

DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO
ESPECIALIZADO EN CORTE DE METALES USADOS EN LA INDUSTRIA
BIOMÉDICA

ANDERSON MAURICIO CASTRO ORTIZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C

2021

DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO
ESPECIALIZADO EN CORTE DE METALES USADOS EN LA INDUSTRIA
BIOMÉDICA

ANDERSON MAURICIO CASTRO ORTIZ

Proyecto de trabajo de grado en la modalidad de solución a un problema de
ingeniería para optar al título de ingeniero mecánico

Director

Ing. Jesús David Villarreal López

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C

2021

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 17 de marzo de 2022

DEDICATORIA

Este trabajo de grado, está dedicado a mi familia que me apoyo en todo el proceso de formación como ingeniero, por ser mi fuente de motivación e inspiración, en especial a mi madre Mireya Ortiz García, por haberme forjado con buenos hábitos y valores lo cual me ha ayudado a salir de los momentos difíciles, a mi padre Isaac Castro Santana quien aunque ya no se encuentra con nosotros, me ilumina a seguir adelante con mis proyectos, a mis hermanos Oscar Castro Ortiz y Johanna Castro Ortiz quienes han sido de gran motivación para nunca rendirme con mis estudios y metas, a mis amigos de toda la vida Nicolás Monzón García, Diego Alejandro Cifuentes Álvarez, Juan David Rodríguez Velasco, por estar siempre, en las buenas y en las malas, a todos ellos por ser esa razón aliciente para el cumplimiento de mis objetivos que significan orgullo y alegría para ellos y también para mí.

AGRADECIMIENTOS

El principal agradecimiento a mi familia por su comprensión y apoyo constante a lo largo de mis estudios, quisiera agradecer también a mi director de trabajo de grado Ing. Jesús David Villareal López, que gracias a su paciencia y atención se logró desarrollar un trabajo investigativo y de diseño de calidad, a todos los docentes e ingenieros que a lo largo de mi vida universitaria me enseñaron y dedicaron su tiempo para formarme como un buen ingeniero, a mis compañeros de estudio, en especial a Brayan Esteven Prada Garnica, Alejandro Alfonso Bejarano Diaz y David Andrés Fernández Ramírez , que estuvieron siempre apoyándome y motivándome en mis proyectos. a todas las personas que de una y otra forma me apoyaron en la realización de este trabajo, para todos ustedes mi total agradecimiento.

ÍNDICE

RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1 OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2 MARCO REFERENCIAL.....	19
2.1 MARCO TEÓRICO.....	19
2.1.1 PROCESOS DE MECANIZADO POR ELIMINACIÓN DE MATERIAL 20	
2.1.2 PULIDO ELECTROQUÍMICO (PEQ).....	23
2.1.3 MECANIZADO ELECTROQUÍMICO (MEQ).....	24
2.1.4 MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO (μ -MEQ).....	25
2.1.5 PARÁMETROS DE CONTROL DEL PROCESO DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO.....	28
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	33
2.3 ESTADO DEL ARTE.....	35
3 REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE.....	37
3.1 IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE, REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES DE DISEÑO.....	38
3.1.1 ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA.....	40
3.1.2 EVALUACIÓN DEL MERCADO.....	42
3.1.3 RELACIÓN DE REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES.....	43

4	DISEÑO CONCEPTUAL de la MÁQUINA DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO	45
4.1	SUBSISTEMAS DE LA MÁQUINA Y FASES PARA EL PROCESO ELECTROQUÍMICO.....	45
4.1.1	GENERACIÓN DISEÑOS CONCEPTUALES.....	46
4.1.2	PRIMER DISEÑO CONCEPTUAL	47
4.1.3	SEGUNDO DISEÑO CONCEPTUAL	49
4.1.4	TERCER DISEÑO CONCEPTUAL	52
4.2	COMPARACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS DE CADA DISEÑO CONCEPTUAL.....	54
4.2.1	SUBSISTEMAS MÓDULO DE TRABAJO Y SUPERVISIÓN	55
4.2.2	SUBSISTEMAS MÓDULO DE CIRCULACIÓN DEL ELECTROLITO Y FILTRACIÓN	56
4.2.3	SUBSISTEMAS MÓDULO DE ALIMENTACIÓN Y FUENTE ELÉCTRICA 61	
4.2.4	SUBSISTEMAS MÓDULO DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA.....	62
4.3	EVALUACIÓN SUBSISTEMAS.....	64
4.3.1	EVALUACIÓN MÓDULO DE TRABAJO Y SUPERVISIÓN	64
4.3.2	EVALUACIÓN MÓDULO DE ALIMENTACIÓN Y FUENTE ELÉCTRICA 68	
4.4	DISEÑO CONCEPTUAL DEFINITIVO.....	70
5	DISEÑO DE DETALLE PARA UNA MÁQUINA DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO	71
5.1	MÓDULO DE TRABAJO Y SUPERVISIÓN.....	71
5.1.1	CÁTODO (HERRAMIENTA) Y ÁNODO (PIEZA DE TRABAJO).....	71
5.1.2	CÁTODO.....	71

5.1.3	SUJECCIÓN ELECTRODO.....	72
5.1.4	MANDRIL.....	72
5.1.5	EJE CONEXIÓN ELÉCTRICA.....	72
5.1.6	CONJUNTO PARA LA HERRAMIENTA DE TRABAJO.....	73
5.1.7	SUJECCIÓN DEL ÁNODO O PIEZA DE TRABAJO.....	73
5.1.8	MÓDULO DE SUPERVISIÓN.....	74
5.2	MÓDULO DE CIRCULACIÓN DEL ELECTROLITO Y FILTRADO.....	75
5.2.1	RESERVORIO DE ELECTROLITO.....	78
5.2.2	RECOLECTOR DE ELECTROLITO.....	78
5.2.3	ACCESORIOS Y TUBERÍA.....	79
5.2.4	FILTRADO DE LA MAQUINA ELECTROQUÍMICA.....	81
5.2.5	FILTRACIÓN DE LA BOMBA.....	81
5.2.6	FILTRACIÓN DEL RESERVORIO.....	82
5.2.7	CONTROL NIVEL DEL ELECTROLITO.....	82
5.2.8	BOMBA DE SUMINISTRO DE ELECTROLITO.....	83
5.2.9	CONTROL DE CAUDAL.....	89
5.3	MÓDULO DE ALIMENTACIÓN Y FUENTE ELÉCTRICA.....	90
5.3.1	FUENTE ELÉCTRICA.....	90
5.3.2	CONTROL DE LA CORRIENTE.....	93
5.4	MÓDULO DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA.....	93
5.4.1	MECANISMO DE AVANCE Y SELECCIÓN DEL MOTOR.....	93
5.4.2	SELECCIÓN MOTOR PASO A PASO.....	94
5.4.3	TORNILLO DE POTENCIA.....	97
5.5	MÓDULO DE SISTEMA DE SEGURIDAD.....	99

6	IMPACTOS.....	101
7	CONCLUSIONES.....	102
	BIBLIOGRAFÍA.....	104
	ANEXOS.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso torneado [8].....	20
Figura 2. Maquinado ultrasónico [9].....	21
Figura 3. Precisión dimensional y acabado superficial obtenido utilizando varios métodos de fabricación [11].	22
Figura 4. Técnicas precursoras en el micromecanizado electroquímico. Autor.	23
Figura 5. Proceso del pulido electroquímico [12].	23
Figura 6. Disolución electroquímica controlada [14]	24
Figura 7. Aplicación micromecanizado electroquímico [15].	25
Figura 8. Esquematización del proceso [17].	26
Figura 9. Set up micromecanizado electroquímico [14].	27
Figura 10. Esquema del equipo de micromecanizado electroquímico. Autor [18].	28
Figura 11. Aspectos del electrodo. Autor [1].	29
Figura 12. Diseño electrodo para micromecanizado electroquímico [10].....	30
Figura 13. Desarrollo de micro agujeros y aplicación de distintos electrodos [10].	30
Figura 14. Protección de la superficie lateral del electrodo [14].....	31
Figura 15. Efecto de la duración y amplitud del pulso [14].....	32
Figura 16. Factor importante en el desplazamiento del electrodo [14].....	33
Figura 17. Parámetros de control [19].....	33
Figura 20. Correlaciones de las especificaciones de ingeniería. Autor.....	41
Figura 21. Análisis comparativo. Autor.	42
Figura 22. Relación requerimientos con las especificaciones del cliente. Autor. ...	43
Figura 23. Grado de dificultad e importancia de cada especificación. Autor.....	44

Figura 24. Primer concepto de ingeniería. Autor.....	48
Figura 25. Segundo concepto de ingeniería. Autor.....	50
Figura 26. Tercer concepto de ingeniería. Autor.....	53
Figura 27. Concepto definitivo. Autor.....	70
Figura 28. Mandril porta brocas [41].	72
Figura 29. Eje para la conexión eléctrica. Autor.....	73
Figura 30. Conjunto herramienta de trabajo. Autor.....	73
Figura 31. Soporte herramienta de trabajo. Autor.....	74
Figura 32. Soporte herramienta de trabajo. Autor.....	74
Figura 33. Pulsadores On/Off [42].	75
Figura 34. Reservorio. Autor.....	78
Figura 35. Recolector. Autor.	78
Figura 36. Modelo sistema de transporte de fluido. Autor.....	79
Figura 37. Tubería RDE 9 PVC [44].....	81
Figura 38. Filtro de anillos [45].....	82
Figura 39. Filtro de bolsa [46].	82
Figura 40. Interruptor de nivel tipo flotador [47].	83
Figura 41. Viscosidad cinemática de la solución [48].....	85
Figura 42. Curva de funcionamiento bomba [50].	88
Figura 43. Bomba de diafragma [50].....	89
Figura 44. Rotámetro [51].	89
Figura 45. Extractor axial [53].	90
Figura 46. Soldadora Inverter ET 300iP [62].....	92
Figura 47. Datos técnicos soldadora Inverter ET 300iP [62].....	92

Figura 48. Amperímetro analógico [63].	93
Figura 49. Mecanismo de avance. Autor.	94
Figura 50. Motor a paso a paso [64].	95
Figura 51. Motor a paso a paso [64].	96
Figura 52. Control motor paso a paso. Autor [64].	97
Figura 53. Pulsador de emergencia [66].	100
Figura 54. Final de carrera. [67].	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Requerimientos del cliente. Autor con base a los resultados de la encuesta.	39
Tabla 2 Importancia requerimientos. Autor con base a los resultados de la encuesta.	40
Tabla 3 Grado de importancia especificaciones de ingeniería. Autor.	41
Tabla 4. Subsistemas primer diseño conceptual. Autor.	47
Tabla 5. Subsistemas segundo diseño conceptual. Autor.	50
Tabla 6. Subsistemas tercer diseño conceptual. Autor.	52
Tabla 7. Comparación de alternativas de cada diseño conceptual. Autor.	55
Tabla 8. Ventajas y desventajas subsistemas del módulo de trabajo y supervisión. Autor.	56
Tabla 9. Ventajas y desventajas subsistemas del módulo de circulación y filtrado. Autor.	61
Tabla 10. Ventajas y desventajas subsistemas del módulo de alimentación y fuente eléctrica. Autor.	62
Tabla 11. Ventajas y desventajas subsistemas del módulo de avance de la herramienta. Autor.	63
Tabla 12. Escala de calificación de Thomas Saaty. Autor.	64
Tabla 13. Matriz del subsistema estructura de trabajo y supervisión. Autor.	65
Tabla 14. Matriz del subsistema sujeciones ánodo y cátodo. Autor.	65
Tabla 15. Matriz del subsistema depósito y retorno electrólito. Autor.	66
Tabla 16. Matriz del subsistema de circulación del electrolito. Autor.	66
Tabla 17. Matriz del subsistema transporte del electrolito. Autor.	67
Tabla 18. Matriz del subsistema filtrado del electrolito. Autor.	67

