

# Diseño y desarrollo de estación compacta de micro-maquinado electroquímico pulsado bipolar

## Design and development of compact bipolar pulsed electrochemical micro-machining station

O. Catarino-Aguilar <sup>a</sup>, E. E. Granda-Gutiérrez <sup>b</sup>, J. A. Pérez-Martínez <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso

<sup>b</sup>Centro Universitario UAEM Atlacomulco

<sup>c</sup>Unidad Académica Profesional UAEM Tlanguistenco.

### Resumen

La manufactura flexible y en específico el proceso de maquinado electroquímico pulsado bipolar ofrece la ventaja de poder mecanizar cualquier material metálico conductor siendo indiferente a su dureza o composición, sin embargo, controlar este proceso se ha convertido en un desafío al no contar con técnicas de control ni maquinaria especializada para incorporar este proceso a una escala micrométrica; en el presente artículo se muestra el diseño, desarrollo y puesta a prueba de una estación compacta de micro maquinado electro químico pulsado bipolar que permite incursionar en el micro mecanizado mediante la resolución mínima de 10  $\mu\text{m}$  que proporciona el sistema mecánico hacen de esta innovación tecnológica una pieza única en su tipo. El prototipo desarrollado brinda la oportunidad de ser usado como estación de prueba y validación para procesos de maquinado electroquímico y como dispositivo de producción, una de sus características primordiales es su tamaño compacto lo cual le permite poder ser desplazado de un lugar a otro sin la necesidad de contar con maquinaria de traslado especializada, a diferencia de máquinas similares de características industriales, incorpora sistemas secundarios como el sistema de recirculación de electrolito, el sistema de inyección neumática de aire, el control sobre la fuente de voltaje y el monitoreo de las variables de interés, lo cual lo convierten en un prototipo único en su tipo y escalable a cualquier tamaño en todas sus características.

**Palabras Clave:** Micro mecanizado, sistema computacional, control, maquinado electroquímico.

### Abstract

Flexible or advanced manufacturing and specifically the bipolar pulsed electrochemical machining process gives the advantage of machining any conductive metallic material being indifferent to its hardness or composition, however, controlling this process has become a challenge due to the lack of control or specialized machinery to incorporate this process on a micrometric scale; this article shows the design, development and testing of a compact bipolar pulsed electrochemical micro machining station by the minimum resolution of 10  $\mu\text{m}$  provided by the mechanical system, making this technological innovation a unique piece of engineering. The developed prototype provides the opportunity to be used as a test and validation station for electrochemical machining processes and as a production device. One of its primary characteristics is its compact size, which allows it to be moved from one place to another without the need. Having specialized transfer machinery, unlike similar machines with industrial characteristics, it incorporates secondary systems such as electrolyte recirculation system, pneumatic air injection system, control over the voltage source and monitoring of the variables of interest, which make it a unique and scalable prototype to any size in all characteristics.

**Keywords:** Micro machining, computer system, control, electrochemical machining.

## 1. Introducción

Ante la creciente demanda de piezas metálicas de dimensiones micrométricas en áreas como la médica, robótica,

aeronáutica, así como biomédica entre otras, surge la necesidad de la investigación y desarrollo de máquinas capaces de desarrollar micro procesos de manufactura (Grover P., 2010), considerando la escala en la cual se debe desarrollar el

\*Autor para la correspondencia: octavio.ca@sfelipeprogreso.tecnm.mx

Correo electrónico: octavio.ca@sfelipeprogreso.tecnm.mx (Octavio Catarino Aguilar), eegrandag@uaemex.mx, (Efrén Everardo Granda Gutiérrez) japerezm@uaemex.mx (José Arturo Pérez Martínez).

maquinado, los procesos de manufactura convencionales pasan a ser desplazados por los procesos de manufactura flexibles o avanzados, caracterizados por que la herramienta y pieza de trabajo no entran en contacto. El proceso de micro maquinado electroquímico pulsado bipolar (BECMM, por sus siglas en inglés de *Bipolar Pulsed Electrochemical Micro Machining*) destaca por ser uno de los procesos de manufactura más prometedores para obtener maquinados en la escala micrométrica, brindando la posibilidad de obtener maquinados sin rugosidades ni deformaciones en el área o pieza de trabajo (Ronnei & Murali, 2012), su correcto desarrollo y control permite la fabricación de microtubos, micro boquillas, micro engranes, micro inyectores, instrumentos quirúrgicos entre otras aplicaciones (Kalpakjian & Schmid, 2008), su incorporación en mancuerna con procesos tradicionales permiten generar micro pulidos que reducen la rugosidad en el acabado final sin afectar la integridad física del material como lo es en el caso del fuselaje de un avión (Hassan & Gawad, 2005).

Para que el proceso BECMM pueda desarrollarse de manera adecuada deben de cumplirse una serie de requisitos, entre los más importantes están; tanto la herramienta como la pieza de trabajo deben ser de metales conductores y estar conectados a una fuente de energía donde comúnmente la herramienta de trabajo se conecta al cátodo mientras que la pieza de trabajo al ánodo, debe existir una separación que va de los  $240\mu\text{m}$  a los  $700\mu\text{m}$  entre la herramienta y pieza de trabajo denominada gap (distancia inter-electrodos) (Katz & Tibbles, 2010) y debe existir un flujo constante de electrolito comúnmente siendo una solución acuosa de  $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ .

