pressures from 1.5 to 5 kPa. An efficient mechatronic system was developed to control the pneumatic seed dosing system.

Index words: Microcontroller, PI and PID control, PWM, seed dispenser device.

INTRODUCCIÓN

La siembra es una de las actividades principales del proceso de producción de los cultivos que afectan significativamente su rendimiento, como en el caso del maíz reportado por Hao *et al.* (2017), siendo el dosificador de semilla el componente de mayor importancia para lograr la mejor calidad de siembra (Li *et al.*, 2016).

Las máquinas sembradoras, de manera general, se caracterizan por implementar sistemas de transmisión mecánica (STM) para el accionamiento de los dosificadores de semilla mediante una rueda motriz y transmisión por cadenas-engranajes, con la desventaja de ser afectados en su funcionamiento por las condiciones del suelo, cubierta vegetal y altas velocidad de siembra, lo que puede provocar deslizamientos de la rueda motriz, fuertes vibraciones o bloqueos del STM y con ello una mala calidad de siembra (Gautam *et al.*, 2019; Zhai *et al.*, 2014). Para resolver este problema, máquinas tecnológicamente más avanzadas implementan sistemas mecatrónicos para el accionamiento de los dosificadores (Gautam *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2015). De acuerdo

con investigaciones realizadas sobre los sistemas mecatrónicos, se encontraron ventajas significativas al compararlos con los STM como son: 1) mejor precisión en el control y adaptabilidad de la sembradora, 2) facilidad para realizar los cambios de la dosis de siembra, 3) mayor velocidad de siembra de hasta 15 km h^{-1} (He *et al.*, 2017), 4) mejores resultados en desempeño bajo condiciones de laboratorio (Cay *et al.*, 2018a) y campo (Cay *et al.*, 2018b); es decir, mayor calidad de siembra y 5) su desempeño no se afecta por las condiciones de siembra directa o labranza convencional (Yang *et al.*, 2015); además, reduce el consumo de combustible (Cay *et al.*, 2018b), todo esto bajo la condición de que la semilla cumple los parámetros físico-técnicos de la dosificación mecanizada.

Los dosificadores neumáticos de semilla mejoran la calidad de siembra en comparación con los de tipo mecánico (Gautam *et al.*, 2019). Los sistemas de dosificación neumático son afectados en su desempeño por factores como la presión, dimensiones y forma del disco semillero y de sus orificios, velocidad angular, así como el tamaño y forma de la semilla (Barut y Özmerzi, 2004).

Yang *et al.* (2015) sugieren que los países en desarrollo deben incluir políticas de apoyo y de mejora técnica para fabricar sembradoras de precisión adecuadas para sus condiciones geográficas y sistemas de cultivo locales, buscando reducir los costos de adquisición. Considerando lo anterior, en el presente trabajo se desarrolló un sistema mecatrónico (SM) para el control del dosificador de semilla, con el fin de aprovechar sus ventajas comparativas con respecto a los sistemas convencionales. El SM fue adaptado a una sembradora y probado bajo condiciones de laboratorio.

Las características principales encontradas en los diferentes SM desarrollados en los trabajos de investigación fueron las siguientes: microcontroladores (Aulin *et al.*, 2017), PLC (Hao *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2013), dispositivos móviles y computadora como unidad de procesamiento y control; servomotores y motorreductores de CD para accionar los dosificadores; baterías de 12 y 24 VCD para la alimentación del SM; sensores efecto hall, codificador incremental (Yang *et al.*, 2022), GPS como sensores para medir la velocidad de siembra o frecuencia de rotación del disco semillero, y el uso de mosfet, transistores, relevadores (Singh y Mane, 2011) y driver para servomotores y motores de CD como componente principal para activar los motores; uso de la modulación por ancho de pulso (PWM) como técnica para modificar la velocidad de giro del motor; y el método de control en lazo abierto o en lazo cerrado del tipo PI y PID. Es importante señalar que los controladores del tipo PI y PID tienen problemas o deficiencias para controlar

sistemas no lineales debido a que la señal de entrada no es proporcional a la señal de salida y son inestables (con perturbaciones), lo que se traduce en errores de mayor magnitud.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un sistema mecatrónico para controlar la frecuencia de rotación del disco semillero y presión de vacío del dosificador de semilla, y adaptarlo en una sembradora-fertilizadora neumática.

MÉTODOS Y MATERIALES

Sembradora-fertilizadora seleccionada

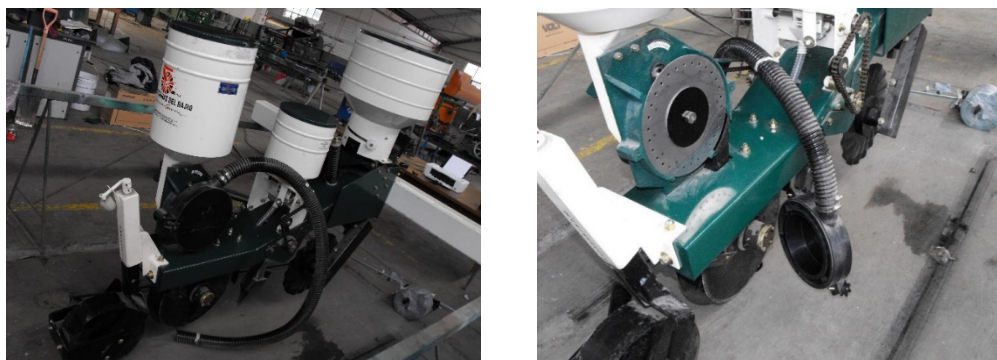
La sembradora-fertilizadora neumática comercial utilizada fue el modelo LC-U-N del fabricante mexicano Sembradoras del Bajío (Figura 1A), que cuenta con las siguientes características de interés: a) diseñada para trabajar bajo condiciones de labranza de conservación; b) cada cuerpo cuenta con un dosificador de semilla, fertilizante y pesticida; c) utiliza un disco cortador dentado, que funciona como rueda motriz y un sistema de transmisión por cadenas para el accionamiento de los dosificadores (Figura 1A); d) la cámara de vacío del sistema neumático utiliza un disco semillero de 30 orificios con diámetro de 6 mm (Figura 1B); e) utiliza una turbina que es accionada por la toma de fuerza del tractor para generar la presión de vacío al interior de la cámara.