Tabla 19. Matriz del subsistema extracción de gases. Autor.	68
Tabla 20. Matriz del subsistema de alimentación y fuente eléctrica. Autor.....	68
Tabla 21. Matriz del subsistema mecanismo de avance. Autor.	69
Tabla 22. Matriz del subsistema motor. Autor.....	70
Tabla 23. Electrolitos empleados con su concentración requerida para diferentes metales. Autor [43]	77
Tabla 24. Cálculo de velocidades a diferentes diámetros. Autor.	80
Tabla 25. Diámetros para selección de la tubería. Autor.	81
Tabla 26. Parámetros óptimos en el mecanizado en electroerosión. Autor [60]. ...	91
Tabla 27. Densidades de corriente eléctrica utilizadas para el mecanizado electroquímico de algunos metales. Autor [61].	91
Tabla 28. Accesorios para mecanismo de avance. Autor.	93
Tabla 29. Cálculos selección motor paso a paso, Autor.	94
Tabla 30. Matriz de decisión de la selección del motor. Autor.	95
Tabla 31. Dimensiones cuerdas ACME [65].	98
Tabla 32. Cálculo tornillo de potencia. Autor [65].....	99
Tabla 33. Conclusiones cálculo tornillo de potencia. Autor [65].	99

RESUMEN

El presente proyecto expone el desarrollo del diseño de una máquina para mecanizado electroquímico para la industria biomédica en Colombia. A través de la implementación de la metodología de diseño, se identifican las necesidades funcionales del equipo, las cuales se plasman en un diseño conceptual que en complemento con una matriz de casa de la calidad, permiten la realización de un diseño de detalle sobre el cual se elaboraron los cálculos pertinentes que permitieron la correcta selección de componentes, resultando en el desarrollo de un equipo que cumple a cabalidad con los requerimientos determinados, cuyo diseño permite su futura fabricación para hacer parte de la de la facultad de Ingeniería Mecánica de la USTA.

Los procesos no convencionales hoy en día son una tecnología moderna que tiene la capacidad de desprender, cortar, formar y desarrollar en casi cualquier tipo de material piezas con una complejidad elevada. Este proyecto muestra y estudia, el diseño de una máquina de micromecanizado electroquímico el cual parte como base en la investigación de múltiples artículos y diseños de máquinas relacionados con la temática, con el fin de crear una maquina adecuada a las necesidades de la industria biomédica en Colombia. El resultado del presente estudio demuestra la viabilidad del diseño de la máquina electroquímica y un óptimo comportamiento de trabajo.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de mecanizado son parte fundamental en la industria, porque tienen una gran versatilidad en la fabricación de piezas con diferentes tipos de geometría y un gran acabado superficial. Los métodos más comunes para realizar diferentes tipos de mecanizado, se realizan mediante desprendimiento de material, deformación plástica de la pieza o añadir un nuevo material al proceso. [1]

Estos se dividen en dos: convencionales y no convencionales.

La demanda de microcomponentes a escalas micrométricas ha aumentado de manera exponencial en diferentes industrias. Una de ellas es la industria biomédica, dicho sector, ha venido implementando nuevas tecnologías de microfabricación, las cuales ofrecen un gran potencial para desarrollar dispositivos compactos con altas funcionalidades. Las aplicaciones incluyen herramientas de diagnóstico, instrumentación quirúrgica, órganos artificiales, entre otras. [2]

Actualmente en Colombia la comunidad científica y medica reconoce tres problemas fundamentales que no permiten generar avances en la industria biomédica en investigación y nuevas aplicaciones. La primera de ellas indica que es la incompatibilidad de los recursos usados con el tejido que se pone en contacto, generando así problemas de salud en las personas que están expuestas a dicho proceso, la segunda es la falta de conocimientos en estas áreas, ya que en algunos casos no se tiene la técnica para hacer uso de las interfaces programables necesarias y finalmente, la última causa es que los criterios convencionales no son los adecuados para estos dispositivos médicos, porque se encuentran alto índices de fallos respecto a los diseños y fabricación que se dan por la ingeniería mecánica en dichas máquinas industriales. [3]

De manera general, se encuentra que las causales anteriormente nombradas, se deben a la falta de conocimientos de variables usadas en el proceso de microcomponentes aplicado en el sector biomédico colombiano, por ende, utilizar técnicas no convencionales como el micromecanizado electroquímico ayuda de

manera exponencial al desarrollo de esta industria y la posibilidad de tener mejores implementos a la hora de realizar cirugías o implantes que involucre al ser humano, ya que este es un procedimiento que presenta un excelente acabado superficial, con un bajo desgaste de la herramienta, libre de grietas y siendo un proceso de un solo paso. [4]

En consecuencia, el diseño de un equipo de micromecanizado electroquímico, contribuiría al desarrollo biomédico, tecnológico e industrial del país, siendo una propuesta de innovación y avance para los procesos de remoción de material que facilitara la fabricación de piezas biomédicas a escalas micrométricas.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una máquina para micromecanizado electroquímico especializado en corte de metales usados en la industria biomédica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los requerimientos de ingeniería en el sector biomédico colombiano para implementar un correcto uso de los metales en el micromecanizado electroquímico.
- Elaborar un diseño conceptual para una máquina de micromecanizado electroquímico.
- Realizar un diseño de detalle mediante la selección de alternativas planteadas para una máquina de micromecanizado electroquímico.

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO TEÓRICO

A partir de 1833, Faraday estableció las leyes de la electrolisis, las cuales fueron la base para las investigaciones que se verían años más tarde en cuanto al electro disposición y electrotécnicas de disolución. En 1929, el investigador ruso W. Gussef por primera vez llevó a cabo un proceso para mecanizar un material anódicamente mediante el uso de electrolitos. [5]

Desde finales de la década de 1950 se vienen implementando investigaciones para estimular el desarrollo de nuevas formas de diseñar y construir máquinas con dimensiones muy pequeñas. El primer desafío para esta idea fue construir un libro con una superficie 25000 veces más pequeño que el original, cuyo objetivo era ser leído mediante un microscopio electrónico. En 1960, el segundo desafío fue hacer un motor completamente funcional en dimensiones menos de 1/64. Hasta 1987 se vino a reconocer como una técnica necesaria para el desarrollar este tipo de proyectos, con un dispositivo transistor de compuerta resonante. [6]

También en 1960 y 1970 esta técnica se aplicó especialmente en las turbinas de gas y en las industrias aeroespaciales, ya que contaban con el mecanizado de grandes componentes hechos de metales avanzados y difíciles de cortar. En 1990, este procedimiento se emplea de igual manera en las empresas del sector biomédico, automotriz y aeroespacial, quienes actualmente siguen siendo los principales usuarios de este mecanizado. [5]

Aunque se han generado varios avances en la implementación de nuevas técnicas de mecanizado, tradicionalmente se ha utilizado el silicio para fabricar microcomponentes, teniendo algunas fallas porque este material no es adecuado para ciertas prácticas que requieren una alta resistencia, rigidez y biocompatibilidad. El micromecanizado electroquímico es una técnica relativamente nueva, la cual ofrece una mayor precisión en las dimensiones de la pieza sin generar contacto de la herramienta con el material a trabajar, es decir, que esta tiene un mayor ciclo de vida ya que no se ve desgastada por la eliminación del mismo, aunque solo es

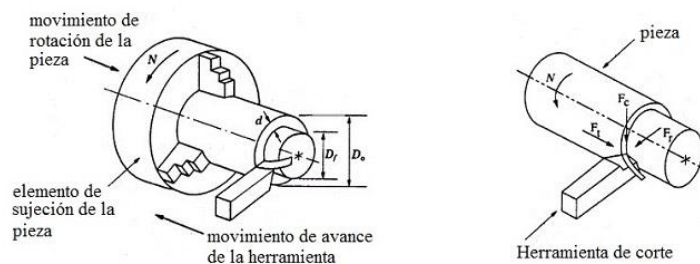
aplicable a materiales conductores de electricidad como lo son el acero inoxidable, cobre, níquel y aluminio. [7]

Algunas de las mejoras que se han encontrado con esta técnica, se han dado de manera experimental, donde se tiene en cuenta las propiedades del material que se va a mecanizar ya que esto influye de manera directa la velocidad de la disolución para el micromecanizado electroquímico o por otro lado el diámetro del electrodo (herramienta de corte) porque entre más pequeño sea, se genera una mayor velocidad en el corte y se observa un mejor acabado superficial. [4]

2.1.1 PROCESOS DE MECANIZADO POR ELIMINACIÓN DE MATERIAL

2.1.1.1 PROCESOS CONVENCIONALES

Eliminación de material por medios mecánicos, estos procesos producen el arranque de viruta por la interferencia de la pieza a mecanizar y la herramienta cortante en movimiento relativo (movimiento de corte, avance y penetración de la herramienta). Hay ocasiones, en la que las piezas no pueden ser mecanizadas por procesos convencionales, debido a la elevada dureza de la pieza, por lo que conlleva a un desgaste excesivo de la herramienta y no sería conveniente este tipo de técnica, también puede ocurrir que la geometría de la pieza a mecanizar sea muy compleja o muy flexible, por lo que no permite su adecuada sujeción en las mordazas del equipo.



Esquema del proceso de torneado

Figura 1. Proceso torneado [8].

Dentro de este tipo de procesos, hay una gran variedad de técnicas (fresado, cizallado, rectificado, torneado), al existir un contacto constante pueden aparecer ciertas complicaciones debido a la existencia de:

- Elevada dureza
- Geometría compleja
- Demasiado flexible
- Aumento de temperatura
- Tensiones residuales
- Acabado superficial
- Tolerancia dimensional estricta

Al ocurrir esto, se puede optar por usar los procesos no convencionales.

2.1.1.2 PROCESOS NO CONVENCIONALES

La eliminación del material se va a producir por otros medios diferentes a los mecánicos (químicos, electroquímicos, termoeléctricos), con estas técnicas se puede aplicar mecanizados por ultrasonidos, laser, electroerosión o el mecanizado electroquímico

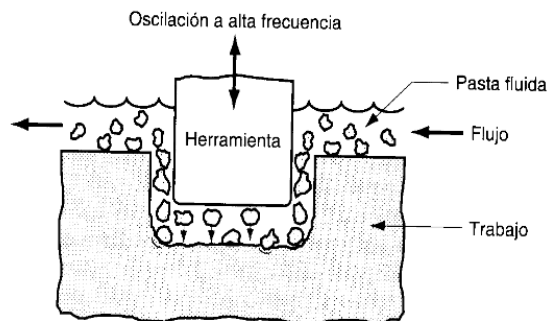


Figura 2. Maquinado ultrasónico [9].

