

IMPLEMENTACIÓN DE UNA FUENTE CONMUTADA PARA USO EN LA TÉCNICA DE OXIDACIÓN ELECTROLÍTICA CON PLASMA^a

IMPLEMENTATION OF A SWITCHED POWER SUPPLY FOR THE PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION TECHNIQUE

JOHN GARCÍA^b, FERNANDO GORDILLO-DELGADO^c, DARWIN TORRES^d

Recibido 04-04-2017, aceptado 12-06-2017, versión final 25-07-2017.

Artículo Investigación

RESUMEN: Se implementó una fuente conmutada para ser utilizada en la técnica de Oxidación Electrolítica con Plasma (OEP). Los dispositivos electrónicos que se usaron son comunes y de bajo costo, lo que facilita la construcción del sistema. Se utilizó un microcontrolador de MICROCHIP para generar una señal digital con control de frecuencia y ciclo útil; también se usó un banco de condensadores y un puente de diodos para rectificar la alimentación suministrada directamente por la red eléctrica. El manejo de la potencia se hizo con transistores MOSFET en configuración “*low side*”, la medición de la corriente se hizo con un sensor de Efecto Hall y los datos se enviaron a un computador mediante comunicación USB para ser visualizados a través de un algoritmo creado en LabVIEW. La fuente fue probada para crear microcavidades en láminas de titanio con el objetivo de formar nanoestructuras de dióxido de titanio.

PALABRAS CLAVE: Fuente conmutada; oxidación electrolítica con plasma; ciclo útil; MOSFET.

ABSTRACT: A switched-mode power supply was implemented for using in the Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) technique. The electronic devices are inexpensive and ordinarily used, which facilitates the construction of the system. A MICROCHIP microcontroller was used for generating a digital signal with frequency and duty cycle control; a capacitor bank and a diode bridge were also used for rectifying the input signal from the electrical network. The management of the output voltage was made with an arrangement of MOSFET transistors in the “*low side*” configuration; the measurement of the current was made with a Hall Effect sensor and using the USB communication the data was sent to a computer for visualization with a LabVIEW algorithm. The power supply was tested for creating microcavities in a titanium sheet with the aim of forming nanostructures of titanium dioxide.

KEYWORDS: Switched-mode power supply; plasma electrolytic oxidation; duty cycle; MOSFET.

^aGarcía, J., Gordillo-Delgado, F. & Torres, D. (2017). Implementación de una fuente conmutada para uso en la técnica de oxidación electrolítica con plasma. *Rev. Fac. Cienc.*, 6(2), 46–57. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n2.63888>

^bGrupo de Investigación en Ciencia Aplicada para el Desarrollo de la Ecorregión- GICADE del IIC. Universidad del Quindío. jagarcia@uniquindio.edu.co

^cGrupo de Investigación en Ciencia Aplicada para el Desarrollo de la Ecorregión- GICADE del IIC. Universidad del Quindío. fgordillo@uniquindio.edu.co

^dGrupo de Investigación en Ciencia Aplicada para el Desarrollo de la Ecorregión- GICADE del IIC. Universidad del Quindío. dtorresce@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La oxidación electrolítica con plasma (OEP) es una técnica usada para el recubrimiento cerámico de metales como aluminio, titanio y magnesio (Stojadinovic *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013; Galvis *et al.*, 2012); este tratamiento aumenta la dureza y la resistencia al desgaste y a la corrosión (Lugovskoy & Zinigrad, 2013; De Viteri *et al.*, 2014). En general, se trata de un método de bajo costo, ya que los dispositivos utilizados son comunes; por otro lado, es amigable con el medio ambiente si se tiene en cuenta que no utiliza solventes orgánicos, ni genera residuos tóxicos. La OEP se presenta ante una diferencia de potencial eléctrico entre dos láminas metálicas que se encuentran inmersas en un electrolito.

En la OEP se utilizan altos niveles de tensión eléctrica entre los dos electrodos; una capa dieléctrica de óxido que se genera sobre la superficie pierde estabilidad en ciertas regiones en las que aparecen zonas de alta conductividad, lo que lleva a que se presenten descargas eléctricas (chispas) entre puntos de la superficie. Esto hace que localmente aumente la presión y la temperatura hasta alcanzar valores del orden de 10^4 K (Yerokhin *et al.*, 1999). De esta forma se crean microcavidades del material oxidado en la superficie de la lámina metálica, que finalmente se convierte en una estructura porosa con mayor espesor debido a que también se da la expulsión del óxido. El material de revestimiento puede contener fases cristalinas y amorfas, con especies constituyentes derivadas del metal y del electrolito (Stojadinovic *et al.*, 2010).

En la técnica de OEP, el control de frecuencia y ciclo útil del voltaje aplicado entre los electrodos puede afectar el carácter de las descargas y por consiguiente las propiedades de las capas obtenidas. Esto corresponde con lo que se puede observar en el experimento, ya que una modificación de la frecuencia de operación modifica la densidad de corriente catódica (Gebarowski & Pietrzyk, 2014).