Ante la inexistencia de herramientas o maquinaria comercial que sean capaces de desarrollar este tipo de procesos de manufactura se abre la oportunidad de incursionar en el campo, son variados los investigadores que han modificado máquinas existentes para adecuarlas a procesos similares al BECMM obteniendo resultados aceptables, sin embargo son pocos los que han desarrollado desde cero maquinaria especializada que cubra al 100% las necesidades que exigen los procesos de este tipo, tal es el caso de la invención (Nagata, 2000) patenté japonesa donde se presenta un prototipo completamente funcional que realiza un proceso de maquinado electroquímico donde la herramienta de trabajo es desplazada libremente sobre una superficie cartesiana por un sistema de ejes coordenados, el prototipo incorpora un cabezal giratorio que al mismo tiempo realiza un proceso de maquinado electroquímico lo cual hace de esta herramienta un sistema híbrido, los parámetros de voltaje, velocidad de remoción y flujo de electrolito son preestablecidos desde el inicio y hasta el fin del proceso, el sistema está diseñado para realizar maquinados en el menor tiempo posible, al incorporar una técnica de manufactura convencional combinada con una flexible, donde se obtienen maquinados rápidos y con acabado uniforme libres de imperfecciones, sin embargo para maquinados con geometrías irregulares no es viable debido a que la máquina no puede realizar trayectorias combinadas, así mismo el establecer los criterios de configuración de funcionamiento del sistema y mantenerlos estáticos durante todo el proceso, no da oportunidad a reajustarlos de manera dinámica en el desarrollo y ante cualquier perturbación el sistema únicamente puede detener por completo el proceso, generando una pieza incompleta y con ello un desperdicio de material.

Por otra parte, en la invención americana (Inman & Taylor, 2011), se presenta una máquina que incorpora manera 2 procesos de manufactura que pueden trabajar sobre un plano cartesiano, en una primera etapa el prototipo realiza un proceso de fresado mecánico, para posteriormente realizar un micro pulido mediante una técnica de maquinado por descarga eléctrica, el objetivo principal es obtener piezas metálicas que están en la escala de los centímetros y metros con un acabado pulido y sin rugosidades o imperfecciones su margen de error está en los 1.5 mm, los parámetros de configuración como lo es el voltaje de polarización, flujo de electrolito, velocidad de avance, están definidos desde los parámetros iniciales del proceso, si bien es una herramienta útil para la obtención de piezas de centímetros o metros, no es posible usarla o adecuarla para procesos de micro-maquinado, esto por la resolución del sistema mecánico y el margen de error que si bien está en el orden de los milímetros, para un proceso de micro manufactura es un error considerable y no viable.

En la patente mexicana (Zdeblick & Zheng, 2007) presentan un sistema de maquinado electroquímico automático cuya característica principal es la de obtener piezas metálicas en serie, consta de múltiples cabezales que se desplazan linealmente llevando consigo un trozo de metal que posteriormente será moldeado mediante la inmersión directa de la pieza en contenedores de electrolito donde se encuentran moldes con los negativos de las diferentes caras a maquinar, el proceso es repetido hasta que la pieza sale del último contenedor con la geometría deseada, las piezas producidas exigen que su superficie no contenga irregularidades o sean sometidas a estrés mecánico, uno de los inconvenientes que presenta esta invención es la limitación de no poder generar maquinados con geometrías complejas y que está diseñado para una producción en serie de piezas en el orden de los centímetros, adecuar este sistema para micro maquinado no es viable por la escala de trabajo y por la demanda de piezas de geometría específica o de profundidad variable.

Durante un proceso BECMM las variables eléctricas usadas para estimar la distancia inter-electrodos tienen un comportamiento no lineal, esto a causa de los remanentes, despojos e inclusive las irregularidades de la superficie a maquinar, aunado a esto el proceso electroquímico genera micro burbujas de hidrógeno (He, Qu, Zeng, & Tong, 2017), (Shimasaki & Kunieda, 2016) que por cavitación se quedan adheridas a la herramienta de trabajo lo cual interfiere con el proceso mismo y en el extremo de los casos lo llevan a paro por corto circuito.

Algunos investigadores han incursionado en el desarrollo de prototipos que puedan desarrollar procesos de maquinado electroquímico en el orden de los micrómetros tal es el caso de (Catarino, 2017), donde se presenta el desarrollo de un prototipo capaz de controlar un proceso de maquinado usando un control condicional que permite el descenso y ascenso de la herramienta de trabajo para la generación de barrenos ciegos de profundidad específica, el prototipo está conformado por un sistema mecánico que desplaza la herramienta de trabajo sobre la superficie a maquinar, hace uso de un electrodo de cobre con un diámetro de 3.1 mm y su resolución de movimiento ronda los  $20\mu\text{m}$ . El prototipo es completamente funcional sin embargo cuando se requieren barrenos de más de  $200\mu\text{m}$  de profundidad el margen de error aumenta sobrepasando el 30% de excedente de profundidad, no cuenta con un sistema de filtrado de electrolito por lo cual no puede realizar maquinados

prolongados y la acumulación de remanentes entre la herramienta y pieza de trabajo detiene el proceso por corto circuito.

Mientras algunos investigadores se centran en un todo, otros eligen mejorar solo un criterio del proceso tal es el caso del trabajo “*Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining*”, de donde se desarrolla una fuente pulsada a medio puente que permite conmutar el voltaje de polarización, su objetivo es contraponer sus resultados a los obtenidos implementando una fuente de voltaje tradicional de corriente directa, valida sus resultados mediante la generación de barrenos ciegos donde comprueba que al conmutar el voltaje de polarización la velocidad de remoción aumenta y el excedente en el diámetro final se reduce en un 14%, su experimentación se realiza manteniendo la frecuencia de la fuente de voltaje constante durante todo el proceso y deja la posibilidad de implementar dicha fuente en un sistema con puente completo que permita conmutar la polarización así como ajustar dinámicamente la frecuencia para que dependiendo del comportamiento del proceso se pueda suministrar un mayor o menor voltaje de polarización y con ello influir directamente la velocidad de remoción de material (Martinez, Granda, Zuñiga & Guerrero, 2015).

