

**SISTEMA DE CONTROL DE ESPACIAMIENTO
PARA MICRO ELECTROEROSIÓN MECANIZADA**

GAP CONTROL SYSTEM FOR MICRO ELECTRODISCHARGE MACHINING

(Recibido el 03 de noviembre de 2014 - Aprobado el 23 de enero de 2015)

PhD. Oscar Chaides

**Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de
Monterrey,**

*Docente investigador,
Monterrey – México,*

oscar.chaides@exatec.itesm.mx

PhD. Horacio Ahuett-Garza

**Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores
de Monterrey,**

*Jefe del departamento de ingeniería,
Monterrey – México,*

horacio.ahuett@itesm.mx

Resumen. El presente artículo muestra los resultados en la implementación de un monitoreo y sistema de control de espaciamiento que permite la fabricación de microcanales sobre materiales conductores por el método de micro mecanizado por electro (μ EDM). El seguimiento y sistema de control de espaciamiento se implementan utilizando componentes analógicos y digitales de uso genérico y las capacidades del sistema se evaluaron en un sistema mecánico de composición de tres ejes ortogonales impulsada por motores paso a paso. El mecanizado de microcanales en titanio (Rockwell C 32 HRC) se llevó a cabo para la evaluación del sistema.

Palabras clave: control de espaciamiento; mecanizado de electroerosión; LinuxCNC; Arduino.

Abstract. The present article shows the results on the implementation of a gap monitoring and controlling system that allows the fabrication of microchannels on conductive materials by the micro electro discharge machining (μ EDM) method. The gap monitoring and controlling system was implemented using analog and digital components of generic use and the capabilities of the system were evaluated in a mechanical system compose of three orthogonal axis driven by stepper motors. The machining of microchannels on Titanium (Hardness 32 Rockwell C HRC) was done for evaluation of the system.

Keywords: gap control; electrodischarge machining; LinuxCNC; Arduino.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los procesos de manufactura tradicionales en los cuales se lleva la modificación de piezas metálicas, están basados casi en su mayoría por proceso de corte y remoción de material por medio de fricción y deformación plástica. Algunos ejemplos de este tipo de procesos de manufactura son: el torneado, el fresado y el pulido. La aplicación de dichos procesos a escalas micrométricas presenta desafíos debido al alto consumo energético, de espacio y recursos que requieren la maquinaria empleada para dichos procesos. Una tendencia actual para abordar dichos desafíos es la reducción del tamaño de la maquinaria. Diversos procesos de

manufactura no convencional han surgido con la intención de conseguir fabricar dispositivos de tamaño reducido, conservando la calidad del implicado en procesos de micromanufactura. Entre las técnicas que pueden ser empleadas se encuentran: la litografía, la erosión por abrasivos, y el micro fresado. Algunos ejemplos de dispositivos de pequeñas dimensiones son los MEMS, así como dispositivos de aplicaciones médicas que deben ser injertados en el cuerpo humano siendo lo menos invasivos posibles. Microsistemas para fluidos pueden utilizarse en el análisis de concentraciones químicas, aplicación automática de fármacos, y sistemas de laboratorio en un chip.

El proceso de μ EDM emplea la acción de descargas instantáneas provenientes de un electrodo para remover material de una pieza de trabajo de material conductor. La principal ventaja que posee el proceso de μ EDM es la capacidad de producir geometrías complejas en materiales con alta dureza, sin necesidad de herramienta de costo elevado y sin producir rebabas. Esta ventaja vuelve al proceso de micro electroerosión una alternativa viable para la manufactura de alta precisión y costo reducido. El proceso se realiza manteniendo la pieza sumergida en un medio dieléctrico que puede ser de diferente composición, desde aceites hasta agua destilada. El medio dieléctrico cumple varias funciones en el proceso: Se emplea para retirar el material removido por las descargas, como refrigerante, y facilita la generación de un canal de ionización. La Fig. 1 muestra el proceso de manera esquemática en su forma más sencilla, cada uno de los componentes principales necesarios para el proceso han sido incluidos.

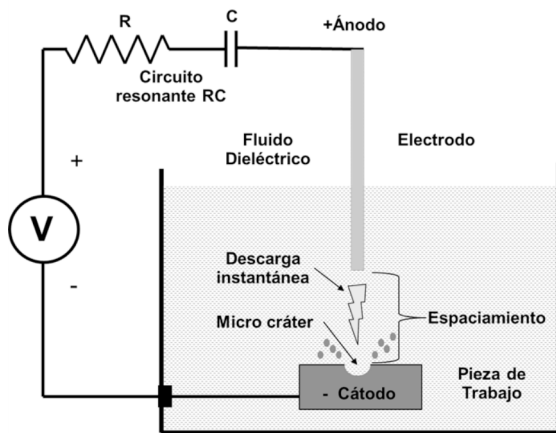


Figura 1. Esquema general proceso de μ EDM

El proceso de electroerosión fue descrito por primera vez en 1943 por los científicos rusos B.R. Y N.I. Lazarenko. Sus estudios se enfocaban en la degradación de contactos eléctricos debido a las descargas por conmutación mecánica. Descubrieron que el desgaste era mayor si el contacto se encontraba sumergido en aceite en lugar de aire. Los Lazarenko desarrollaron el primer circuito práctico para electroerosión. Consistía en un condensador cargado mediante una resistencia acoplada entre el espaciamiento de dos electrodos. Este circuito se conoce como circuito RC para EDM y continúa siendo empleado en día. En sus orígenes el proceso de EDM fue empleado únicamente para la remoción de machuelos rotos en piezas costosas.

