

AP06 - Desarrollo de un prototipo universal para adaptación de equipos centrífugos de abono convencionales en equipos de aplicación variable.

Martínez, J.¹, Pérez-Ruiz, M.¹, Castro, S.², Agüera, J.²

¹Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluido, Universidad de Sevilla, Ctra. Sevilla-Utrera km1 Sevilla 41013, E-mail: martinezj@us.es; manuelperez@us.es.

²Dpto. de Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba, Campus Rabanales 14014 Córdoba, E-mail: scastro@us.es; jaguera@uco.es.

Resumen

La Agricultura de Precisión constituye un nuevo paradigma en la agricultura de hoy. A objetivos como el aumento de la productividad o de la eficiencia económica, se les unen otros en auge como el respeto medioambiental y un riguroso control en la seguridad alimentaria. En general las técnicas de agricultura de precisión requieren de un mejor conocimiento de las necesidades del cultivo y del suelo, y también del empleo de la maquinaria más adecuada que tenga en cuenta la variabilidad espacial y temporal en las necesidades de los cultivos. En este contexto, este estudio tiene como objetivo principal, el diseño, desarrollo y evaluación de una plataforma universal para controlar una abonadora centrífuga convencional mediante un monitor comercial inicialmente diseñado para el control de barras de pulverización de productos líquidos, lo que permite la adaptación dinámica de la cantidad de fertilizante sólido según las necesidades reales del cultivo. Para el desarrollo del sistema de control fue necesario realizar una caracterización de la abonadora mediante pruebas de calibración del sistema dosificador. También se han desarrollado los distintos módulos de hardware (módulo para el control de los discos, interacción con el sistema de control de líquidos comercial, etc.) necesarios para automatizar las acciones que se realizan durante el funcionamiento de la máquina. Para la gestión del sistema se utiliza la plataforma de hardware libre de bajo coste Arduino que resulta fácilmente adaptable para otras abonadoras, desarrollando un software capaz de gestionar el resto de componentes. Finalmente se monta todo el conjunto a bordo del tractor y se realizan las pruebas de funcionamiento. Se comprobó que el sistema trabaja correctamente, con una respuesta adecuada, consiguiendo automatizar el proceso de variar la dosis durante la marcha de forma eficaz. Como se observa en estos primeros resultados, la utilización de este equipo como elemento importante en una aplicación variable de insumos, puede suponer una reducción económica y del impacto medioambiental de la operación, además de permitir una distribución más racional del nitrógeno u otros fertilizantes en campo, algo sin duda de especial relevancia en sistemas modernos de producción.

Palabras clave: agricultura de precisión, arduino, low-cost, controlador

Universal prototype for adapting from conventional centrifugal fertilizer to variable-rate spreader.

Abstract

Precision Agriculture represents a new paradigm in modern agriculture. To objective such as increasing productivity and economic efficiency, are joined other arising objective as the environmental concern. Precision agriculture techniques require a better understanding of crop and soil needs, and the use of precise machinery that take into account the spatial-temporal variability across fields. In these terms, the goal of this study was the design, development and evaluation of a universal platform to control a conventional disc fertilizer spreader, and thus able to manage the amount of fertilizer on the go. A specific on-field calibration was necessary to determine the spreader settings for a given type of fertilizer. The components of the hardware modules (control system of disks, interaction with sections control system, etc.) capable of automating actions performed in operation of the spreader were developed. The control system was developed based on an open-source and low-cost microcontroller-board (Arduino), which could be adapted easily to other spreader model, and a firmware capable to control the hardware components. Once installed on-board, field tests were provided to investigate the proper

functioning and response time (approx. 1 sec) of the control system and achieve automate the process of varying the fertilizer dose on the go. As noted these preliminary results, the utilization of this prototype as an essential part of a variable input application may found an economic reduction in fertilizer operation and environmental impact, and allows the control of nitrogen or other fertilizer in fields, techniques that definitely significant in modern agriculture production systems.