Atacando la problemática de la generación de micro burbujas en el trabajo “*Effects of pulsating electrolyte flow in electrochemical machining*” se propone la inyección de electrolito en un Angulo de 90° respecto a la herramienta de trabajo, inyectando directamente electrolito entre la herramienta y pieza de trabajo (Fang, Qu, & Zhang, 2014), los resultados simulados y prácticos demuestran que es una técnica viable para remover las burbujas de hidrogeno y los remanentes del proceso, sin embargo a medida que la profundidad del maquinado va aumentando esta técnica pierde eficacia debido a que la inyección del electrolito no se realiza de manera adecuada y el mismo sale proyectado al chocar directamente sobre la pieza de trabajo. Ante la misma problemática en el trabajo “*Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool*”, desarrollan un sistema de inyección-succión de electrolito, suministran el electrolito directamente sobre la pieza de trabajo y al mismo tiempo es succionado por un ducto dentro de la herramienta de trabajo, esto garantiza que se está suministrado la cantidad exacta de electrolito y al no existir excedentes o desbordamientos en la periferia el proceso de maquinado se puede desarrollar de manera adecuada (Guixian, Zhang, & Natsu, 2019). La técnica es innovadora, pero está pensada para maquinados en el orden de los centímetros el incorporarlo a una escala micrométrica no sería posible por el tamaño que debería tener el sistema de succión.

Considerando todos estos referentes, propuesta y patentes así como atender a las problemáticas que surgen al incorporar el proceso BECMM como lo es la remoción controlada de material, el control del flujo del electrolito, las micro burbujas de hidrogeno y su cavitación y sobre todo poder generar maquinado en el orden de los micrómetros, en el presente trabajo se propone el desarrollo de una herramienta tecnológica con la capacidad de incorporar todos los sistemas necesarios antes descritos, y así obtener un prototipo único en su tipo, con la capacidad de ajustar dinámicamente las variables eléctricas involucradas en el proceso para lograr una remoción de material controlada, en este contexto el prototipo tendrá la capacidad de aumentar o disminuir el voltaje de

polarización y con ello influir directamente en la corriente de maquinado y remoción de material y con ello en la distancia inter-electrodos del proceso.

## 2. Metodología

El proceso BECMM toma el nombre *bipolar* debido a que incorpora una fuente pulsada que tiene la capacidad de conmutar la polaridad entre la herramienta y pieza de trabajo, sus componentes básicos se presentan en la Figura 1, está conformado por una herramienta (3) y una pieza (4) de trabajo que deben ser de metal conductor, la herramienta de trabajo debe estar conectada al cátodo de la fuente de voltaje pulsada bipolar (1) mientras que la pieza de trabajo al ánodo, un electrolito (2) se hace fluir entre herramienta y pieza de trabajo mediante una bomba centrífuga (5), la adquisición de las variables voltaje de polarización y corriente de maquinado se realiza mediante los sensores (7) que con ayuda de un conversor analógico digital son enviados a una computadora de tamaño compacto (8) SBC (por sus siglas en ingles *Single Board Computer*), encargada de procesar, interpretar y generar una respuesta que gobierna el movimiento del sistema mecánico (6) que desplaza la herramienta de trabajo sobre la superficie a maquinar.

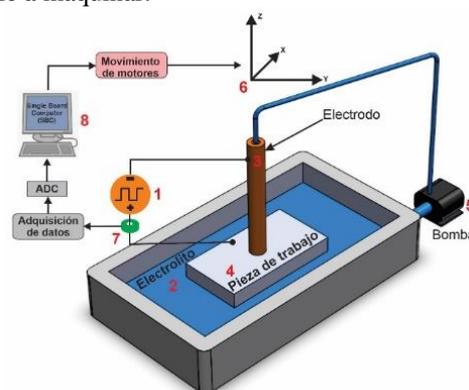


Figura 1: Representación esquemática de los elementos que conforman al proceso BECMM.

### 2.1. Contenedor de electrolito sobre eje X.

Ante la necesidad de contar con una cama de trabajo que permitiera posicionar la pieza de trabajo y que al mismo tiempo contuviera el electrolito usado en el proceso de maquinado, se fabricó un contenedor de ABS (por sus siglas *Acrilonitrilo butadieno estireno*) el cual recibió un tratamiento con vapor de acetona cristalizando su superficie y haciéndolo impermeable. Para inmovilizar la pieza de trabajo durante el proceso; se incorporó una pieza de sujeción de material PLA (ácido poliláctico) resistente a la corrosión, el contenedor de electrolito fue dispuesto sobre el soporte del eje “X” transfiriendo el desplazamiento lineal generado por el motor a pasos cuya configuración puede ajustarse para alcanzar una resolución de hasta  $10\mu\text{m}$  por cada paso que da el motor, el contenedor de electrolito puede ser ajustado de manera independiente en sus esquinas gracias un mecanismo incorporado por tornillos y resortes que permiten asegurar que el contenedor de electrolito se encuentra completamente vertical con respecto a la herramienta de trabajo, la sección antes descrita se muestra en la Figura 2.

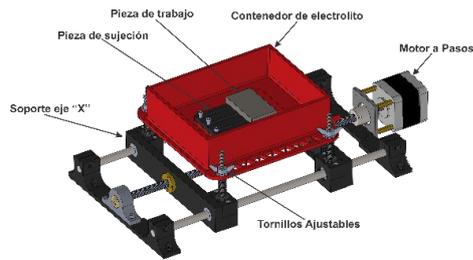


Figura 2: Contenedor de Electrolito instalado sobre eje "X".

## 2.2. Estructura de eje "Y" y "Z"

La estructura que se encarga del desplazamiento de la herramienta de trabajo sobre el plano cartesiano fue diseñada para que trabaje como una sola pieza de ingeniería, cuenta con dos motores a pasos encargado de transferir el movimiento circular a desplazamiento lineal permitiendo alcanzar una resolución de  $10\mu\text{m}$  por cada paso que dan los motores, las piezas con las que esta ensamblado fueron fabricadas mediante la técnica de impresión 3d usando plástico altamente resistente a la corrosión y desgaste provocado por los electrolitos usados por el proceso, cuenta con un soporte para el cabezal donde se posiciona la herramienta de trabajo, mismo que puede ser reajustado y desmontado de manera modular para su fácil mantenimiento, los componentes metálicos incorporados en la estructura están fabricados en aluminio estructural y acero inoxidable, en la Figura 3 se puede apreciar la estructura del eje "Y" y "Z".