Para el diseño del SM se consideró una velocidad máxima de siembra de 12 km h^{-1} , lo que provocaría una frecuencia de rotación del disco semillero (FRDS) de 70 r/min con el sistema de transmisión original de la sembradora, por lo que es la velocidad máxima con la cual se probó el SM.

Subsistema mecánico

El sistema de accionamiento original del dosificador de semilla fue reemplazado por un sistema electromecánico. Este sistema utiliza un motorreductor eléctrico (MRE) (Modelo Electro Drive XYD-18A, Currie Technologies, Chatsworth, California, EUA) de 24 VCD, que mediante una transmisión por cadena (con reducción de 2.5) acciona la flecha del dosificador, que es donde se fija el disco semillero, flecha en la cual se fijó el codificador YUMO E6B2-CWZ3E.

Para controlar la PVCS se utilizó una turbina eléctrica de la marca Truper de 22.7 L y un servo motor (MG995, TowerPro, Danbury, Connecticut, EUA). El servomotor controla una compuerta que abre o cierra la entrada de aire de la línea de succión de la turbina para ajustar la PVCS, la cual es medida por dos sensores de presión absoluta (Modelo MPX4115A, Eindhoven, Países Bajos) uno ubicado al interior y otro al exterior de la cámara, obteniendo así la presión diferencial.



A) Cuerpo sembradora-fertilizadora. B) Vista del sistema neumático.

Figura 1. Sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N utilizada en la investigación.

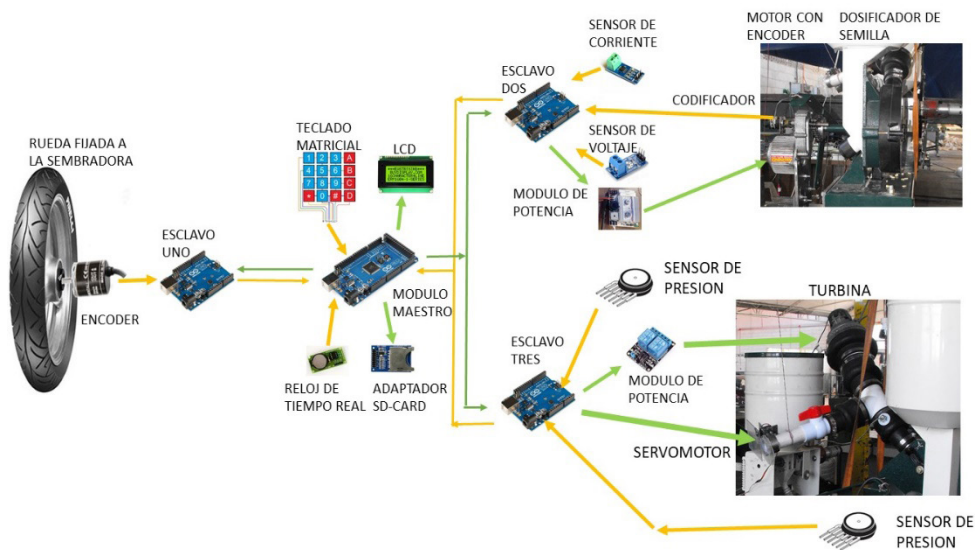


Figura 2. Esquema del circuito electrónico y lógica de control.

Subsistema electrónico

El SM utiliza como unidad de procesamiento y control una placa arduino MEGA (basado en el microcontrolador Atmega2560, Microchip Technology Inc., Chandler, Arizona, EUA) y tres arduino UNO (basado en el microcontrolador Atmega328P, Microchip Technology Inc., Chandler, Arizona, EUA) en configuración maestro esclavo y comunicación I2C. Cada placa arduino se conecta a los elementos que se indican en la Figura 2 y funcionan como si fueran módulos independientes.

El módulo maestro, cuyo componente principal es el Arduino Mega, controla el funcionamiento de los módulos esclavos o del SM. Mediante el uso de un teclado matricial y una pantalla de cristal líquido LCD20x4, permite al usuario seleccionar el modo de funcionamiento del SM e introducir la información requerida para ejecutar la labor de siembra,

envía a los módulos esclavo y recibe de éstos información requerida para el funcionamiento sincronizado del SM cada 163.84 ms.

El módulo esclavo 1 determina la velocidad de avance de la sembradora cada 163.84 ms (Ecuación 1), mediante un codificador incremental fijado a una rueda que gira al hacer contacto con el suelo durante la siembra (Figura 2), y envía la información al módulo maestro.

$$v_s = \frac{3.6\pi D P_{cR}}{T_{cR} P_{rR}} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Dónde: v_s es la velocidad de desplazamiento de la sembradora (km h^{-1}), D es el diámetro de la rueda (m), T_{cR} es el tiempo en el cual se realiza el conteo de pulsos provenientes del codificador fijado en la rueda (s), P_{cR} es el número de pulsos contados en el T_{cR} (pulsos) y P_{rR} son

los pulsos generados en el codificador por cada giro de la rueda (pulsos/revolución).

El módulo esclavo 2 controla el funcionamiento del dosificador de semilla, a través del motor de CD, para lograr la dosis de siembra deseada; para ello, se determina la FRDS requerida (punto de consigna o setpoint) con la Ecuación 2 y la FRDS actual o medida con la Ecuación 3. La diferencia entre estas dos variables corresponde al error utilizado en el control PID, el cual también puede expresarse en porcentaje con la Ecuación 4.

$$n_{rds} = \frac{60v_s}{3.6N_{cd}d_s} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde: n_{rds} es la FRDS requerida (r/min), v_s es la velocidad de desplazamiento de la sembradora (km h^{-1}), d_s es la distancia entre semillas para la siembra definida por el usuario (m) y $N_{cd}d_s$ es el número de celdas del disco semillero (adimensional).

$$n_{mds} = \frac{60P_{cds}}{P_{rm}T_c} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde: n_{mds} es la FRDS actual o medida (r/min), T_c es el tiempo en el que se cuentan los pulsos (s), P_{cds} son los pulsos generados por el codificador fijado en la flecha del disco semillero en el tiempo T_c (n/s n = pulsos), P_{rm} son los pulsos generados por el codificador por cada giro del disco semillero (adimensional).

$$e_{frds} = n_{rds} - n_{mds} \quad \text{o} \quad e_{frds\%} = \frac{100(n_{rds} - n_{mds})}{n_{rds}} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde: e_{frds} es el error en la FRDS (r/min) y $e_{frds\%}$ es el error en la FRDS en %.

