

Recibido 27 Septiembre 2018, aceptado 4 Diciembre 2018, fecha de publicación 16 Diciembre 2018

ISSN 2448-7775

Análisis y diseño de la automatización del proceso de secado de piezas en celdas de manufactura

A. HERNÁNDEZ- MENÉNDEZ¹, F. ALAFFITA HERNÁNDEZ², J.C. OLIVARES GALVÁN³

¹Universidad de Sotavento A. C., Coatzacoalcos, Veracruz, México.

²Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos, Veracruz, México.

³Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, CdMx, México.

alexandrom@hotmail.com

alex_alafita@hotmail.com

jolivaresgalvan@gmail.com

RESUMEN Este trabajo estudia y analiza la aplicación de la energía ultrasónica para el secado sobre un sistema transportador automático de piezas manufacturadas considerando distintos escenarios de temperatura, particularmente en niveles industriales donde la energía ultrasónica se caracteriza como una herramienta limpia y eficiente para mejorar procedimientos clásicos o una opción para innovaciones de nuevos procesos. Los valores estadísticos obtenidos en el proceso de secado manual supera al proceso automático sobre una pieza y en términos de producción masiva de piezas el sistema automático supera al método manual, con un arreglo de 16 sensores y un secado de manera continua.

PALABRAS CLAVES Transductor, ultrasónico, frecuencia, piezoeléctrico, ingeniería y tecnología, tecnología industrial, maquinaria industria.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas convencionales de secado se realizan por medio de aire comprimido que producen colisiones entre las piezas manufacturadas o por calor que cambia algunas de las propiedades de los metales y que principalmente presentan alguna decoloración en su materia prima.

En la industria, la energía ultrasónica se ha aplicado desde mediados del siglo XX, pero debido a que la investigación de esta tecnología en particular implica una inversión económica significativa, sólo un número reducido de aplicaciones se han introducido de manera comercial. Durante los últimos años esta línea de investigación ha retomado un auge, renovando el interés por la aplicación ultrasónica en procesos farmacéuticos, industria alimentaria, química, etc., convirtiéndose en una tecnología limpia y eficiente para el desarrollo de procesos de secado [1].

La aplicación de la energía ultrasónica además de sus beneficios de secado, permite mejorar la eficiencia, minimizar el impacto al medio ambiente y en generar ahorro de energía para una mejor sostenibilidad.

Actualmente se emplea la energía ultrasónica para la

limpieza o lavado de medios sólidos flexibles, como textiles y especialmente adecuado para limpiar de forma continua materiales. La energía ultrasónica se aplica a los materiales a lavar mediante placas vibrantes a flexión, que se ponen en contacto directo con los materiales a lavar, estos tienen que estar sumergidos en una capa superficial de líquido [2].

El empleo de la energía ultrasónica a diferentes frecuencias permite la medición del gradiente de tensión basado en tecnología ultrasónica y permite medir la onda longitudinal de refracción crítica (LCR) en base a la teoría de la elasticidad [3]. El estudio muestra que el método LCR puede utilizarse para medir la tensión residual rápidamente y con precisión, y cambiando la frecuencia del anillo puede realizar la detección rápida del gradiente de tensión en una determinada profundidad. Este nuevo método mide el estrés residual de los componentes basado en la onda longitudinal de refracción crítica.

En base a una mejor eficiencia en la soldadura se aplica la energía ultrasónica automatizando el diseño de la soldadura con un nuevo tipo de paquete de dosis unitaria con una guía especial proporcionando incluso colocación de las extensiones. La ventaja de esta dosis unitaria, es que hasta que el producto sea consumido, tiene la garantía de un sellado hermético [4].