Keywords: precision agriculture, arduino, low-cost, controller

Introducción y/o Justificación

Desde sus inicios, la agricultura se ha ido beneficiando de una sucesión de desarrollos tecnológicos en busca de un aumento tanto en la productividad como en la eficiencia económica de los cultivos. Persiguiendo estos mismos objetivos, y añadiendo otros en auge como el respeto medioambiental y un mayor control sanitario de los alimentos, surge en la década de los noventa la Agricultura de Precisión basada en el manejo localizado. El manejo tradicional de los cultivos implica que los trabajos de fertilización, riego, control de mala hierba, etc. se realicen de manera uniforme, mientras que el nuevo planteamiento que proponen estas técnicas es el de una gestión más sostenible basada en las necesidades reales de insumos atendiendo a la variabilidad existente en cada una de las distintas zonas de una parcela de cultivo.

La posibilidad de identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad de las necesidades de los cultivos constituye el paso previo para la confección de un mapa de aplicación, entendiéndolo éste como eslabón intermedio que permite introducir la información necesaria en un equipo o implemento que trabaje modificando la cantidad de producto aplicado. Para ello la agricultura de precisión necesita de la recolección (Hu and Mo, 2011) y tratamiento de datos e información para efectuar una correcta toma de decisiones (Ferguson *et al.*, 2013).

En este sentido, el uso de la teledetección y los sistemas de posicionamiento por satélite (GNSS) para navegación han demostrado ser herramientas muy útiles en explotaciones agrícolas, permitiendo la georreferenciación de los elementos en parcela y la realización de tareas con un solape ajustado, consiguiendo un ahorro significativo de los insumos aportados. En la última década, y ayudado por el desarrollo en las técnicas de correcciones diferenciales, se han popularizado entre los agricultores y empresas de servicios los sistemas de guiado automático en maquinaria agrícola (ej. tractor), permitiendo una precisión centimétrica en operaciones agrícolas, incluso en condiciones de visibilidad reducida además de un ahorro del tiempo empleado (Pérez-Ruiz *et al.*, 2011).

Estas técnicas pueden tener una especial relevancia en la fertilización nitrogenada, que en el marco de la AP, requiere de equipos y máquinas capaces de realizar una variación de la dosis de aplicación en función de las necesidades. La maquinaria de aplicación variable, ya presente en muchos modelos de la mayoría de fabricantes, adolece de una lenta adopción por parte de los agricultores en principio achacable a su mayor precio pero fundamentalmente, a la incertidumbre que todavía genera la posibilidad de disponer de información precisa y fiable para la confección de un correcto mapa de prescripción. En este sentido, se hace necesaria una mayor coordinación entre las empresas que suministran imágenes tomadas desde drones o vehículos tripulados, empresas de servicio y gestión de explotaciones y distribuidores de maquinaria que son los encargados de materializar la aplicación. En este trabajo se presentan algunos de

los aspectos más relevantes para la puesta en práctica de estas técnicas de dosificación variable de abonos nitrogenados así como de la maquinaria y dispositivos electrónicos existentes en el mercado actual capaces de llevar a cabo dichas tareas.

El objetivo de este trabajo ha sido la adaptación de una abonadora centrífuga de discos convencional para la realización de abonado variable de forma automatizada haciendo uso de un monitor comercial para el control de líquidos, y una primera evaluación en condiciones reales de campo.

Materiales y Métodos

Para conseguir los objetivos propuestos es necesario conocer las características de la abonadora y los parámetros que caracterizan el abono que se quiere aplicar. Así mismo, es necesario disponer de un sistema de control y gestión que permita automatizar los movimientos de apertura y cierre del sistema dosificador de la abonadora. Para ello ha sido utilizado un sistema de control basado en Arduino.

Equipos empleados

El equipo de abonado empleado en el desarrollo de este trabajo ha sido una abonadora centrífuga de discos convencional (Marca SOLA, modelo D-903) (**Figura 1a**). Algunas de las características técnicas de este equipo son: equipo suspendido, frecuencia de giro de los discos, 675 r.p.m.; ancho de trabajo, de 15 a 24 m; número de palas por disco, 3; distancia entre los centros de los discos, 1140mm. En condiciones normales la regulación de caudal se hace de forma manual con una palanca, eligiendo la posición de la misma conforme a tablas del fabricante en función del abono escogido, el ancho de trabajo, la dosis en kg/ha y la velocidad a la que se pretende trabajar.

