

Sistema mecatronico para el control de los dosificadores de fertilizante y pesticida granulados de una sembradora-fertilizadora

Julio Torres Sandoval^{1§}

Eugenio Romantchik Kriuchkova¹

Irineo L. López Cruz¹

Gilberto De J. López Canteñs¹

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. C.P. 56230, Chapingo, Estado de México, México. Tel: 595 95 2 15 51.

[§]Autor para correspondencia: jultsmex@yahoo.com.mx.

Resumen

Las máquinas de dosificación variable hacen uso de sistemas mecatrónicos para el accionamiento y control de los dosificadores, reemplazando los sistemas mecánicos tradicionales constituidos por una rueda motriz, transmisión por cadenas y engranes. Los sistemas mecatrónicos permiten un cambio continuo y en tiempo real de la dosis de aplicación. En este trabajo se desarrolló un sistema mecatrónico para el control de los dosificadores de fertilizante y pesticida granulado, el cual fue adaptado a una sembradora-fertilizadora. El sistema está basado en microcontroladores como unidad de procesamiento y control, además de motores de corriente directa con codificadores para accionar a los dosificadores. Los cambios de la dosis de aplicación se logran con el control de la frecuencia de rotación de los dosificadores, utilizando la técnica de modulación por ancho de pulso y el control proporcional-integral-derivativo o proporcional-integral. El desempeño del sistema mecatrónico, para controlar la frecuencia de rotación del dosificador de fertilizante permite un tiempo de levantamiento menor a un segundo, sobreelongación máxima de 14% y tiempo de asentamiento de 1.5 a 2 segundos en frecuencias que van de 5 a 35 rev/min. En el caso del dosificador de pesticida, el tiempo de levantamiento es menor a un segundo, sobre elongación máxima menor al 10%, y tiempo de asentamiento de 1.5 segundos para frecuencias superiores a 100 rev/min, en frecuencias menores a este valor las variaciones de la señal de control rebasan el ±5%. De manera global, el desempeño del SM cumple con los requerimientos de las máquinas de dosificación variable

Palabras clave: control PID, dosificadores de fertilizante y agroquímico microcontrolador, PWM.

Recibido: abril de 2018

Aceptado: julio de 2018

Introducción

La agricultura de precisión (AP) es definida como el “manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel inter parcelario para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental” (Fountas *et al.*, 2003). Su aplicación permite optimizar el uso de los recursos, disminuir el impacto ambiental negativo, incrementar la rentabilidad de los cultivos y facilitar el logro de la sustentabilidad de la actividad agrícola. La AP hace uso de las tecnologías como los sistemas de posicionamiento global (GPS), dispositivos de detección y almacenamiento de la información referente a la variabilidad interparcelaria, sistemas de información geográfica, modelos de ayuda para la toma de decisiones, tecnologías capaces de controlar automáticamente los equipos agrícolas (mecatrónicos) de forma que se pueda modificar en continuo y en tiempo real las condiciones de regulación de los mismos (IDEA, 2010). Una de las áreas de mayor interés en la AP es la aplicación de insumos a tasa variable, concepto promisorio no incorporado con suficiente rapidez a las prácticas productivas de la agricultura moderna (Robert, 2002; Reyes *et al.*, 2011).

Los equipos utilizados en la aplicación a tasa variable de fertilizante y pesticida en línea, hacen uso de sistemas hidráulicos o electromecánicos para su accionamiento. El primero de ellos, utiliza el sistema hidráulico del tractor y los actuadores principales son motores hidráulicos para el accionamiento de los dosificadores. El segundo, utiliza como fuente de potencia al sistema eléctrico del tractor y los actuadores principales son motores de corriente directa (CD) para el accionamiento de los dosificadores (Bragachini *et al.*, 2010). Este último presenta mayores ventajas, debido a su menor costo y mantenimiento, además de ser más rápido para alcanzar la dosis de aplicación deseada. Los sistemas mecatrónicos pueden ser divididos en las siguientes áreas clave: 1) Modelado de sistemas físicos; 2) Sensores y actuadores; 3) sistemas y señales; 4) computadores y sistemas lógicos; y 5) software y adquisición de datos (Bishop, 2002; Bolton, 2006).

El cambio de la dosis de aplicación de los insumos, se logra mediante la variación de la velocidad angular o frecuencia de giro de los dosificadores. Una de las técnicas más utilizadas para modificar dicha variable, cuando los dosificadores son accionados por motores de corriente continua, es la modulación por ancho de pulso (PWM) (Wenbin *et al.*, 2012; Atul *et al.*, 2012; Sartori *et al.*, 2015). Para gobernar su magnitud se utilizan técnicas de control en lazo abierto, mediante el uso de motores a pasos (Yang *et al.*, 2015; Jianbo *et al.*, 2104) o en lazo cerrado, mediante servomotores o motores de CD, con técnicas de control clásico PI o PID (Basilio y Mateos, 2002; Saranya y Pamela, 2012; Pratap, 2014).

En México la aplicación de la AP es escasa o nula tanto a nivel de investigación como productivo, a pesar de los beneficios que permite alcanzar; por ello, el objetivo de esta investigación fue el desarrolló (diseño, construcción y prueba) de un sistema mechatrónico (SM) para el control de la dosificación de fertilizante y pesticida de forma continua y en tiempo real, adaptable a una sembradora-fertilizadora.

Materiales y métodos

Descripción de la sembradora-fertilizadora

La sembradora-fertilizadora utilizada en esta investigación fue diseñada para trabajar bajo condiciones de labranza de conservación, se comercializa con uno o hasta ocho cuerpos, cada cuerpo cuenta con un sistema de dosificación neumática de semilla, un dosificador de fertilizante y pesticidas sólidos. Utiliza un disco cortador dentado, que funciona como rueda motriz, transmisión por cadenas y engranes para accionar a los dosificadores, en el caso del dosificador de fertilizante la transmisión por cadenas y engranes mueven a un piñón y este a su vez a la corona, sobre la cual se fija una barra ubicada al interior de la tolva (Figura 2). Considerando la velocidad operativa de las máquinas para la aplicación de insumos, con velocidad máxima de 12 km/h, a esta velocidad y con los ajustes de la máquina seleccionada para esta investigación, el disco cortador giraría a una frecuencia de rotación máxima de 146 rev/min, la barra-disco dosificadora de fertilizante a 35 rev/min, y el rodillo ranurado para la dosificación de pesticida a 144 rev/min; estos datos fueron considerados como especificaciones de diseño y para realizar las pruebas del sistema mecatrónico.