El módulo esclavo 3 controla el sistema neumático de vacío. Mediante la técnica PWM y el control PI controla un servomotor que ajusta la apertura de una compuerta en la línea de succión de la turbina, para ajustar la PVCS medida a la de referencia (dada por el usuario); además, envía la información relevante de su funcionamiento al módulo maestro.

Subsistema de control

El sistema de control del dosificador de semilla se trató como un sistema de una entrada y una salida (SISO), el cual es representado en el diagrama de bloques en lazo cerrado mostrado en la Figura 3. De la misma manera fue considerado el sistema de control de la PVCS.

El diagrama de bloques en lazo cerrado de la Figura 3

inicia con la variable de referencia como entrada, que para el controlador del dosificador de semilla es la FRDS requerida, y para el controlador de la PVCS es la PVCS deseada. Las constantes k_p , k_i y k_d se determinaron al sintonizar el controlador PID, para posteriormente obtener la función de transferencia (F.T.) del controlador representada por la Ecuación 6 (Anaya-Pérez *et al.*, 2014). Las perturbaciones del sistema están representadas por $z(s)$ y la F.T. de la planta por $G_p(s)$. Finalmente, se obtiene la variable de salida $y(s)$, representada por la FRDS y PVCS medida para los controladores respectivos, que al ser realimentada y restada a la variable de referencia se obtiene el error de control $e(s)$, con el cual se determina el valor de la salida del controlador representado por la Ecuación 5.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{o} \quad u(s) = k_p \frac{e(s)}{s} + k_i + k_d e(s) \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde: $u(t)$ es la señal de control, $e(t)$ es la diferencia entre el valor de referencia y el valor actual, k_p , k_i y k_d son las constantes del controlador proporcional, integral y derivativa respectivamente y s es el argumento de la transformada de Laplace.

$$G_c(s) = u(s)/e(s) = k_p + k_i/s + k_d s = (k_i + k_p s + k_d s^2)/s \quad \text{[Ecuación 6]}$$

La sintonización de los controladores para determinar las constantes de control k_p , k_i y k_d se hizo de la siguientes manera:

1. Se caracterizó el comportamiento de la FRDS, al aplicar diferentes valores de la señal PWM como entrada escalón de la energía eléctrica que alimenta al motorreductor, el cual acciona al disco semillero o dosificador de semilla; para ello, se aplicaron 10 valores diferentes de la señal PWM como entradas escalón (valores tomados a intervalos regulares de la señal PWM entre 150 y 1023) a dos diferentes PVCS (una a 1.5 y la otra a 3.9 kPa) con tres repeticiones cada combinación.
2. Se caracterizó la respuesta del sistema a una entrada escalón. En el caso del controlador de la FRDS, se aplicó un valor de la entrada PWM de 1023 para alimentar al motor, midiendo cada 16.384 ms la FRDS por un periodo de 1 s con 30 repeticiones bajo condiciones de llenado de la tolva con semilla de maíz al 50 % de su capacidad y PVCS de 1.5 y 3.9 kPa; en el caso del controlador de la PVCS, se aplicó una señal PWM de 2209 para alcanzar la PVCS aproximada de 5 kPa, realizando mediciones de la PVCS cada 16.384 ms por un periodo de 1 s en 30

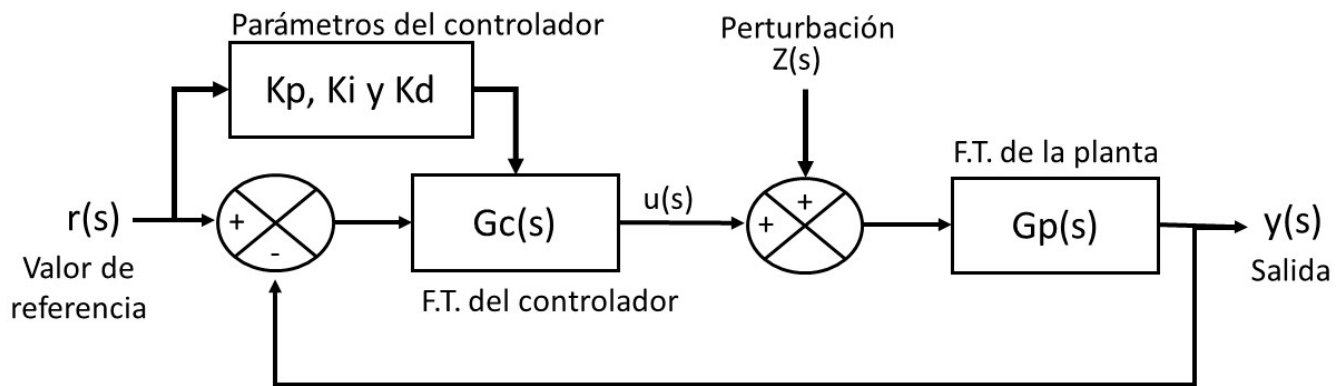


Figura 3. Diagrama de bloques en lazo cerrado de los controladores.

repeticiones, bajo condiciones de llenado de la tolva con semilla de maíz al 50 % de su capacidad.

3. Con los datos obtenidos del paso anterior se estimó la función de transferencia de la planta de los controladores mediante la herramienta 'System Identification Tool' del System Identification Toolbox del ambiente de programación de Matlab. De igual manera, con el uso de esta herramienta se estimaron los valores de las constantes de los controladores, también fue implementado el método de Ziegler-Nichols (Basilio y Matos, 2002).
4. Los valores de los constantes determinados anteriormente se tomaron como valor semilla para probar el desempeño de los controladores, y fueron modificados hasta que se logró un desempeño aceptable o se consideró que no había mejora (método de Ziegler-Nichols). Para esto se tomó el valor mínimo obtenido de la integral del error (ISE) (Berrones et al., 2019) durante las pruebas de desempeño. El procedimiento anterior se realizó para cinco puntos de prueba, los cuales se tomaron a intervalos equidistantes en el intervalo de valores de la FRDS de 5 a 70 r/min.

$$ISE = \int_0^t e^2(t) dt \quad \text{[Ecuación 7]}$$

Donde: ISE es la integral del cuadrado del error y e(t) es el error de control.

Programación o software

Los algoritmos de control del sistema mecatrónico se programaron en lenguaje C++ e implementaron en el IDE de arduino.