En este trabajo se ha modificado el sistema de conexiones de la abonadora y sus componentes para posibilitar la apertura y cierre automáticos de los dosificadores mediante actuadores lineales (**Figura 1b**), gestionados por el sistema de control.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Vista lateral de la abonadora utilizada y (b) actuador lineal para apertura y cierre

Además se ha utilizado un sistema comercial de control de 10 tramos, usado para aplicación de líquidos (TRIMBLE, modelo EZ-Boom). El equipo ha sido adaptado para trabajar con un abono sólido usando sólo 2 tramos, uno para cada cuerpo de los que dispone la abonadora. Además del equipo de control de tramos se ha usado un sistema de ayuda al guiado mediante GNSS para una conducción más eficiente del tractor,

reduciendo la posibilidad de dejar huecos o hacer solapes en la aplicación. Este mismo monitor nos posibilita la introducción de parámetros de ajuste y calibración (ancho de trabajo, posición de la antena, dosis a aplicar etc).

El sistema ha sido montado en un tractor de tracción simple, con ruedas delanteras bajas que entrega una potencia de 55,2 kW (John Deere, modelo 1840). La toma de fuerza puede girar a 540 o 1000 rpm y el régimen de par máximo es de 1200 rpm.

Como producto fertilizante se ha utilizado urea, con un contenido del 46% de nitrógeno y un 1,2% de Biuret (Fertiberia Andalucía). Se presenta en forma perlada de color blanco, duro y sin poros para evitar la acción de la humedad.

Hardware del sistema de control

El equipo comercial de control de líquidos utilizado, se basa en la lectura continua de la señal de frecuencia variable procedente de un sensor tacométrico de caudal usado como información de entrada. Proporciona dos señales digitales de salida: una para hacer que la válvula reguladora de caudal aumente el flujo de líquido destinado a la aplicación y otra para reducirlo. Cuando ambas salidas digitales se encuentran en su valor bajo, la válvula reguladora de caudal está correctamente ajustada a la dosis actualmente requerida.

Para el caso de la distribución de productos sólidos, no existe un medidor del caudal másico del abono que fluye por la trampilla de salida hacia los discos centrífugos para proporcionarnos la información de entrada. En su lugar se emplea la posición instantánea del actuador lineal con el que se realizan las operaciones de apertura/cierre de la trampilla dosificadora original. Esta posición está relacionada con el flujo másico de salida del abono según una ecuación empírica que previamente es necesario determinar.

Los actuadores lineales usados en ambos cuerpos de la abonadora incorporan un encoder doble, sensor que permite al sistema conocer su posición actual mediante el conteo en ambos sentidos (ascendente/descendente) de los pulsos de tensión que se generan durante su movimiento de apertura/cierre.

El sistema desarrollado permite leer continuamente la señal procedente de ambos encoders para mantener actualizados sus contadores de pulsos, que representan el grado de apertura de las trampillas dosificadoras. El valor de estos contadores es convertido continuamente, mediante la función de calibración obtenida, en una señal PWM (Pulse Width Modulation) de ancho de pulso proporcional al caudal másico actual, que posteriormente se transforma en una señal de frecuencia variable similar a la proporcionada por los sensores de caudal volumétrico, para ser enviada a la entrada del equipo EZ-Boom. Sus salidas digitales se emplean para activar los actuadores lineales.

Para la creación del sistema se ha utilizado una plataforma de hardware libre y código abierto (Arduino UNO R3) basada en una placa con un microcontrolador programable con un entorno de desarrollo propio. Se trata de una placa con el microcontrolador ATmega328 (memoria de 32 Kilobytes, 2kB de memoria SRAM y 1kB de memoria EEPROM), que dispone de 14 pines de entradas/salida (de los cuales 6 se pueden emplear como salidas de señal PWM), 6 pines de entrada analógica, conector USB, conector de alimentación, botón de reset y toda la circuitería impresa en la PCB (Printed Circuit Board).