La energía se descarga en un período de tiempo muy corto, del orden de microsegundos de duración, a través de un canal de ionización entre la pieza de trabajo y el electrodo. Para tal efecto, se requiere de un voltaje capaz de ionizar el medio dieléctrico. En el instante posterior a la ionización se genera una descarga abrupta de energía formada de iones y electrones formando un canal de plasma. El plasma puede alcanzar temperaturas de varios miles de grados Celsius. La remoción del material se debe principalmente a dos mecanismos. El primero consiste en el material que se vaporiza instantáneamente debido a la elevada temperatura del plasma y el segundo es el material que es removido en forma de partículas cuando el canal de plasma colapsa formándose turbulencia en el dieléctrico. En el presente estudio se utilizó una fuente de poder para electroerosión del grupo conocido como RC, la cual se basa en el empleo de una resistencia y un capacitor que determinan la frecuencia de descargas por medio de su propia frecuencia natural de oscilación. Este tipo de fuente es el más extendido ya que su desarrollo se remonta a la década de los 40's. Para que las descargas generadas por la fuente RC se mantuvieran en el rango considerado de baja energía, se fijó un límite de energía por descarga de $100\mu\text{J}$. Un voltaje de 60 Vdc y una frecuencia de 8Khz fueron elegidos como parámetros nominales para mantener al operario seguro contra descargas. El valor del capacitor requerido fue calculado a partir de la ecuación (1) obteniéndose $0.56\mu\text{F}$. Pruebas en la fuente de alimentación RC mostraron que para la producción de una descarga óptima en forma de chispa, se requiere una carga mínima del capacitor de 98%. Por lo tanto el valor de resistencia requerido para la fuente RC se calculó a partir de la ecuación (2) obteniéndose 563Ohm.

$$C = \frac{2E}{V^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{\tau}{4C} \quad (2)$$

La Fig. 2 presenta los diferentes tipos de descarga que es posible observar durante el proceso de electroerosión así como el comportamiento del voltaje entre electrodo y pieza de trabajo. La descarga en forma de chispa es la que presenta la mayor tasa de remoción de material ya que es la única que produce el canal de plasma y su consecuente colapso.

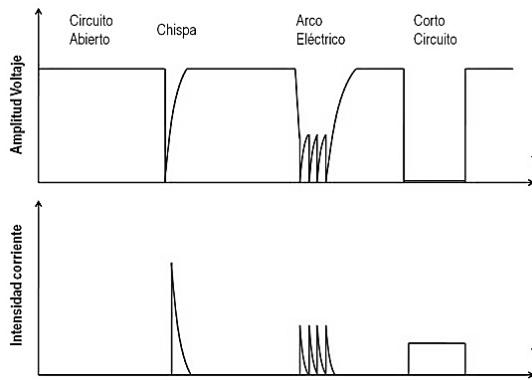


Figura 2. Tipos de descargas durante proceso de electroerosionado

Dado que no existe contacto físico y sólo se aplican fuerza despreciable entre el electrodo y la pieza de trabajo los sistemas mecánicos que posicionan la pieza de trabajo y el electrodo están expuestos a mínimas cargas más allá de las propias de la fricción, inercia y gravedad. Es esta falta de exigencia a los sistemas mecánicos la que permite a motores a pasos controlados con sistemas de alta precisión ser empleados en tareas de alta demanda en precisión como lo es el proceso de μ EDM. Los motores de pasos pueden alcanzar posiciones específicas con gran exactitud y han sido empleados en procesos de micro-manufactura de manera exitosa.

La Fig. 3 presenta las curvas características de voltaje y corriente entre electrodo y pieza, ante la presencia de una descarga de tipo chispa. Es posible observar una abrupta caída del voltaje (Canal 1) y la aparición instantánea de un pico de corriente (Canal 2) el cual produce la remoción de material.