Las fuentes de alimentación usadas en la OEP presentan características tales como: tensión de operación con valores entre 100 V y 600 V, corrientes hasta de 50 A, rangos de frecuencia entre 10 y 1000 Hz y variación del ciclo útil del 20 % al 80 %; al respecto se reporta la implementación de fuentes de conversión AC/DC por empresas fabricantes como *Kepco S.A.* y *Keronite*; cuyo funcionamiento se basa en la rectificación, filtrado y conmutación de la alimentación de corriente alterna comercial en corriente pulsante y controlada; dichas fuentes presentan circuitos electrónicos de medición y control de parámetros eléctricos de salida y etapas de potencia utilizando transistores de conmutación tales como IGBT o MOSFET (Galvis *et al.*, 2012). En este trabajo se presenta la implementación de una fuente conmutada para un sistema de OEP; con ésta, la circulación de corriente pulsante es controlada por dispositivos de activación en función de una señal de control con una frecuencia y ciclo útil determinados. Esta fuente es de fácil implementación, los componentes son de fácil adquisición comercial y la operación es sencilla.

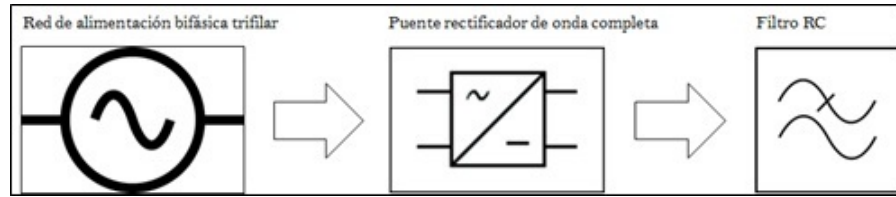


Figura 1: Esquema básico de un convertidor AC/DC. Fuente: Elaboración propia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Una fuente conmutada es un sistema que entrega una potencia a una carga mediante la modificación de algún parámetro de control como la frecuencia o ciclo útil de la señal de salida. A diferencia de una fuente de alimentación lineal, la corriente consumida no depende enteramente de la carga, sino también de la conmutación realizada en la etapa de potencia de la fuente, como menciona Zhang *et al.* (2013). Las fuentes conmutadas presentan mejor rendimiento frente a las lineales o reguladas, ya que estas últimas entregan la corriente demandada por la carga sin ningún tipo de control y hay calentamiento de los dispositivos electrónicos por el consumo de corriente, incluso cuando no se tiene una carga conectada. Existen diversas propuestas para el desarrollo de una fuente conmutada, pero todas se componen básicamente de un convertidor AC/DC con diodos (rectificación no controlada) o tiristores (rectificación controlada) y un circuito de conversión DC/DC que permite eliminar armónicos presentes en la alimentación, mediante el uso de inductores y condensadores. La etapa de potencia se compone por transistores de conmutación, cuyas características físicas varían de acuerdo a la tensión y corriente eléctrica de trabajo y en algunos casos se considera un circuito de realimentación, que permite a la etapa de control detectar cambios de tensión de salida para realizar el ajuste respectivo.

2.1. Convertidor AC/DC

El esquema básico del convertidor AC/DC, presentado en la figura 1, consta de una entrada de corriente alterna, un puente rectificador de cuatro diodos y un filtro resistencia-condensador (RC); en algunas ocasiones se adiciona un filtro inductor-capacitor (LC) con el fin de eliminar armónicos presentes en la alimentación de la fuente (Yu *et al.*, 2013). Como la tensión de salida no es completamente continua se le agrega un circuito convertidor DC/DC para reducir el voltaje de rizado de salida y garantizar una tensión fija, aun cuando la carga exija una alta potencia de alimentación.

En este trabajo, se implementó un convertidor AC/DC con alimentación bifásica trifilar de 220 V; se usó un puente rectificador de potencia con una corriente máxima de 35 A y el circuito de filtrado fue construido con condensadores electrolíticos de 470 μF /400 V. La configuración del convertidor fue la de modo doblador de tensión; por lo tanto el neutro se comporta como tierra para obtener un potencial eléctrico máximo aproximado de 340 V, como se muestra en la figura 2.