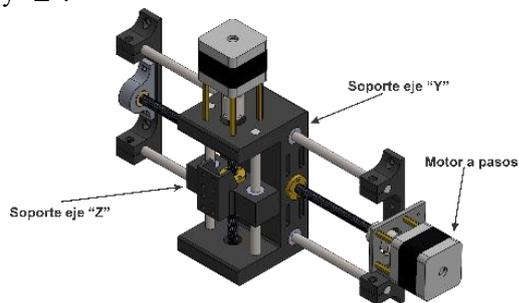


Figura 3: Estructura de eje "Y" y "Z".

La incorporación completa del sistema mecánico donde se incluye los 3 ejes mecánicos, así como la herramienta de trabajo pueden ser observadas en la Figura 4.

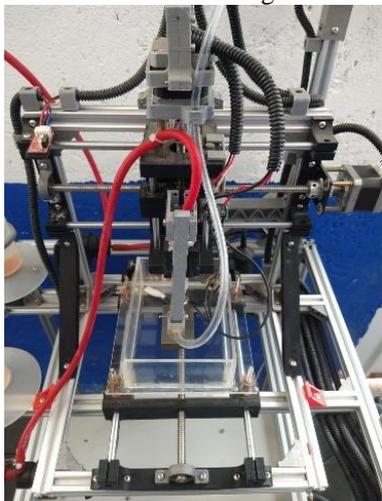


Figura 4: Incorporación de los 3 ejes mecánicos.

## 2.3. Incorporación de sistema neumático de inyección de aire.

Mientras el proceso BECMM se desarrolla, se generan reacciones químicas, resultado de la polarización entre herramienta y pieza de trabajo y de la presencia del electrolito. Se da un intercambio de iones entre los materiales de los cuales están compuestos los electrodos, catalizado por el electrolito que fluye entre ambos. Considerando el supuesto que la pieza de trabajo sea de un material compuesto en su mayor proporción de hierro y el electrolito empleado se una disolución acuosa de cloruro de sodio, es decir,  $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ , al someterlos al diferencial de potencial, se produce la disociación de las moléculas de agua, formado micro burbujas de Hidrogeno que con ayuda del flujo turbulento del electrolito quedan adheridas a la herramienta de trabajo, así como hidróxidos de Hierro  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , cloruro ferroso  $\text{FeCl}_2$ , presentes en forma de lodos y que quedan fijos entre la herramienta y pieza de trabajo, esto genera que el tiempo de maquinado no pueda ser prolongado debido a cortos circuitos. Este fenómeno puede ser apreciado gráficamente en la Figura 5, estas burbujas y residuos no pueden ser desplazados ni eliminados por el propio proceso, lo cual presenta un inconveniente al querer realizar maquinados de mayor profundidad ya que causan errores de medición en las variables eléctricas del proceso que son usadas para el monitoreo y control del mismo, inclusive llegando al extremo de ocasionar un corto circuito y por lo mismo un paro total del sistema.

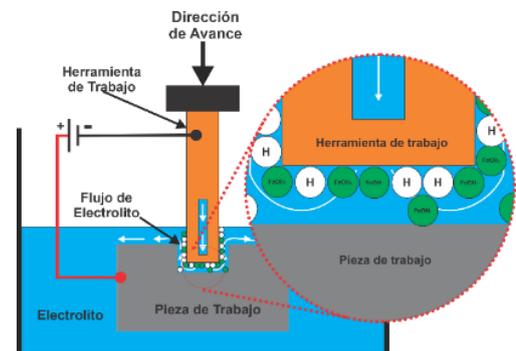


Figura 5: Burbujas de Hidrogeno e hidróxidos adheridos a herramienta y pieza de trabajo.

La naturaleza de un proceso de micro-maquinado requiere que los elementos, herramientas, accesorios y piezas de los que está conformado estén diseñados para poder desempeñarse eficientemente en esta escala, la herramienta de trabajo empleada en este tipo de proceso es una estructura tubular hueca de acero, similar a una aguja de jeringa medica que tiene un diámetro exterior de  $603\mu\text{m}$ , y que es empleada debido a la accesibilidad comercial, la distancia inter-electrodos es de  $240\mu\text{m}$ , criterio establecido a partir de experimentaciones y caracterizaciones según (Gallegos, Pérez, Granda, & Flores, 2018), el flujo del electrolito que se hace circular entre herramienta y pieza de trabajo, va de los 70-190 ml/min, y es debido a este último parámetro que se presenta un segundo fenómeno que afecta el desempeño del proceso de micro-maquinado, al ser un flujo bajo y al hacerlo circular por una tubería estrecha cuando sale expulsado de entre la herramienta y pieza de trabajo se forma una burbuja de fluido que cubre un área considerable tanto de la herramienta y pieza de trabajo, adicionalmente en el fluido también se encuentran remanentes del proceso de maquinado como lo son los hidróxidos que al

acumularse son la causa de alteraciones en la medición de las variables eléctricas del proceso.

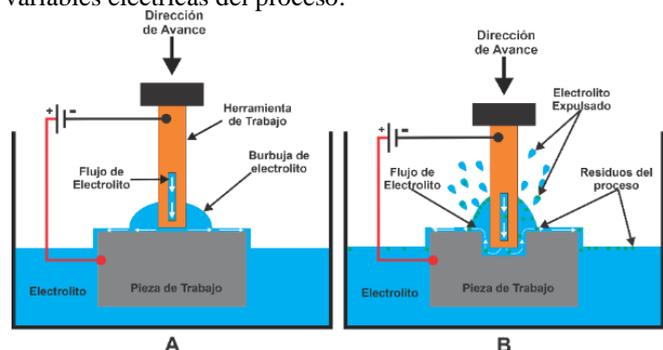


Figura 6 (A) (B): Concentración de electrolito entre herramienta y pieza de trabajo (A), acumulación y proyección de electrolito con remanentes después de un lapso de tiempo de maquinado (B).