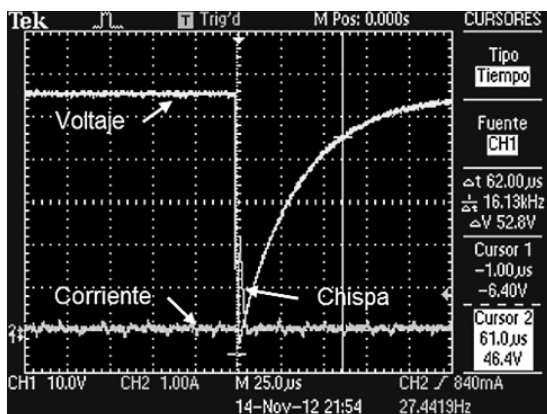


Figura 3. Perfil eléctrico de descarga instantánea entre electrodo y pieza en forma de chispa

2. RELEVANCIA DEL ESPACIAMIENTO

El control del espacio entre el electrodo y la pieza de trabajo, es crucial en el proceso de μ EDM. La disminución del tamaño de pieza exige mayor control sobre los parámetros de manufactura (espaciamento, voltaje, frecuencia, etc.). El tamaño del espaciamento puede disminuir a pocos micrómetros. Un espaciamento pequeño es difícil de alcanzar y mantener estable. Entre menor sea el espaciamento menor será la energía requerida para lograr obtener la descarga adecuada que en consiguiente produzca un maquinado de características deseadas.

El control de espaciamento se debe realizar de manera automática, ya que la velocidad de respuesta que exige el proceso para controlarlo y mantener el proceso estable no puede ser alcanzada de manera manual. A manera de referencia, es necesario corregir dicha distancia cientos de veces cada segundo.

Mantener el espaciamento estable dentro de rangos de operación permite una remoción efectiva de material y la continuidad del proceso. La velocidad de remoción de material y la calidad del acabado son afectados directamente por la capacidad de control sobre el electrodo. Ante la presencia de descargas en forma de chispa se producirá la mayor cantidad de microcráteres en la superficie de la pieza de trabajo, el tamaño de los mismos dependerá de la energía que suministre la fuente en cada descarga. Si el espaciamento no es estable se presentaran arcos eléctricos que pueden repercutir negativamente en el acabado de la pieza al fundir parte del material superficial que permanece adherido a la pieza de trabajo y no removerlo en forma de partículas.

La medición del espaciamento de manera directa durante el proceso resulta complicada. Sin embargo, el espacio entre el electrodo y la pieza puede ser estimado mediante el voltaje existente entre ambos. Dicho espacio en procesos de μ EDM está por debajo de las decenas de micrómetros.

Al mantener el espaciamento constante es posible obtener condiciones de descarga continuas. El número de descargas por unidad de tiempo está definido por la frecuencia natural de oscilación en el caso de fuentes RC o por la frecuencia de descarga programada en un control transistorizado. Durante las descargas, el circuito de potencia se coloca en corto, lo que demanda una gran cantidad de energía en un tiempo breve.

Al realizarse las descargas, el voltaje entre el electrodo y la pieza tiende a cero. Si el espaciamento es estimado por el voltaje entre el electrodo y la pieza

Sistema de control de espaciamiento para micro electroerosión mecanizada.

de trabajo, en cada descarga se tiene un desajuste de la medición. El circuito de control de espaciamiento tiene entonces que ser capaz de interpretar de manera correcta los diferentes valores de voltaje entre el electrodo y pieza, y no interpretar como corto circuito una descarga exitosa.

Fleming presenta un circuito analógico de monitoreo de espaciamiento y servo control de fácil implementación. Basado en comparadores y divisores de voltaje por resistencia. Sin embargo, el sistema está enfocado principalmente al control de espaciamiento en el proceso de EDM a escala mayor. Dicho circuito es capaz de enviar tres tipos de señal al motor de control de espaciamiento dependiendo de la distancia electrodo-pieza. Los tres estados posibles son: 1) acercar electrodo, 2) alejar electrodo y 3) mantener posición. El empleo de estos estados tiene como finalidad mantener el espaciamiento constante. La aplicación del sistema en escalas micrométricas presenta problemas de estabilidad. La principal limitante que presenta el circuito analógico es la falta de flexibilidad en cuanto a modificación de parámetros.

3. INTERCONEXIONES ENTRE SUBSISTEMAS

El sistema de micro manufactura por μ EDM utilizado para la validación del control de espaciamiento, está conformado por una serie de sub sistemas interconectados. Cada subsistema ejecuta tareas específicas y sencillas las cuales sumadas producen el resultado deseado. El sistema fue diseñado teniendo en mente la modularidad y la capacidad de replicación. Los subsistemas principales son los siguientes:

- **Sistema Mecánico**
 - 3 Ejes móviles ortogonales actuados con motores a pasos
 - Porta electrodo
- **Sistema de control CNC**
 - Computadora ejecutando LinuxCNC
 - Intérprete de código G
- **Sistema Electrónico**
 - Integrador
 - Tarjeta de control Arduino
 - Amplificador y PZT
 - Compuerta selectora tipo "OR"
 - Fuentes de Voltaje
 - Oscilador RC
 - Generador de señales

Para su correcta operación señales son intercambiadas entre los subsistemas. Estas señales permiten coordinar los diferentes estados de cada subsistema y sincronizar la operación en conjunto. La Fig. 4 presenta el diagrama de conexión a bloques de los diferentes subsistemas así como las señales intercambiadas entre los mismos.