El mecanizado de materiales a micro y submicroescalas se considera una tecnología clave del futuro y juega un papel cada vez más importante en la

miniaturización de máquinas completas, con importantes aplicaciones como bioingeniería, MEMS, microsensores y micro actuadores. [10]

Todas estas industrias van a necesitar la fabricación de piezas que tengan un acabado superficial de alta calidad en el mecanizado de piezas de pequeñas dimensiones (micrómetros), como se aprecia en la siguiente imagen, se puede evidenciar las dimensiones de la estructura frente a la calidad superficial, se puede comprobar como las técnicas de micromecanizado, son las que ofrecen los menores valores de rugosidad superficial.

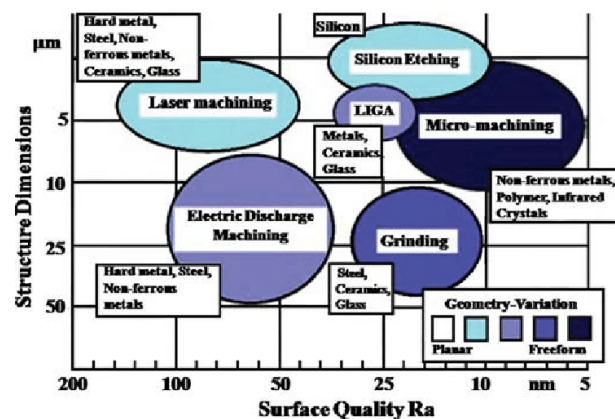


Figura 3. Precisión dimensional y acabado superficial obtenido utilizando varios métodos de fabricación [11].

Estas técnicas de micromecanizado ofrecen la máxima flexibilidad para el mecanizado de múltiples geometrías. En particular, el micromecanizado electroquímico presenta ventajas por ser una técnica de disolución anódica frente a otras técnicas litográficas, micromecanizado convencional y micromecanizado por electroerosión.

Técnicas de mecanizado basadas en procesos electroquímicos

- Procesos de arranque de material de la pieza de trabajo metálica mediante reacciones electroquímicas de disolución debidas al elevado gradiente de

potencial creado en la interfase metal/electrolito y que están bajo control de transporte de masa.

- No hay contacto directo entre herramienta y pieza de trabajo, por lo que se evitan problemas de deformación, vibración y desgaste de la herramienta.
- Flexibilidad en la fabricación de componentes metálico con acabados de alta calidad.

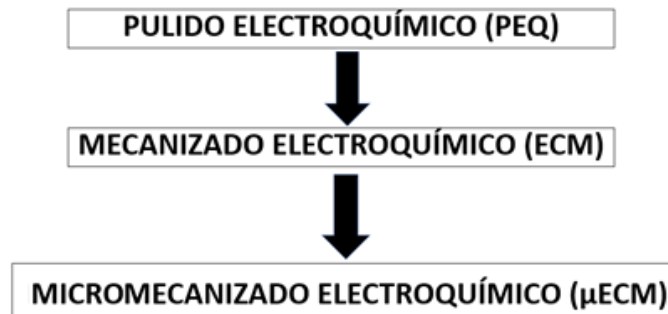


Figura 4. Técnicas precursoras en el micromecanizado electroquímico. Autor.

2.1.2 PULIDO ELECTROQUÍMICO (PEQ)

Tratamiento que permite la eliminación de la capa superficial distorsionada existente sobre un material conductor, el arranque de material se produce en amplias áreas de la pieza de trabajo, habitualmente en la totalidad de su superficie, gracias a esto se logra un alisado por reducción de su rugosidad superficial y un abrillantado de la pieza metálica. [1]

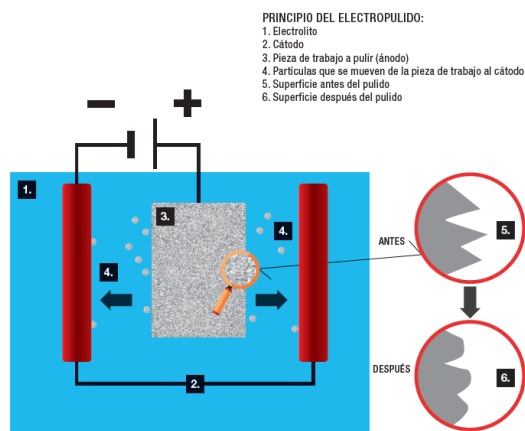


Figura 5. Proceso del pulido electroquímico [12].

Como se evidencio en la imagen anterior, en este proceso se necesita una celda electroquímica, donde se encuentra un ánodo (pieza de trabajo), un material que va a funcionar como cátodo y un electrolito el cual permitirá el paso de corriente. Cuando ocurre una diferencia de potencial entre le ánodo y el cátodo, empieza la disolución del metal en la superficial de la pieza de trabajo.

2.1.3 MECANIZADO ELECTROQUÍMICO (MEQ)

Como se mencionó, el pulido electroquímico se realiza para arrancar material de piezas grandes, es aquí cuando surge el mecanizado electroquímico. Los principios de Faraday se utilizan en el mecanizado electroquímico . En este proceso, el electrolito pasa entre el ánodo (pieza de trabajo) y el cátodo (herramienta) para formar una celda electrolítica. El metal se elimina mediante la disolución controlada del ánodo de acuerdo con la conocida ley de electrólisis de Faraday. Debido al proceso de electrólisis en el cátodo, se liberan iones hidroxilo que se combinan con los iones metálicos del ánodo para formar hidróxido metálico insoluble. Así, el metal se elimina en forma de lodo y se precipita en la celda electrolítica. Este proceso continúa hasta que la herramienta ha producido su forma en la pieza de trabajo. [13]

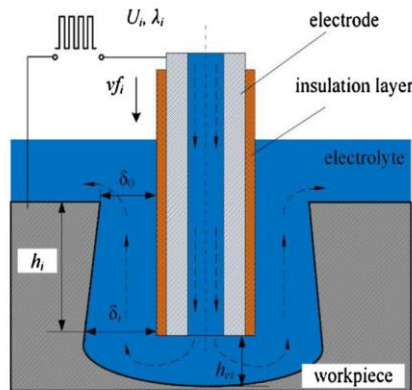


Figura 6. Disolución electroquímica controlada [14]

Durante esta disolución, al aplicar la diferencia de potencial, comienzan a disolverse las zonas de la pieza con menor distancia al cátodo (mayor densidad de corriente), al seguir con el proceso, se va estabilizando la corriente a medida que la pieza va reproduciendo la forma del cátodo.

Dentro de esta técnica, se encuentran una serie de ventajas respecto al acabado final de nuestra pieza:

- Excelente acabado superficial de la pieza mecanizada
- No afecta térmicamente
- No altera la microestructura
- Sin tensiones residuales
- Libre de grietas y rebabas
- Mecanización de piezas con geometrías complejas
- Mecanización sin deformación de secciones delgadas y frágiles
- Mecanización rápida en un solo proceso
- El electrodo que es la herramienta no sufre desgaste

2.1.4 MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO (μ -MEQ)

Este proceso es la evolución del MEQ, teniendo en cuenta sus técnicas precursoras, aquí se centra en la localización del proceso de disolución anódica en áreas de la pieza de trabajo de dimensiones micrométricas en un rango de (1-999 μm), esto resulta útil para su aplicación de microcomponentes y microsistemas con precisión submicrométrica para numerosos sectores. [1]

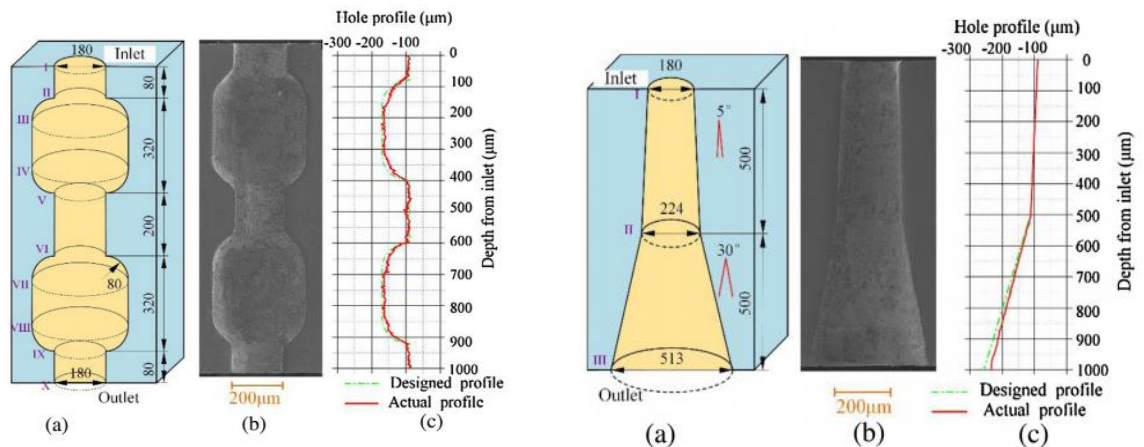


Figura 7. Aplicación micromecanizado electroquímico [15].

2.1.4.1 FUNDAMENTOS DE LA TECNICA DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO

Se basa en la localización de la reacción de disolución electroquímica de un muestra conductora en la proximidad de un electrodo utilizado como herramienta, mediante la aplicación de pulsos ultracortos de potencial (duración nanosegundos). [16]

Gracias a esto se logra mecanizar tridimensionalmente materiales conductores con precisión submicrométrica, cuando se aplican los pulsos de potencial, las interfases que se encuentran en el sistemas se van a polarizar.

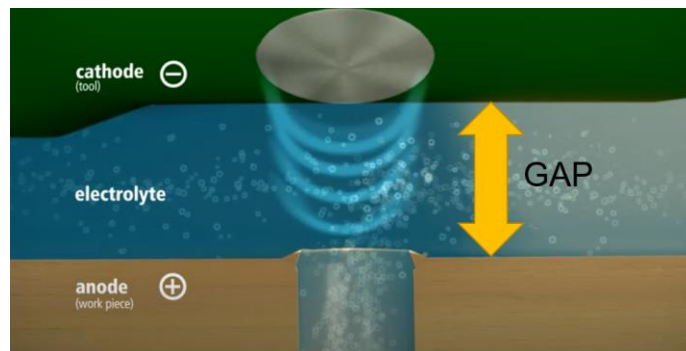


Figura 8. Esquematación del proceso [17].

Como se mencionaba anteriormente, la herramienta va a actuar como cátodo, la pieza a mecanizar como ánodo, inmersas en un electrolito como ocurrió en el mecanizado electroquímico, en este caso se define el GAP como la distancia entre cátodo y ánodo de la zona frontal de la herramienta. Cuando aplicamos los pulsos de potencial van a producir reacciones electroquímicas confinadas en la región de la superficie de la pieza, por lo que comenzara la disolución del metal, como consecuencia se mecaniza una forma que va a reproducir el negativo de la imagen especular de la herramienta sobre la superficie de la pieza, pero a nivel micrométrico. [1]

2.1.4.2 APLICACIÓN DE PULSOS DE POTENCIAL

Es importante aplicar estos pulsos de potencial, debido a que nos proporcionara mayor control en la precisión de mecanizado, dándonos ventajas como:

- Posibilidad de aplicar mayor densidad de corriente instantánea durante el pulso-on.
- Posibilidad de monitorizar el GAP durante el pulso-off, proporcionado un posicionamiento de la herramienta según el GAP deseado antes del próximo pulso o grupos de pulsos.
- Relación pulso-on: pulso off (1:1, 1:2, 2:1), por lo que se puede determinar que este bien espaciada para disipar el calor (efecto Joule) y gas (reacción electroquímica) en la zona del GAP, por lo que conlleva a un constante reemplazo del electrolito en el GAP.
- Mayor precisión de mecanizado con pulsos de corta duración, por lo que el proceso electroquímico se hace estable para pequeños valores de GAP (<0.1 mm) y la cantidad de material eliminado por pulso disminuye.