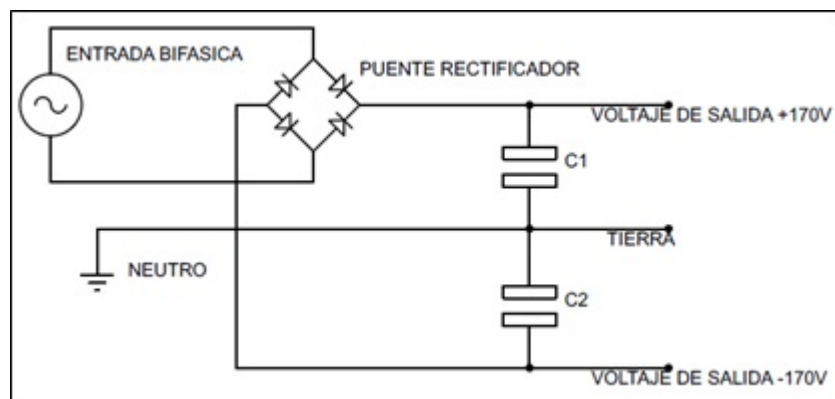


Figura 2: Conversor AC/DC en modo doblador de tensión. Fuente: Elaboración propia.

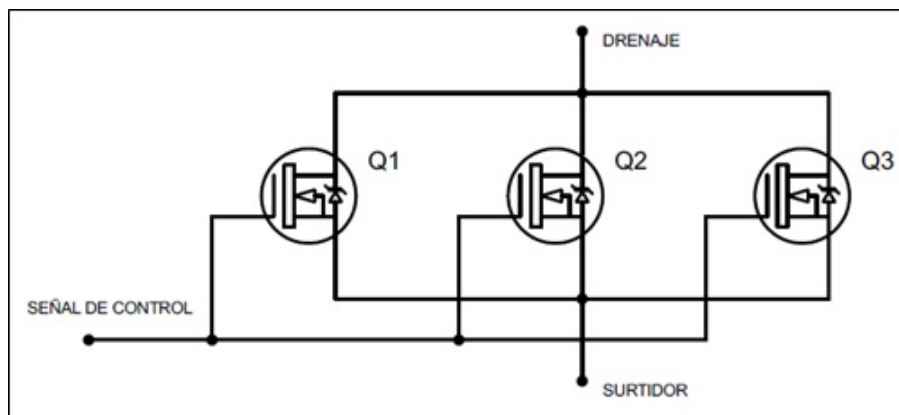


Figura 3: Conexión en paralelo de los transistores MOSFET. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Conversor DC/AC

Con el fin de generar una tensión pulsante a partir de la modificación de la frecuencia y ciclo útil se implementó un inversor mediante transistores MOSFET de potencia (referencia IRFP460, con un voltaje máximo VDS de 500 V y una corriente de drenaje ID de 20 A) en configuración “*low side*”. Esta configuración sitúa la tensión de disparo aplicado entre la compuerta y el surtidor (VGS) con respecto a un punto neutro. De esta forma, los electrodos del sistema de OEP se conectan entre la alimentación y el drenaje, y el surtidor se acopla a un punto neutro. En este caso, la activación del MOSFET se hizo con una tensión entre 5 y 12 VDC. La conmutación del transistor en función de la frecuencia y ciclo útil permite que la corriente pase por la carga (electrodos inmersos en la solución), cruzando por el drenaje y surtidor del transistor (Taniguchi *et al.*, 1988). Los transistores MOSFET se conectaron en paralelo, como se muestra en la figura 3, con el fin de mejorar el control de la corriente y disminuir la disipación de potencia en cada transistor (Xiao *et al.*, 2015).