La alimentación de la placa se puede realizar de dos formas: mediante conexión USB o con fuente de alimentación externa. Para alimentación externa se recomienda entre 6 y 20V, aunque no es recomendable trabajar con más de 12V puesto que el regulador de voltaje puede sufrir sobrecalentamiento. En este trabajo se ha utilizado la alimentación procedente del tractor, lo que nos entrega 12V, que son transformados mediante un regulador de voltaje en 7V para alimentación de la placa Arduino.

Una de las funciones principales del módulo Arduino es el control de los movimientos del actuador lineal que permite el cierre y apertura del sistema dosificador original de cada módulo de la abonadora. Para llevar a cabo estos movimientos se ha diseñado una placa de pruebas de prototipos donde se han montado cuatro relés (FINDER, modelo 40.52). Son relés miniaturizados para pinchar en la placa de pruebas. De los cuatro relés, dos son usados para activar el movimiento del actuador derecho de la abonadora (la activación de uno para la apertura y del otro para el cierre) y los otros dos realizan las mismas acciones en el actuador de la izquierda.

Caracterización granulométrica del fertilizante utilizado

La granulometría del abono tiene una gran influencia sobre la curva de calibración obtenida posteriormente. Se ha realizado un análisis que nos permite conocer la distribución del tamaño de las partículas. Para ello se tomaron 5 muestras de aproximadamente 500 g. El abono se hace pasar por 5 tamices con diámetros decrecientes de 5 mm, 2mm, 1mm, 0,6 mm y 0,4 mm, y es pesada la cantidad retenida por cada uno (**Figura 2**).



Figura 2. Muestras de Urea (arriba) y tamices empleados en la granulometría (abajo)

Ensayo de recepción y conteo de pulsos para el posicionado de los actuadores

Con este ensayo se pretende confirmar la correcta recepción por parte del sistema desarrollado, de los pulsos provenientes de los encoders con que van equipados los actuadores lineales de la abonadora, para las distintas posiciones del mismo, así como que el programa desarrollado respondía como contador de forma veraz, aumentando en los movimientos de apertura y disminuyendo en los cierre. Contabilizar los pulsos e incorporar esta información de manera apropiada al flujo del programa es muy importante para el correcto control del sistema dosificador. El valor instantáneo del

contador de pulsos de cada actuador deberá informar al software de su posición actual siendo este el origen del valor de caudal másico obtenido mediante la función de calibración, que será a su vez enviado en forma de frecuencia variable al equipo EZ-Boom.

El ensayo consistió en situar en 35 posiciones diferentes el recorrido de apertura/cierre de la trampilla dosificadora. Cada posición está definida por el valor numérico del indicador mecánico sobre la escala graduada original (de 0 a 20) de la máquina abonadora. Para cada posición se tomó la lectura del contador de pulsos proporcionado por el programa. Se realizaron 3 repeticiones siguiendo esta metodología.

Ensayo de calibración de la abonadora

El objetivo de este ensayo es la obtención de una función de calibración empírica que relacione el caudal másico de abono que salía por la trampilla de la abonadora con el grado de apertura de la misma, lo cual constituye el modelo matemático que será implementado en el programa de Arduino para obtener el ancho de pulso de la señal PWM en función de dicho grado de apertura.

Se realizaron 3 repeticiones en las que se obtuvo el caudal másico correspondiente a 10 posiciones del recorrido del actuador. Estas posiciones cubrían sólo la primera mitad del recorrido ya que se comprobó que mas allá de la mitad se originaban caudales fuera del intervalo usado normalmente por esta abonadora.

La posición del actuador fue determinada tanto por el indicador mecánico como por el número de pulsos del contador tal y como se describió anteriormente. La determinación del caudal másico real se realizó a partir de la medida experimental del peso de abono recogido durante un tiempo que se fijó en 194 s.