En la Figura 6 (A) se puede apreciar como al inicio del proceso de maquinado electroquímico se concentra el electrolito entre la herramienta y pieza de trabajo, esto a causa de que se hace circular el electrolito en un flujo abundante por un espacio reducido, lo cual genera que este, quede adherido entre herramienta y pieza de trabajo, en la Figura 6 (B) se puede apreciar, como, después de un periodo de tiempo maquinando, la concentración de electrolito continua sin embargo debido a que la remoción de material sigue presente y ya ha generado una hendidura sobre la pieza de trabajo este sale proyectado en todas direcciones y los remanentes se concentran entre la herramienta y pieza de trabajo, lo cual interrumpe el proceso o genera resultados fuera de los parámetros deseados.

Dar solución a estas problemáticas representa un desafío, al ser un proceso que se desarrolla en el orden de los micrómetros, implementar una solución física resulta complicado, sin embargo poder desplazar las burbujas de Hidrogeno, los hidróxidos y concentración excesiva de electrolito usando una sola técnica es posible, partiendo de la base de sistemas de maquinado tradicional podemos analizar cómo se han enfrentado a problemáticas similares, trabajos relacionados profundizan en la importancia del flujo y dirección de inyección del electrolito, ante la problemática se ha propuesto el uso de un sistema neumático encargado de inyectar un flujo de aire en ángulo de 45° con respecto a la herramienta de trabajo, con el objetivo de desplazar el excedente de electrolito y con él las burbujas e hidróxidos generados durante el proceso, esta incorporación puede ser observada en la Figura 7.

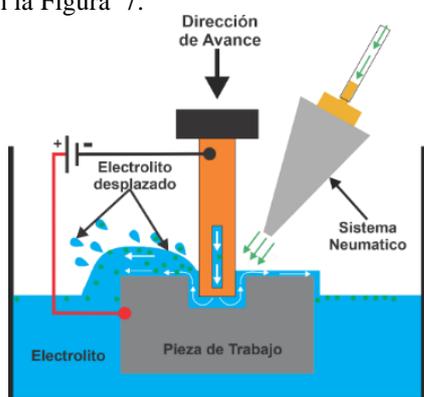


Figura 7: Incorporación de Sistema de inyección de aire a proceso BECM.

El sistema neumático hará uso de un sensor de presión diferencial con matrícula (Mpx10dp) el cual está conectado a

un conversor analógico digital (MCP3204) que le permite a la SBC raspberry adquirir la magnitud de esta variable y mediante una controladora conectada de manera serial ajustar el ciclo del trabajo de la bomba neumática usada para el suministro de aire, el diagrama de conexión se muestra en la Figura 8.

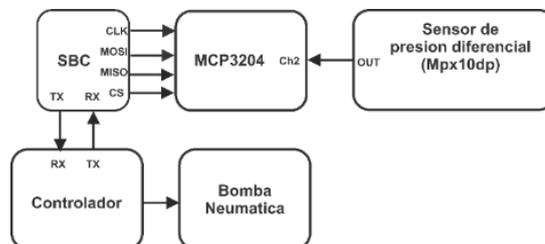


Figura 8: Diagrama esquemático de conexión de sistema neumático a SBC raspberry.

#### 2.4. Sistema de recirculación de electrolito.

Uno de los criterios que influyen directamente sobre el proceso BECM es el electrolito empleado, debido a que a medida que se desarrolla el proceso de maquinado se van generando remanentes, mismos que se mezclan con el electrolito presentándose en forma de lodos, interfiriendo directamente con el proceso de maquinado, se propuso el diseño de un sistema de filtrado por decantación presentado en la Figura 9 compuesto por dos recipientes conectados entre sí, donde una bomba centrífuga absorbe el electrolito usado almacenando en el contenedor principal donde se encuentra la pieza de trabajo para ser depositado en el contenedor 1, mediante una diferencia de niveles se logra un proceso de decantación lo cual hace que el electrolito precipite los remanentes al fondo del contenedor fluya el electrolito al contenedor 2, una segunda bomba centrífuga es la encargada de bombear el electrolito filtrado, incorporándolo nuevamente al proceso de maquinado haciéndolo fluir a través de la herramienta de trabajo.

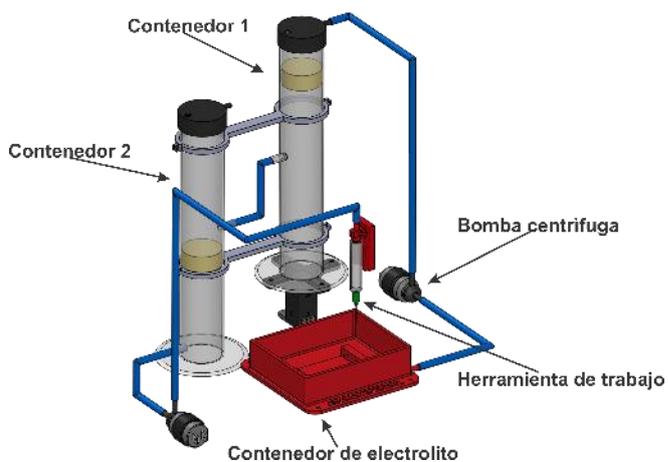


Figura 9: Sistema de recirculación de electrolito.

Para conocer la magnitud de del flujo de electrolito suministrado al proceso, se incorporó un sensor de caudal con matrícula (937-0820) posicionado entre el contenedor primario de electrolito y la bomba que suministra el mismo al proceso de maquinado tal como se aprecia en la Figura 10.