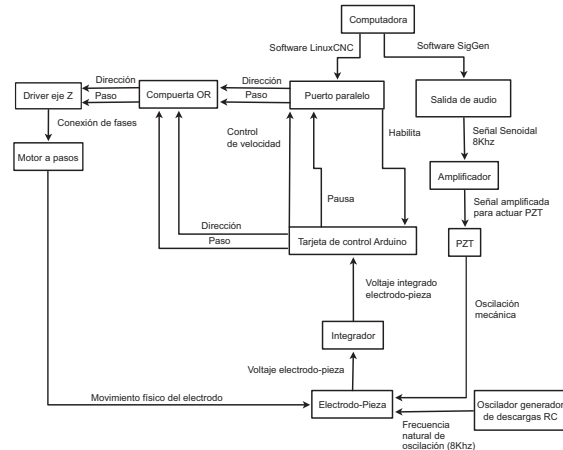


Figura 4. Interconexiones entre subsistemas

Para el montaje mecánico se empleó una mini fresadora CNC de integración propia, la cual cuenta con 3 ejes ortogonales actuados por motores a pasos con guías antijuego de la marca Thomsom, un cabezal porta electrodo, un tanque para fluido dieléctrico y una prensa para sujeción de la pieza de trabajo. La Fig. 5 presenta el montaje experimental.

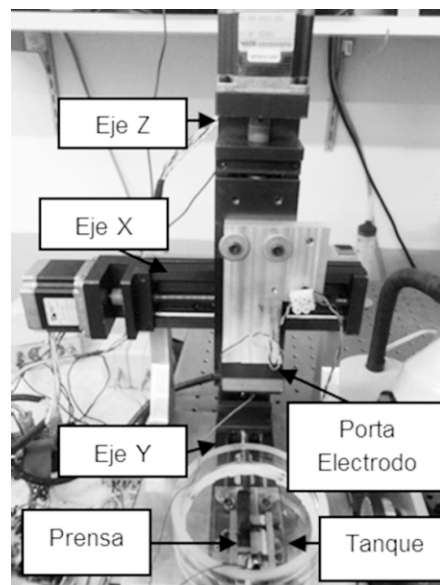


Figura 5. Montaje experimental para μ EDM

Las maquinarias utilizadas para procesos de electroerosión requiere un control computarizado específicamente diseñado para este fin, dado que el control del espaciamiento entre electrodo, pieza necesaria para el proceso, no está contemplado en el lenguaje de programación para máquinas herramientas convencionales (RS-274). La adaptación de un sistema CNC de uso convencional para operaciones de electroerosionado no es una práctica estándar dado la falta de apertura de la arquitectura de los sistemas CNC comerciales.

Para sobre llevar este inconveniente se utilizó un controlador de movimientos basado en el software de control LinuxCNC. El LinuxCNC se basa en el uso de las librerías de tiempo real del sistema operativo de libre distribución Linux capaces de ejecutarse en una computadora personal (PC). Actualmente, el LinuxCNC puede comunicarse con la máquina a controlar mediante el puerto paralelo o una tarjeta de expansión PCI.

Otras variantes de puerto de comunicación no han sido implementadas (específicamente no existen controladores USB ya que no es posible obtener respuesta en tiempo real) dado que la operación de una máquina herramientas requiere la capacidad de respuesta por parte del sistema operativo de manera instantánea.

Las señales necesarias para la interacción del subsistema de espaciamiento con el LinuxCNC son las siguientes:

1. Señal para solicitar la pausa de movimiento en la presencia de un corto circuito y su reanudación cuando el corto circuito es roto.
2. Señal para acelerar la ejecución de los movimientos en caso de que el espaciamiento aumente demasiado.
3. Señal para desacelerar la ejecución de movimiento en caso de que el espaciamiento se reduzca demasiado.

La Fig. 6 presenta de forma esquemática la interconexión del sistema CNC y del subsistema de espaciamiento. Es de notar que el uso del puerto paralelo de la computadora huésped como medio de interconexión permite que no sea necesaria la adquisición de hardware extra, ya que la velocidad de repuesta de este puerto es más que suficiente para recibir las señales que mantienen estable el espaciamiento.

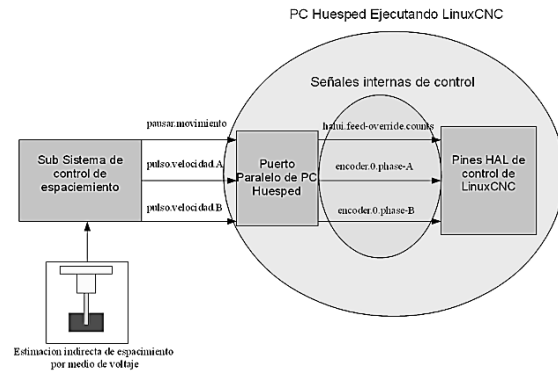


Figura 6. Interconexión de señales de control para permitir el control de espaciamiento

La arquitectura abierta de LinuxCNC permite la interconexión de sistemas de hardware y software externos que complementan las capacidades del CNC. Utilizando esta flexibilidad de interconexión fue posible controlar el espaciamiento y conservar las ventajas como intérprete de código G del LinuxCNC. Mediante la utilización de las señales de control adecuadas, un sistema de control CNC genérico como el LinuxCNC puede ser adaptado de manera exitosa para realizar tareas complejas como las requeridas para la electroerosión. El hardware extra necesario para dicha adecuación es mínimo.