2.1.4.3 CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO

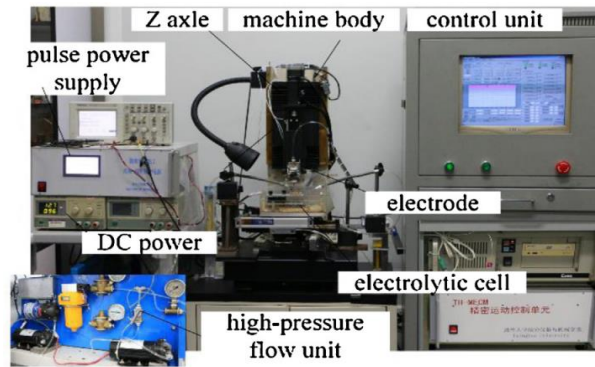


Figura 9. Set up micromecanizado electroquímico [14].

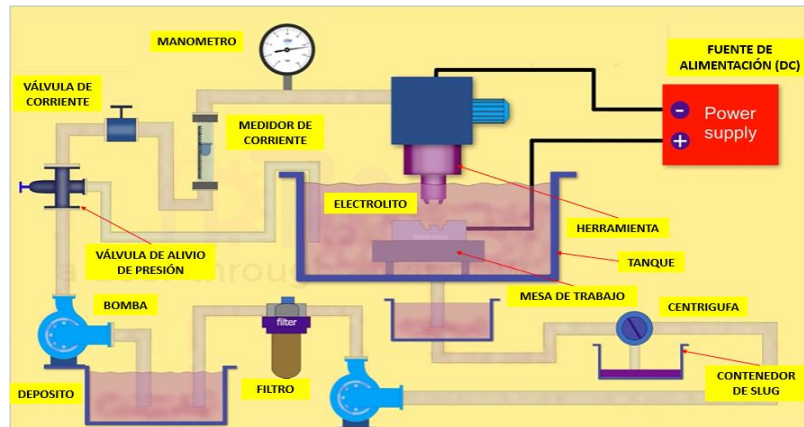


Figura 10. Esquema del equipo de micromecanizado electroquímico. Autor [18].

En esta configuración, se puede observar la celda electroquímica, en ella se encuentra el ánodo y el cátodo inmerso en el electrolito recirculado mediante un sistema de bombeo.

2.1.5 PARÁMETROS DE CONTROL DEL PROCESO DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO

2.1.5.1 PARÁMETROS ESTÁTICOS

- Pieza a mecanizar

Se debe seleccionar el material en función de su respectiva aplicación, como requisito es que el material tenga conductividad eléctrica y, por último, se debe tener en cuenta la influencia del material en el proceso de micromecanizado electroquímico, ya que pueden afectar procesos importantes como el MRR (Metal Removal Rate) o velocidad de micromecanizado – velocidad de disolución. [1]

$$MRR = \frac{I M}{n F A \rho}$$

CORRIENTE = I (A)
 PESO MOLECULAR DEL MATERIAL DISUELTO = M (g/mol)
 NÚMERO DE VALENCIA = n
 CONSTANTE DE FARADAY = F
 ÁREA FRONTAL DE LA HERRAMIENTA = A (cm²)
 DENSIDAD DEL MATERIAL = ρ (g/cm³)

(1)

- Electrodo herramienta

Como se ha venido mencionando, la herramienta no sufre ningún desgaste, por lo que se tendrá una larga vida de uso. Para su diseño y fabricación, se toman los siguientes aspectos:

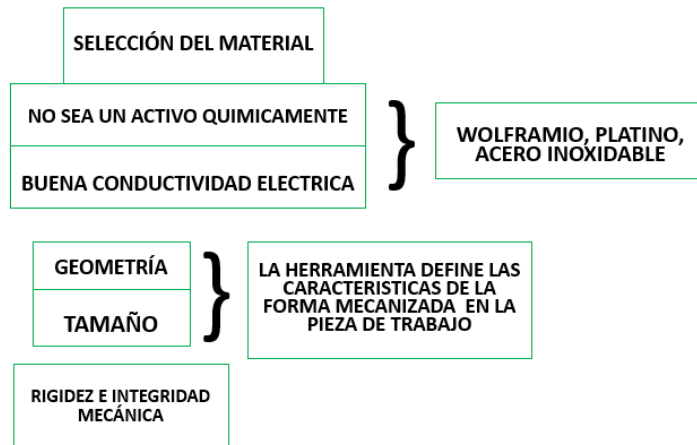


Figura 11. Aspectos del electrodo. Autor [1].

Dentro de la geometría y el tamaño, se tiene en cuenta que la velocidad de micromecanizado (MRR) va a aumentar al disminuir el diámetro del electrodo (herramienta), por lo que interesa fabricar micro electrodos con un pequeño diámetro en su punta.

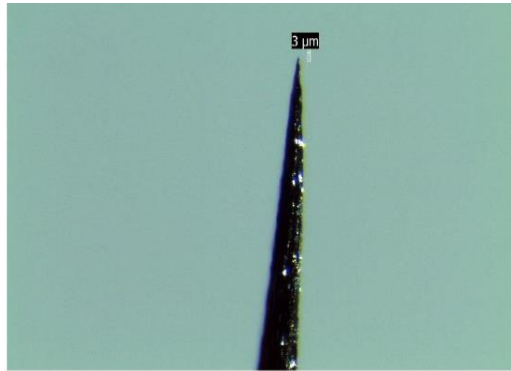


Figura 12. Diseño electrodo para micromecanizado electroquímico [10].

2.1.5.2 EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS LÍNEAS DE CORRIENTE EN EL ELECTROLITO

Este factor es importante, ya que da lugar a error de mecanizado, no se obtiene la forma y tamaño del electrodo en la pieza mecanizada, por lo que se obtiene una baja calidad de acabado superficial.

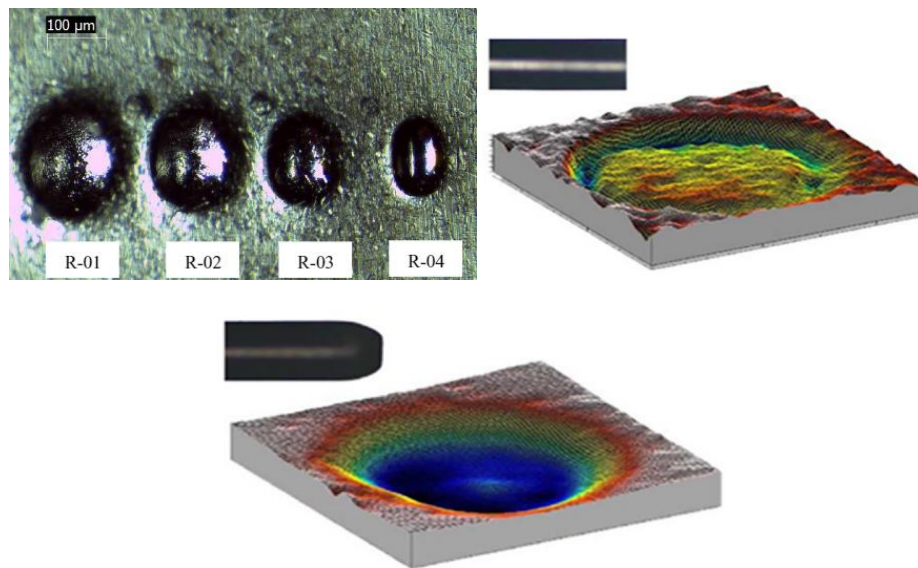


Figura 13. Desarrollo de micro agujeros y aplicación de distintos electrodos [10].

Por lo que se plantea como solución para tratar este fenómeno en el electrodo, una aplicación es la capa de aislamiento para proteger la herramienta en sus áreas laterales y tener líneas de corriente en la línea frontal de la herramienta.

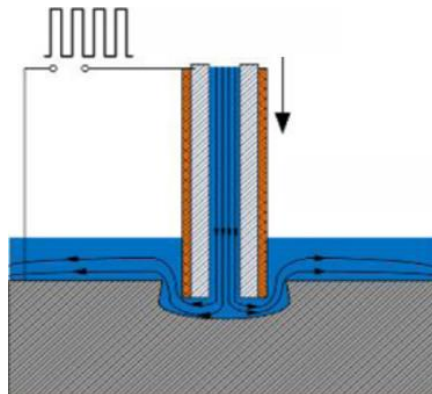


Figura 14. Protección de la superficie lateral del electrodo [14].

Esta protección da un aumento de rigidez e integridad mecánica al electrodo, esto facilita su manipulación en las etapas de colocación y retirada del equipo, y a su vez evita su doblado en caso de contacto físico con la pieza de trabajo durante el proceso de aproximación.

2.1.5.3 ELECTROLITO

El electrolito se va a seleccionar en función del material de la pieza a mecanizar, donde se presentan aspectos a tener en cuenta como

- Elevada conductividad
- Baja viscosidad
- No corrosivo
- Económico
- Amigable con el medio ambiente

Con estos aspectos, de igual manera, hay que tener en cuenta las variables de estudio, ya que estas van a afectar la eficiencia de la disolución anódica, por lo que haya que tener en cuenta el tipo de electrolito que pueden llegar a ser:

Pasivantes: Especies oxidantes, que ofrecen mayor precisión de mecanizado, más seguros con el medio ambiente

No pasivantes: Especies más agresivas, por lo que da una mayor velocidad de mecanizado, pero una menor precisión. [1]

2.1.5.4 PULSO DE POTENCIAL APLICADO

Características del pulso

- Duración: La precisión del mecanizado aumenta con la disminución de la duración del pulso, por lo que se usaran pulsos ultracortos del orden de nanosegundos y una frecuencia alta del orden de mega hertzios.
- Amplitud: La velocidad de mecanizado aumenta con el aumento de la amplitud y con esto controlar la relación de tiempos pulso on: pulso off, para favorecer la disipación de calor y gas en el GAP.

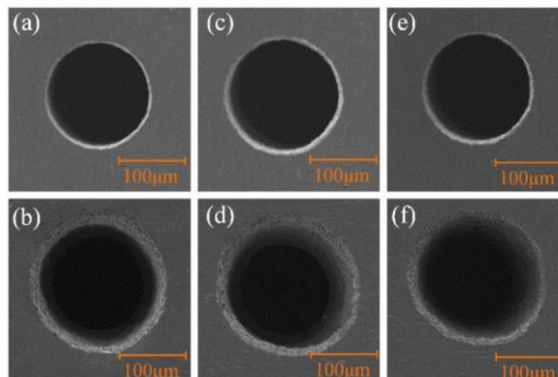


Figura 15. Efecto de la duración y amplitud del pulso [14].

Parámetros dinámicos

- GAP: Este es uno de los parámetros más críticos a controlar, ya que aquí la eficiencia del proceso de disolución anódica varía con la distancia al electrodo, y que su precisión es mayor cuando el GAP disminuye, pero no es tan sencillo cuando se reduce esta distancia debido a que produce un aumento en la

concentración de productos de disolución, por lo que se obtiene velocidades de reacciones menores a lo esperado. [1]

Por lo que controlar el tamaño del GAP durante el proceso de micromecanizado es vital para obtener una alta precisión.

