

## Sistema de control de velocidad de sistema de expulsión de polvo por aire aplicado en la producción de arroz

### Speed control system of air dust ejection system applied in rice production

SÁNCHEZ-CORONADO, Eduardo Mael†\*, HERRERA-ARELLANO, María De los Ángeles, BAUTISTA-BAUTISTA, Alberto Nicolas y GALVÁN-CHÁVEZ, Jorge Moisés

*Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Departamento de Mecatrónica, Av. Universidad 350, C.P. 94910, Cuitláhuac Veracruz, México*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Eduardo Mael, Sánchez-Coronado* / ORC ID: 0000-0002-7593-4524, Researcher ID Thomson: H-1668-2018, arXiv Author ID: EduardoSanchez, CVU CONACYT ID: 308648

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *María de los Ángeles, Herrera-Arellano* / ORC ID: 0000-0001-8893-7882, Researcher ID Thomson: H-1779-2018, arXiv Author ID: Mariaherrer, CVU CONACYT ID: 630325

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Alberto Nicolas, Bautista-Bautista* / ORC ID: 0000-0002-7742-7200, Researcher ID Thomson: H-2039-2018, arXiv Author ID: alberto\_nicolas, CVU CONACYT ID: 662045

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Jorge Moisés, Galván-Chávez* / ORC ID: 0000-0003-1739-2971, Researcher ID Thomson: H-6028-2018, arXiv Author ID: JorgeGalvan, CVU CONACYT ID: 482786

Recibido Junio 30, 2018; Aceptado Noviembre 30, 2018

#### Resumen

El presente artículo muestra un sistema de control en lazo cerrado de velocidad angular para un equipo de extracción de polvo por medio de aire con aplicación a una planta de producción de arroz. El sistema de control consiste en la aplicación de una estrategia de control lineal en regulación para establecer el volumen de extracción de partículas de acuerdo con la cantidad de polvo en suspensión en el aire que aparece durante la transportación del arroz en distintas áreas operativas industriales. Se utiliza un sistema de cómputo mínimo para la adquisición de señales basado en Arduino para controlar el sistema de extracción de polvo. La programación del sistema de cómputo mínimo se realiza a través de un lenguaje de programación y entorno integrado de código abierto. El sistema tiene el propósito de garantizar la calidad de aire con respecto a regulaciones laborales mexicanas de salud laboral. Los resultados se muestran a través de la experimentación de un prototipo a escala de laboratorio el cual puede ser construido a escala industrial.

#### Sistema de control, Microcomputadora, Monitoreo

#### Abstract

The article presents a system of control in closed loop of angular speed for an equipment of extraction of dust by means of air with application to a plant of production of rice. The control system consists of the application of a linear control strategy in regulation to establish the volume of extraction of particles according to the amount of dust in the air that appears during the transportation of rice in the different areas of industrial operation. A minimum computer system is used for the data-acquisition based on Arduino to control the dust extraction system. The programming of the minimum computer system is done through a programming language and an integrated open source environment. The system is designed to guarantee air quality with respect to Mexican labor health standards. The results are shown through the experimentation of a laboratory-scale prototype that can be built on an industrial scale.

#### Control system, Microcomputer, Monitoring

**Citación:** SÁNCHEZ-CORONADO, Eduardo Mael, HERRERA-ARELLANO, María De los Ángeles, BAUTISTA-BAUTISTA, Alberto Nicolas y GALVÁN-CHÁVEZ, Jorge Moisés. Sistema de control de velocidad de sistema de expulsión de polvo por aire aplicado en la producción de arroz. Revista de Cómputo Aplicado. 2018, 2-8: 12-18.

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: eduardo.sanchez@utcv.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En el sector industrial de rubro alimentario pueden ser encontradas empresas en donde el producto que comercializan tiene forma de grano, en particular, la producción del grano de arroz alimenticio involucra la recolección, transportación, manejo y almacenamiento, con ello se necesitan procedimientos, instrumentación, herramientas y espacios adecuados para el manejo del grano (Sharma, 2013). Comúnmente, dentro de aquella planta industrial en donde la materia prima posee forma de grano es concentrada en grandes volúmenes dentro de un espacio cerrado para su tratamiento (Deb, 2010).