Otra aplicación de la energía ultrasónica basado en las diferencias frecuencias es el micro electroformado, el cual es ampliamente utilizado para la fabricación de dispositivos de micro metal en el Sistema Micro Electro Mecánicos (MEMS). Sin embargo, existe el problema de poca fuerza de adherencia entre la capa de micro electroformado y el sustrato. Esto influye drásticamente en la precisión dimensional del dispositivo. Para resolver este problema, el método de agitación ultrasónica se aplica durante el micro proceso de galvanoplastia. Para medir el efecto de la agitación ultrasónica en la fuerza de adherencia micro galvánica, se realizaron pruebas empleando diferentes energías ultrasónicas (100 W, 150 W, 200 W, 250 W) y diferentes frecuencias ultrasónicas (40 kHz, 80 kHz, 120 kHz, 200 kHz). Se analizaron los efectos de la energía ultrasónica en conjunto con la frecuencia ultrasónica en el proceso de micro electroformación, aplicando el método de polarización y con esto modificar el actual método de impedancia de corriente alterna (c.a.). Los resultados experimentales indican que la agitación ultrasónica puede disminuir el potencial de polarización y aumentar el proceso de transferencia de carga. Generalmente, la superficie de contacto interna se aumenta y el esfuerzo de compresión se reduce. Entonces la fuerza de adherencia es mayor [5] lo que contribuye a la fabricación de la capa galvánica con gran resistencia a la adherencia.

Se desarrolla un sistema automatizado que permite implantar un medio continuo del proceso de secado de piezas, logrando reducir los tiempos, el costo, evita los golpes entre piezas maquinadas, disminuye la peligrosidad por el uso o contacto de solventes en los trabajadores, genera un área de trabajo limpia y segura, como consecuencia el sistema propuesto mejora la productividad de la empresa reduciendo costos de producción y asegurando la demanda de piezas.

A. MATERIALES

Los cuatro materiales piezoeléctricos más empleados que cubren la mayoría de los principales requisitos que se plantean en el ámbito comercial son:

- Tartrato de sodio y potasio (Sal de Rochelle).
- Fosfato hidrógeno de amonio (ADP).
- Titanato-circonato de plomo (PZT), cerámica.
- Cuarzo.

II. FACTORES DE DISEÑO DEL TRANSDUCTOR

Para seleccionar el modo de trabajo del transductor de acuerdo con su radiación ultrasónica, se analizaron varios modos de resonancia del transductor que permita pulverizar el agua, observando cómo se comporta su distribución de desplazamientos y tensiones en el transductor en su frecuencia de trabajo.

Tomando en cuenta el límite de tensión de fatiga del material y la capacidad de energía irradiada por la placa, se empleó un transductor cerámico de 20mm de diámetro, un consumo de potencia de 1.5 - 3 W, con un consumo de tensión DC de 3.7 - 12V, con frecuencias de 113MHz/2.4MHz/1.7MHz/108kHz

con controlador de +/- 3 kHz, con un tiempo de vida aproximadamente mayor a 3000 h (de acuerdo a las especificaciones del fabricante), como se muestra en la Fig. 1. Características del transductor:

- Alta eficiencia de conversión
- Baja impedancia estable de forma de onda
- Baja pérdida dieléctrica
- Alta resistencia a la corrosión
- Gran cantidad de atomización (pulveriza el agua).

El análisis del transductor en la banda transportadora, y todo el sistema para el secado involucra un elevado precio computacional, de acuerdo con las dimensiones del sistema, para obtener un modelo adecuado, se determinaron consideraciones secundarias como [6]: a) Que la distribución de la presión del aire sea simétrica en relación con el eje central longitudinal y transversal; b) Que la deformación de la placa sea simétrica en relación con el eje transversal y al eje longitudinal.

Las ecuaciones fueron derivadas de las ecuaciones acústicas de la onda [7]: a) El fluido se determina por las estimaciones de presión y temperatura; b) El fluido no es viscoso; c) La velocidad del fluido es cero y no hay convección; d) La variación de la densidad del aire es despreciable; la compresión del líquido es termodinámicamente reversible y adiabático.