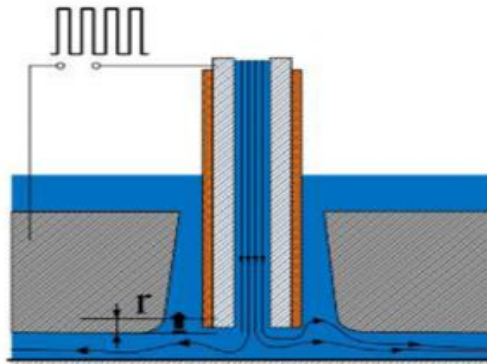


Figura 16. Factor importante en el desplazamiento del electrodo [14].

- Resistencia
- Densidad de corriente

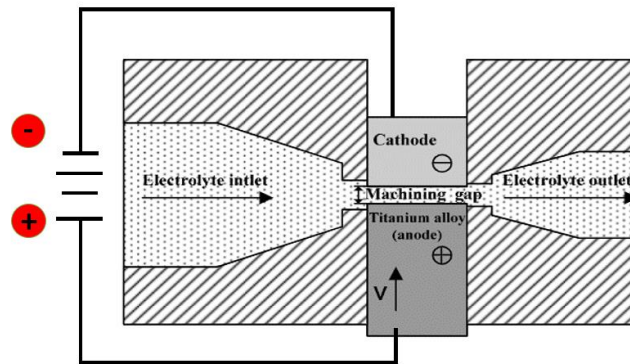


Figura 17. Parámetros de control [19].

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Cuando se habla de fabricar piezas de tamaño muy pequeño, es decir en una escala micrométrica, se encuentran algunas dificultades y desafíos para las industrias, en especial en la industria biomédica, ya que obtener piezas con un excelente acabado superficial y excelentes tolerancias dimensionales sin que la herramienta de corte sufra algún desgaste, genera la necesidad de utilizar técnicas costosas.

Por consiguiente, es de vital importancia desarrollar investigaciones a cerca de procedimientos no convencionales en la manufactura de piezas, que permita el crecimiento en la fabricación de microcomponentes en la industria colombiana, así mismo, aplicando tecnologías con un bajo costo, ayudando a evolucionar esta industria.

Para ello, es importante entender algunos de los conceptos trabajados en este documento, como lo son:

Procesos convencionales

Son aquellos que la eliminación de material se da por medio del arranque de viruta, debido a la interferencia de la pieza a mecanizar y la herramienta. Son procesos que cuenta con tres movimientos (corte, avance y penetración). [4]

Procesos no convencionales

Se utilizan para mecanizar piezas que pueden tener una dureza muy alta, su geometría sea muy difícil o este material sea muy flexible y mediante las mordazas no se pueda ajustar.

La eliminación del material se va a dar de manera diferente a los procesos convencionales (mecánicos) y estos pueden ser: electroquímicos, químicos, termoeléctricos, ultra sonido, arco plasma, por láser, electroerosión, entre otros. [4]

Micromecanizado

Es el proceso de fabricación de piezas muy pequeñas a escalas micrométricas, las cuales son utilizadas en industrias como la aeronáutica, aeroespacial, telecomunicaciones, medicina, óptica, automoción, entre otras. Esta técnica ofrece menores valores de rugosidad y máxima flexibilidad para fabricar elementos muy pequeños. [4]

Micromecanizado electroquímico

El micromecanizado electroquímico es un proceso de eliminación de metales basado en la ley de Faraday de disolución electrolítica de metales. Los componentes principales de un sistema PECM son la pieza de trabajo (ánodo), la

herramienta (cátodo), que son metales conductores y un electrolito acuoso. El electrolito es una solución conductora que normalmente consta de una sal como el nitrato de sodio (NaNO_3) disuelto en agua. [20]

2.3 ESTADO DEL ARTE

El mecanizado electroquímico es un proceso no convencional. Esta técnica tiene algunas ventajas como el excelente acabado superficial de la pieza o la capacidad de fabricarlas con geometrías complejas teniendo en cuenta el material si es de alta dureza. Además, trabaja con una fuente de alimentación DC, la cual suministra entre 10-25 voltios que también es sumergida en un electrolito (como el NaNO_3) por lo que circula a una velocidad de 10-60 m/s a una densidad de corriente de 20 a los 200 A/cm. En la figura 1 se puede las partes del proceso. [21]

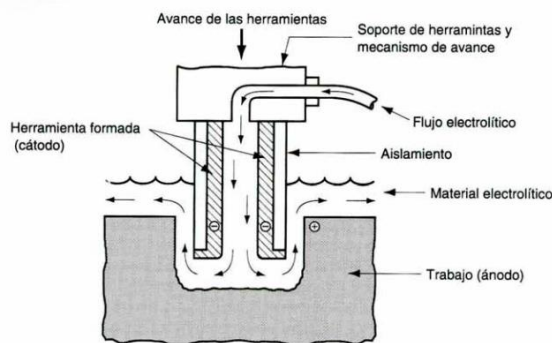


Figura 18. Mecanizado electroquímico [14].

Se han realizado algunas pruebas donde se estableció un espacio de un micrómetro antes de movimiento del electrodo, este tuvo una velocidad de alimentación de $0.2 \mu\text{m/s}$, una frecuencia de oscilación de 50 Hz. Por otro lado, la pieza se hizo oscilar en $0.3 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ para el contacto del electrodo de la herramienta con la pieza de trabajo. [22]

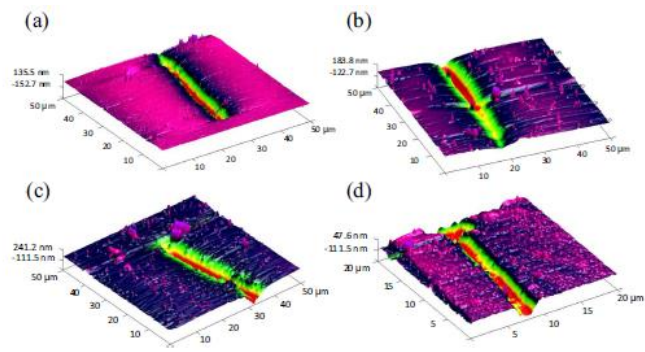


Figura 19. Comportamiento del proceso [14].

3 REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

Para conducir el desarrollo del proyecto y con esto el primer objetivo específico, se debe partir de una metodología, la cual permitirá describir, identificar y plantear cómo a partir de las necesidades del cliente planteadas por individuos especializados en el área biomédica, se logra obtener una idea amplia respecto a un equipo que permita un micromecanizado electroquímico en la industria biomédica. De este modo, se recurre como primera acción, el desarrollo de una encuesta enfocada a la población biomédica nacional e internacional, para conocer cuáles son los requerimientos principales que debe cumplir la máquina de micromecanizado electroquímico (μ -MEQ).

En esta sección se desarrolló una evaluación QFD (Quality Function Deployment) o conocida comúnmente como casa de la calidad, esta es una técnica que permite determinar aspectos que son vitales al momento de desarrollar o diseñar un producto, en este punto, se identificó al cliente en el que se especificaron las necesidades de cliente respecto al diseño de una máquina de micromecanizado electroquímico, donde cada requerimiento fue evaluado, asignándole un grado de importancia, tras esto, se especificaron los requerimientos con cada uno de las especificaciones del cliente que fueron previamente evaluadas.

Como adición, se realizó un estudio de mercado para maquinas electroquímicas y se evaluaron respecto a los requerimientos del cliente que, por último, fueron calificadas frente a las especificaciones de ingeniería, esto con el fin de obtener el aspecto más importante para el desarrollo y diseño de la máquina para micromecanizado electroquímico en la industria biomédica.

3.1 IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE, REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES DE DISEÑO

Al identificar el cliente, se propuso la realización de una encuesta donde se presentó la idea del proyecto para la industria biomédica y se establecieron requerimientos que son prioritarios para su desarrollo, entre ellas las más importantes fueron:

- Costos razonables frente a la estructura del diseño.
- Facilidad de transporte de la máquina.
- La adaptabilidad de la máquina, para el micromecanizado de diferentes metales.

Teniendo en cuenta las demás respuestas, recibidas por estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás de Colombia, ingenieros biomédicos de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, Universidad Autónoma de Occidente y la Universidad Nacional de Córdoba de Argentina, donde se especificaron los demás requerimientos como se puede apreciar en la Tabla 1.

REQUERIMIENTOS	DESCRIPCIÓN
BIOCOMPATIBILIDAD	Es la capacidad de un material para actuar con una respuesta adecuada del medio biológico en el cual son utilizados.
EFICAZ - USO DE ENERGÍA	El equipo debe aprovechar la energía suministrada para su funcionamiento y el desarrollo de la pieza a mecanizar.
TAMAÑO MEDIANO	El sistema no debe ser grande para la industria, ya que esto puede llegar a ser basto y poco funcional en espacios limitados.
LIGERA PARA TRANSPORTAR	El equipo pueda transportarse fácilmente por lo que los materiales del sistema deben ser livianos y debe ser fácil de armar.
FÁCIL MANEJO - DIGITALIZACIÓN DE DATOS	La recopilación y el fácil acceso a los datos suministrados de las piezas a mecanizar.
BAJO COSTO	La máquina debe tener un costo que se adapte a las posibilidades económicas de la industria biomédica a la cual va dirigida el proyecto.
SOFTWARE CON INTERFAZ	Este es el medio en el cual el usuario puede comunicarse con su máquina y así generar sus respectivas interacciones.
MECANIZADO DE DIFERENTES MATERIALES DE ALTA Y BAJA DUREZA	Las piezas a implementar en la máquina de micro mecanizado deben ser comerciales.

CONTROL DEL GAP	Al obtener un control sobre el GAP del proceso, se obtendrán precisiones en las piezas a mecanizar.
CONTROL DE CORRIENTE	Contar con un sistema de carga alterna de energía en caso de alguna eventualidad.

Tabla 1 Requerimientos del cliente. Autor con base a los resultados de la encuesta.

Con la información de los requerimientos del cliente y como paso siguiente de la evaluación QFD, se realizó una ponderación de prioridad en una escala de 0 a 10, donde 0 es el valor más bajo para cumplir dicho requerimiento y 10 el valor máximo de dificultad, como se puede observar en la Tabla 2, Aquí se concluyó que la prioridad del cliente es que la máquina sea eficaz, un uso apropiado en el control de la energía y el distanciamiento empleado para el desarrollo de las piezas, con esto, se logra un mecanizado apropiado teniendo en cuenta las dimensiones del equipo.

VALOR	REQUERIMIENTOS	IMPORTANCIA
1	BIOCOMPATIBILIDAD	7.0
2	EFICAZ - USO DE ENERGÍA	9.0
3	TAMAÑO MEDIANO	8.0
4	LIGERA PARA TRANSPORTAR	8.0
5	FÁCIL MANEJO - DIGITALIZACIÓN DE DATOS	8.0
6	BAJO COSTO	7.0
7	SOFTWARE CON INTERFAZ	5.0
8	MECANIZADO DE DIFERENTES MATERIALES DE ALTA Y BAJA DUREZA	8.0

9	CONTROL DEL GAP	9.0
10	CONTROL DE CORRIENTE	8.0

Tabla 2 Importancia requerimientos. Autor con base a los resultados de la encuesta.