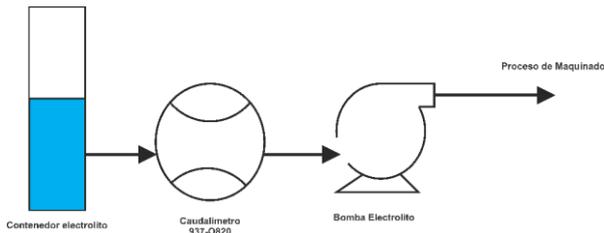


Figura 10: Incorporación de caudalímetro a sistema de recirculación de electrolito.

La incorporación del sensor se realiza directamente a la SBC y mediante una controladora y dependiendo de la magnitud del flujo del mismo, se puede ajustar de manera dinámica el ciclo de trabajo de las bombas que suministran el electrolito al proceso, el diagrama esquemático de esta incorporación se puede apreciar en la

Figura 11.

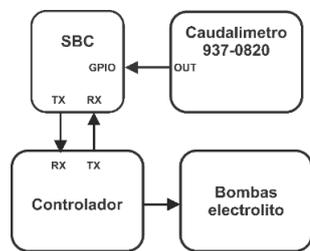


Figura 11: Diagrama esquemático de incorporación de caudalímetro.

### 2.5. Fuente pulsada bipolar

Para complementar las incorporaciones antes descritas y atacar la problemática generada por los remanentes del proceso y las micro burbujas que se adhieren a la herramienta de trabajo debido al efecto de cavitación, se desarrolló una fuente pulsada bipolar la cual permite la conmutación de la polaridad entre la herramienta y pieza de trabajo, por un periodo de tiempo se polariza la herramienta y pieza de trabajo al cátodo y ánodo de la fuente de voltaje denominándola etapa de “corte”, para posteriormente cambiar dicha polaridad quedando la herramienta y pieza de trabajo en el ánodo y cátodo respectivamente siendo esta etapa denominada de “limpieza” esta conmutación puede ser apreciada de manera grafica en la Figura 12.

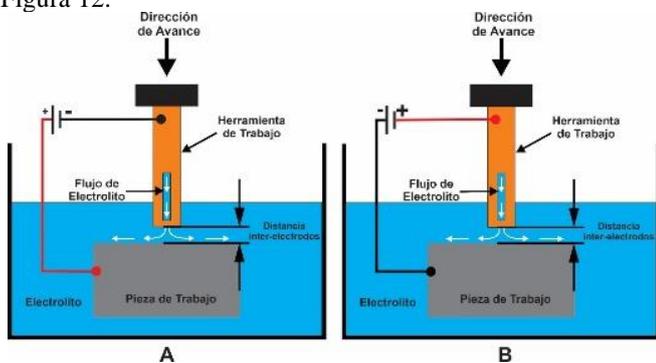


Figura 12: Conmutación de voltaje de polarización, etapa de corte (A), etapa de limpieza (B).

Al ser una fuente pulsada su funcionamiento puede ser controlado mediante el tren de pulsos que se le envía desde la

SBC, mediante la experimentación y validación se estableció la relación de pulsos para la etapa de corte y de limpieza siendo de 12 pulsos para la etapa de corte por cada 1 de la etapa de limpieza, esta conmutación se presenta en la Figura 13.

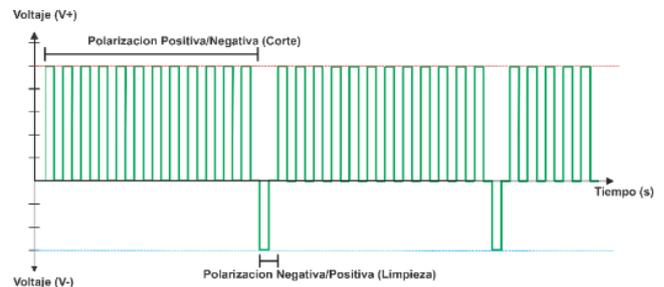


Figura 13: Relación de tren de pulsos para etapa de corte y limpieza.

El control de la fuente se realiza mediante una controladora que es gobernada por la SBC y que controla en simultaneo 2 fuentes independientes sincronizando la conmutación de ambas mediante la relación de tren de pulsos antes descrita y así lograr la bipolaridad de herramienta y pieza de trabajo.

### 2.6. Adquisición de variables eléctricas.

Para la adquisición de las variables eléctricas se incorpora un convertor analógico digital de matrícula MCP3204 el cual cuenta con una resolución de 12 bits y que está conectado mediante el protocolo SPI al SBC, un sensor de corriente RMS con matrícula T60404-N conectado en serie a la herramienta de trabajo permite la adquisición de la magnitud de la variable de corriente de maquinado, por otro lado para la obtención de la magnitud de la variable de voltaje de polarización se emplea un divisor de voltaje que asegura que las mediciones de salida no sobrepasaran los 5V lógicos y mediante un AD536 que estima el valor eficaz de la señal pulsada se obtiene la magnitud del voltaje de polarización del proceso de maquinado, estas conexiones pueden ser visualizadas en el diagrama de conexiones presentado en la Figura 14.

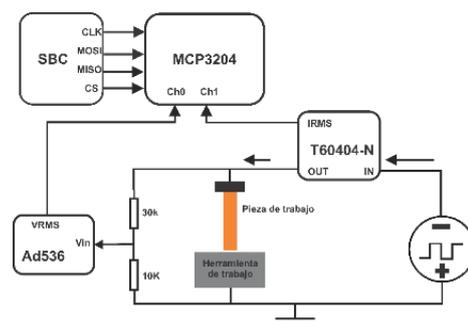


Figura 14: Diagrama de conexión de la etapa de adquisición de variables eléctricas.

## 3. Pruebas y resultados

Con todas las incorporaciones propuestas y desarrolladas se obtuvo un prototipo 100% funcional con la capacidad de controlar un proceso de micro manufactura pulsado bipolar mismo que se puede apreciar en la Figura 15. Para validar el correcto funcionamiento de la estación compacta de micro maquinado se propusieron 3 pruebas de barrenos ciegos con una profundidad preestablecida de 100, 200 y 300  $\mu\text{m}$ , el

objetivo es que una vez terminado el proceso de maquinado la profundidad alcanzada sea lo más cercana al valor deseado, los parámetros iniciales para estas pruebas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parameros de configuración para pruebas de barrenos ciegos.