Subsistema mecánico

El SM se adaptó a un cuerpo de la sembradora-fertilizadora. Para accionar el dosificador de pesticida granulado se usó el motoreductor EMG49, de 24 volts de corriente directa (VCD), con una frecuencia de rotación en vacío de 160 rev/min, torque máximo de 1.6 Nm y potencia de 34.7 W. Con un codificador integrado de 245 pulsos por giro de la flecha en cada línea de salida A y B. La flecha del motor es acoplada directamente al dosificador de pesticida (Figura 1b).

Para accionar el dosificador de fertilizante se usó un motoreductor de 350W a 24 VCD, con dos flechas de salida, una de ellas proveniente del reductor y la otra directa del motor. La flecha con reducción alcanza una frecuencia de rotación en vacío de 500 rev/min, y la flecha sin reducción de 6255 rev/min; en esta última se fijó el codificador Yumo E6B2-CWZ3E de 1024 pulsos por revolución en cada línea de salida A y B, el cual se alimenta entre 5 a 15 VCD. La flecha de salida con reducción acciona un engranaje piñón-corona, mediante una transmisión por cadena entre la flecha del piñón y la flecha del motoreductor, en la corona está fija la barra-disco que da movimiento al fertilizante (Figura 1a y Figura 2).

Subsistema electrónico

El SM está basado en la plataforma de desarrollo Arduino “open source”, de hardware y software libre. Utiliza la placa Arduino Mega (Atmel Corporation, 2016a) como unidad de control principal, basada en el microcontrolador Atmel2560. A esta placa se conectaron los siguientes elementos: pantalla de cristal líquido (LCD 20x4), reloj de tiempo real, memoria SD, teclado matricial; y tres placas Arduino Uno (Atmel Corporation, 2016b) en comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit), donde la placa Arduino Mega actúa como maestro y los Arduino Uno como esclavos. Para la realización de las pruebas de laboratorio fueron conectados otros dos arduino uno, para medir la masa del material de prueba entregada por los dosificadores (Figura 2).



a) Fijación del motor al dosificador de fertilizante.
b) Fijación del motor al dosificador de pesticida.

Figura 1. Fijación de los motores de CD a los dosificadores.

Un Arduino-Uno se usó para controlar el dosificador de fertilizante y otro para el de pesticida. En cada uno se conectaron los siguientes elementos: sensor de voltaje, sensor de corriente, codificador incremental, unidad de potencia y el Arduino Mega. Otro Arduino Uno se utilizó para medir la velocidad de avance de la sembradora, al cual se conectó un codificador Yumo E6B2-CWZ3E y el Arduino Mega. Se diseñó una unidad de potencia basada en opto-acopladores y transistores de potencia, que amplifican la señal de control PWM enviada por los microcontroladores a los motores aislando los de las altas tensiones. El SM se alimenta con el sistema eléctrico del tractor a un voltaje de 24 VCD.

Subsistema de control

El proceso seguido para el desarrollo del sistema de control de los dosificadores, fue el siguiente:

Paso 1. Experimentalmente se identificó la ecuación que relaciona el ancho de pulso (duty cycle) de la señal PWM con la frecuencia de pulsos del codificador, esto por separado por cada dosificador. Para ello, se aplicaron diferentes entradas escalón del ancho de pulso (tomando el valor mínimo de 50 y los valores al ir incrementando en 50 hasta tomar el valor máximo de 1023) y se midió la frecuencia de pulsos obtenida del codificador del motor; con cada ancho de pulso seleccionado se hizo funcionar el motor-dosificador en un tiempo de 10 segundos, tomando mediciones de la frecuencia de pulsos cada 98.304 ms. El valor de la frecuencia considerada como respuesta al ancho de pulso aplicado de la señal PWM, fue el promedio de las mediciones obtenidas a partir de los 2 a los 10 segundos. Para el caso del dosificador de fertilizante, el ensayo se realizó con el motor acoplado al dosificador con la tolva vacía. En el dosificador de agroquímico se efectuó bajo tres condiciones, la primera únicamente con el motor, la segunda con el motor acoplado al dosificador de pesticida con la tolva vacía y la tercera igual que el caso anterior, pero con la tolva llena del material de prueba y compuerta completamente abierta.

Paso 2. Caracterización de la respuesta del sistema a una entrada escalón. Fue obtenida como el comportamiento promedio en 30 repeticiones, de la aplicación de una entrada escalón de la señal PWM (con valor de 1023) y su respuesta en frecuencia de pulsos del codificador, en el intervalo de tiempo del inicio de la aplicación de la entrada escalón (tiempo cero) a los 1.5 segundos y realizando mediciones de la frecuencia de pulsos a intervalos regulares de 16.384 ms. Las condiciones bajo las cuales se realizaron los ensayos para el dosificador de fertilizante y agroquímico fueron las descritas en el paso 1.

Paso 3. Generación de la función de transferencia de la planta. Utilizando los datos obtenidos en el paso 2, se determinó la función de transferencia de la planta mediante la herramienta ‘System Identification Tool’ del System Identification Toolbox del ambiente de programación de Matlab, haciendo un llamado a esta herramienta desde la ventana de comandos con la instrucción ‘ident’.