3.1.1 ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA

A partir de los requerimientos establecidos, se establecieron las especificaciones de ingeniería Tabla 3, las especificaciones de ingeniería se clasifican en tres categorías: minimizar (▼), maximizar (▲) y estado neutral (X). Esta clasificación sirve para dar un grado de evaluación a las especificaciones de ingeniería y así obtener los aspectos con un mayor grado de importancia.

ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN
ADAPTABILIDAD EN LA FABRICACIÓN DE PIEZAS	Especifica el comportamiento que tiene la máquina para generar piezas complejas.	▲
ENERGÍA CONVECCIONAL	Adaptación de la energía eléctrica en el sistema para su funcionamiento.	x
DIMENSIONAMIENTO DE LA MÁQUINA	Evaluar el tamaño de la máquina.	x
PESO	Cantidad de peso que tiene la máquina de micro mecanizado una vez se realice su ensamble completo.	▼
TRANSPORTE	La máquina debe tener un determinado peso para que personas o alguna maquinaria externa puedan transportarla sin problemas.	x
COSTO MATERIALES	Especifica los gastos que se generan al construir la máquina para micromecanizado electroquímico.	▲
AUTOMATIZACIÓN	Transferencia de tareas de producción por operadores a un conjunto de elementos tecnológicos.	▲
VERSATILIDAD EN EL MERCADO	La versatilidad del diseño permite distintas posibilidades de generación de piezas.	▲
CONTROL DISTANCIA HERRAMIENTA	Distanciamiento entre herramienta y pieza, para tener una mayor precisión en los resultados.	▲

FLUJO CORRIENTE FUNCIONAMIENTO	Control en la corriente para un proceso más preciso y eficiente.	▲
-------------------------------------------	------------------------------------------------------------------	---

Tabla 3 Grado de importancia especificaciones de ingeniería. Autor.

Cuando las especificaciones de ingeniería se relacionan, generan un valor que al final se obtiene de relacionar los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería, ocasionando que aumenten o disminuyen. Para realizar la relación entre las especificaciones de ingeniería se usaron correlaciones positivas fuertes (++) , correlaciones positivas (+) , correlaciones negativas (-) y correlaciones negativas fuertes (▼). Las correlaciones positivas se refieren a que las dos especificaciones se ayudan mutuamente para ser más funcionales, mientras que las relaciones negativas indican que para mejorar una especificación se ve afectada la otra negativamente. En la Figura 1 se evidencia la correlación a cada especificación de ingeniería.

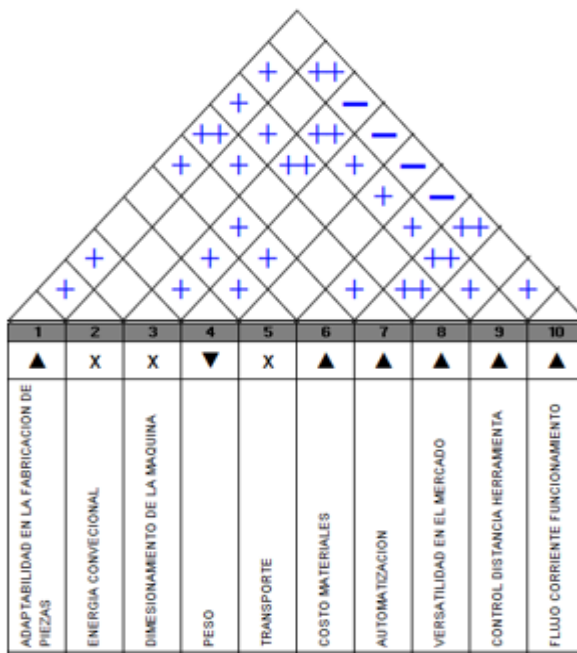


Figura 20. Correlaciones de las especificaciones de ingeniería. Autor.

3.1.2 EVALUACIÓN DEL MERCADO

Realizando un estudio de mercado, se evaluaron cinco empresas enfocadas a la fabricación de máquinas de micromecanizado y mecanizado electroquímico: METALMECANICA (Latinoamérica), SITEC (Alemania), STOBA (Estados Unidos), EMAG (Alemania) y ECM TECHNOLOGIES (Holanda – Estados Unidos).

En la Figura 21 se añadió la información de las máquinas desarrolladas por estas empresas con los requerimientos del cliente, en donde se ponderan valores de 0 a 5, en donde 0 hace referencia a que el requerimiento no se cumple y 5 es que cumple satisfactoriamente con el aspecto solicitado.

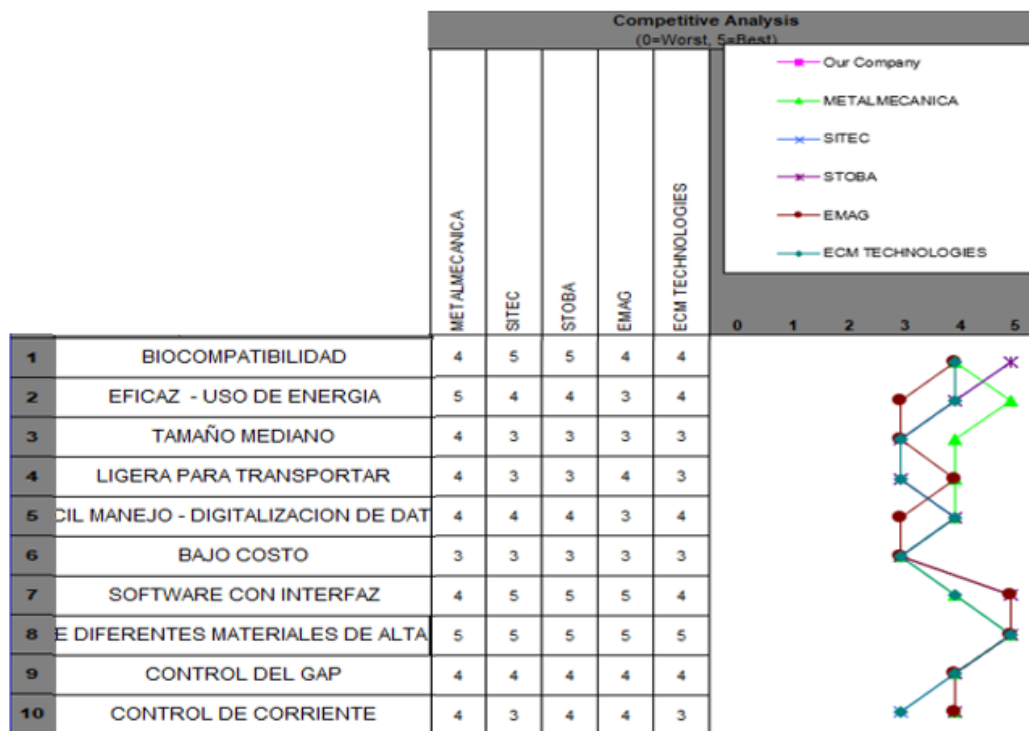


Figura 21. Análisis comparativo. Autor.

De acuerdo a la Figura 21 se obtuvo que las compañías que manejan un rango de desviación estable son SITEC y STOBA, esto se debe a que genera un rango acorde a los requerimientos y su estructura no es tan robusta, mientras que otras compañías como EMAG y ECM TECHNOLOGIES presentan un grado de

inestabilidad, con un bajo margen de puntuación ya que sus dimensiones hacen que el costo aumente, sea compleja de desarrollar o adaptar y de transportar por personas sin ayuda mecánica.

3.1.3 RELACIÓN DE REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES

En esta etapa se buscan establecer las relaciones que se presentan al analizar los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería. Para este análisis se tienen tres categorías: fuertemente relacionada (⊙) con un valor de 9, medianamente relacionada (O) con una puntuación de 3 y débilmente relacionada (▲) con un peso de 1. Si no existe una relación entre los requerimientos y las especificaciones no es necesario poner una relación. En la Figura 22 se presenta la relación entre el cómo y el qué de los requerimientos del cliente y los requisitos de ingeniería.

Column #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (⊙)	▲	X	X	▼	X	▲	▲	▲	▲	▲
Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	ADAPTABILIDAD EN LA FABRICACION DE PIEZAS	ENERGIA CONVECCIONAL	DIMENSIONAMIENTO DE LA MAQUINA	PESO	TRANSPORTE	COSTO MATERIALES	AUTOMATIZACION	VERSATILIDAD EN EL MERCADO	CONTROL DISTANCIA HERRAMIENTA	FLUJO CORRIENTE FUNCIONAMIENTO
Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")										
BIOCOMPATIBILIDAD	⊙	⊙					⊙	⊙		
EFICAZ - USO DE ENERGIA	⊙	⊙					⊙			⊙
TAMAÑO MEDIANO			⊙	⊙	⊙				⊙	▲
LIGERA PARA TRANSPORTAR				⊙	⊙				▲	
CIL MANEJO - DIGITALIZACION DE DAT	▲						⊙	⊙	⊙	
BAJO COSTO			⊙	⊙		⊙	▲		⊙	
SOFTWARE CON INTERFAZ				▲	▲		⊙	⊙	⊙	
E DIFERENTES MATERIALES DE ALTA	⊙		▲			▲		⊙		
CONTROL DEL GAP							⊙		⊙	⊙
CONTROL DE CORRIENTE				▲					▲	⊙

Figura 22. Relación requerimientos con las especificaciones del cliente. Autor.

Evaluando la relación de los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería se completó la matriz de la casa de la calidad (QFD), donde se ha establecido el porcentaje en los que se relacionan los aspectos indicados. Las relaciones que se establecieron dieron a conocer una ponderación final, evaluando al mismo tiempo el grado de dificultad que tendrá lograr cada especificación de

ingeniería, esta evaluación dio como resultado los aspectos más relevantes con los cuales se va a diseñar la máquina de micromecanizado electroquímico, como se puede evidenciar en la Figura 23.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	▲	X	X	▼	X	▲	▲	▲	▲	▲
	ADAPTABILIDAD EN LA FABRICACION DE PIEZAS	ENERGIA CONVECCIONAL	DIMENSIONAMIENTO DE LA MAQUINA	PESO	TRANSPORTE	COSTO MATERIALES	AUTOMATIZACION	VERSATILIDAD EN EL MERCADO	CONTROL DISTANCIA HERRAMIENTA	FLUJO CORRIENTE FUNCIONAMIENTO
Target or Limit Value				200 - 800 kg						
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely)	8	3	8	5	4	5	6	7	9	8
Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance	167.1	139.7	138.4	175.3	138.4	97.3	198.6	180.8	220.5	150.7
Relative Weight	10.4	8.7	8.6	10.9	8.6	6.1	12.4	11.3	13.7	9.4

Figura 23. Grado de dificultad e importancia de cada especificación. Autor.

Al finalizar la casa de calidad (QFD) se puede concluir que la prioridad con la que se va a realizar el diseño de la máquina de micromecanizado electroquímico para la industria biomédica, es que ésta tenga un diseño simple, a su vez, va a suplir tanto las necesidades del cliente como otras especificaciones de ingeniería, sin embargo, en el control del GAP, se concluye con un valor de 13.7 sobre el total de la ponderación realizada en el QFD. Otro aspecto con más relevancia que se presenta es que el equipo debe tener un control en el flujo de corriente, esta especificación va de la mano del diseño simple, con un valor de 9.4, para que de esta manera la máquina no se vea afectada y logre satisfacer la demanda en la fabricación de microcomponentes, sin dejar de lado la especificación que dio el cliente de generar un diseño con un costo accesible. Con base en lo establecido anteriormente se puede dar inicio a la generación del diseño de la máquina de micromecanizado que más se adecue a las condiciones y restricciones determinadas en el análisis de este capítulo.