Variable	Magnitud
Frecuencia	25 kHz
Amplitud pulso de maquinado	5 V
Amplitud pulso limpieza	3 V
Ciclo de trabajo	50%
Electrolito	H <sub>2</sub> O con una concentración en masa de 16.6% de NaCl
Material de trabajo	Acero AISI 1018
Distancia inter-electrodos inicial	240 μm
Electrodo	Estructura tubular de acero con un diámetro de 603 μm
Relación de pulsos bipolares	12:1
Flujo electrolito	110 ml/min
Presión Sistema neumático	6.3 kPa
Profundidad deseada	100 μm, 200μm, 300μm

Los criterios a considerar para la efectividad de la estación compacta de micro maquinado son; la profundidad final alcanzada y el sobre corte resultante, este último siendo un efecto propio del proceso de maquinado electroquímico y se deriva de la exposición prolongada entre herramienta y pieza de trabajo, debido a que cuando el proceso inicia el área expuesta entre herramienta y pieza de trabajo únicamente es la base de la herramienta de trabajo, sin embargo mientras esta va penetrando en la pieza de trabajo los laterales de la herramienta pasan a ser considerados área expuesta y por lo tanto existe una remoción continua de material. Los resultados de la experimentación se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados de pruebas de barrenos ciegos.

Prueba	Profundidad deseada (μm)	Profundidad alcanzada (μm)	Diferencia (μm)	Sobre corte (μm)	Porcentaje Sobre corte (%)	Tiempo (s)
PBC1	100	97	-3	39	6.1	66
PBC2	200	202	+2	65	10.3	143
PBC3	300	306	+6	92	14.3	228

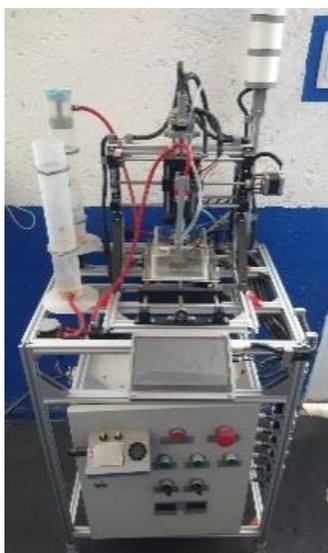


Figura 15: Estación compacta de micro maquinado.

Al analizar los resultados es notable la diferencia de tiempos de maquinado, esto debido a que a mayor profundidad mayor es el tiempo que dura el proceso, la prueba de barreno ciego PBC1 presento una profundidad menor a la esperada mientras que las pruebas PBC2 y PBC3 presentan un excedente, sin embargo considerando que el sistema mecánico cuenta con una resolución mínima de 10 μm se considera que esta dentro del margen de error permisible, debido a que el sistema mecánico es incapaz de hacer ajustes en una escala menor a la mencionada.

Un rubro que también es notorio es el efecto de sobre corte, es decir el excedente en el diámetro final el cual considerando que la herramienta de trabajo usada tiene un diámetro externo de 603μm el efecto de sobre corte no supera mas de 15%, un porcentaje aceptable, teniendo en cuenta que mientras el proceso de maquinado se desarrolla el área expuesta incrementa gradualmente, dando como resultado a este efecto, no es posible eliminar el sobre corte de manera definitiva sin embargo mantenerlo en un porcentaje mínimo representa un resultado satisfactorio.

La evolución de la magnitud de la corriente de maquinado de las pruebas de barrenos ciegos se presenta en la Figura 16, se puede observar los ajustes de descenso que realiza el sistema mecánico, estos ajustes se logran mediante la estimación indirecta de la distancia inter electrodos haciendo uso de la corriente de maquinado, existe una relación entre esta y la distancia entre la herramienta y pieza de trabajo, mientras la remoción de material se realiza de manera adecuada el espacio entre herramienta y pieza de trabajo aumenta y con ello la corriente de maquinado desciende, al descender hasta un punto preestablecido la SBC realiza un reajuste mecánico, descendiendo 10μm la herramienta de trabajo, retomando la magnitud de la corriente de maquinado a su valor original, sin embargo en todas la pruebas es notorio que tras cada ajuste el punto de referencia va aumentado esto como resultado de que la herramienta está penetrando en la pieza de trabajo y con ello aumenta el área expuesta, criterio que debe considerar la SBC para realizar los ajustes de descenso en el momento indicado, entre mayor sea la profundidad deseada mayor será el incremento del punto de referencia para los ajustes de descenso, esto debido a que el área de exposición aumenta considerablemente.

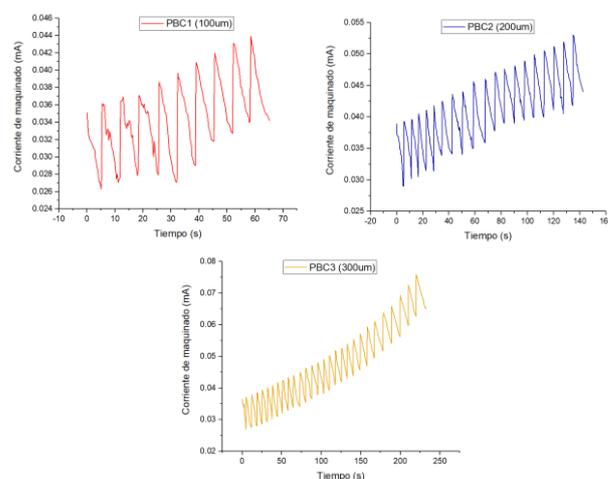


Figura 16: Comportamiento de la Corriente de maquinado en pruebas de barrenos ciegos.