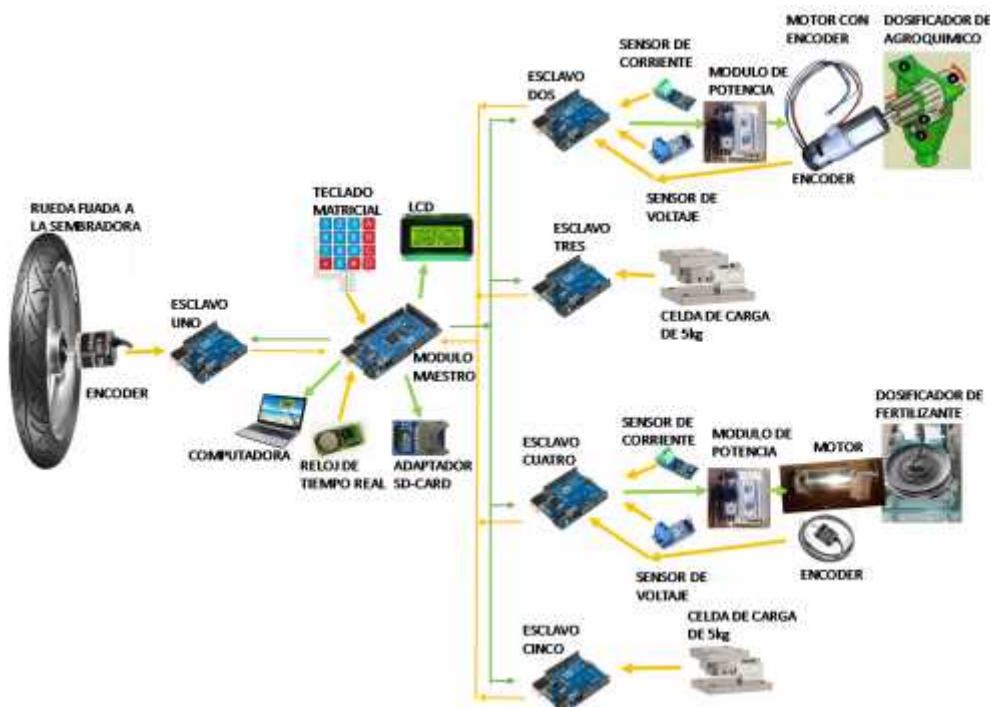


Figura 2. Esquema del circuito electrónico y lógica de control.

Paso 4. Sintonización del controlador PID. Con la función de transferencia de la planta, se utilizó la herramienta ‘pid tuner’ del Control System Toolbox de Matlab, haciendo un llamado a esta herramienta en la ventana de comandos con la instrucción ‘pidtool’, para encontrar los valores de las constantes k_p , k_i y k_d del controlador PID. También se determinaron las constantes del controlador PID utilizando la Ecuación 1, la cual representa la función de transferencia del controlador PID

($G_e(s)$), y la función de transferencia de la planta estimada ($G_p(s)$), obteniendo con ellas la función de transferencia en lazo cerrado del sistema del controlador (Ecuación 2), Alfaro *et al.* (2002 y 2003); Anaya *et al.* (2014).

$$G_e(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_i + k_p s + k_d s^2}{s}$$

$$G_{L}(s) = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)}$$

Donde: $G_L(s)$ es la función de transferencia en lazo cerrado, $G_p(s)$ la función de transferencia de planta y $G_c(s)$ la del controlador.

En la Ecuación 3, muestra la expresión que permite determinar la señal de control, mediante la reducción de la diferencia entre la referencia (frecuencia de pulsos requeridos) y el valor medido (frecuencia de pulsos medidos) de la variable de control en el sistema.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d e(t)}{dt}$$

Donde: $u(t)$ es la señal de control, $e(t)$ es el error 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.

Paso 5. Finalmente se programaron los algoritmos de control del sistema mecatrónico. El algoritmo de control programado en el arduino uno que controla al dosificador de fertilizante y pesticida es el presentado en la Figura 3, donde $u(t)$ se determina con la Ecuación 3, para PWM , y PWM_m se determina con la Ecuación 4, para el dosificador de fertilizante y con la Ecuación 5 para el dosificador de pesticida.

Programación'y'funcionamiento'del'SM

La programación del SM se realizó en lenguaje C++ con el software arduino versión 1.0.5 0. El arduino uno (esclavo uno) fue programado para determinar la velocidad de avance de la sembradora (v_s), (Figura 2), a través del conteo de pulsos generados por el codificador al girar la rueda en un tiempo exacto de 163.84 ms, enviando el valor determinado de la velocidad vía comunicación I2C.

El arduino Mega gobierna el funcionamiento del SM. Controlando el modo de funcionamiento de los esclavos en tres modos, que son: modo de inactividad, modo de aplicación de insumos y modo de prueba-calibración. Cuando se enciende el SM inicia en modo inactivo, en espera de que el usuario cambie el modo de operación, ya sea al modo de aplicación o de prueba-calibración. Cuando es seleccionado alguno de estos modos, activa los esclavos correspondientes para ejecutar el modo de operación seleccionado y envía los datos requeridos por cada esclavo para su funcionamiento. Cuando el modo de aplicación de insumos está activo, el arduino mega espera la señal del esclavo uno que le indica que la velocidad de desplazamiento de la sembradora ha sido actualizada, momento en el cual actualiza cada uno de los datos de operación de los esclavos y extrae de ellos vía I2C los datos que caracterizan el desempeño de los dosificadores, además de verificar y actualizar los datos de operación introducido por el usuario o cambiar el modo de operación.

Cuando el SM opera en modo de pruebas-calibración, el usuario introduce la frecuencia de rotación a la cual deben girar los dosificadores y el número de giros que deben realizar. Una vez activo, el arduino mega controla la frecuencia de rotación de los dosificadores con la magnitud seleccionada y los detiene cuando han realizado los giros elegidos por el usuario, recibiendo los datos de importancia de cada uno de los esclavos cada 163.84 ms vía comunicación I2C.