4 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MÁQUINA DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO

Como parte fundamental para el desarrollo de una máquina de micromecanizado electroquímico, se encuentra el diseño conceptual ya que en esta etapa se plantean las posibles alternativas que se tomarán en cuenta para el diseño final.

Se debe partir y tener en cuenta los requerimientos de ingeniería planteados para el diseño de una máquina de micromecanizado electroquímico. Se procede a la etapa del diseño conceptual donde se plantean las alternativas de los subsistemas que componen el equipo de micromecanizado, gracias a la identificación de los requerimientos de ingeniería, se abordan las fases del proceso electroquímico requeridas en el diseño de la máquina.

4.1 SUBSISTEMAS DE LA MÁQUINA Y FASES PARA EL PROCESO ELECTROQUÍMICO

Al no tener definidos los conceptos para el proceso y funcionamiento de la máquina de micromecanizado, se plantearon las fases para el desarrollo del proceso electroquímico.

- Mesa de trabajo y supervisión.
- Depósito y retorno del electrolito.
- Circulación del electrolito.
- Transporte del electrolito.
- Filtrado del electrolito.
- Alimentación y fuente eléctrica.
- Avance de la herramienta.
- Extracción de gases.

Con estas fases de micromecanizado se definen que se tendrán en cuenta para la realización de los diseños conceptuales, se optaron por módulos, subsistemas o

mecanismos que estarán encargados del funcionamiento de cada una de estas fases, debido a esto, cada diseño conceptual debe incluir:

- Módulo de trabajo y supervisión.
 - Subsistema estructura de trabajo y control.
 - Subsistema sujeciones ánodo y cátodo.
- Módulo de circulación del electrolito y filtrado.
 - Subsistema depósito y retorno electrolito
 - Subsistema de circulación del electrolito.
 - Subsistema transporte del electrolito.
 - Subsistema filtrado del electrolito.
 - Subsistema extracción de gases.
- Módulo de alimentación y fuente eléctrica.
 - Subsistema fuente de alimentación y fuente eléctrica.
- Módulo de avance de la herramienta.
 - Subsistema mecanismo de avance.
 - Subsistema motor.

Con base a los requerimientos del cliente, las posibles etapas, módulos y subsistemas para el proceso de micromecanizado electroquímico, se idearon los diseños conceptuales para definir cuál de estos sería candidato como una de las soluciones.

4.1.1 GENERACIÓN DISEÑOS CONCEPTUALES

Para la realización de los posibles diseños conceptuales, se comenzó con la solución a los requerimientos que para el cliente se consideraron importantes, estos son:

- Costos de fabricación.
- Facilidad de transporte del equipo.
- La adaptabilidad del equipo, para el micromecanizado de diferentes metales.
- Diseño simple y control del GAP.

- Control en el flujo de corriente.

Los diseños surgieron de las soluciones para estos requerimientos que, a su vez, abarcan los demás requerimientos planteados. Se generaron tres conceptos los cuales describen la solución planteada para cada subsistema y mecanismo.

4.1.2 PRIMER DISEÑO CONCEPTUAL

PRIMER DISEÑO CONCEPTUAL	
Subsistema estructura de trabajo y supervisión.	Estructura con partes móviles.
Subsistema sujeciones ánodo y cátodo.	Cabezal (cátodo). Cuba con red de alcantarillado (ánodo).
Subsistema depósito y retorno electrolito	Tanques plásticos.
Subsistema de circulación del electrolito.	Tubería PVC
Subsistema transporte del electrolito.	Bomba de agua sumergible.
Subsistema filtrado del electrolito.	Filtración a vacío.
Subsistema extracción de gases.	Extractor centrífugo.
Subsistema fuente de alimentación y fuente eléctrica.	Fuente de poder regulable.
Subsistema mecanismo de avance.	Impresora 3D.
Subsistema motor.	Motor paso a paso

Tabla 4. Subsistemas primer diseño conceptual. Autor.

En el primer diseño conceptual, el proceso de micromecanizado electroquímico se va a realizar mediante una estructura cubica, la cual va a tener un desplazamiento en tres dimensiones controlado por un Arduino para el funcionamiento y secuencia del motor paso a paso, que permitirá el movimiento del cátodo hacia la pieza de

trabajo durante el proceso electroquímico. Se modeló el siguiente boceto, como se ve en la figura 24.

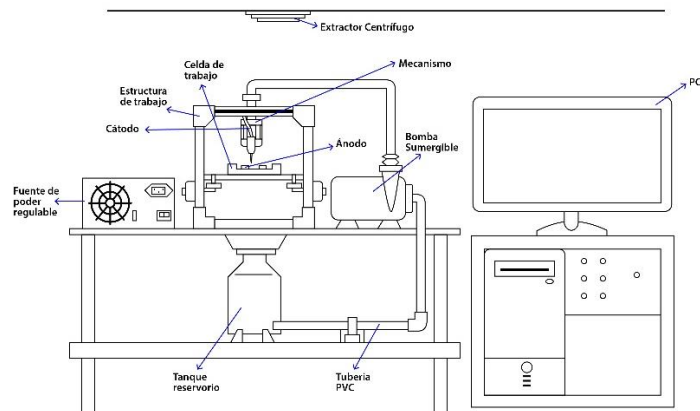


Figura 24. Primer concepto de ingeniería. Autor.

La estructura de la máquina es una impresora 3D, por lo general se mueve en los tres ejes del espacio XYZ, sin embargo, en los procesos electroquímicos, si el eje z permanece quieto, obtendrá una mayor precisión y exactitud a lo largo de ese acceso. Consta de rieles, bujes LMU 8 con varillas lineales, y con un motor paso a paso, ya que estos son esenciales en todas las impresoras 3d, eso es común, tienen cuatro entradas y tienen muy buena precisión, también son baratos y simples, por lo que lo conectamos a 12 voltios, ya que para impresoras 3D esto es lo que comúnmente se usa para el voltaje, mientras que con el mecanizado electroquímico podemos hacer esto a voltajes muy bajos con un amperaje relativamente bajo. La fuente de poder regulable nos permite conectar la salida de 12 voltios del cabezal para la nivelación automática de la cama al Arduino.

En la celda de trabajo, se encuentra el cabezal de la herramienta de mecanizado electroquímico, en la parte posterior hay un cerrojo para que el carro lo bloquee en su lugar simplemente deslizando y tirando hacia atrás de este cerrojo, lo mantendrá en su lugar en la parte delantera. Cuenta con un cable con un perno que está conectado a la fuente de poder regulable que va al cátodo. Otro cable que conecta a otro perno en la parte inferior, está conectado a un relé que puede conectarlo a tierra dependiendo de la posición en la que se encuentre el carro, harán contacto

eléctrico con el perno inferior o el perno superior y se mantiene en su lugar usando resortes genéricos. El tubo lleva el electrolito que se ira rociando en la punta de la aguja gracias a la bomba estática. Con un módulo de relé se puede conectar esto al pin del cátodo en el Arduino y usar un comando de código g para apagar y encender la herramienta para el mecanizado electroquímico.

En la sujeción del ánodo, se acoplará la pieza sobre una especie red de alcantarillado donde caerá el electrolito suministrado y llegará al tanque reservorio después de su utilización sobre la pieza de trabajo, fluye hacia abajo y pasa a través de tubos PVC, para su reutilización en el sistema de bombeo a la celda de trabajo.

El electrolito será circulado por medio de una bomba periférica y tubos de PVC que alimentaran a la celda de trabajo donde ira inundando la pieza de trabajo y a la herramienta, posteriormente, al tanque de depósito que estará en uno de los costados de la estructura cubica para su debido retorno al tanque reservorio.

Las bombas estáticas o bombas de agua sumergibles, será responsable de la circulación del electrolito, aquí no hay que preocuparse del contacto del electrolito debido a que ninguna de las partes responsables del bombeo real está en contacto con el líquido, lo que significa que se puede utilizar para bombear líquidos estériles, líquidos corrosivos, ácidos bases fuertes y no tendrá que preocuparse por dañar esta bomba, esto resulta útil para su aplicación porque estaremos bombeando electrolito que es conductor y corrosivo.

4.1.3 SEGUNDO DISEÑO CONCEPTUAL

SEGUNDO DISEÑO CONCEPTUAL	
Subsistema estructura de trabajo y supervisión.	Estructura vertical.
Subsistema sujeciones ánodo y cátodo.	Mandril Dremel (cátodo). Base con agujeros mediante tornillos autoperforantes (ánodo).
Subsistema depósito y retorno electrolito	Tanques fibra de vidrio.

Subsistema de circulación del electrolito.	Tubería PVC hidráulico.
Subsistema transporte del electrolito.	Bomba centrífuga anticorrosiva.
Subsistema filtrado del electrolito.	Filtración por ósmosis inversa.
Subsistema extracción de gases.	Extractor helicocentrífugo.
Subsistema fuente de alimentación y fuente eléctrica.	Fuente multicanal.
Subsistema mecanismo de avance.	Este sistema cuenta con un brazo de dos grados de libertad.
Subsistema motor.	Servomotor.

Tabla 5. Subsistemas segundo diseño conceptual. Autor.

En el segundo diseño conceptual, el proceso de micromecanizado electroquímico se va a realizar mediante una estructura vertical, la cual va a tener un desplazamiento en dos dimensiones controlado por un PLC para el funcionamiento y secuencia del servomotor, que permitirá el movimiento del mecanismo hacia el ánodo en el proceso electroquímico. Se modeló el siguiente boceto, como se ve en la figura 25.

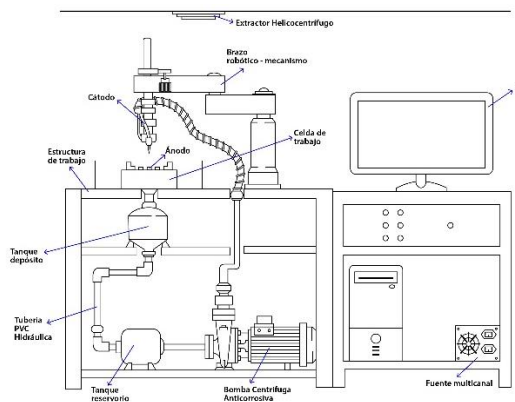


Figura 25. Segundo concepto de ingeniería. Autor.

La estructura de la máquina cuenta con una base o mesa metálica, su función es darle un mayor estabilidad y soporte a la celda de trabajo, esta cuenta con un soporte en la parte inferior de la estructura para la distribución de la bomba, tanque reservorio y depósito, ya que, por lo general en los procesos electroquímicos, se suele optar por dos tanques,

La fuente multicanal nos permite conectar al cátodo mayor cantidad de energía eléctrica, debido a que solo se va a estar enfocando en el mecanismo y no en toda la estructura de la máquina.

En la celda de trabajo, se encuentra un brazo que estará acoplado a la herramienta de mecanizado electroquímico, este mecanismo permitirá el movimiento en dos dimensiones XY. Para mantener el cátodo firme, se emplea un mandril Dremel, para que la herramienta este calibrada y centrada. Cuenta con un cable de alimentación para el cátodo, el cual estará acoplado a la base del mecanismo para evitar interferencias en las rotaciones del brazo. Por último, presenta una manguera que estará al pie de la herramienta, la cual ira inundando la celda de trabajo.