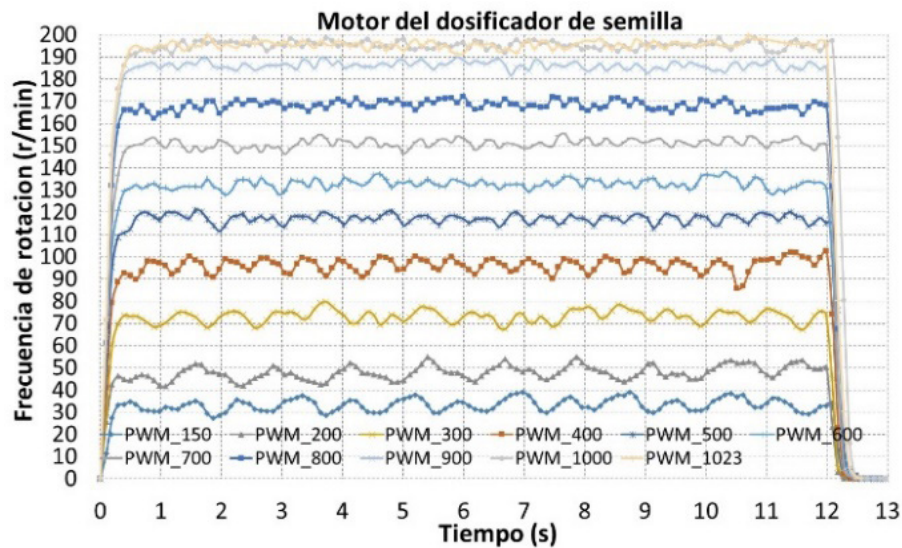
Pruebas de laboratorio

Con el fin de caracterizar el desempeño del SM desarrollado y adaptado al dosificador de semilla de la sembradora-fertilizadora Modelo LC-U-N, fue probado bajo condiciones de laboratorio tomando como base el método de la banda engrasada de la norma ISO 7256-1. El lugar donde se llevaron a cabo las pruebas fue en el Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El material de prueba fue semilla de maíz, con las siguientes propiedades promedio: 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 %. La tolva se llenó al 80 % de su capacidad con la semilla señalada.

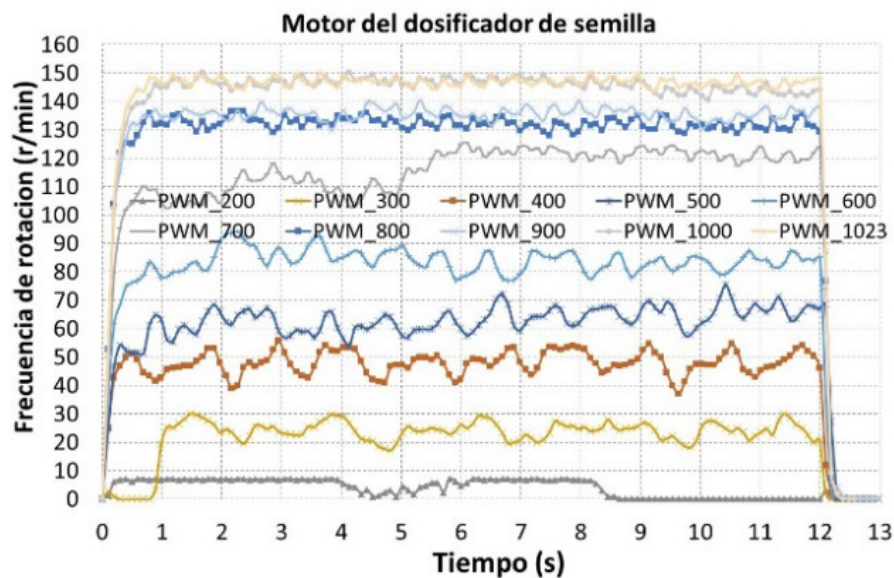
La prueba de los controladores de la FRDS y de la PVCS se realizó de la siguiente manera: 1) se utilizaron cinco FRDS (5, 21, 37, 53 y 70 r/min) y por cada FRDS se aplicaron cinco PVCS (1.5, 2, 3, 4 y 5 kPa). Por cada combinación de la FRDS y PVCS se realizaron cinco repeticiones, y en cada repetición se midieron o calcularon y registraron principalmente el valor de referencia o setpoint, valor medido de la variable a controlar (valor actual), error de control, la integral del error (ISE), potencia y torque requerido por el motorreductor.

RESULTADOS Y DISCUSION

La respuesta de la variable FRDS al aplicar diferentes entradas escalón de la señal PWM que alimenta al motorreductor (que a su vez acciona al disco semillero) para dos PVCS se muestran en las Figuras 4A y 4B. Algunas de las observaciones de estas figuras, son las siguientes:



A) Utilizando la presión de vacío de 1.8 kPa



B) Utilizando la presión de vacío de 3.9 kPa

Figura 4. Respuesta de la variable FRDS a diferentes anchos de pulso de la señal PWM.

1) se requiere un valor mínimo de la señal PWM para poder mover el disco sembrero (energía mínima suministrada al motorreductor para vencer la fuerza de fricción del disco sembrero); por ejemplo, para lograr el movimiento del disco sembrero a una PVCS de 1.8 kPa se requiere un valor de la señal PWM de 150, obteniendo una FRDS oscilante entre los 27 y 39 r/min; sin embargo, a PVCS de 3.9 kPa se requiere un valor de la señal PWM de 200 y se obtiene una FRDS oscilante entre 0 y 7 r/min; 2) se tiene un comportamiento no lineal entre la señal PWM y la FRDS; 3) la FRDS se reduce al incrementar la PVCS al mantener una señal de alimentación PWM constante; 4) las oscilaciones

de la FRDS se incrementan con el aumento de la PVCS o con la disminución de la señal PWM que alimenta al motorreductor.

El comportamiento de la dinámica del sistema para controlar la FRDS se muestra en la Figura 5A, y las funciones de transferencia obtenidas de la planta y del controlador se muestra en el Cuadro 1. En el caso del comportamiento obtenido de la dinámica del sistema para controlar la PVCS, se muestra en la Figura 6A, y las funciones de transferencia obtenidas en el Cuadro 1. Lo anterior fue realizado acorde con lo descrito en la metodología. Las

F.T. fueron obtenidas mediante el uso del programa Matlab, donde la F.T. resultante de la planta está representada por una función de primer orden con un retardo, y la del controlador por un control tipo PI. Esta última presenta los valores de las constantes del controlador PI (mostradas acorde con la notación de la Ecuación 6, utilizadas como valores semilla para la obtención de los valores finales de las constantes PI y PID de los controladores del dosificador de semilla (controlador de la FRDS y PVCS).