El arduino uno (esclavo dos) fue programado para controlar el funcionamiento del dosificador de fertilizante y arduino uno (esclavo cuatro) del dosificador de pesticida, (ver Figura 2). Su funcionamiento inicia con la configuración e inicialización de cada uno de los dispositivos conectados a él y espera a que el maestro le asigne el modo de funcionamiento, ya sea en modo de aplicación, de prueba-calibración o de inactividad; para cada modo operativo recibe del maestro los datos requeridos para ejecutarlo e implementa el algoritmo de control de los dosificadores (Figura 3). Cuando el modo de aplicación está activo, espera que el maestro actualice los datos de la operación y le envíe los datos de mayor importancia de la labor de aplicación, lo que se realiza cada 163.84 ms. En el caso en el cual el modo de operación activo sea el de pruebas-calibración, espera a recibir del maestro los datos operativos actualizados y le regresa los datos de mayor importancia resultado de la actividad, esto lo realiza hasta cumplir con la condición de paro.

El algoritmo implementado en los esclavos que controlan los dosificadores se presenta en la Figura 3, el cual inicia con los datos de entrada enviados por el maestro, que son: la velocidad de avance de la sembradora (v_s), los pulsos generados por el codificador en cada giro de la flecha del motor (P_{em}), la cantidad de material entregado en cada giro del dosificador (q), la dosis de aplicación deseada (Q) y distancia entre surcos (d_{sur}) y para cuando funciona en modo de pruebas-calibración también envía el número de giros a dar en el dosificador y la frecuencia de rotación a la cual los debe realizar. Los esclavos realizan el conteo de pulsos (P_{cm}) del codificador fijado en la flecha del motor en un tiempo exacto de 163.84 ms (T_{cm}) determinando con ello la frecuencia de pulsos generada por el codificador del motor (f_m) y de los datos recibidos se determina la frecuencia de rotación requerida (f_r), posteriormente con la frecuencia de pulsos requerida se estima el ancho de pulso requerido (PWM_r) y con la frecuencia de pulsos medida se determina el ancho de pulsos medido (PWM_m). El ancho de pulsos requerido o medido para el caso del dosificador de fertilizante se determina con la Ecuación 4 y para el dosificador de pesticida con la Ecuación 5.

$$PWM = 3 \times 10^{-12} f^3 - 2 \times 10^{-7} f^2 + 0.012f - 14.4$$

Donde: PWM es el ancho de pulsos requerido o medido de la señal PWM (adimensional) y f la frecuencia de pulsos requerida o medida, ambas en el motor que acciona al dosificador de fertilizante.

$$PWM = 0.00005f^2 - 0.0733 * f + 83.668 \text{ si } f < 1800$$

$$PWM = 0.6255 * f - 745.26 \text{ si } 1800 < f < 2450$$

$$PWM = 0.7276f^2 + 948.6 \text{ si } f > 2450$$

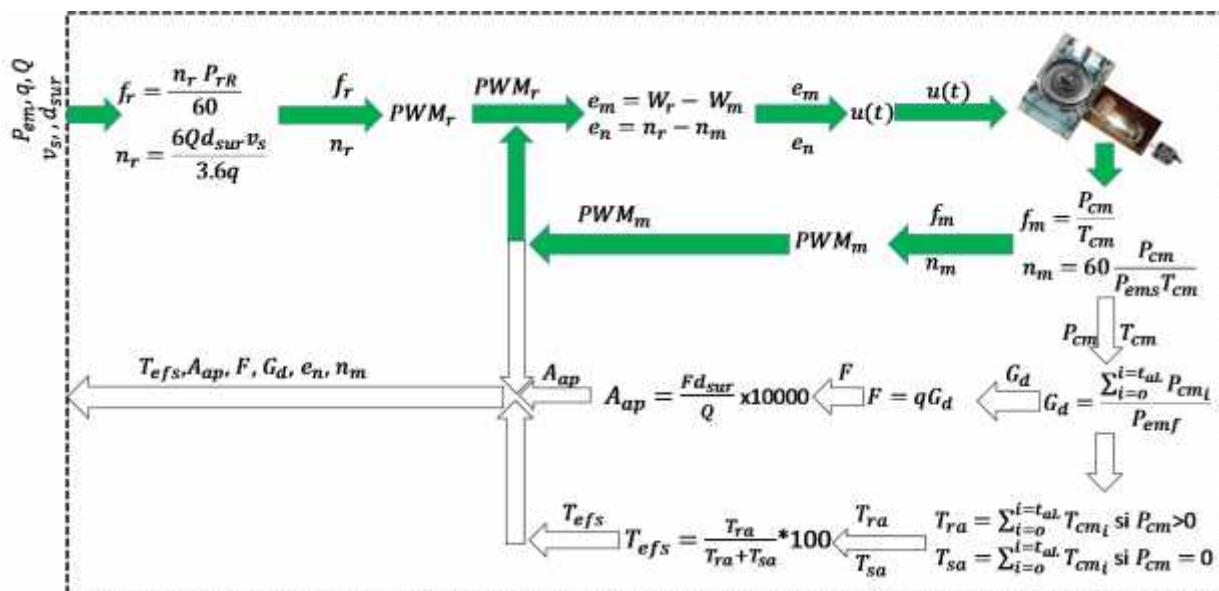
Donde: PWM es el ancho de pulsos requerido o medido de la señal PWM (adimensional) y f la frecuencia de pulsos requerida o medida, ambas en el motor que acciona al dosificador pesticida.

La diferencia entre el ancho de pulsos requerido (PWM_r) y ancho de pulsos medido (PWM_m) corresponde al valor del error (e_m) utilizado por la Ecuación 3, que permite obtener la señal de control (u_t) del dosificador (ancho de pulso de la señal PWM) con la cual se alimenta al motor del dosificador correspondiente. Además, se realiza el cálculo del área en la cual se ha aplicado el insumo (A_{ap}) en m^2 , cantidad teórica aplicada del insumo (F) en gramos, tiempo efectivo de trabajo del dosificador (T_{efs}) en porcentaje. Los datos de importancia del desempeño del control del dosificador y correspondientes al trabajo realizado durante la labor de aplicación del insumo o pruebas son enviados al maestro, datos como tiempo efectivo de trabajo del dosificador (T_{efs}), área cubierta durante la aplicación (A_{ap}), masa teórica aplicada (F), frecuencia de rotación medida en el dosificador (n_m) y el error de control (e_n). Cuando los esclavos funcionan en modo de pruebas también miden el voltaje y la corriente de alimentación del motor y calculan la potencia y el torque (Ecuación 6) exigido al motor.

$$V_e = V_f \frac{D_e}{1023}, \quad P = V_e I \quad y \quad T = \frac{P}{w}$$

Donde: V_e voltaje efectivo (V); P potencia al motor (W); T torque (Nm), w velocidad angular de la flecha del motor (rad s^{-1}), D_e ancho de pulsos de la señal PWM enviado (toma valores de 0 a 1023, adimensional), V_f voltaje medido en la línea que alimenta al motor (V) y I corriente de alimentación al motor (A).