La materia prima granulada a diferencia de la materia prima alimenticia de mayor dimensión volumétrica, en esta última es posible manipularla por pieza unitaria, en donde puede ser empleado algún mecanismo hidráulico, neumático o robótico evitando la necesidad de su alta concentración en espacios reducidos.

El procesado industrial del arroz inicia en los campos agrícolas desde su plantación para su posterior recolección, transporte y el procesado (Ajala, 2015) antes de llegar a su forma final para el consumidor, de esta manera el grano de arroz recolectado requiere de su tratamiento para la separación de partículas e impurezas, lo anterior involucra retirar las distintas cascaras que lo envuelven para poder obtenerlo en su forma de producto final apto para su consumo.

Para que el grano de arroz se transporte hacia las distintas etapas de su procesado como por ejemplo la del descascarillado es necesario hacerlo a través de bandas transportadoras (Thongsanit, 2015), puesto que las cascaras del grano son de bajo peso; el mínimo flujo de aire en el espacio productivo provocado de manera natural o artificial causa su dispersión en la atmosfera, en consecuencia genera la acumulación y saturación en el aire de las cascaras suspendidas, con ello las condiciones de seguridad, ambiental e higiénica para los trabajadores de la planta se convierte en un problema de riesgo laboral dentro de la empresa (Batsungnoen, 2011).

Un ambiente atmosférico saturado de partículas de polvo de arroz dificulta la visibilidad del área laboral, lo anterior puede el motivo de accidentes laborales a causa de caídas, choques con obstáculos, así como dificultad en localizar las salidas de emergencia en caso de contingencia donde se requiera la evacuación del área operativa, aunado a ello puede traer consigo afectaciones directas a la salud del trabajador relacionadas con enfermedades respiratorias, visuales y/o auditivas (Tripathi, 2015).

Hay distintos métodos en las arroceras para el manejo de las partículas saturadas en el ambiente en forma de polvo suspendidas en el aire, uno de ellos consiste en la extracción de partículas usando sistemas de extracción por aire (Ogbeide, 2015), lo anterior suele ser efectivo debido al bajo peso y volumen de las partículas de polvo desprendidas por los granos de arroz para su expulsión fuera del área operativa.

Los elementos principales de los sistemas de extracción de polvo son ventiladores, en donde las aspas están dispuestas en una determinada posición para generar una corriente de aire de succión, con ello captan y direccionan el polvo del arroz suspendido en el aire.

La operación de ventiladores debe ser permanente durante la operación de los sistemas de extracción, en consecuencia, debe ser considerado dentro del diseño el consumo eléctrico y su programa de mantenimiento con el fin de asegurar el correcto funcionamiento operativo del sistema.

Considerando lo anterior, para que la producción de arroz sea rentable se debe buscar que el costo del consumo eléctrico, así como los costos de mantenimiento del sistema de extracción de polvo sean aceptables, a causa de ello surge la necesidad de utilizar estrategias de control automático capaces de regular la operación eficiente de los equipos y/o sistemas. Diversos sistemas de control en lazo cerrado para la regulación de sistemas de extracción de aire de polvo se basan en estrategias "On-Off",

Con ello se demanda que el actuador opere algunas veces a su máxima capacidad aunque en ocasiones es innecesario, además, la activación del actuador se hace de forma conmutada una vez que la variable controlada o de salida ( $y(t)$ ) presenta una mínima diferencia en magnitud con respecto a la señal de referencia ( $r(t)$ ), además provoca un régimen de operación severo en los actuadores al pasar de inoperativos a operativos de manera cercanamente instantánea, por otra parte la demanda de energía eléctrica con esta manera de operación genera descompensaciones en el suministro eléctrico afectando a otros equipos (Abhyarthana, 2013) conectados.