4. INTEGRADOR DETECTOR DE ESPACIAMIENTO

Para mantener el proceso de electroerosión estable y continuo, es necesario que el electrodo se encuentre a una distancia de aproximadamente 7 micrómetros de la pieza de trabajo. Para monitorear dicha distancia se utilizan métodos indirectos basados en mediciones continuas en tiempo real del voltaje existente entre pieza y electrodo. Un voltaje tendiente a cero indicará la presencia de un corto circuito y será necesario alejar el electrodo de la pieza de trabajo. Un voltaje tendiente al nominal de alimentación del circuito oscilante indicará que no se están realizando descargas eléctricas de forma constante y se debe de tomar una acción correctiva. En trabajos previos, se implementó un sistema compuesto por comparadores que monitoreando el voltaje electrodo pieza controlaba el espaciamiento. El sistema implementado solo consideraba la presencia de dos estados y se mantenía de manera continua alejando o acercando el electrodo a la pieza. No existían estados intermedios que permitan que el proceso se estabilizara con descargas continuas al lograrse el espaciamiento óptimo.

En el presente trabajo se plantea la existencia de cuatro estados, dos adicionales a los antes analizados, en la condición en la que es necesario acercar el electrodo a la pieza se realizó una división en dos estados acelera y desacelera, y en caso de encontrarse en un espaciamiento óptimo el electrodo debe de mantener su posición actual dependiendo del valor instantáneo del voltaje electrodo pieza. Mediante el monitoreo del voltaje y en cuál de estos estados se encuentra, se toman acciones de control tendientes a mantener el proceso de electroerosión continuo. Los estados definidos se presentan de manera cualitativa en la Fig. 7.

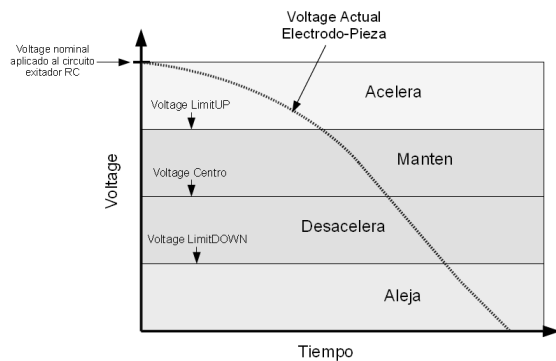


Figura 7. Representación cualitativa de los estados definidos

La Tabla I presenta de manera resumida las propiedades de cada estado así como una explicación de su conceptualización.

Tabla I. Estados de control para μ EDM

ESTADO	DESCRIPCIÓN
Acelera	Este estado se presenta cuando el voltaje actual electrodo-pieza es mayor al voltaje predefinido LimitUP. Una señal de control es enviada al eje Z para que la velocidad de avance del eje se incremente.
Mantén	Este estado se presenta cuando el voltaje actual es menor al voltaje LimitUP y mayor al voltaje centro, en este estado el proceso de electroerosión es continuo y estable por lo que no se toma ninguna acción correctiva.
Desacelera	Este estado se presenta cuando el voltaje actual electrodo-pieza es mayor al voltaje predefinido LimitUP y menor al voltaje centro. Una señal es enviada al eje Z para que la velocidad de avance del eje disminuya.
Aleja	Este estado se presenta cuando el voltaje actual es menor al voltaje LimintDOWN e indica la inminente aparición de un corto circuito. En este estado una señal de control indica al eje Z invertir la dirección de su desplazamiento hasta que el voltaje actual se encuentre de nuevo por encima del voltaje LimitDOWN a una distancia segura

El electrodo está montado en el eje móvil Z de una microfresadora de control numérico (LinuxCNC). Para la realización de electro erosionado se programa una velocidad de avance predefinida y por medio del circuito integrador se acelera, desacelera o pausa completamente el avance.

La toma de decisiones basándose en los estados de control de monitoreo del espaciamiento se realizó por un sub-sistema de control ejecutándose en un microcontrolador. En específico se utilizó un micro controlador ATMEL mega 328 montado en una tarjeta de diseño Arduino UNO corriendo a 16MHz con un costo de 21 USD. La flexibilidad de las tarjetas de diseño Arduino así como su sencillez de programación ha permitido su utilización en sistemas de control distribuido por red así como en sistemas de monitoreo de temperatura. El primer canal analógico del micro controlador fue programado para monitorear de manera continua el valor del voltaje Electrodo-Pieza. El voltaje actual del integrador está definido por la ecuación (3):

$$V_{actual} = \int \frac{-V_{in}}{RC} dt \quad (3)$$

La velocidad de lectura del canal analógico en el microcontrolador es limitada, ya que este modelo de microcontrolador no está diseñado específicamente para aplicaciones demandantes en cuanto al número de lecturas análogas por segundo. Para solventar el problema sin la necesidad de incluir un DSP (Procesador de Señales Digitales) y elevar la complejidad y costo del diseño, un integrador en tiempo basado en un filtro pasa-bajas fue empleado como integrador para reducir la exigencia de lecturas por segundo al microcontrolador. El integrador fue implementado utilizando amplificadores operacionales y una red RC con frecuencia de corte de 80 Hz como se muestra en la Fig. 8. Este tipo de filtro está basado en un pasa bajas donde la frecuencia de corte es mucho mayor a la relación $1/RC$.