Una vez implementado la programación y el algoritmo de control en cada uno de los Arduino, se realizaron pruebas para determinar el desempeño del control PID utilizando diferentes valores de las constantes, tomando como base los estimados con la herramienta PID Tuner de Matlab. Para cada una de las constantes k_p , k_i y k_d fueron seleccionados tres valores, el primer grupo de ellos utilizados para obtener una respuesta de la señal de control que elimine rápidamente el error, cuando el error es mayor al 10%, el segundo grupo de valores se utiliza cuando el error está en un rango de 5 a 10% del valor de referencia y el tercer grupo cuando el error es menor al 5% del valor de referencia.



Nomenclatura utilizada: n_{II} = número de interrupciones desde que inicio la labor de siembra hasta el momento actual (adimensional); G_d = giros dados por el disco semillero; T = tiempo contado desde que inicio la labor (s); $\sum_{t=0}^{t=t_d} P_c$ = pulsos totales contados en el tiempo desde que inicio la labor (pulsos); P_c = pulsos contados en el encoder del motor (adim.); $\sum_{t=0}^{t=t_d} P_e$ = pulsos totales contados en el motor desde el inicio de la labor (adimensional); G_d = giros del dosificador (adim.); F = fertilizante teórico aplicado durante la labor (adim.); T_r = tiempo real de aplicación (s); T_s = tiempo sin aplicación (s)

Figura 3. Algoritmo de control de los dosificadores.

Evaluación del sistema mecatrónico mediante pruebas de laboratorio

Las pruebas se hicieron utilizando un cuerpo de una sembradora-fertilizadora, en el banco de pruebas de sembradoras del laboratorio del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA), que pertenece al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El material de prueba utilizado fue fertilizante urea comercial (46-0-0), para el dosificador de fertilizante y pesticida, tomando como base lo descrito por la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004 (Secretaría de Economía, 2004) y evitar la manipulación de productos tóxicos para el caso del dosificador de pesticida. Las propiedades promedio del material de prueba, fueron las siguientes: densidad aparente de 766.8 kg/m³, coeficiente de fricción estático de 30°, tamaño del grano menor a 5 mm y humedad 0.22%.

En la prueba de cada dosificador, se utilizaron cinco frecuencias de rotación para el dosificador de fertilizante (barra dosificadora) 5, 12, 20, 27 y 35 rev/min y cinco para el dosificador de pesticida (rodillo ranurado) 10, 32, 55, 77 y 100 rev/min. La apertura de la compuerta que regula la salida del material de la tolva se colocó en la posición media (50%) y la tolva fue puesta a un nivel de llenado del 80% de su capacidad con el material de prueba en ambos casos. En cada frecuencia de rotación se realizaron cuatro repeticiones y por cada repetición se hizo girar 20 veces la barra dosificadora y 30 veces al rodillo ranurado. En cada repetición se midió la frecuencia de rotación del dosificador, el error de control, el número de giros, voltaje y corriente de alimentación del motor a intervalos regulares de 114.688 ms, además se midió la cantidad de material de prueba entregado por cada dosificador a

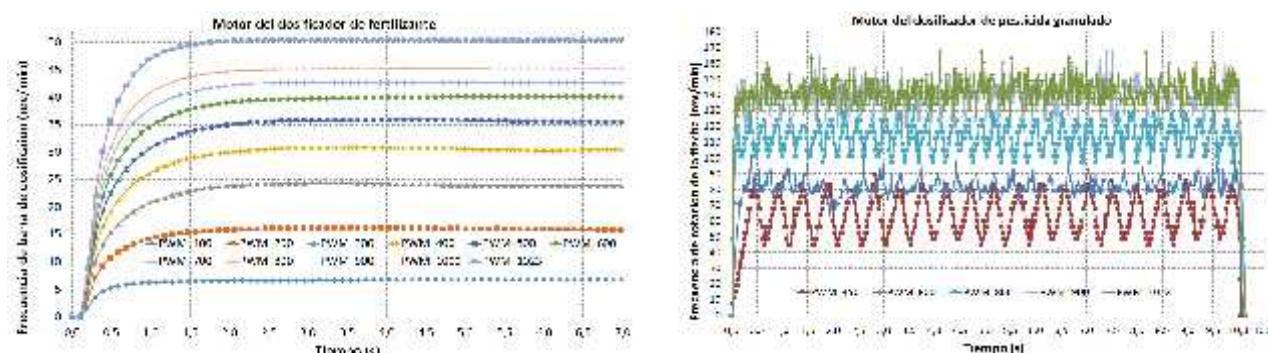
intervalos regulares de 645 ms para el dosificador de agroquímico y 715 ms para el de fertilizante.

El sensor de voltaje y corriente fueron verificados con un multímetro digital (modelo: UD87 de la compañía Urrea Herramientas Profesionales, SA de CV) presentando diferencias en las mediciones menores al $\pm 2\%$ en ambos casos. La celda de carga se verificó con pesas calibradas de uno, dos, tres, cuatro y cinco kilogramos obteniendo una diferencia en la medición menor al $\pm 0.05\%$.

Resultados y discusión

La adaptación del sistema mecatrónico consistió principalmente en la fijación de los motores al cuerpo de la sembradora para accionar los dosificadores; y el sistema electrónico y de control permitió un funcionamiento conjunto de cada uno de los componentes que integran al SM.