Una alternativa a la estrategia de control “On-Off” es la del control “PID” (Proporcional Integral Derivativo), dicha estrategia de control es capaz de regular proporcionalmente la acción del actuador del sistema en lazo cerrado en forma proporcional a la dinámica del error ( $e(t)$ ), el error es producido por diferencia entre la señal de referencia y la salida de la planta, además, es útil conocer el modelo matemático de la planta para optimizar la elección de sus parámetros para una regulación efectiva (Barboza, 2017).

Con una estrategia “PID” el actuador opera en un régimen de trabajo único y estrictamente necesario al requerido para la corrección del error de salida de la planta, con ello, solo se requiere un consumo eléctrico acotado para que la variable controlada alcance la señal de referencia, así mismo la estrategia de control elimina la operación conmutada del actuador evitando su desgaste prematuro, con ello se reducen tiempos de paro de planta a causa de mantenimiento correctivo, lo anterior provoca la eliminación de pérdidas económicas así como un ahorro en la demanda de horas-hombre; además garantiza la consigna de volumen de producción de arroz propuesto al inicio del proceso.

A continuación, se presenta el diseño del sistema de control bajo una estrategia de control “PID” aplicable para la regulación de la velocidad angular de ventiladores en sistemas de extracción de polvo para la producción de arroz, la finalidad del sistema es mejorar las condiciones de operación, seguridad e higiene laboral, aunado a ello se pretende ejecutar una operación del sistema de manera sustentable y rentable para la planta de arroz.

El presente artículo se encuentra dividido por 3 secciones principales: en el Desarrollo se realiza una descripción física de la planta, así como de los parámetros de los componentes del sistema, además se aborda el desarrollo del sistema de control, por otra parte, en la sección de Resultados se presentan los datos presentados por la experimentación de sistema, finalmente en la última sección se presentan las Conclusiones obtenidas del trabajo.

## Desarrollo

### Planta

El sistema diseñado de experimentación a escala de prototipo consiste en una cámara cerrada cuyas dimensiones son de 1m de alto, 0.5m de alto y 0.3m de ancho, la cámara de pruebas está acondicionada con un sistema de tuberías de policloruro de vinilo (PVC) de 1 pulgada de diámetro, el sistema de tuberías es el encargado de ingresar y expulsar el polvo de arroz en suspensión que se haya dentro de la cámara de pruebas, con ello se pretende establecer un escenario productivo real dentro de una arrocera. La cámara de pruebas diseñada se muestra a continuación en la Figura 1.



**Figura 1** Cámara de prueba  
Fuente: Elaboración Propia

Cabe destacar que el sistema de tuberías está conectado a un ventilador el cual incorpora un motor de corriente directa que se alimenta con una magnitud de 12V, la orientación de las aspas del ventilador (considerado como el actuador del sistema de control) están dispuestas para generar una corriente de aire de extracción.

Por otra parte, para realizar la medición de la concentración de polvo de arroz en suspensión dentro de la cámara se utiliza el sensor de polvo: GP2Y101AU0F, la finalidad del sensor consiste en proveer la información de la magnitud de la variable controlada en línea dentro del sistema de control.

El sensor mencionado anteriormente y de acuerdo con el fabricante puede alcanzar una sensibilidad de detección de polvo típica de  $0.5V/\frac{mg}{m^3}$ , de esta manera el sensor debe ser operado de forma ininterrumpida para medir la calidad del aire dentro de la cara de prueba.

La detección de polvo llevada a cabo por el sensor se realiza de manera óptica a través del fenómeno físico óptico de reflexión de luz, el fenómeno se realiza directamente sobre las partículas de polvo de arroz a través de un diodo emisor de infrarrojos (IRED) y un fototransistor.

La respuesta del sensor se basa conforme a la densidad y concentración de polvo dentro de una frecuencia de trabajo de  $10ms$ , es importante mencionar el consumo eléctrico de operación en términos corriente es bajo, siendo este de  $11mA$ . A continuación, en la Figura 2 se presenta una imagen del sensor GP2Y101AU0F utilizado.