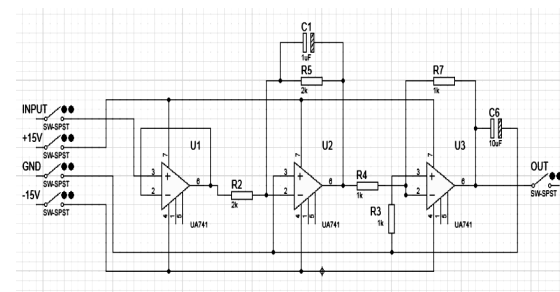


Figura 8. Integrador de voltaje utilizando filtro pasa bajas con frecuencia de corte a 80Hz

El circuito integrador fue simulado en SPICE siendo excitado con un tren de pulsos de frecuencia fija a 8000Hz, tratando de simular la frecuencia de descarga esperada durante el proceso de electro erosión en sintonización con el circuito excitador de descarga RC. La Fig. 9 presenta los resultados obtenidos a la salida del integrador, las señales excitadoras tienen una amplitud de 10uS, 12uS y 24uS. Es posible observar que la variación en el voltaje integrado en color azul es menos drástica que la del voltaje excitador ya que no presenta discontinuidades o picos abruptos.

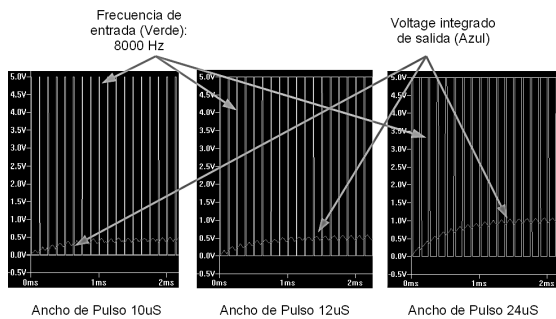


Figura 9. Simulación del funcionamiento del integrador al ser alimentado con señales que simulan descargas de electroerosión

El integrador propuesto demostró ser funcional y realizar las funciones de integración de voltaje de descarga eléctrica conforme a diseño.

5. SELECTOR DE CONTROL DE MOTOR EN EJE MÓVIL

Conforme el electrodo se acerca a la pieza de trabajo y llega al punto de espaciado óptimo para descarga (aproximadamente 7 micrómetros), el proceso de electro erosión comienza y miles de pequeñas descargas por segundo remueven material en la pieza de trabajo. El proceso se puede ver interrumpido por la presencia de cortocircuitos entre electrodo y pieza. En la presencia de un cortocircuito sin la existencia de un sistema de compensación del espaciamento, el proceso de remoción de material se detiene por la falta de nuevas descargas que remuevan material de la pieza de trabajo. De continuar el acercamiento del electrodo a la pieza de trabajo, el electrodo se deformará plásticamente afectando la tolerancia dimensional del maquinado terminado. La Fig. 10 muestra de manera esquemática la deformación plástica que sufriría el electrodo si ante la presencia de un cortocircuito se continúa avanzando en el eje de alimentación móvil Z.

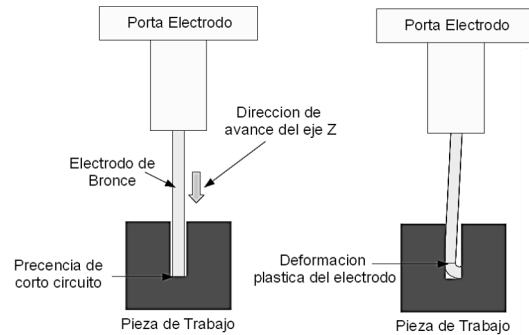


Figura 10. Efecto de deformación plástica en electrodo por presencia de cortocircuito y alimentación del eje móvil Z

Para evitar la aparición de cortocircuitos, es necesario monitorear en tiempo real el voltaje electrodo-pieza. El circuito integrador en conjunto con el microcontrolador (Arduino) son utilizados para el control del espaciamento. Cuando el voltaje electrodo-pieza cae por debajo del voltaje definido como LimitDOWN (Fig. 5), el micro controlador envía una señal de pausa al avance de alimentación del eje Z en el CNC con lo que se evita la deformación plástica. Al mismo tiempo el microcontrolador envía pulsos de control al eje móvil Z y comienza a alejar el electrodo de la pieza hasta que se rompe el cortocircuito. El electrodo es reposicionado en la última posición que presentó al momento del cortocircuito y el control de la alimentación del eje móvil es devuelto al CNC para que el proceso de electroerosión continúe. El proceso anteriormente descrito es repetido cuantas veces se presente un cortocircuito electrodo pieza. Para realizar la selección de la fuente de pulsos de control a los motores a pasos entre el CNC y el microcontrolador se utiliza una compuerta lógica "OR". La Fig. 11 presenta de manera conceptual el sistema de selección de control para el eje móvil Z.