Al aplicar diferentes entradas escalón del ancho de pulso de la señal PWM al sistema (motor-mecanismo dosificador con tolva vacía) se obtuvo un comportamiento en la frecuencia de rotación para el dosificador de fertilizante, que se muestra en la Figura 4a y para el dosificador de pesticida en la Figura 4b. En el caso del dosificador de fertilizante se presenta un comportamiento lineal mientras que para el dosificador de pesticida el comportamiento es no lineal.



a) Señal PWM vs frecuencia de rotación del dosificador de fertilizante.

b) Señal PWM vs frecuencia de rotación del dosificador de pesticida.

Figura 4. Respuesta del sistema motor - dosificadores a diferentes anchos de pulso de la señal PWM.

El motor del dosificador de fertilizante permite obtener una mayor precisión y mejor ajuste al controlar la frecuencia de rotación, comparado con el motor del dosificador de pesticida, esto debido al comportamiento lineal y a que el ancho de pulso (duty cycle) de la señal PWM que permitió vencer la fuerza de resistencia al movimiento en el dosificador fue de 25, pudiendo utilizar los valores en el intervalo de 25 a 1 023, para modificar la frecuencia de rotación del dosificador (Figura 4a). Sin embargo, para el caso del dosificador de pesticida el ancho de pulso de la señal PWM que permitió vencer la fuerza de resistencia al movimiento fue de 450 y en el intervalo de 850 a 1 023 casi no hubo variación en la frecuencia de rotación, consiguiendo utilizar únicamente los valores en el intervalo de 450 a 850 (Figura 4b).

Las funciones de transferencia identificadas para dar cuenta del comportamiento de la planta para el dosificador de fertilizante y agroquímico se presentan en la Cuadro 1. Las estimaciones de las constantes k_p , k_i y k_d del controlador PID resultado de la sintonización se muestran en el Cuadro 1. Estos valores fueron implementados en el algoritmo de control (Figura 3) programado en los Arduino uno encargados del control de los dosificadores.

Cuadro 1. Ecuaciones de la función de transferencia de la planta, de los controladores y valores obtenidos de las constantes del controlador para cada uno de los dosificadores.

Sistema	Función de transferencia		Valores seleccionados de las constantes PID
	Planta	Controlador	
EM49	$G = \frac{13.73s + 8809}{s^2 + 188.1s + 3503}$	$G = \frac{0.00215s^2 + 0.3292s + 12.6}{s}$	Error>10% Kp=0.329, Ki=12, Kd=0.05
MDPT V	$G = \frac{72.07s + 52070}{s^2 + 675s + 23340}$	$G = \frac{0.2118s + 25.82}{s}$	5-10% de Error Kp=0.9, Ki=4, Kd=0.01
MDPTL	$G = \frac{70.76s + 108.5}{s^2 + 38.67s + 56.04}$	$G = \frac{0.000789s^2 + 0.117s + 4.341}{s}$	Error <5% Kp=0.9, Ki=4, Kd=0
MDFT V	$G = \frac{663.3s + 19440}{s^2 + 36.01s + 244.1}$	$G = \frac{0.000789s^2 + 0.117s + 4.341}{s}$	Error>10% Kp=0.709, Ki=6.778, Kd=0.01 5-10% de Error Kp=0.26, Ki=1.32, Kd=0.01 Error <5% Kp=0.26, Ki=1.32, Kd=0

EM49: Motoreductor; MDPTV: Motor-Dosificador Pesticida con la tolva vacía; MDPTL: Motor-Dosificador Pesticida con la tolva llena; MDFTV: Motor-Dosificador de fertilizante con la tolva vacía.

Al determinar la irregularidad de entrega entre repeticiones de los dosificadores, conforme a la norma mexicana NMX-O-222-SCFI-2004, se encontró que el dosificador de fertilizante presenta una irregularidad superior máxima de 15% mientras que para el dosificador de pesticida fue menor al 3%. Lo que indica una elevada irregularidad de entrega del dosificador de fertilizante al utilizar la misma frecuencia de rotación.

Los resultados promedio de las repeticiones, en la prueba del dosificador de fertilizante se muestran en la Cuadro 2, donde se obtuvo un error en el desplazamiento angular programado con respecto al medido del -0.84% en su valor máximo, esto en 20 giros del dosificador. Esto implica que el efecto debido al error de desplazamiento del dosificador (desplazamiento angular teórico respecto del real a diferentes

frecuencias de rotación programadas) en la variación de la cantidad de fertilizante entregado (dosis de aplicación) es baja, lo que permite aseverar que la masa del material entregada en cada giro del dosificador es afectada por el cambio en la magnitud de la frecuencia de rotación del dosificador. Este comportamiento es indeseable, ya que cuando se ajusta una máquina para la aplicación de fertilizante, no se espera que la dosis de aplicación cambie con la modificación de la velocidad de avance de la máquina para máquinas con rueda motriz y sistema de transmisión mecánica.

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

Dosificador de fertilizante				Dosificador de pesticida			
FRP	FRM	E	ME	FRP	FRM	E	ME
5	5.04	-0.84	93.35	10	9.51	4.92	2.88
12	12.01	-0.10	106.30	32	31.58	1.31	2.91
20	19.92	0.37	142.04	55	54.85	0.28	2.86
27	26.96	0.14	153.87	77	76.72	0.36	2.90
35	34.96	0.11	169.93	100	99.67	0.33	3.00

*Frecuencia de rotación programada (FRP); rev/min, frecuencia de rotación medida (FRM), rev/min; error (E); (%) y masa entregada por giro del dosificador (ME) g.