**Figura 2** Sensor de polvo  
Fuente: Elaboración Propia

Como parte del diseño, también se incorpora un sistema de adquisición de las señales basado en una tarjeta Arduino UNO, se hace uso de entradas analógicas para registrar la respuesta del sensor, por otra parte, a través de los puertos de salida PWM (Modulación por Ancho de Pulso) se envía la señal de control hacia el motor del ventilador para regular la velocidad de extracción de polvo de arroz contenido dentro de la cámara de prueba.

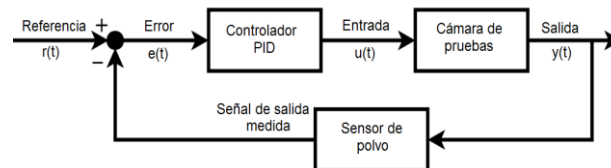
## Sistema de control Proporcional Integral Derivativo

El tipo de sistema de control propuesto es de lazo cerrado bajo una configuración por retroalimentación en modo de regulación, de esta manera se realiza una regulación de la velocidad de extracción de polvo de arroz a través de la operación y control del ventilador de la planta considerándose dicha variable dentro del sistema como la manipulada, por otra parte, la medición de la concentración de polvo en la cámara de prueba realizada por el sensor se considera como la variable controlada utilizando la unidad de medida:  $mg/m^3$ .

Dentro del sistema de control regulatorio el ventilador tiene la capacidad de variar su velocidad angular en todo momento durante su operación, su magnitud depende de la atmosfera de polvo de arroz concentrado dentro de la cámara de prueba, para ello la velocidad está determinada por la señal que determina y envía el controlador hacia el actuador, lo anterior se realiza de acuerdo a la magnitud de la señal de error generada por la diferencia entre la referencia y la salida dinámica del sistema, esto se define matemáticamente como:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

En la Figura 3 se presenta gráficamente de manera simplificada por bloques el sistema de control en lazo cerrado por retroalimentación desarrollado.



**Figura 3** Sistema de control PID en lazo cerrado  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, como parámetro de referencia se toma en cuenta la Norma Oficial Mexicana de Salud Ambiental para clasificar el nivel de calidad del aire atmosférico respiratorio, para ello a través de la Tabla 1 se establecen los criterios de la clasificación.

$mg/m^3$	Calidad del aire
0.06	Buena
0.12	Regular
0.22	Mala
0.31	Muy mala
mayor a 0.32	Extremadamente mala

**Tabla 1** Clasificación de la calidad del aire

Fuente: *Elaboración Propia*

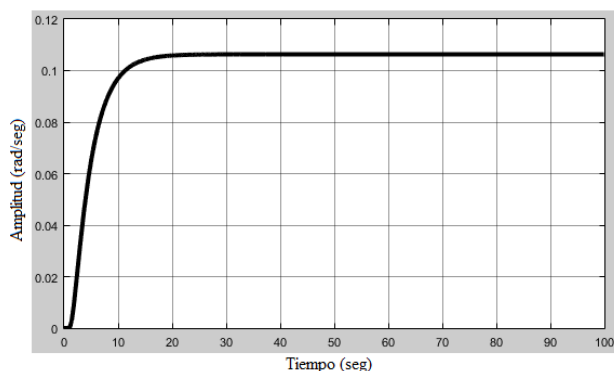
La información de la Tabla 1 permite establecer los parámetros de diseño de consigna del sistema de control para el sistema de extracción de polvo de arroz, con ello se establece el mantener dentro de la cámara de prueba una calidad de aire clasificada como “Buena” considerando una calidad “Regular” como una desviación severa en el sistema.

## Resultados

En base a la experimentación y a la caracterización con diferentes condiciones de operación del actuador es posible aproximar un modelo matemático lineal para conocer la dinámica natural del mismo, para ello el motor puede ser modelado a través de la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{0.0084}{s^2 + 1.62s + 0.395} \quad (2)$$

Con ello, y una vez obtenido el modelo matemático se realiza una validación a través de la experimentación física con la finalidad de conocer la respuesta dinámica del motor, la validación consiste en verificar el funcionamiento del actuador en lazo abierto, es decir sin ningún sistema de control. A continuación, se presenta el Gráfico 1 en donde se muestra el resultado obtenido por la operación del actuador en lazo abierto.