Ensayo de campo del equipo

Se realizaron dos tipos de ensayo. El primero consistió en ajustar distintos valores de dosis manualmente desde el equipo EZ-Boom mientras la abonadora avanzaba a una velocidad constante pero sin abono en la tolva. Durante el ensayo se registraba en un ordenador portátil el valor de los contadores de pulsos de los actuadores y la posición del indicador mecánico, mediante una cámara de video enfocada a dicho indicador. Su objetivo era comparar el caudal másico objetivo, resultado de la dosis programada y demás parámetros de funcionamiento, con el caudal másico estimado obtenido a partir de la función de calibración y las lecturas de contadores. El segundo consistió en la aplicación de urea a un cultivo de trigo en dos parcelas de 5 ha con dosificación variable en 2 niveles: 155 y 185 kg/ha. Su objetivo fue conocer la respuesta del sistema en condiciones reales de campo.

Resultados y Discusión

Ensayo de granulometría

La Tabla 1 nos muestra los valores de peso medio de los diferentes tamices utilizados en laboratorio. Como se puede observar en la columna de la derecha predominan los gránulos de 1 mm de diámetro medio, siendo su presencia superior al 90%, considerándose un abono perlado prácticamente uniforme.

Tabla 1. Valores medio de las 5 muestras observados de abono de aprox. 500 g

Diámetro	Quedan (g)	Pasan (g)	% Queda
5 mm	0,00	501,26	0,00
2 mm	33,72	467,54	6,74
1 mm	455,68	11,86	91,13
0,6 mm	9,48	2,38	1,89
0,4 mm	11,8	0,00	2,36

Ensayo de recepción y conteo de pulsos para el posicionado de los actuadores

La Ecuación 1 representa el número de pulsos de la abonadora frente a la posición del regulador según la escala numerada que incorpora la máquina, arrojándonos un coeficiente de determinación $r^2=0,99$. Esta ecuación se obtuvo mediante regresión lineal, a partir de las 3 repeticiones de las 35 posiciones del actuador ensayadas.

$$y = 18,35x + 23,86 \quad (1)$$

Donde las variables son:

y= valor del contador de pulsos

x= posición del regulador en unidades de la escala graduada que incorpora la abonadora.

Se observó que en cada posición se obtiene el mismo número de pulsos, indicando esto la estabilidad del sistema y que el código desarrollado para la aplicación mantiene el sincronismo de los pulsos al contar. Talha *et al.*, (2012) mostró resultados similares a los obtenidos en este trabajo, con la única diferencia de representar la distancia de apertura del actuador (y) en función de la dosis que sale de la tolva (kg/ha) (x). Conseguida la linealidad deseada para este estudio, se procedió a la calibración de la abonadora.

Ensayo de calibración de la abonadora

La Tabla 2 muestra los valores estadísticos de la masa de abono recogida en función del valor del indicador mecánico y del contador, para las 3 repeticiones realizadas. Conociendo el valor medio de la masa de abono obtenido en cada una de las posiciones y el tiempo que transcurre desde que se da la señal de apertura de la tolva y el cierre (194 s), podemos conocer el caudal de salida de la tolva.

Tabla 2. Valores estadísticos de la masa de fertilizante recogido (kg) en función de la posición del actuador.

Contador	Indic.	Media	Desv.	Mínimo	Máximo
	mec.		Típica		
27	0,1	5,28	0,03	5,24	5,32
41	1	13,23	0,18	13,09	13,43
57	2	25,03	0,14	24,90	25,18
73	3	34,06	1,63	32,27	35,47
89	4	52,72	0,12	52,58	52,81
111	5	75,47	0,03	75,44	75,50
131	6	98,13	0,17	98,02	98,26
153	7	124,95	0,39	124,67	125,22
180	8	162,15	0,83	161,55	162,73
206	9	203,95	0,39	203,67	204,23

La **Figura 3** muestra el caudal obtenido frente al valor del contador con un valor del coeficiente de determinación de 0,997, de lo que se extrae que el ajuste de esta curva a un polinomio de segundo grado resulta bastante adecuado.