Debido a la dinámica no lineal del sistema dosificador de semilla, se estableció un control PID por fases o secciones (con comportamiento aproximadamente lineal), semejante a lo realizado por Cai *et al.* (2016) y Guzmán *et al.* (2004); para ello, se tomaron tres secciones de control de la FRDS seleccionando valores diferentes para las constantes k_p , k_i y k_d ; además, en cada sección del control PID de la FRDS fueron seleccionados tres valores para cada una de las constantes k_p , k_i y k_d en dependencia del error de la señal de control. El primer grupo de valores de las constantes se tomó con el fin de dar una respuesta rápida para reducir el error, cuando era mayor de 10 %; el segundo grupo de valores se utilizó para dar una respuesta más moderada para reducir el error, cuando estaba entre 5 y 10 %, y el tercer grupo para estabilizar el error cuando era menor del 5 %.

Los criterios para seleccionar el mejor desempeño del controlador fueron el ISE, tiempo de levantamiento y el tiempo de asentamiento del sistema. Menor magnitud del ISE indica menor error de control de la FRDS y mayor estabilidad, lo que se traduce en mayor acercamiento a

la distancia objetivo entre semillas y su uniformidad. Los otros dos criterios permiten dar una respuesta rápida debido a los cambios de velocidad de desplazamiento de la sembradora o de la dosis de aplicación, lo que modifica la consigna del controlador. En el caso del controlador de la PVCS, se dividió en dos secciones de control acorde con el comportamiento de su dinámica.

Los valores de las constantes del controlador PI o PID con los que mejores resultados se obtuvieron para el control de la FRDS y de la PVCS se presentan en los Cuadros 2 y 3, respectivamente.

Los resultados del desempeño del controlador de la FRDS a las diferentes PVCS de prueba se presentan de la Figura 5B a la Figura 5F, y se describen a continuación: 1) FRDS de 5 r/min (Figura 5B), se logra mantener el error de control entre el $\pm 20\%$ en un tiempo menor a los 3 s, con excepción de cuando la PVCS fue de 5 kPa, que requirió un tiempo de 4.7 s; 2) FRDS de 21 r/min (Figura 5C), se logra un error de control en el intervalo del $\pm 10\%$ en menos de 1.5 s y de $\pm 5\%$ a los 3.5 s, con excepción de la PVCS de 5 kPa, que se mantiene en el intervalo de $\pm 10\%$; 3) FRDS de 37 r/min (Figura 5D), se logra un error de control en el intervalo de $\pm 10\%$ en menos de 1.5 s, con excepción de la PVCS de 5 kPa que superó este tiempo; 4) FRDS de 53 r/min (Figura 5E), se logra un error de control en el intervalo de $\pm 5\%$ en menos de 1.2 s para todas las PVCS; y 5) finalmente a la FRDS de 70 r/min (Figura 5F), se logra un error de control en el intervalo de $\pm 5\%$ en menos de 2 s a PVCS de 2, 3 y 4 kPa, y de $\pm 10\%$ a PVCS de 1 y 5 kPa.

Cuadro 1. F.T. de las plantas y de los controladores para controlar la FRDS y PVCS.

Sistema a controlar	Función de transferencia	
	Planta	Controlador
FRDS (PVCS de 1.2 kPa)	$G_p = \frac{0.0413}{s + 0.01519} e^{-0.416s}$	$G_p = \frac{0.19485s + 0.0201}{s}$
FRDS (PVCS de 3.9 kPa)	$G_p = \frac{169.5}{s + 29.13} e^{-0.492s}$	$G_p = \frac{0.443s + 0.2478}{s}$
PVCS	$G_p = \frac{2.8204}{1 + 0.001s} e^{-4.7034s}$	$G_p = \frac{0.18s + 0.009}{s}$

Cuadro 2. Valores de las constantes utilizadas en el control de la FRDS.

Frecuencia de rotación requerida (r/min)	Error de control > 10%			Error de control > 5% y < 10%			Error de control < 5%		
	k_p	k_i	k_d	k_p	k_i	k_d	k_p	k_i	k_d
0 a 10	2	5.7	0.01	1.2	5.2	0	1	3.9	0
> 10 a 30	1.6	16	0.01	1.6	16	0	1.6	16	0
> 30	0.01	7	0.01	0	7	0	0	7	0

Cuadro 3. Valores de las constantes utilizadas en el control de la PVCS.

Presión de vacío deseada (kPa)	Valor de las constantes		
	k_p	k_i	k_d
0 a 4	0.05	0.2	0
> 4	0.05	0.15	0

Para la FRDS de 5 r/min a las diferentes PVCS de prueba, el error de control fue elevado debido a que al alimentar al motorreductor con una señal PWM constante, requerida para vencer la resistencia al movimiento del disco semillero, no permite alcanzar una FRDS cercana a 5 r/min; es decir, cuando se vence esta resistencia la FRDS obtenida es superior, como se indicó con anterioridad, y lo exhibe las Figuras 4A y 4B. Esto ocasiona que el controlador incremente o disminuya fuertemente la magnitud del ancho de pulso de la señal PWM, para poderse aproximar a la FRDS de referencia; por este motivo, se tomó como la FRDS mínima.

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas del controlador de la FRDS, se observa que su desempeño se ve afectado por la magnitud de la FRDS y PVCS, logrando un error de control en estado estable del $\pm 5\%$ en la mayoría de los casos probados a FRDS de 21, 57 y 70 r/min, y PVCS de 1.5 a 4 kPa, por lo que, estableciendo nuevas secciones de control, para las FRDS y PVCS en las cuales el error de control fue superior al $\pm 5\%$ (FRDS de 37 r/min y PVCS de 5 kPa) se puede mejorar el desempeño del controlador de la PVCS.