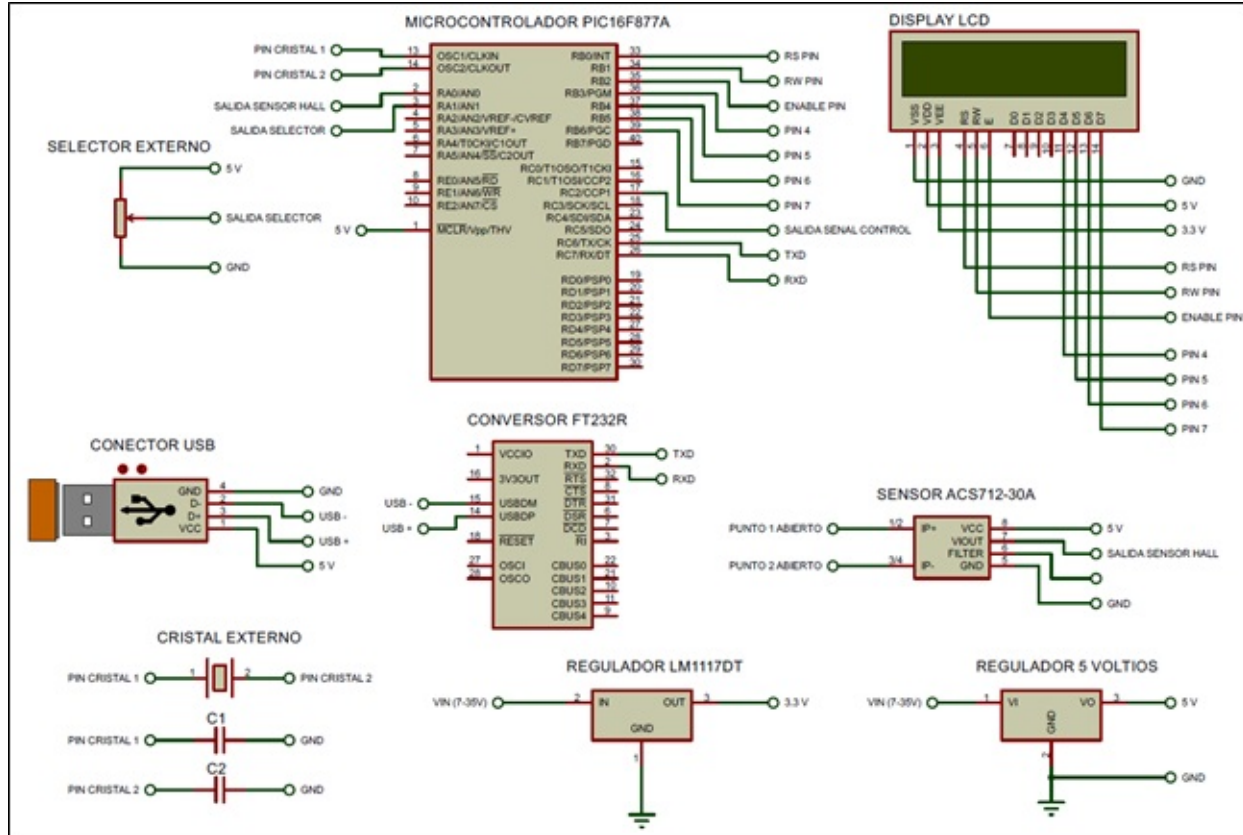


Figura 4: Esquema de conexiones de la etapa de control. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Etapa de control

El circuito de control se compone de un microcontrolador PIC16F877A con una frecuencia de operación de 4 MHz, cuya configuración se muestra en la figura 4. Se implementó un algoritmo en lenguaje C configurando el registro interno del temporizador para obtener una señal digital con una frecuencia y ciclo útil variable y se obtuvo una variación de frecuencia entre 500 y 5000 Hz con una resolución de 0.1 Hz. En la técnica de OEP, el ciclo útil influye en las características del material obtenido; la corriente circulante aumenta con un valor mayor del ciclo útil y por lo tanto el tiempo de la reacción lamina-electrolito tiende a ser mayor. Por otro lado, la frecuencia del pulso se relaciona de manera directa con la densidad de las microcavidades que se forman en la superficie del electrodo durante la electroerosión con plasma.

La etapa de control que se presenta en la figura 4 cuenta con su propio sistema de alimentación para disminuir el ruido eléctrico proveniente de la etapa de potencia. La visualización de la información se implementó en una pantalla de cristal líquido alfanumérica. El valor del ciclo útil fue determinado mediante un selector externo al microcontrolador y leído por conversión analógica a digital (ADC). La conexión entre la etapa de control y la etapa de potencia se hizo mediante optoacopladores, como se muestra en la figura 5;

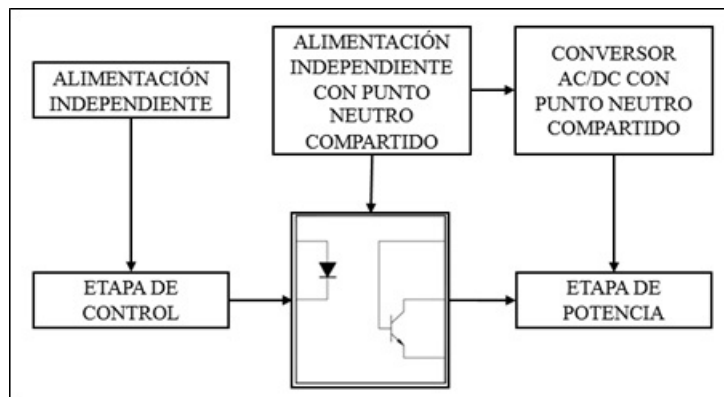


Figura 5: Conexión entre la etapa de control y la etapa de potencia por aislamiento óptico. Fuente: Elaboración propia.

para evitar que un fallo en la etapa de potencia repercuta en la etapa de control se hizo cada alimentación por separado. Esta etapa de acople se construyó de tal forma que tuviera su propia fuente de alimentación y solo compartiera el punto neutro con la etapa de potencia, con el fin de mantener el V_{GS} para disparar los transistores de potencia.

2.4. Montaje para la técnica de OEP

En la figura 6 se muestra el esquema del montaje de la técnica de la OEP utilizando la fuente conmutable implementada en este trabajo; dentro de una cubeta de acero inoxidable se coloca el sustrato inmerso en una solución de fosfato trisódico (Na_3PO_4) e hidróxido de sodio (NaOH) disueltos en agua destilada; se sujeta por pinzas mecánicas el electrodo positivo al sustrato de titanio y el electrodo negativo a la cubeta de acero inoxidable. La información de la corriente medida durante el proceso, así como la frecuencia y ciclo útil de operación es enviada al computador para su visualización.