Para los cálculos de la propagación de las ondas se contempló la ecuación de Helmholtz (1) y para calcular la vibración del transductor se empleó la teoría elastodinámica (2) que se utilizó y calculó en la investigación [6].

$$\nabla^2 P + K_e^2 P = 0 \tag{1}$$

$$-\rho_s \omega^2 \vec{U}_s = \vec{\nabla} \sigma \tag{2}$$

Dónde ∇ es el operador laplaciano, P es la presión acústica [Pa], K_e es el número de onda compleja [m^{-1}], ρ_s es la densidad del sólido [kg/m^3], ω es el coeficiente de atenuación [dB/m], \vec{U}_s es el desplazamiento del campo [m], y σ es la tensión elástica [Pa].

III. SISTEMA DE GENERACIÓN DE ALTA FRECUENCIA

Para generar un campo acústico estacionario de alta frecuencia ultrasónica, se empleó la placa PCB circuito de frecuencia de búsqueda automática, como se muestra en la Figura 2.

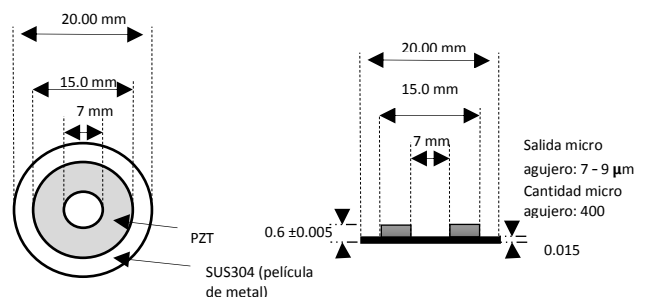


Fig. 1. Especificaciones del transductor cerámico.

Las especificaciones de la placa PCB:

- Módulo atomizador micro ultrasónico.
- Aplicaciones para juguetes de gama alta y micro zumbido.
- Compatible con Xbox, Kinect, play station.
- Voltaje de operación: 3 – 12 VDC.
- Consumo de potencia de 1.5–3 W (operación normal 1.5 W).
- Sin marca.
- Manufacturado en China.
- Soporta transductores de 16 – 20 mm.
- Frecuencia de salida: 113 ± 3 kHz.
- Capacitor de $3000 \text{ pF} \pm 15 \%$.
- Tensión nominal: 70 V (máximo).
- Tipo de salida: frecuencia.

Los componentes que integran la placa PCB que genera la frecuencia de salida para el transductor piezoeléctrico se muestra en la Tabla I.



Fig. 2. Placa PCB WG3166A.

TABLA I. ELEMENTOS USADOS EN LA PLACA PCB.

Referencia	Descripción	Características principales	Cantidad
D1 SS14	Diodo rectificador Schottky	Gama de voltaje = -20 a 80 V, 1 ^a	1
U1 78L05	Regulador de voltaje positivo	Vinmax=20 io =70 mA Vomax=5.25 Vi= 3 – 40 V	1
U2 MC34063A	Control del convertidor DC a DC	Ioswitch= 1.5 A Frecuencia de operación hasta 100 kHz	1
Q1 1N60C	Diodo de conmutación	50 V 3A 2-pin	1
U3 Integrado de 8 pines Desconocido	Generador de pulsos de alta frecuencia	Desconocidas	1

IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Se diseñó el experimento en una rejilla metálica de asbesto (contiene las mismas dimensiones que tiene la banda transportadora metálica) y se delimitó un área de 3.24 cm^2 donde se vertió una cantidad de agua de 0.5 ml como se muestra en la Fig. 3.

La frecuencia central de trabajo del generador de frecuencia en base a los datos de fabricante es de 113 ± 3 kHz y al someterlo a pruebas de secado la frecuencia de salida decae. Como se observa en la Tabla II.

A. PRUEBA DE SECADO

Para realizar la prueba de secado a través de la malla de la banda transportadora se realizaron tres escenarios de pruebas diferentes, donde se manipuló la temperatura promedio del agua a 29.15°C , 18.8°C y 62.5°C , con el propósito de comprobar el buen funcionamiento del transductor piezoeléctrico.