Los resultados de la prueba del desempeño del controlador del sistema neumático con el disco semillero estático fueron los siguientes: para todas las PVCS se logró un error del $\pm 5\%$ en estado estacionario, con un tiempo de asentamiento de 2 a 4 s, con excepción de la PVCS de 1.5 kPa que requirió de 6 s (Figuras 6B a 6F); sin embargo, cuando el disco semillero se encuentra en movimiento el error de control se incrementa, manteniéndose dentro

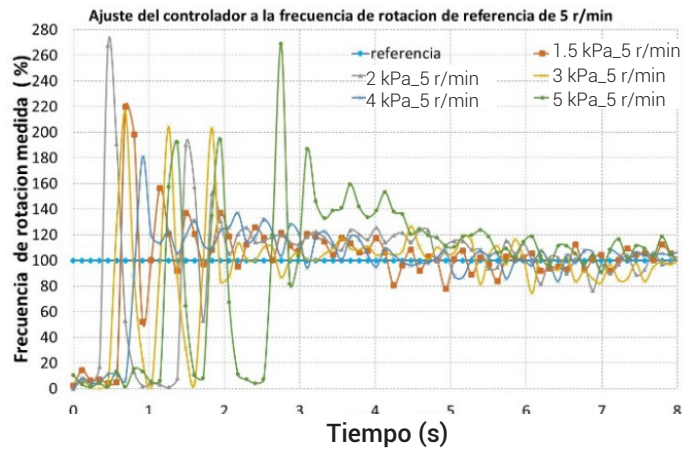
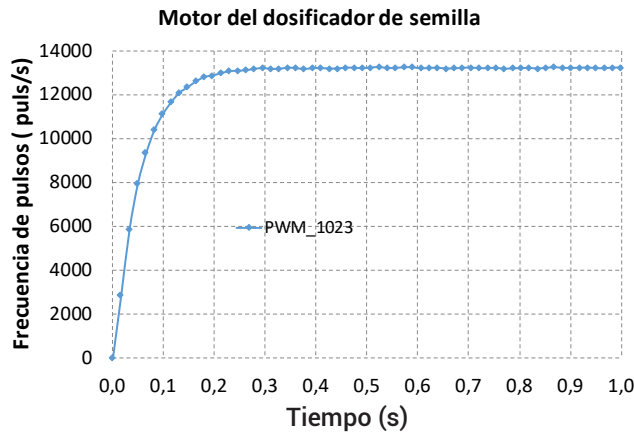
de un intervalo aproximado de $\pm 10\%$ y el tiempo para alcanzarlo después de iniciar el movimiento del disco semillero es de aproximadamente 4 s (Figura 6B a 6F). En cada una de las figuras, el inicio del movimiento del disco semillero puede distinguirse por los picos más elevados (perturbaciones) de cada una de las curvas graficadas.

Con base en los resultados obtenidos del desempeño de los controladores de la FRDS y PVCS, se puede decir que es aceptable y aplicable para controlar el dosificador de semilla de la sembradora bajo las condiciones en las cuales se trabaja. Es importante resaltar que, de los trabajos de investigación consultados, no se encontró alguno que presente resultados del control simultáneo de la FRDS y PVCS con los cuales se pueda comparar.

El mayor requerimiento de potencia del MRE del dosificador de semilla fue 148.5 W y torque de 8.1 Nm. Lo anterior a FRDS de 70 r/min, PVCS de 4 kPa, al ser alimentado con una señal PWM de ancho de pulso de 910.2, voltaje efectivo de 16.8 V y corriente de 8.86 A.

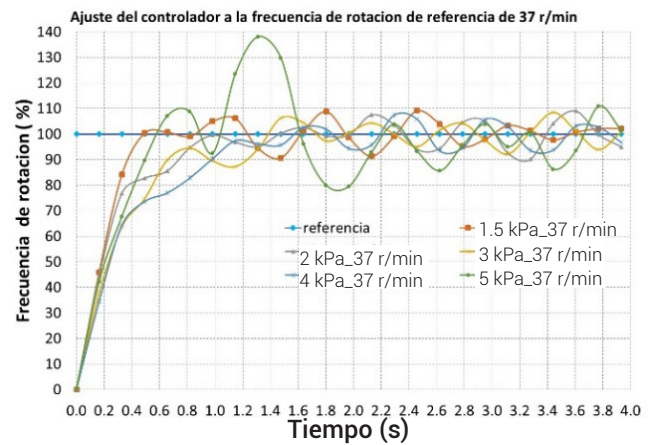
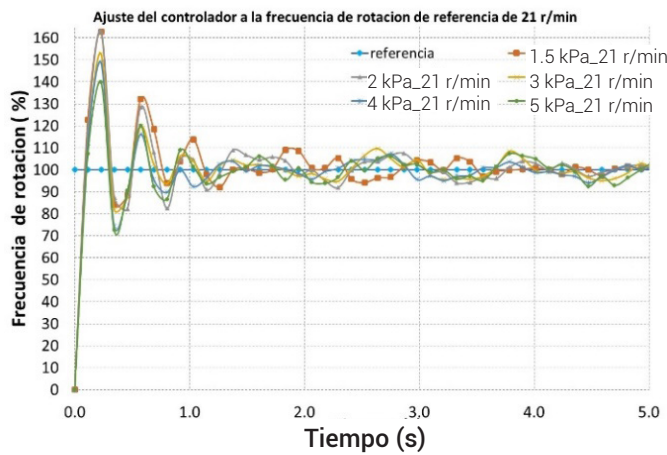
CONCLUSIONES

El desempeño del controlador del dosificador es adecuado para realizar cambios en la dosis de aplicación de forma continua y en tiempo real, obteniendo errores en estado estable del $\pm 5\%$ para FRDS de 21, 53 y 70 r/min, con un tiempo de asentamiento máximo de 1.5 y 3 s. En el caso de la FRDS de 37 y 5 r/min el error de control fue del $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$, respectivamente. El controlador del sistema neumático permite ajustar la PVCS de referencia en el intervalo de 1.5 a 5 kPa con un error de control de $\pm 10\%$ a FRDS es de 5 a 70 r/min. Los controladores de la FRDS y PVCS cumplen con los requerimientos necesarios para utilizarse en el dosificador de semilla de la sembradora donde fueron adaptados. Con el establecimiento de más secciones o fases de control (con base a la magnitud de la FRDS y PVCS) fue posible mejorar el desempeño del controlador de la FRDS en las condiciones de operación en las cuales el error de control fue superior a $\pm 5\%$.