En la Figura 17, se muestra la micrografía con los resultados de las pruebas de barrenos ciegos complementando la información presentada en la Tabla 2, los diámetros finales son resaltados confirmando que a mayor profundidad deseada mayor es el efecto de sobre corte, la uniformidad y geometría final da evidencia de la calidad de maquinado que se puede generar haciendo uso de la estación compacta de micro maquinado desarrollada, si bien lo más notorio es diámetro excedente final, se tiene que destacar el porcentaje de este, no superando el 15% en la prueba de mayor profundidad que es la de  $300\mu\text{m}$ , haciendo de esto un indicativo que demuestra que la maquina desarrollada se desempeña de manera correcta.

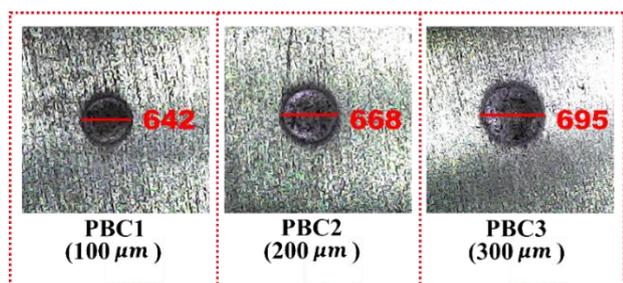


Figura 17: Micrografía de resultados de pruebas de barrenos ciegos.

#### 4. Conclusiones

Se logró obtener una herramienta tecnológica con la capacidad de realizar micro maquinado electroquímico y sus variantes, en específico el proceso BECMM, esta herramienta cumple con las especificaciones físicas y lógicas que demanda un proceso de esta naturaleza, al estar fabricada con materiales resistentes a la corrosión garantiza ser de utilidad durante periodos prolongados de maquinado.

La herramienta desarrollada permite incursionar en los micro procesos de maquinado electroquímico ya sea de manera comercial o como una herramienta educativa donde se puedan validar diversas técnicas de control. Con el uso de una fuente pulsada bipolar se extiende el tiempo de maquinado al realizar un proceso de limpieza sobre la herramienta de trabajo, evitando la acumulación de micro residuos y micro burbujas en la herramienta de trabajo.

El incorporar un sistema de recirculación de electrolito permite prolongar la vida útil del proceso de maquinado, reutilizándolo continuamente, gracias a sé que incorpora un sistema de filtrado basado en decantación, lo cual brinda la posibilidad de agilizar el tiempo que se demora en realizar un proceso de esta naturaleza, aunado a esto, la incorporación de un sistema neumático de inyección de aire permite desplazar de manera más eficiente los remanentes del proceso así como el electrolito que se acumula entre la herramienta y pieza de trabajo, es importante destacar que este último criterio es poco conocido en la rama del micro maquinado convirtiendo a este prototipo en pionero en el área.

La estación de micro maquinado resulta ser una herramienta viable, al tener una resolución de hasta  $10\mu\text{m}$  en cada uno de sus ejes coordenados y que sobre todo su margen de error este dentro de esta escala, se evalúa la incorporación de una técnica de control robusto capaz de admitir múltiples variables de entrada y que a su vez se puedan ajustar de manera dinámica todos los parámetros de configuración de la estación de micro maquinado con el objetivo de obtener maquinados de longitud, profundidad y geometrías complejas que estén en el orden de los micrómetros.

#### Referencias

- Bhattacharyya, B. (2015). Electrochemical Micromachining for nanofabrication. *Elsevier*, 25-52. doi:10.1016/b978-0-323-32737-4.00002-5
- Catarino Aguilar, O. (2017). *Sistema asistido por computadora para la remoción controlada de material en un procesos de Maquinado Electroquímico*. México: Universidad Autonoma del Estado de México, Atlacomulco.
- Fang, X., Qu, N., & Zhang, Y. (2014). Effects of pulsating electrolyte flow in electrochemical machining. *Journal of Materials Processing Technology*(214), 36-43.
- Gallegos Miranda, I., Perez Martinez, J. A., Granda Gutierrez, E. E., & Flores Fuentes, A. A. (2018). Caracterización de Proceso de Maquinado Electroquímico por Pulsos (PECM). *Journal CIM*.
- Grover P., M. (2010). *Fundamentos de Manufactura Moderna* (4° ed.). México: Mc GrawHill.
- Guixian, L., Zhang, Y., & Natsu, W. (2019). Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- Hassan, A., & Gawad, E.-H. (2005). *Advanced Machining Processes*. Alexandria: McGraw-Hill.
- He, H. D., Qu, N. S., Zeng, Y. B., & Tong, P. Z. (2017). Improvement of Hydrogen Bubbles Detaching from the Tool Surface in Micro Wire Electrochemical Machining by Applying Surface Microstructures. *Journal of The Electrochemical Society*(164), 248-259.
- Inman, M., & Taylor, j. (2011). *Estados Unidos Patente WO2011/156301A1*.
- Kalpakistan, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería Y Tecnología*. (5° ed.). Pearson.
- Katz, Z., & Tibbles, C. (2010). Analysis of micro-scale ECM Process. *Journal of Advance Manufacturing Technology*, 35, 923-928.
- Martinez Alvarado, R., Granda Gutierrez, E. E., Zuñiga, L. M., & Guerrero, R. (2015). Pulsed Power Supply for Electrochemical Machining. *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 3(15), 1-6.
- Nagata, M., & Wacabayashi, K. (2000). *japón Patente n° 1999347888*.
- Ronnei, M., & Murali, S. (2012). Modeling and fabrication of micro tools by pulsed electrochemical machining. *Journal of materials Processing Technology*, 1567-1572. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.03.004
- Shimasaki, T., & Kunieda, M. (2016). Study on influences of bubbles on ECM gap phenomena using transparent electrode. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*(65), 225-228.
- Zdeblick, W., Zheng, Y., Bischof, K., & Liang, J. (2007). *Mexico Patente n° MX20070110336A*.