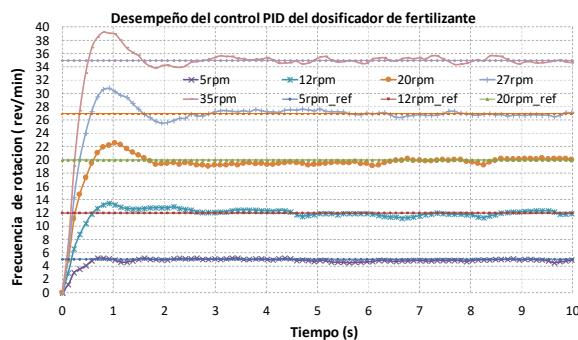
En la Cuadro 2 se muestran los resultados de la cantidad promedio de material de prueba tirado por cada giro del dosificador de pesticida, además del error promedio de las repeticiones del desplazamiento angular en 30 giros, donde su obtuvo un máximo de 4.92% a 10 rev/min.

El desempeño del controlador PID para regular la frecuencia de rotación del dosificador, en el caso del dosificador de fertilizante: permite un tiempo de levantamiento menor a un segundo, sobreelongación máxima de 14% y tiempo de asentamiento entre los 1.5 a 2 segundos para frecuencias que van de 5 a 35 rev/min (Figura 5a), en el caso del dosificador de pesticida, permite un tiempo de levantamiento menor a un segundo, en este caso el sobrepaso no está bien definido pero se podría decir que lo alcanza en menos de 1.5 segundos, el estado estacionario con un error de la variable de control del $\pm 5\%$ únicamente la alcanza para la frecuencia de rotación de 100 rev/min del rodillo ranurado y para el caso de las frecuencias de rotación de 10 a 77 rev/min lo supera (Figura 5b).

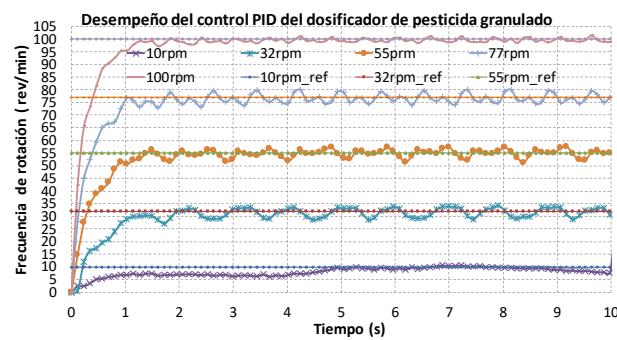
Tola *et al.* (2008) obtuvo para un sistema de dosificación variable, al utilizar como dosificador de fertilizante granulado un rodillo dosificador estriado accionado por un motor de 12VCD, errores de la dosificación objetivo en el intervalo de $\pm 5\%$ y un tiempo de respuesta del sistema de control para ajustar la dosificación de aplicación en el intervalo de 0.95 - 1.90 segundos.

Considerando el error de desplazamiento angular el cual está directamente relacionado con la dosis de aplicación de los dosificadores (fertilizante y pesticida) obtenidos en esta investigación, podría decirse que están dentro del valor de $\pm 5\%$ del error de la dosis de aplicación objetivo; y que el tiempo de respuesta de los dosificadores para realizar los cambios en la dosis de aplicación son muy similares a los reportados.

Santori *et al.* (2015) encontró que, para un dosificador helicoidal movido por un motor de 12VCD, a bajas frecuencias de rotación del dosificador el error en la dosis de fertilización objetivo se incrementaba conforme se disminuye la frecuencia de rotación, al obtener un error de 8.3% a 4rev/min, de 5.5% a 12 rev/min y 3.5 a 20 rev/min y <1.5% a 24 rev/min, este comportamiento también fue observado principalmente en el dosificador de pesticida, en el error del control de la frecuencia de rotación y del desplazamiento angular.



a) Dosificador de fertilizante



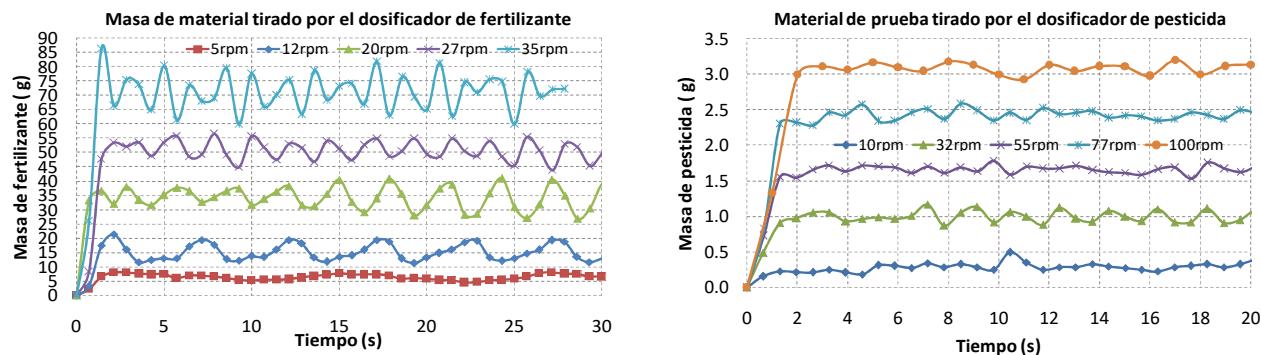
b) Dosificador de pesticida

Figura 5. Desempeño del control PID de la variable frecuencia de rotación de los dosificadores.

Debido a que no se tiene referencia en la determinación del comportamiento de la entrega del insumo por los dosificadores, a intervalos de tiempo pequeños como los que fueron medidos en esta investigación (en intervalos de tiempo de 0.753 para el dosificador de fertilizante y de 0.653 s para el dosificador de pesticida), ya que en todos los casos consultados realizan la determinación de la dosis de aplicación acumulada. Por ello, el análisis únicamente se basa en la desviación estándar y el coeficiente de variación. Los resultados para el dosificador de fertilizante se muestran en la Cuadro 1 y Figura 6a, donde se observa que la entrega es irregular (no uniforme), basado en los valores elevados obtenidos del coeficiente de variación y para el caso del dosificador de pesticida, de acuerdo a los resultados obtenidos en el Cuadro 3 y Figura 6b, la entrega de material de prueba por el dosificador es más uniforme conforme se incrementa el valor de la frecuencia de rotación del dosificador, teniendo los mejores resultados de 55 a 100 rev/min. Este resultado contrasta con el error de control de la frecuencia de rotación y desplazamiento angular, comparado con el dosificador de fertilizante.