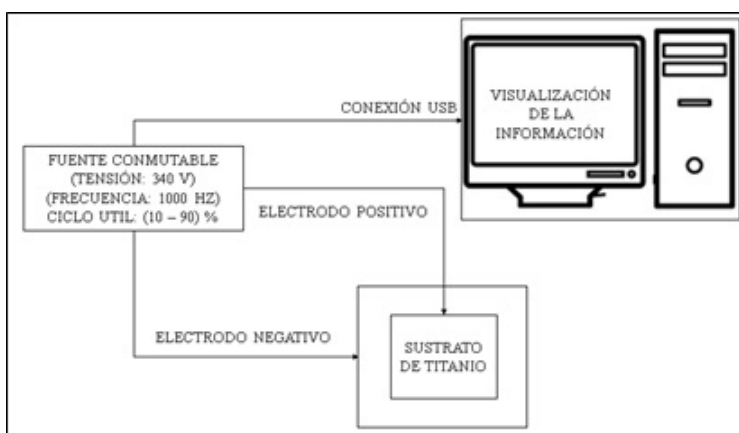


Figura 6: Esquema del montaje para la técnica de OEP. Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El conversor AC/DC implementado arrojó un voltaje de salida máximo de 340 VDC entre las dos terminales (positivo y negativo) y un voltaje de ± 170 VDC entre el punto positivo o el negativo con respecto al punto neutro. La señal de control de frecuencia y ciclo útil programable activó los transistores MOSFET (Dehnavi *et al.*, 2013); cada uno de ellos en esta configuración presentó una caída de tensión muy baja entre los terminales de drenaje y de surtidor que puede ser despreciada; por lo tanto la tensión obtenida del conversor AC/DC fue la misma suministrada en la OEP, mientras que la corriente demandada se controló con la conmutación de los transistores. En la práctica se observó que una variación del ciclo útil de la señal de control se ve reflejada en la tensión de alimentación del montaje de la OEP. Esto se debe a que el voltímetro mide el valor RMS (Raíz Media Cuadrática) del voltaje presente en la carga, incluso cuando se aplica todo el voltaje de entrada como se muestra en la figura 7 (Kurokawa & Furukawa, 2014).

Así, para una frecuencia de 1000 Hz y un ciclo útil del 50 % se midió un voltaje medio en la carga de 170 V, inclusive cuando se tuvo toda alimentación del conversor AC/DC de 340 V; para un ciclo útil del 10 %, el voltaje de salida promedio fue de 340 V y para un ciclo del 90 % el voltaje promedio de salida fue de 306 V. El consumo de corriente depende de las condiciones experimentales del montaje de OEP y presentó picos de hasta 25 A. La medición de corriente se hizo mediante un sensor de referencia ACS712-30A que se ubicó en serie a lo largo de la malla de la etapa de potencia. Este sensor utiliza el Efecto Hall, de tal forma que la medición se hace considerando el campo magnético asociado a la corriente en el conductor; la tensión de salida, entre 0 y 5 V, es proporcional a la corriente que pasa por la etapa de potencia y la respuesta del sensor es lineal para corriente alterna o continua de acuerdo con la información del fabricante.

La visualización de la información se hizo a través de una interfaz desarrollada en el software de programación gráfica LabVIEW, con lo que se logró la comunicación USB entre el microcontrolador y el computador; cabe resaltar que este dispositivo no cuenta con un periférico interno para el correspondiente protocolo de comunicación, así que se utilizó un conversor TTL-USB; este dispositivo externo es reconocido por el sistema operativo del computador como un serial emulado y el algoritmo en LabVIEW recibe la información utilizando la herramienta VISA (Virtual Instrument Software Architecture). La interfaz presenta al usuario los valores en tiempo real de la corriente suministrada al sistema de OEP, así como la frecuencia de operación y el ciclo útil de la tensión de salida.

Durante el proceso de OEP de una lámina de titanio, la curva de densidad de corriente en función del tiempo, expuesta en la figura 8, muestra que la densidad de corriente alcanzó un valor máximo de 1.84 A/cm^2 y disminuyó a valores entre 0.50 y 0.65 A/cm^2 cuando se usó un ciclo de trabajo de 90 %. Por otro lado, se observó que con un ciclo útil del 10 % el valor máximo es de 1.2 A/cm^2 y llega a un valor cercano a 0.2 A/cm^2 . Estas caídas abruptas son atribuidas a la cinética de la formación de los óxidos de titanio.