En la Fig. 4 se observa que el transductor tiene mayor eficiencia de secado en la temperatura alta (62.5°C) en comparación con las otras dos temperaturas.

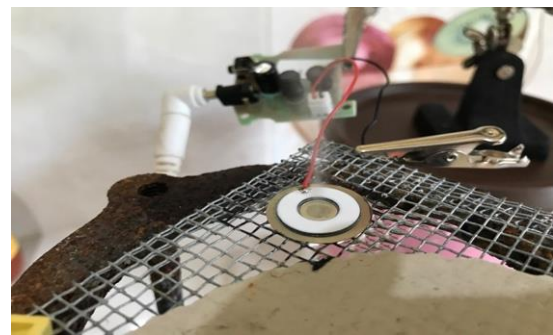


Fig. 3. Pulverización del agua.

TABLA II. RESULTADOS EN LA FRECUENCIA DE SALIDA.

	Frecuencia base al fabricante (kHz)	Frecuencia de salida experimental (kHz)	% Error
Frecuencia central	113	103.7	8.9
Frecuencia superior	116	106.7	8.71
Frecuencia inferior	110	100.7	9.23

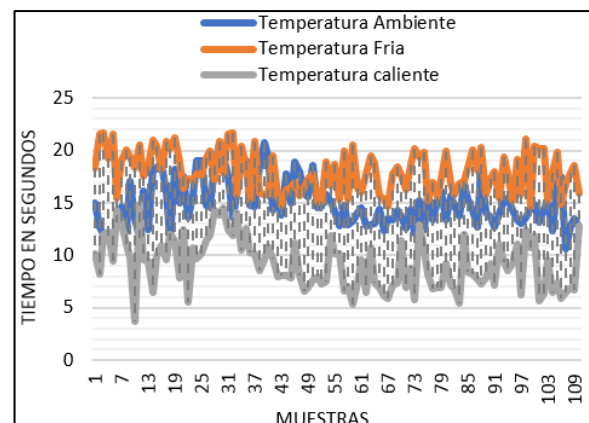


Fig. 4. Gráfica comparativa de tiempo de secado ultrasónico.

En la evaluación estadística se encontró diferencias significativas en el tiempo de secado, y que dependen de la habilidad de la persona, se analizó el secado de una pieza como se muestra en la Fig. 5 y la Tabla III, donde se concluye y visualiza la diferencia entre ambos métodos.

Se validaron los resultados estadísticos como se observa en la Fig. 5, para una sola muestra donde el tiempo de secado manual es menor al secado automático, en el diagrama se nota una distribución compacta en el secado manual y va a depender mucho de la habilidad del operador, la mediana del secado manual es 4 segundos, con casos aislados de 6 segundos. En el secado automático también presenta una distribución compacta y presenta una mediana igual a 14.6 segundos y con dos casos aislados de 20.8 segundos. Pero con el diseño de una matriz de 16 sensores se secarán 16 piezas en un promedio de 14.97 segundos como se observa en la Tabla III, mientras que de modo manual secar 16 piezas tomaría un tiempo promedio de 63.68 segundos y el operador solo puede manipular un máximo de 5 piezas al mismo tiempo para su secado, sin provocar vibraciones y colisiones entre las piezas.

Haciendo una comparación entre el método manual y el automático en un promedio de 16 piezas se observa que el tiempo con el método manual es de 63.68 segundos y 14.6 segundos con el tiempo del método automático, notándose claramente una eficiencia de 4.56 veces más rápido el proceso de secado, con una reducción de un 22.93 % en el tiempo de secado de las piezas.

Después de las pruebas de secado, se desarrolló el bosquejo del sistema de banda transportadora en sistema CAD (SolidWorks), fabricando de manera virtual el sistema de transportación de las piezas manufacturadas.