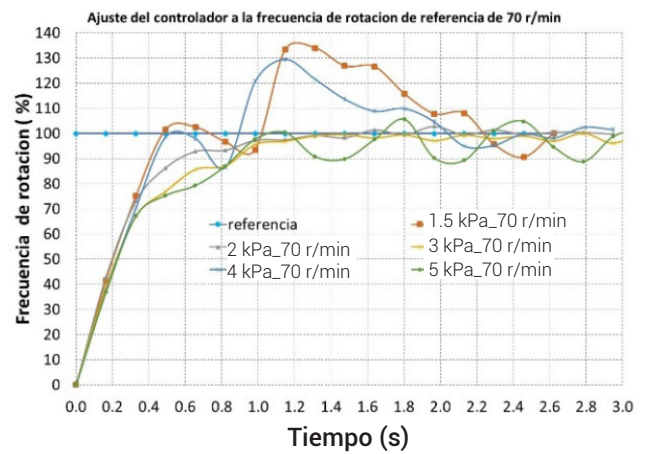
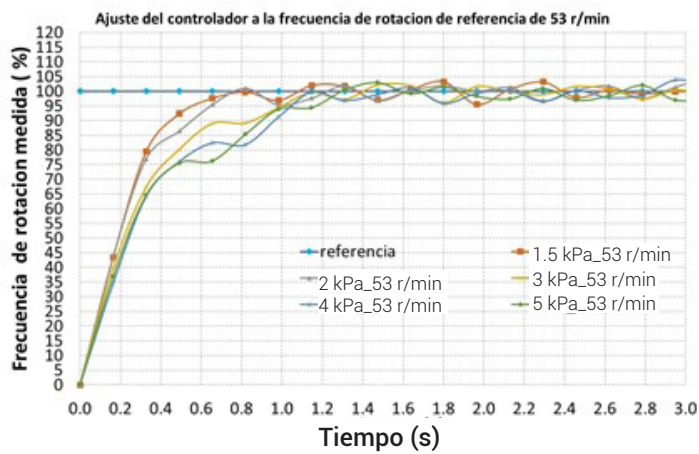
A) Respuesta del sistema a una entrada escalón.

B) Utilizando la FRDS de 5 r/min



C) Utilizando la FRDS de 21 r/min

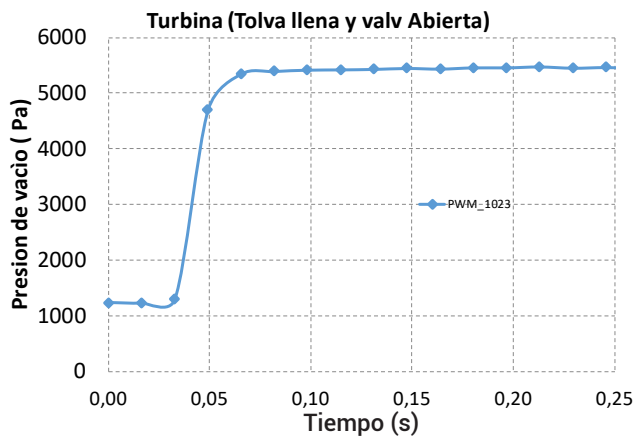
D) Utilizando la FRDS de 37 r/min



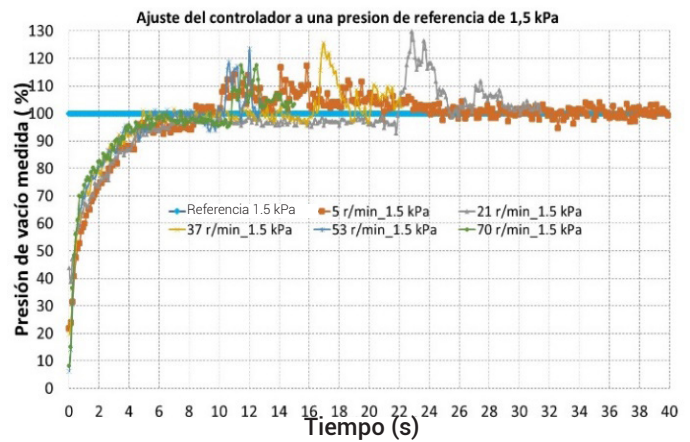
E) Utilizando la FRDS de 53 r/min

F) Utilizando la FRDS de 70 r/min

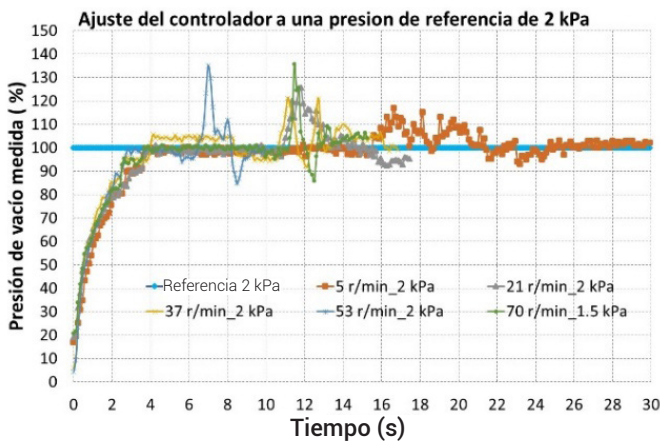
Figura 5. Desempeño del controlador PI y PID del dosificador de semilla.



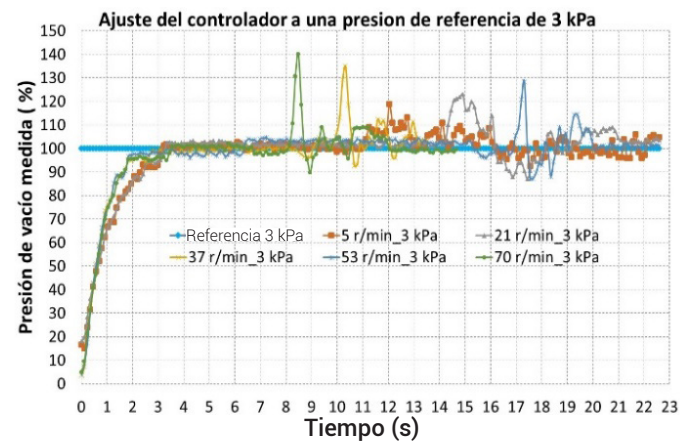
A) Respuesta del sistema a la entrada escalón.