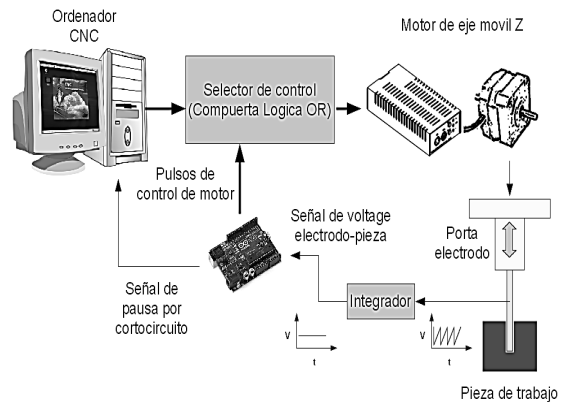


Figura 11. Sistema de selección de control para el eje móvil Z

El sistema propuesto para el control del eje móvil Z fue capaz de mantener una baja incidencia de cortocircuitos. Lo anterior permitió la realización del proceso de electroerosión de manera continua y dentro de la tolerancia geométrica esperada. La Fig. 12 presenta la señal de voltaje a la salida del circuito integrador y la presencia de cortocircuitos durante el proceso de electroerosión.

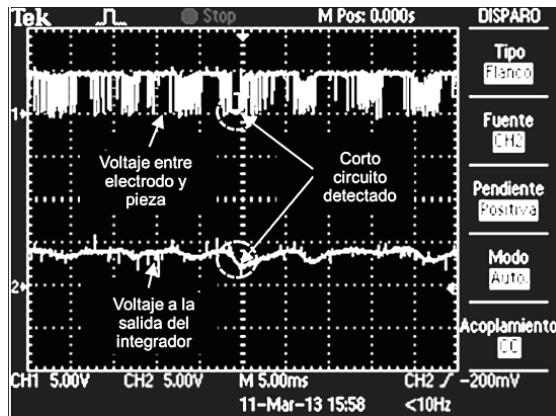


Figura 12. Presencia de cortocircuitos detectados por el subsistema integrador-microcontrolador

6. RESULTADOS

Las pruebas de maquinado de microcanales fueron realizadas en Titanio (HRC 32) utilizando un electrodo de cobre de 600µm de diámetro a profundidades de 200 µm. La Fig. 13 muestra uno de los microcanales resultantes, pudiéndose observar que el maquinado se realizó de manera continua y sin interrupciones.

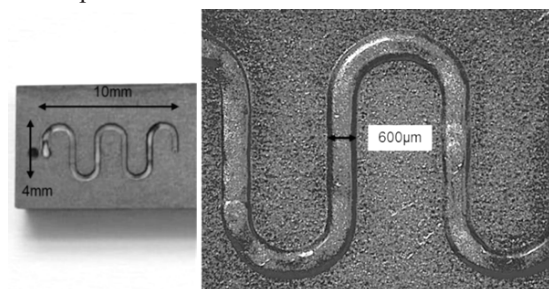


Figura 13. Microcanales fabricados en Titanio

Un microscopio confocal con 10X de aumento fue utilizado para analizar detalles internos en los microcanales. En la Fig. 14, es posible observar una representación 3D generada a partir de datos de una sección de microcanal. La geometría del microcanal corresponde con lo esperado en cuanto a profundidad y anchura. Es posible observar un redondeo de las esquinas internas del microcanal el cual es atribuido al desgaste en esa zona del electrodo, el cual pierde

parte de su forma conforme el proceso de electroerosión se realiza. En cuanto a la rugosidad del fondo del microcanal, un valor de 8.302 Ra fue obtenido como lectura final.