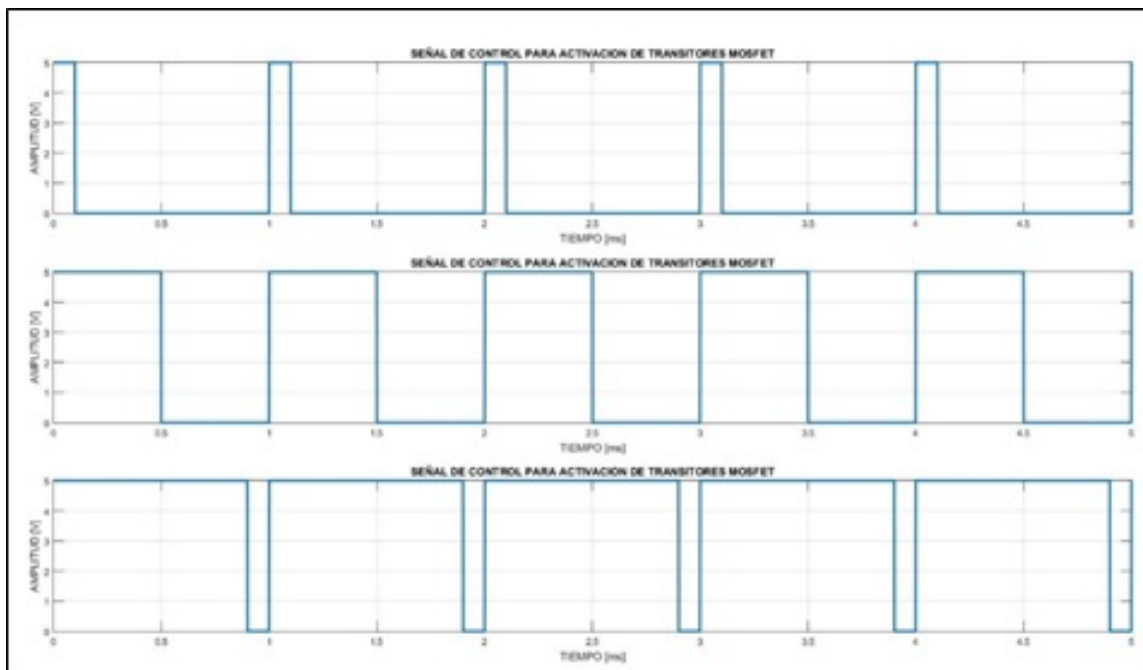


Figura 7: Señal de control con frecuencia de 1 kHz y ciclo útil de 10, 50 y 90 %. Fuente: Elaboración propia.

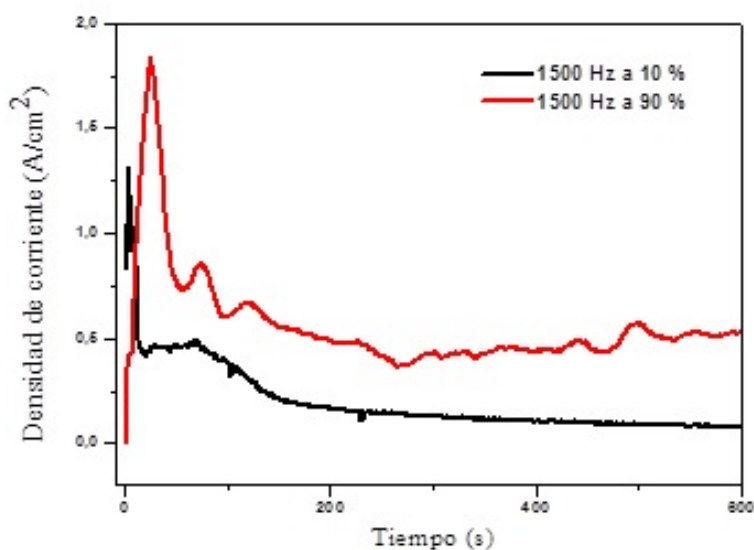


Figura 8: Comportamiento de la densidad de corriente en función del tiempo durante la OEP de una lámina de titanio. Fuente: Elaboración propia.

Una de las muestras obtenidas luego del proceso de OEP se observó con un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6390LV). En la figura 9 se presenta la imagen obtenida, en la que se aprecia la formación de las microcavidades uniformes de alta densidad espacial y de diámetro entre 500 y 1000 nm sobre la lámina de titanio (tamaño $2 \times 2 \times 0.1$ cm, fabricada por ASME, SB-265 grade-2); estas cavidades presentan baja