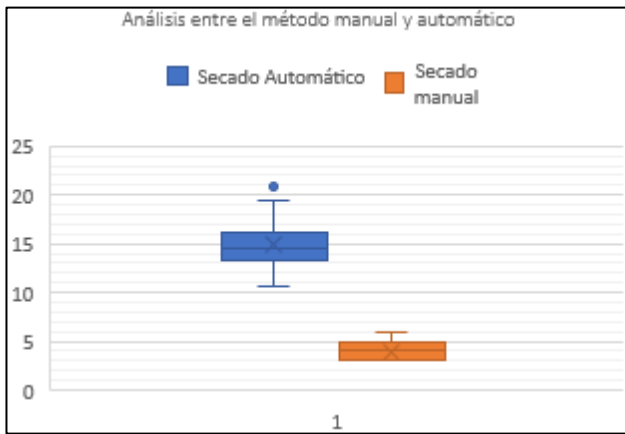


Fig. 5. Gráfico que muestra la variabilidad en los métodos comparados.

TABLA III. RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE VALIDACIÓN.

Pieza	Modo de prueba	Vol. de agua por pieza	Método de secado	Piezas	Tiempo promedio de secado
Boquilla de acero	Manual	0.5 ml	Aire comprimido	1	3.98 s
	Automático	0.5 ml	Vibración ultrasónica	1	14.97 s

En la Fig. 6 se muestra la estructura de la banda transportadora, situando el elemento de control de desplazamiento de las piezas manufacturadas sobre una banda metálica (motor) y el sistema de secado que está compuesto por un arreglo de piezoeléctricos en una placa cuadrada.

La Fig. 7 describe el posicionamiento del sistema de secado dentro de la estructura de la banda, al detectar el paso de la pieza sobre la banda transportadora, el sistema se elevará hasta realizar contacto directo con la banda metálica y realizar el proceso de pulverización del agua contenida sobre el medio, al terminar el desplazamiento del agua, el sistema de secado regresará a su posición original permitiendo el desplazamiento continuo de la banda.

En la Fig. 8 se detalla el ensamble del sistema de secado y el sistema de control, la Fig. 9 se presenta el prototipo final del sistema de secado continuo de piezas maquinadas basado en energía ultrasónica.

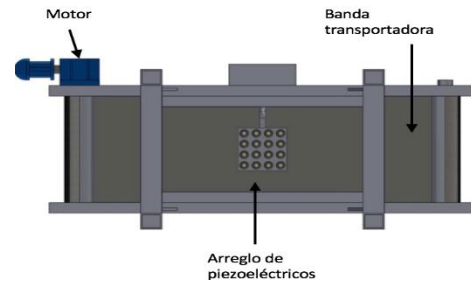


Fig. 6. Vista inferior del sistema.

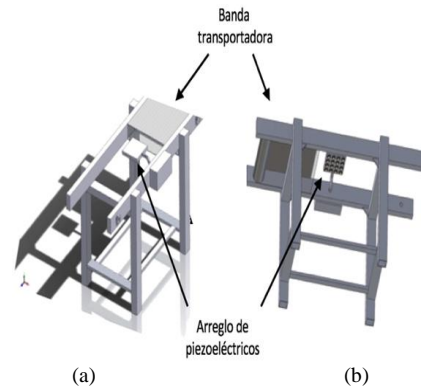


Fig. 7. Ubicación de arreglo de los transductores. (a) Corte isométrico lateral superior. (b) Corte isométrico lateral inferior.

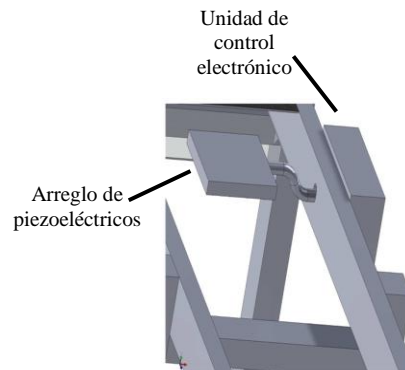


Fig. 8. Conexión del sistema de secado con la unidad de control.