**Gráfico 1** Dinámica del sistema en lazo abierto

Fuente: *Elaboración Propia*

Una vez conocida la dinámica del sistema al obtener sus parámetros, así como su respuesta en lazo abierto, el sobrepulso y el margen de fase ahora es necesario determinar las ganancias del controlador PID, dichas ganancias deben asegurar una respuesta dinámica suave de la planta ante desviaciones y perturbaciones de la variable controlada con respecto a la señal de referencia.

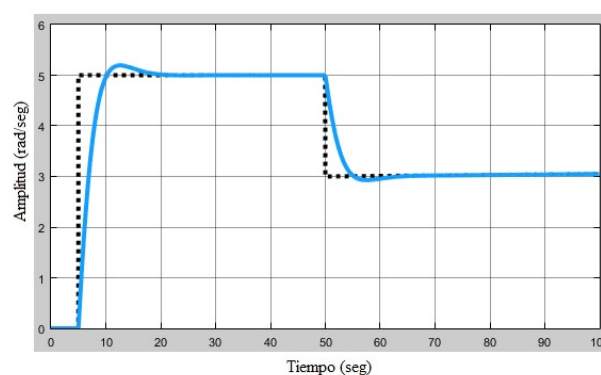
Para ello, es se lleva a cabo el cálculo de las ganancias del controlador, para este trabajo se utiliza el método de sintonización de controladores PID “Ziegler-Nichols”, de esta manera en la Tabla 2 se presentan los valores de las ganancias obtenidas.

Ganancias PID	Valor
Ganancia P (Kp)	88.1
Ganancia I (Ki)	30.4
Ganancia D (Kd)	46.6

**Tabla 2** Parámetros del controlador PID

Fuente: *Elaboración Propia*

Una vez implementado el controlador PID con sus respectivas ganancias proporcional, integral y derivativa se procede a su experimentación para llevar a cabo su validación, para ello se establece una señal de referencia de tipo escalón en el sistema de control de lazo cerrado, para ello se demanda que la señal de referencia cambie en dos ocasiones con la finalidad de conocer la respuesta dinámica transitoria en regulación de la variable controlada, lo anterior se muestra a continuación en el Gráfico 2.



**Gráfico 2** Regulación de la variable controlada

Fuente: *Elaboración Propia*

Como se aprecia en el Gráfico 2 la línea segmentada corresponde al valor de la magnitud de la señal de referencia, esta última describe los cambios en magnitud que se mencionaron anteriormente.

Para ello en el instante de tiempo  $t = 5\text{seg}$  la señal toma un valor de  $r(t) = 5\text{rad/seg}$ , posteriormente en el instante  $t = 50\text{seg}$  toma un valor de  $r(t) = 3\text{rad/seg}$ , en el mismo gráfico, la línea continua muestra la respuesta dinámica en el tiempo de la variable controlada.

Como puede ser visto la variable controlada efectúa un adecuado seguimiento del valor de la señal de referencia con un tiempo de alcance corto, gracias a la adición de la ganancia integral del controlador se elimina el error en estado estacionario natural, aunado a ello el sistema presenta un ruido despreciable que aparece por la acción de ajustarse alrededor del valor de la magnitud de la señal de referencia.

Una vez sometiendo al sistema bajo diferentes escenarios de operación se determina que manteniendo el valor de la variable controlada entre valores de  $2.9\text{rad/seg}$  y  $5.2\text{rad/seg}$  es capaz de mantener dentro de la cámara de prueba una atmosfera con una baja concentración de polvo de arroz, que de acuerdo con la Tabla 1 corresponde a una calidad de aire establecida en "Buena".

## Conclusiones

El artículo mostró el diseño y los resultados obtenidos de un sistema de expulsión de polvo de arroz por aire que involucró la construcción de una planta a escala de prototipo acompañada del diseño de un sistema de control en lazo cerrado utilizando una estrategia PID.