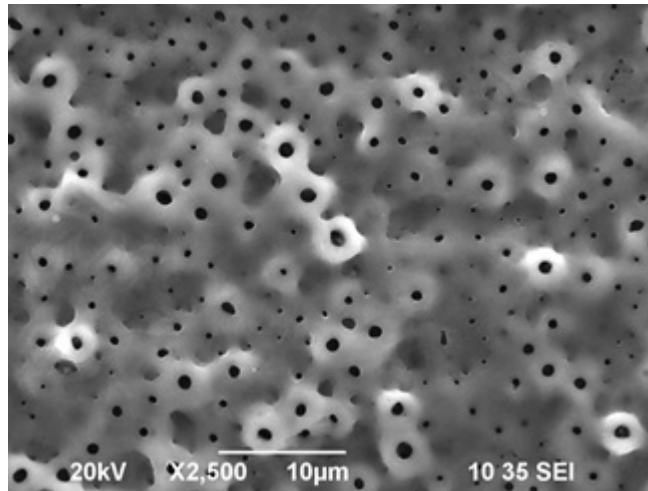


Figura 9: Imagen SEM de la morfología de la superficie del recubrimiento o revestimiento cerámico de TiO_2 obtenido con una frecuencia de pulso de 1000 Hz, ciclo útil de trabajo de 10 % y tratamiento térmico posterior a 500 °C. Fuente: Elaboración propia.

profundidad debido a la baja duración del pulso relacionada con el ciclo útil de trabajo de 10 %; la composición química del revestimiento sobre la lámina de titanio se determinó por Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS), se encontró un 72.29 % de oxígeno y 21.36 % de titanio y un máximo de 6,35 % de fósforo, lo que indica la formación superficial del revestimiento cerámico de dióxido de titanio (TiO_2) (Chang *et al.*, 2016; Gowtham & Arunnellaiappan, 2016).

Los difractogramas de rayos X, presentados en la figura 10 fueron tomados con un equipo de marca X Bruker D8- Advance; estos corresponden al sustrato de titanio y al sustrato de titanio tratado por el proceso de OEP; se evidencia una reducción de la intensidad de los picos correspondientes al titanio puro y la aparición de uno característico de los nanocristales de TiO_2 fase anatasa en el revestimiento cerámico.

Aunque los análisis de EDS mostraron la presencia de fósforo en la superficie de la muestra, ésta no se observó en los difractogramas de rayos X, posiblemente por encontrarse en fase amorfa y en baja proporción, de tal forma que no puede ser detectado por DRX (Venkateswarlu *et al.*, 2012). Los resultados reportados por otros autores (Galvis *et al.*, 2012; Srinivasan *et al.*, 2016), que usan fuentes reguladas convencionales en la OEP, son similares a los obtenidos con la fuente descrita en este trabajo; sin embargo, hacer una estricta comparación es complicado porque en los experimentos descritos se involucran otros parámetros de crecimiento que no se fijan con la fuente sino que dependen por ejemplo del tipo de electrolito y tiempo de exposición del sustrato. Por otro lado, el dispositivo presentado en este trabajo es de bajo costo, sencillo y eficiente en la OEP de láminas titanio, mientras que los usados en los trabajos mencionados son robustos, lo que aumenta el costo del proceso.

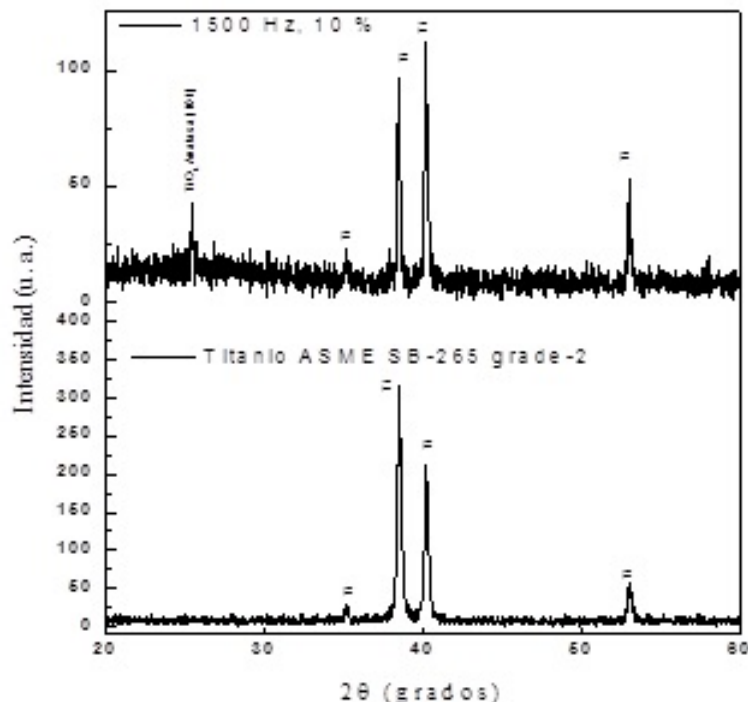


Figura 10: En la parte superior: el difractograma de rayos X correspondiente a la modificación superficial por OEP de titanio a 1500 Hz y ciclo útil de trabajo de 10 %. En la parte inferior: el difractograma del sustrato. Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Se implementó una fuente de alimentación para ser usada en un sistema de OEP con dispositivos de bajo costo, de fácil adquisición comercial, que presenta un buen funcionamiento con corrientes pico de 25 A y tensiones de salida de 340 V, con la que se obtienen pulsos de voltaje con frecuencias en el rango 500-5000 Hz y el ciclo útil puede ser modificado entre 10 y 90 %. Esta fuente conmutada no utiliza un transformador para el control de tensión de la alimentación y por tanto la tensión de operación de salida es fijo. Este valor de voltaje (340 V) y el comportamiento de la corriente fueron suficientes para obtener un recubrimiento cerámico de TiO_2 sobre el sustrato de titanio.