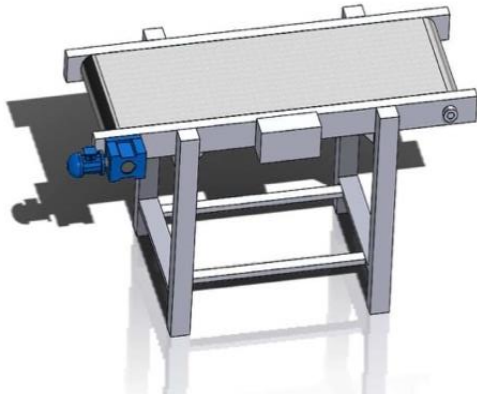


Fig. 9. Sistema de secado continuo.

V. CONCLUSIONES

En base a los análisis del sistema ultrasónico, la frecuencia de trabajo es de 103 Hz con un desempeño eficiente en el secado a temperaturas altas, bajo consumo de energía aproximadamente de 1.5 – 3 W, bajo costo, no genera ruido y no contamina el medio ambiente. Con el argumento del presente trabajo, se contribuye al desarrollo de sistemas con equipos ultrasónicos a partir de la adaptación de tecnología existente y la capacidad de implementar equipos con elementos accesibles.

La implementación del proyecto en la empresa permitirá un medio continuo de secado de las piezas, garantizando una reducción en el tiempo de secado y minimizando los golpes entre la pieza maquinada.

Comparando este sistema con otros equipos que existen en el mercado o con similares características, el sistema propuesto puede ser competitivo en el mercado actual, tanto en eficiencia y precio.

Los beneficios de la implementación de este sistema serán tangibles desde su puesta en marcha a corto plazo, puesto que aumentará la eficiencia de la producción y mejora de calidad en el proceso hasta su almacenaje.

REFERENCIAS

- [1] J.A. Gallego-Juárez, G. Rodríguez-Corral, E. Riera-Franco de Sarabia, F. Vázquez-Martínez, C. Campos-Pozuelo, V.M. Acosta-Aparicio Recent developments in vibrating-plate macrosonic transducers. *Ultrasonics*, vol 40 (2002), pp. 889-893.
- [2] J. A. Gallego Juárez, G. Nájera, G. Rodríguez Corral, F. Vázquez, P. Van der Vlist, and others, "Procedimiento y dispositivo de lavado por ultrasonido de textiles en continuo," 2003. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS C/Serrano, 117 28006 Madrid, Es. Número de publicación 2182118.
- [3] Pan, Q., Ren, Y., Wei, Y., & Mi, Y. (2016, August). The method of residual stress gradient measurement based on ultrasonic technology. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 1215-1220). IEEE.
- [4] Khmelev, V. N., Slivin, A. N., Abramov, A. D., Khmelev, S. S., Genne, D. V., & Ankudinov, V. A. (2015, June). Ultrasonic technology of production of unit-dose pack with guide way of spreads. In *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2015 16th International Conference of Young Specialists on* (pp. 195-200). IEEE.
- [5] Zhong Zhao, Liqun Du, Yousheng Tao, Qingfeng Li, Lei Luo (2016), "Enhancing the adhesion strength of micro electroforming layer by ultrasonic agitation method and the application ", Key Laboratory for Precision &

- Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education. *Ultrasonics sonochemistry*, 33, 10-17.
- [6] Acosta, V., Bon, J., Riera, E., & Pinto, A. (2015). Ultrasonic drying processing chamber. *Physics Procedia*, 70, 854-857.
 - [7] Trujillo, F. J., Knoerzer, K. In: Knoerzer, K., Juliano, P. Roupas, P., Versteeg, C. (Eds.). (2011). *Innovate Food Processing Technologies: Advances in Multiphysics simulation*. John Wiley & Sons. IFT Press and WILEY-BLACKWELL, Oxford, pp. 233-264.