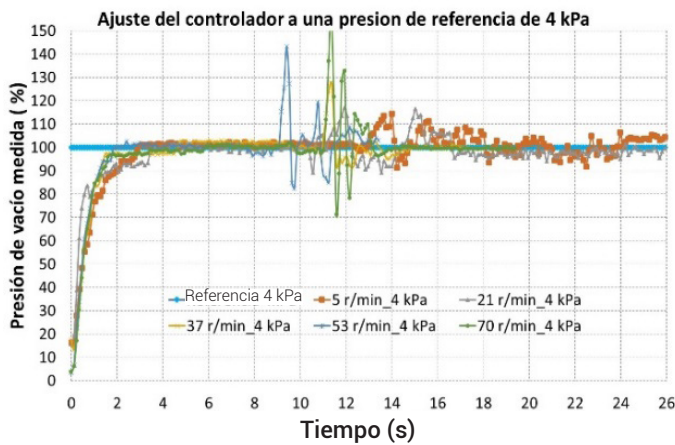
B) PVCS de 1.5 kPa como el 100%.



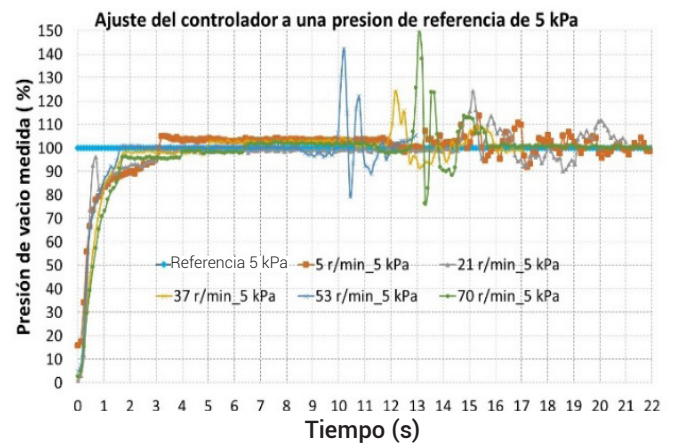
C) PVCS de 2 kPa como el 100%.



D) PVCS de 3 kPa como el 100%.



E) PVCS de 4 kPa como el 100%.



F) PVCS de 5 kPa como el 100%.

Figura 6. Desempeño del controlador PID del controlador de la PVCS.

BIBLIOGRAFÍA

- Anaya-Pérez M. E., V. H. Benítez B., J. H. Pacheco R. y F. Montaña V. (2014) Diseño de controladores P, PI y PID para el comportamiento dinámico de un servo-sistema hidráulico, basado en desarrollo experimental. *Epistemus* 16:13-21.
- Aulín V. V., A. O. Pankov, T. M. Zamota, O. L. Lyashuk, A. V. Hryniv, A. A. Tykhyi and A. V. Kuzyk (2017) Development of mechatronic module for the seeding control system. *INMATEH Agricultural Engineering* 59:181-188, <https://doi.org/10.35633/inmateh-59-20>
- Barut Z. B. and A. Özmerzi (2004) Effect of different operating parameters on seed holding in the single seed metering unit of a pneumatic planter. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 28:435-441.
- Basilio J. C. and S. R. Matos (2002) Design of PI and PID controllers with transient performance specification. *IEEE Transactions on Education* 45:364-370, <https://doi.org/10.1109/TE.2002.804399>
- Berrones S., R. Barcia, O. Miguel-Escrig y J. A. Romero-Pérez (2019) Sintonización de controladores PID para control de velocidad de motores de corriente continua mediante algoritmos genéticos. *Revista Técnico-Científica Perspectivas* 1:31-37, <https://doi.org/10.47187/perspectivas.vol1iss2.pp31-37.2019>
- Cai X., M. Walgenbach, M. Doerpmiond, L. P. Schulze and Y. Sun (2016). Closed-loop control of chemical injection rate for a direct nozzle injection system. *Sensors* 16:127, <https://doi.org/10.3390/s16010127>
- Cay A., H. Kocabiyik and S. May (2018a) Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters Part I: Design and laboratory simulation. *Computers and Electronics in Agriculture* 144:71-79, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.035>
- Cay A., H. Kocabiyik and S. May (2018b) Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters Part II: Field performance. *Computers and Electronics in Agriculture* 145:11-17, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.021>
- Gautam P. V., H. L. Kushwaha, A. Kumar and D. K. Kushwaha (2019) Mechatronics application in precision sowing: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 8:1793-1807, <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.208>
- Guzmán J. L., R. Medina, F. Rodríguez, J. Sánchez-Hermosilla and M. Berenguel (2004) Pressure control of a mobile spraying system. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2:181-190, <https://doi.org/https://doi.org/10.5424/sjar/2004022-72>
- Hao Y., T. Cui, G. Bora, D. Zhang, J. Wei, X. He, ... and L. Yang (2017) Development of an instrument to measure planter seed meter performance. *Applied Engineering in Agriculture* 33:31-40, <https://doi.org/10.13031/aea.11974>
- He X., T. Cui, D. Zhang, J. Wei, M. Wang, Y. Yu, ... and L. Yang (2017) Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture* 136:184-192, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.028>
- Li Y., Y. Bingxin, Y. Yiming, H. Xiantao, L. Quanwei, L. Zhijie, ... and Z. Dongxing (2016) Global overview of research progress and development of precision maize planters. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 9:9-26, <https://doi.org/10.3965/ijabe.20160901.2285>
- Singh T. P. and D. M. Mane (2011) Development and laboratory performance of an electronically controlled metering mechanism for okra seed. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 42:63-69
- Yan X., J. Hu, C. Lu and X. Wang (2013) Design of a control system for magnetic plate-type precision seeding production line. *Advanced Materials Research* 694-697:2051-2056, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.2051>
- Yang L., X. T. He, T. Cui, D. X. Zhang, S. Shai, R. Zhang and M. Wang (2015) Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8:1-9, <https://doi.org/10.3965/ijabe.20150804.1717>
- Yang S., C. Y. Zhai, Y. Y. Gao, H. J. Dou, X. G. Zhao, Y. K. He and X. Wang (2022) Planting uniformity performance of motor-driven maize precision seeding systems. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 15:101-108, <https://doi.org/10.25165/ijabe.20221505.5911>
- Zhai J. B., J. F. Xia, Y. Zhou and S. Zhang (2014) Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7:13-18, <https://doi.org/10.3965/ijabe.20140703.002>