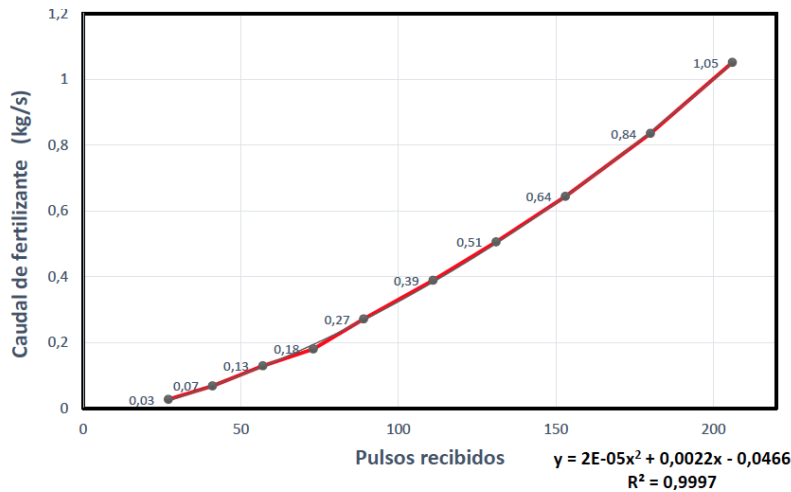


Figura 3. Representación gráfica de caudal obtenido frente al contador de pulsos y polinomio de ajuste.

Para conocer el grado de bondad de estos resultados se compara con las tablas realizadas por el fabricante de la abonadora y que se encuentran en el manual de uso del equipo. Si centramos la comparación en la Urea perlada, evidenciamos empíricamente que salen de la tolva unos 100 g más por segundo de lo indicando por el fabricante. Zhang et al., (2014) en el desarrollo de un sistema de abonado variable a través de sensores, también reporta diferencias de hasta un 5,17% más de fertilizante obtenido respecto a la cantidad pre-programada, con un coeficiente de variación que va desde el 0,35% al 2,67%. Los autores concluyen que, a pesar de este error, el prototipo reúne los requisitos para realizar correctamente un abonado variable.

Ensayo de campo del equipo

Los 2 tipos de ensayos de campo realizados (sin y con aplicación real de abono) mostraron resultados satisfactorios. En el primero, la desviación obtenida entre los valores de caudal másico objetivo y los estimados fueron despreciables aunque se observó un cierto retraso del actuador del módulo izquierdo respecto al derecho, lo cual es achacable al sistema que el programa emplea para gestionar las salidas digitales del equipo EZ-Boom, haciendo que el módulo derecho se actualice antes que el izquierdo. Los ensayos de campo mostraron un tiempo de respuesta de los actuadores para cambiar entre las dosis fijadas de 1,5 s, el cual resulta admisible para este tipo de trabajos.

Conclusiones

- La transformación de una abonadora convencional en un equipo capaz de aplicar un abono de forma variable y automática se ha realizado de forma satisfactoria con un trabajo eficiente. Además, el sistema desarrollado presenta una gran adaptabilidad a otras abonadoras convencionales que cumplan unas características simples, resultando un sistema de automatización universal fácil de utilizar.
- Existen diferencias entre los resultados en la calibración del abono y los datos ofrecidos por el fabricante. Esto pone de manifiesto la conveniencia de realizar ensayos propios con el fin de realizar una buena calibración bajo condiciones reales de trabajo.
- El uso de la plataforma Arduino ha permitido la automatización de los mecanismos necesarios a un precio económico y con muchas posibilidades de futuro.
- El tiempo de respuesta del equipo en aplicación variable es adecuado y está dentro del intervalo obtenido por otros autores.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado dentro de las actuaciones y con la financiación del proyecto "Sustainable agriculture in carbon arithmetics (LIFE AGRICARBON)" LIFE08ENV/E/000129.

Bibliografía

- Hu, S. & Mo, X., 2011. Interpreting spatial heterogeneity of crop yield with a proces model and remote sensing. *Ecol. Model.* 222 (14), 2530-2541.
- Ferguson, R., Shcmer, M., Shaver, T., Wienhold, B., et al. 2013. Variable rate irrigation and nitrogen fertilization of maize across landscape positions. 9th Europea Conference on Precision Agricultrure, Lleida, Cataluña (Spain).
- Pérez-Ruiz, M., Carballido, J., Agüera, J., Gil, J.A., 2011. Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. *Precision Agric.* 12, 639-652.
- Talha, Z., 2012. Deveopment of pneumatic system for granular fertilizer flow rate contro. Annual Conference of Postgraduate Sudies and Scientific Research.