El sistema demostró que una estrategia de control Proporcional Integral Derivativa al error genera un desempeño de control suave que evita poner a su máxima capacidad de funcionamiento el actuador, con ello el desgaste del actuador se reduce notablemente reduciendo la posibilidad de paros de planta de emergencia a causa de fallas abruptas en el actuador.

Con la estrategia de control diseñada el consumo eléctrico requerido por la acción del actuador y del sistema en general evita una alta demanda eléctricas, además con ello se tiene la ventaja de evitar sobrecorrientes y/o picos sobre la instalación eléctrica.

Es importante destacar que la sintonización del controlador para determinar las ganancias proporcional integral derivativa del controlador permitió que la respuesta dinámica de la variable controlada tenga una convergencia rápida al valor de referencia asignado, con la ventaja de añadir la ganancia integral para elimina el error en estado estacionario natural del sistema.

Con los resultados mostrados el sistema demuestra tener la capacidad de mantener condiciones ambientales óptimas para ser llevada a las arroceras en beneficio de salud y seguridad para los operadores, adicionalmente el sistema también efectuó una reducción acústica de operación al mantener al actuador únicamente a una velocidad necesaria y efectiva de trabajo. Así mismo, se deduce que ante la necesidad de desplazar el arroz en sus diferentes etapas del proceso este puede ser llevado a cabo de manera continua, con ello se descarta la necesidad de dejarlo en reposo para el asentamiento del polvo acelerando en el tiempo su producción.

Con lo anterior los operadores pueden llevar a cabo sus actividades sin ninguna demora, o sin exponerse a riesgos de seguridad laboral y de salud. Finalmente, para un trabajo futuro se toma en cuenta la consideración de llevar a cabo modelado matemático no lineal para proponer el diseño de una estrategia de control no lineal y cubrir con una dinámica de operación más amplia.

## Referencias

- Abhyarthana, B., & Umesh, P. (2013). Implementation of On/Off and PID controller using TCP protocol based on virtual instrumentation. *International Journal of Advanced Computer Research*, 3(1), 22-26.
- Ajala, A., & Gana, A. (2015). Analysis of challenges facing rice processing in Nigeria. *Journal of Food Processing*, 2015, 1-6.
- Barboza, J., Aguirre, L., Velázquez, D., & Nuñez, G. (2017). Diseño de un controlador para una celda de envasado modelada con Redes de Petri. *Revista de Prototipos Tecnológicos*, 3(10), 44-49.

Batsungnoen, K., & Kulworawanichpong, T. (2011). Effect of dust Pprticles in local rice mills on human respiratory system. *World Academy of Science, Engineering & Technology*, 80, 421-426.

CDMX, A. (s.f.). *Calidad del aire*. Obtenido de <http://www.aire.df.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27Yw==>

Deb, S. (2010). The grain management in Andhra Pradesh: Scope and reforms. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 65(2), 203-227.

Ogbeide, E. (2015). Design and construction of A dust extractor machine. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 2(10), 2765-2768.

Praveena, M., Clevin, R., Ghattargi, C., Dorle, A., & Lalitha, D. (2013). Effects of occupational dust exposure on the health status of Portland cement factory workers. *International Journal of Medicine and Public Health*, 3(3), 192-196.

Sharma, V., Giri, S., & Rai, S. (2013). Supply chain management of rice: A rice processing company's perspective. *International Journal of Managing Value and Supply Chains*, 4(1), 25-36.

Singha, K., & Mishra, S. (2015). Sustainability of rice cultivation: A study of manipur. *Rice Research*, 4(1), 1-4.

Thongsanit, P., Aphaiphak, P., Ard-ong, R., & Kongsattra, M. (2015). The dust fall in the rice mill factory and community area. *International Conference on Biological, Civil and Environmental Engineering*, (págs. 14-16). Bali.

Tripathi, A., Singh, N., & Singh, R. (2015). Analysis of environmental factors in rice mill workers of Uttar Pradesh, India. *G - Journal of Environmental Science and*, 2(5), 77-80.