Cuadro 1. Comportamiento de la entrega del dosificador de fertilizante y pesticida por segundo.

	Dosificador de fertilizante					Dosificador de pesticida				
	5	12	20	27	35	10	32	55	77	100
Frecuencia de rotación de prueba (rev/min)										
Promedio (g/s)	8.61	21.25	47.60	48.96	99.47	0.45	1.51	2.53	3.69	4.69
Desviación estándar	1.46	4.11	6.54	5.57	8.74	0.064	0.15	0.08	0.11	0.11
Coeficiente de variación (%)	16.93	19.33	13.78	11.37	12.28	14.06	9.65	3.12	3.07	2.38



a) Masa del material tirado cada 715 ms.

a) Masa del material tirado cada 653 ms.

Figura 6. Comportamiento de la caída de fertilizante y pesticida.

Conclusiones

El desempeño del controlador del dosificador de fertilizante y del dosificador de agroquímico es adecuado para realizar cambios en la dosis de aplicación de forma continua y en tiempo real; con un tiempo de estabilización de la frecuencia de rotación entre 1.5 y 2 segundos, con un error de desplazamiento angular del dosificador menor al $\pm 0.84\%$ para el dosificador de fertilizante; y con un tiempo máximo de 1.5 segundos para alcanzarla la dosis de aplicación, con un error en el desplazamiento angular menor al $\pm 1.5\%$, irregularidad de entrega menor al 5% para frecuencias de rotación de 10 a 140 rev/min en el caso del dosificador de pesticida.

De manera general el SM desarrollado, cumple con los requerimientos para su aplicación en la máquina.

Literatura citada

- Alfaro, R. V. M. 2003. Métodos de sintonización de controladores PID que operan como servomecanismos. Revista Ingeniería, San José, Costa Rica. 13(1-2):13-29.
- Alfaro, R. V. M. 2002. Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. Revista Ingeniería, San José, Costa Rica. 12(1-2):21-36.
- Anaya, P. M. E.; Benítez, B. V. H.; Pacheco, R. J. H. y Montaño, V. F. 2014. Diseño de controladores P, PI y PID para el comportamiento dinámico de un servo-sistema hidráulico, basado en desarrollo experimental. UNISON-EPISTEMUS 16:13-21.
- Atmel Corporation. 2016a. ATMEGA328/P Datasheet, 8-bit AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_datasheet.pdf.
- Atmel Corporation. 2016b. ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Datasheet, 8-bit AVR microcontroller. San José, California, USA. http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf.
- Atul, K. D.; Nibbedita, C.; Sashi S. and Vinod, Y. 2012. PWM Based Automatic Closed Loop Speed Control of DC Motor. Inter. J. Eng. Trends Technol. 3(2):110-112.
- Basilio, J. C. and Matos, S. R. 2002. Design of PI and PID controllers with transient performance specification. IEEE Transactions on Education. 45(4): 364-370.

- Bishop, H. R. 2010. The mechatronics hand book. The Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA). The University of Texas at Austin Austin, Texas, USA. 18-25 pp.
- Bolton, W. 2006. Mechatronics: electrical control systems in mechanical and electrical engineering. 3rd Ed. Addison-Wesley Longman, Harlow, England. 1 pp.
- Bragachini, M.; Méndez, A.; Scaramuzza, F; Vélez, J. P. y Villarroel, D. 2010. Manejo de cultivos por ambiente. Evolución de la dosificación variable en Argentina. Proyecto Agricultura de Precisión INTA. Manfredi, Pcia. de Córdoba, Argentina.
- Fountas, S.; Søren, M. P. and Simon, B. 2003. ICT in precision agriculture - diffusion of technology. Institute of Agricultural Sciences. The Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). 2010. Ahorro y eficiencia energética en la agricultura de precisión. Madrid, España. 12-17 pp.
- Jianbo, Z.; Junfang, X.; Yong, Z.; and Shun, Z. 2014. Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device. Inter. J. Agric. Biol. Eng. 7 (3):13-18.
- Página web de Arduino. <https://www.arduino.cc/>.
- Pratap, V.; Neelam, P.; and Chandrakant, K. 2014. Real time DC motor speed control using PID controller in LabVIEW. Inter. J. Adv. Res. Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 3(9):12162-12167.
- Reyes, A. J. F.; Berrios, A. D. F.; Ortega, B. R. A.; Wilson, D. E. y Flores, J. F. 2011. Calibración estática de un sistema de control automático de tasa variable de fertilizante. Santiago, Chillán, Chile. Agrociencias 46:51-62.
- Saranya, M. and Pamela, D. 2012. A real time IMC tuned PID controller for DC motor. Inter. J. Recent Technol. Eng. 1(1):2277-3878.
- Sartori, M. J. R.; Di Raimo C.; Costa, C. R. R.; Montezuma, M. A. and Capello de Souza E. A. 2015. Study of an electromechanical system for solid fertilizer variable rate planting. Afr. J. Agric. 11(3):159-165.
- Secretaría de Economía. 2004. Tractores, implementos agrícolas - sembradora neumática de precisión - especificaciones y método de prueba NMX-O-222-SCFI-2004, México.
- Tola, E.; Kataoka, T; Burce, M; Okamoto, H and Hata S. 2008. Granular fertiliser application rate control system with integrated output volume measurement. Bio. Eng. 101(4):411-416.
- Wenbin, Y.; Dada W.; Pengfei, J.; and Weiguo, L. 2012. The PWM speed regulation of DC motor basedon intelligent control. Systems Engineering Procedia. 3:259-267.
- Yang, Li; Xiantao, He; Cui, Tao; Dongxing, Z.; Song, S.; Rui, Z.; Mantao, W. 2015. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter. Inter. J. Agric. Biol. Eng. 8(4):1-9.