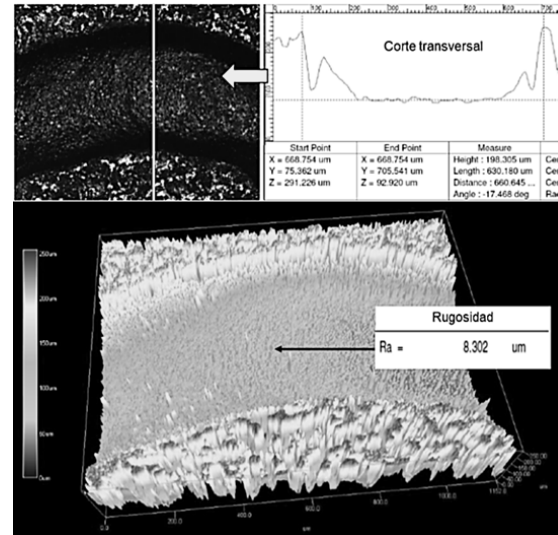


Figura 14. Detalles internos de los microcanales fabricados

7. CONCLUSIONES

Las caídas de voltaje electrodo pieza son identificadas como la existencia de un gap demasiado pequeño a lo que el conjunto de subsistemas de control de espaciamiento responde de manera instantánea frenando el avance del eje móvil Z y alejando el electrodo de la pieza de trabajo. Lo cual restablece las descargas propias del proceso de electroerosión y mantiene el proceso continuo y estable. El sistema propuesto puede ser implementado con elementos electrónicos y mecánicos genéricos sin requerir el empleo de hardware o software especializado. Se validó de forma satisfactoria el uso de plataformas de diseño electrónico de fácil aprendizaje en aplicaciones de carácter industrial. Se comprobó la flexibilidad de LinuxCNC para ser adaptado a procesos de manufactura no convencionales. Se realizaron de manera satisfactoria pruebas de micromaquinado en titanio, el cual es un material de maquinado complicado por métodos de corte de viruta debido a su elevada dureza.

AGRADECIMIENTOS

Los fondos para la realización de este proyecto fueron proporcionados por las cátedras de Investigación en Autotrónica y Máquinas Inteligentes del Tecnológico de Monterrey (ITESM) y por el departamento de sistemas integrados de la Universidad Estatal de Ohio (OSU).

REFERENCIAS

- Abbas, N. M., Solomon, D. G., & Bahari, M. F. (2007). A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (47), 1214-1228.
- Asad, A., Masaki, T., Rahman, M., Lim, H., & Wong, Y. (2007). Tool-based micro-machining. *Journal of Materials Processing Technology*, (192-193), 204-211.
- Association for Manufacturing Technology - AMT. (2003) *A report on technology assessment of electrical discharge and electro-chemical machine tools*. (1). Recuperado de <http://www.amtonline.org/>
- Baluta G. y Coteata M. (2007). Precision microstepping system for bipolar stepper motor control. *Proceedings of the International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, (1) 291-296.
- Casanueva, R., Chiquito L., Azcondo, F., y Salvador, B. (2002). Electrical discharge machining experiences with a resonant power supply. *The 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Sevilla, España.
- Chaides O. (2008). *Sistema de posicionamiento y potencia para máquina de μ EDM*. (Tesis de maestría) Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.
- Chaides O., Ahuett-Garza H., Flores A., Caballero A. y Ruiz L. (2009). Diseño y prueba de un sistema de control de espaciado y potencia para Micro EDM. *Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*, 3(2) 37-45.
- Fleming, B. (2005). *The EDM how-to book*. EUA: Fleming Publications.
- García E., Siller H., Rodríguez C., Elías A. (2010). Estudio del micro-fresado de polímeros biocompatibles en enfriamiento de CO₂. *XVI Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*. México.
- Georgitzikis, V., Akribopoulos, O. y Chatzigiannakis, I. (2012). Controlling physical objects via the internet using the arduino platform over 802.15.4 networks. *IEEE Latin America Transactions*, 10(3), 1686-1689.
- Ho, K., & Newman, S. (2003). State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application*, (43). 1287-1300.
- Jauregui A. L., Siller H.R., Rodríguez C.A., Elias-Zuniga A. (2010). Evaluation of micromechanical manufacturing processes for microfluidic devices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(9-12), 963-972.
- Kunieda, M., Hayasaka, A., Yang, X. D., Sano, S., & Araie, I. (2007). Study on Nano EDM Using Capacity Coupled Pulse Generator. *CIRP annals*, 56, 213-216.
- Kussul, E., Huerta, L. R., Ruiz, A. C., Kasatkin, A., Kasatkina, L., Baidyk, T., et al. (2004). CNC machine tools for low cost micro devices manufacturing. *Journal of Applied Research and Technology*, 2, 76-91.
- Li, L., Yang, C., Shi, H., Liao, W. C., Huang, H., Lee, L. J., Castro, J. M., Yi, A. Y. (2010) Design and Fabrication of an Affordable Polymer Micromixer for Medical and Biomedical Applications. *Polym. Eng. Sci*, (50), 594-1604.
- Loup, T. O., M. Torres, F. M. Milian, y P. E. Ambrosio. (2011). Bluetooth Embedded System for Room-Safe Temperature Monitoring. *Latin America Transactions, IEEE*, 9(6), 911-915.
- Marbán A., Corona R., Siller H., Rodríguez C., Elías A. (2010). Diseño y construcción de micro-fresadora CNC para el maquinado de polímeros biocompatibles. *XVI Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*. Monterrey, México
- Mohd Syafiq D. (2008) *Study the Effect of Wire-EDM Parameters on Surface Roughness for Machining Die-Steel*. (Tesis de maestría). Universiti Teknikal, Melaka, Malaysia.
- Morgan C. J. (2004). *Micro-electro discharge machining: techniques and procedures for micro fabrication*. (Tesis de Maestría). University of Kentucky, USA.
- Sen, B., Kiyawat, N., Singh, P. K., Mitra, S., Ye, J. H., & Purkait, P. (2003). Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM). *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (IEEE)*. India.
- Sunderhaus, R. (1992). Study of electrical discharge machining and application to drilling small holes. (Tesis de Maestría) The Ohio State University. USA.