Con el sistema de OEP, con pulsos de voltaje de frecuencia 1000 Hz y ciclo útil de 10 %, se generó un revestimiento cerámico de dióxido de titanio en fase anatasa, poroso y nanoestructurado; esto fue evidenciado con los resultados de DRX y SEM. Las microcavidades que se formaron sobre la superficie del sustrato son de baja profundidad, aparentemente uniformes en forma y tamaño. Esto es muy importante cuando se trata de aplicaciones relacionadas con el aumento de la resistencia mecánica y de aplicaciones fotocatalíticas en las que el aumento del razón área/volumen es fundamental para aumentar la eficiencia del proceso.

Referencias

- Chang, F. C.; Wang, C. J.; Lee, J. W. & Lou, B. S. (2016). Microstructure and mechanical properties evaluation of molybdenum disulfide-titania nanocomposite coatings grown by plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 303, 68-77
- De Viteri, V. S.; Igartua, A.; Bayón, R.; Barandika, G.; Pérez-Jorge, C.; Esteban, J. & Martínez, M. (2014). *Tribocorrosion and antibacterial behaviour of TiO₂ coatings obtained by OEP technique*. In Medical Measurements and Applications (MeMeA), IEEE International Symposium on, 1-4.
- Dehnavi, V.; Luan, B. L.; Shoesmith, D. W.; Liu, X. Y. & Rohani, S. (2013). Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (OEP) coating growth behavior. *Surface and Coatings Technology*, 226, 100-107.
- Galvis, O.; Quintero, D.; Pavón, J. J.; Castaño, J. G. & Echeverría, F. (2012). Fabricación de películas anódicas porosas sobre titanio mediante oxidación electrolítica por plasma. *Revista ION*.
- Gebarowski, W. & Pietrzyk, S. (2014). Growth characteristics of the oxide layer on aluminium in the process of plasma electrolytic oxidation. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(1), 407-411.
- Gowtham, S.; Arunnellaiappan, T. & Rameshbabu, N. (2016). An investigation on pulsed DC plasma electrolytic oxidation of cp-Ti and its corrosion behaviour in simulated body fluid. *Surface and Coatings Technology*, 301, 63-73.
- Kurokawa, F. & Furukawa, Y. (2014). *High performance digital control switching power supply*. In Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 16th International, 1165-1170.
- Li, Q.; Liang, J. & Wang, Q. (2013). Plasma electrolytic oxidation coatings on lightweight metals. *Modern Surface Engineering Treatments*.
- Lugovskoy, A. & Zinigrad, M. (2013). Plasma electrolytic oxidation of valve metals. *Materials science-advanced topics*.
- Stojadinovic, S.; Vasilic, R.; Belca, I.; Petkovic, M.; Kasalica, B.; Nedic, Z. & Zekovic, L. (2010). Characterization of the plasma electrolytic oxidation of aluminium in sodium tungstate. *Corrosion Science*, 52(10), 3258-3265.
- Srinivasan, V.; Karthik, P.; Mukesh, P. & Praven, S. (2016). Review on Plasma Electrolytic Oxidation of Titanium Coatings. *International Journal of Advanced Research in Biology, Engineering, Science and Technology*, 2(1), 29-34
- Taniguchi, K.; Ogino, Y. & Irie, H. (1988). PWM technique for power MOSFET inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 3(3), 328-334.

- Venkateswarlu, K.; Rameshbabu, N.; Sreekanth, S.; Bose, A. C.; Muthupandi, V.; Babu, N. K. & Subramanian, S. (2012). Role of electrolyte additives on in-vitro electrochemical behavior of micro arc oxidized titania films on Cp Ti. *Applied Surface Science*, 258(18), 6853-6863.
- Xiao, Q.; Yan, Y.; Wu, X.; Ren, N. & Sheng, K. (2015). *A 10kV/200A SiC MOSFET module with series-parallel hybrid connection of 1200V/50A dies*. In 2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 349-352.
- Yerokhin, A. L.; Nie, X.; Leyland, A.; Matthews, A.; & Dowey, S. J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122(2), 73-93.
- Yu, T. H.; Liang, T. J.; Chen, K. H.; Li, J. S., & Lee, J. S. (2013). *Design of an AC-DC and DC-DC interleaved PWM controller for switching power supply*. In 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 4172-4179.
- Zhang, H. J. (2013). Basic concepts of linear regulator and switching mode power supplies. *Linear Technology*, [Online]. Available: <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/AN140fa.pdf>. [Accessed Jun. 2014].