Para controlar el mecanismo y los motores de este concepto se pueden utilizar un PLC, para el movimiento y secuencia de cada motor, emplear softwares compatibles con el PLC, ya sea Tia Portal, Simatic step7 o Machine expert basic.

En la sujeción del ánodo, se acoplará la pieza sobre una base con agujeros para el retorno del electrolito al tanque reservorio, mediante tornillos autoperforantes.

El electrolito será circulado por medio de una bomba centrífuga y tubos de PVC hidráulico que alimentaran a la celda de trabajo donde ira inundando al ánodo, posteriormente, al tanque de depósito que estará debajo de la celda de trabajo para su debido retorno al tanque reservorio.

La bomba centrífuga anticorrosiva, será responsable de la circulación del electrolito, de igual manera, no hay que preocuparse del contacto del electrolito debido a que estas bombas están destinadas para aplicaciones con fluidos muy cargados de materias abrasivas o que puedan contener sólidos en suspensión.

4.1.4 TERCER DISEÑO CONCEPTUAL

TERCER DISEÑO CONCEPTUAL	
Subsistema estructura de trabajo y supervisión.	Dos estructuras verticales.
Subsistema sujeciones ánodo y cátodo.	Mandril porta brocas (cátodo). Diseño de apoyo (ánodo).
Subsistema depósito y retorno electrolito.	Tanques metálicos.
Subsistema de circulación del electrolito.	Tubería metálica.
Subsistema transporte del electrolito.	Bomba de membrana.
Subsistema filtrado del electrolito.	Microfiltración.
Subsistema extracción de gases.	Extractor axial.
Subsistema fuente de alimentación y fuente eléctrica.	Soldadora TIG tipo inversor.
Subsistema mecanismo de avance.	Mecanismo de avance de la herramienta acoplado en la celda de trabajo en una sola dirección.
Subsistema motor.	Actuador lineal.

Tabla 6. Subsistemas tercer diseño conceptual. Autor.

En el último y tercer diseño conceptual, el proceso de micromecanizado electroquímico se va a realizar mediante dos estructuras verticales, la cual va a tener un desplazamiento en una dimensión que consta de un Arduino y un controlador Easy Driver para el funcionamiento y secuencia del actuador lineal, que permitirá el movimiento vertical del mecanismo hacia el ánodo durante su proceso. Se modeló el siguiente boceto, como se ve en la figura 26.

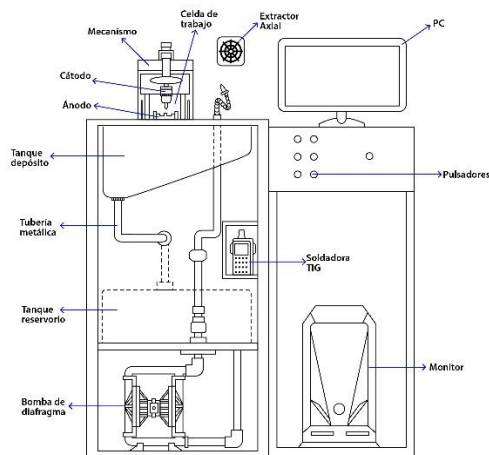


Figura 26. Tercer concepto de ingeniería. Autor.

La estructura de la máquina cuenta con dos bases, una de trabajo y otra de supervisión, su función es darle un mayor estabilidad, soporte, control y condición de trabajo al proceso electroquímico, esta cuenta con unas cavidades en la parte inferior tanto de la estructura de trabajo y supervisión para la distribución de sus diversos componentes.

La soldadora TIG tipo inversor al ser un sistema de control, es posible generar fuentes de alimentación que son compactas, por lo cual tienen un bajo consumo de energía y hacen posible un mayor control del proceso, este equipo proporciona una fuente de alimentación que es capaz de proporcionar una corriente de alta frecuencia.

En la celda de trabajo, se encuentra un mecanismo que estará acoplado a la herramienta de mecanizado, este mecanismo generará el movimiento en una dimensión. Se emplea un mandril portabrocas, para que la sujeción de la herramienta. Aquí la conexión va a presentar un eje, con una perforación en la parte superior para su respectiva conexión y sujeción del cable de la fuente de poder, y a su vez, estará roscada en la parte inferior para el ensamble con el mandril.

Para controlar el mecanismo y motor de este concepto se puede utilizar un Driver puente H L298N, para el movimiento y secuencia del actuador lineal, controlado por el software Mach3 CNC.

En la sujeción del ánodo, se acoplará la pieza un diseño de apoyo con un material que no sea conductor eléctrico, esta sujeción se va a encontrar dentro de una cubeta, donde va a estar inundada por el electrolito.

El electrolito será circulado por medio de una bomba de membrana y tubos metálicos que alimentaran a la celda de trabajo donde inundará al ánodo, con una circulación posterior del electrolito al tanque de depósito que estará debajo de la celda de trabajo para su debido retorno al tanque reservorio.

La bomba de membrana, será responsable de la circulación del electrolito, estas bombas son sumergibles y están destinadas para aplicaciones de aguas residuales, plantas de proceso o industrias químicas.

4.2 COMPARACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS DE CADA DISEÑO CONCEPTUAL

Una vez definidos los tres diseños conceptuales, se realiza una matriz morfológica y posteriormente se empleará el método analítico jerárquico o método AHP, con el fin de determinar cuál es el diseño conceptual definitivo para una máquina de micromecanizado electroquímico.

COMPARACIÓN DISEÑOS CONCEPTUALES				
Módulo	Subsistema	Diseño I	Diseño II	Diseño III
Módulo de trabajo y supervisión	Subsistema estructura de trabajo y supervisión	Estructura con partes móviles	Estructura vertical.	Dos estructuras verticales
	Subsistema sujeciones ánodo y cátodo	Cabezal (cátodo). Cuba con red de alcantarillado (ánodo)	Mandril Dremel (cátodo). Base con agujeros mediante tornillos autoperforantes (ánodo)	Mandril porta brocas (cátodo). Diseño de apoyo (ánodo)
	Subsistema depósito y retorno electrolito	Tanques plásticos	Tanques fibra de vidrio.	Tanques metálicos
	Subsistema de circulación del electrolito	Tubería PVC	Tubería PVC hidráulico	Tubería metálica

Módulo de circulación del electrolito y filtrado	Subsistema transporte del electrolito	Bomba de agua sumergible	Bomba centrífuga anticorrosiva	Bomba de membrana
	Subsistema filtrado del electrolito	Filtración a vacío	Filtración por ósmosis inversa	Microfiltración
	Subsistema extracción de gases	Extractor centrífugo	Extractor helicocentrífugo	Extractor axial
Módulo de alimentación y fuente eléctrica	Subsistema fuente de alimentación y fuente eléctrica	Fuente de poder regulable	Fuente multicanal	Soldadora TIG tipo inversor
Módulo de avance de la herramienta	Subsistema mecanismo de avance	Impresora 3D	Brazo de dos grados de libertad	Mecanismo de avance, una sola dirección
	Subsistema motor	Motor paso a paso	Servomotor	Actuador lineal

Tabla 7. Comparación de alternativas de cada diseño conceptual. Autor.

Con la elaboración de esta matriz se observan las posibles soluciones para cada uno de los módulos principales para la máquina, para decidir que alternativa es la que mejor se adecua a los requerimientos y funcionamiento de la máquina, se describen las ventajas y desventajas de cada subsistema.

4.2.1 SUBSISTEMAS MÓDULO DE TRABAJO Y SUPERVISIÓN

MÓDULO DE TRABAJO Y SUPERVISIÓN		
Subsistemas	Ventajas	Desventajas
Estructura con partes móviles	Facilidad de transporte. Tamaño de la máquina. Fácil mantenimiento. Adaptabilidad en el ambiente.	Resistencia mecánica. Distribución de sus componentes. Costo.
Estructura vertical	Resistencia mecánica. Facilidad de transporte. Adaptabilidad en el ambiente.	Mantenimiento.
Dos estructuras verticales	Resistencia mecánica. Distribución de sus componentes. Control y seguimiento proceso de mecanizado.	Costos. Tamaño de la estructura.

	Facilidad de transporte.	
Cabezal (cátodo). Cuba con red de alcantarillado (ánodo)	Compatibilidad con el cátodo y ánodo.	Control y retención de la herramienta y la pieza de trabajo.
Mandril Dremel (cátodo) Base con agujeros mediante tornillos autoperforantes (ánodo)	Adaptabilidad al mecanismo. Control y precisión del cátodo. Seguridad herramienta.	Costos de la base perforada.
Mandril porta brocas (cátodo). Diseño de apoyo (ánodo)	Adaptabilidad al mecanismo. Control ánodo. Seguridad pieza de trabajo.	Costo diseño de apoyo.

Tabla 8. Ventajas y desventajas subsistemas del módulo de trabajo y supervisión.

Autor.

4.2.2 SUBSISTEMAS MÓDULO DE CIRCULACIÓN DEL ELECTROLITO Y FILTRACIÓN

MÓDULO DE CIRCULACIÓN DEL ELECTROLITO Y FILTRACIÓN		
Subsistemas	Ventajas	Desventajas
Tanques plásticos	Fabricados con polietilenos de alta densidad, productos muy ligeros, fáciles de transportar, flexibles y resistentes a golpes como a variadas temperaturas y materiales/líquidos químicos u orgánicos [23].	Puede romperse fácilmente.
Tanques fibra de vidrio	Mayor resistencia a agentes corrosivos. Mayor resistencia química y mecánica. Larga vida útil de servicio. Mantenimiento cero. Facilidad de reparación y fabricación. Bajo peso específico. Excelentes aislantes térmicos y eléctricos, además de fácil transporte [24].	Costos de la fabricación, el molde de fibra de vidrio es costoso para construir y mantener. Poca resistencia mecánica.
Tanques metálicos	Amigable con el medio ambiente. Bajo costo de mantenimiento. Seguridad alimenticia. Resistentes a altas temperaturas y bajas temperaturas. Gran resistencia contra la corrosión. Gran resistencia mecánica. Apariencia y propiedades higiénicas.	La instalación de estos tanques, puede ser más compleja que la instalación de un tanque de polietileno de alta resistencia. Tienen un costo mayor, ya que el acero inoxidable es muy costoso.

	Facilidad de fabricación: soldabilidad, corte, doblado y plegado. Reciclable [25].	Los tanques de acero inoxidable suelen tardar más en su fabricación, ya que se fabrican a la medida y necesidad del cliente.
Tubería PVC	Las tuberías PVC son muy ligeras en cuanto al peso, por lo que su instalación es muy sencilla al no pesar. Resistentes a la corrosión: La tubería de PVC se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión y a los líquidos químicos. Resistencia mecánica: Son bastante duraderas y elásticas ya que cuentan con una excelente resistencia a la tracción y al impacto. También son tuberías que resisten al fuego a la perfección ya que no son combustibles [26]. Requieren menos mantenimiento	Las tuberías de PVC están disponibles en un número reducido de medidas. Temperatura Los tubos de PVC son capaces de soportar temperaturas de hasta sesenta grados centígrados. Más allá de esa temperatura, este material corre el riesgo de sufrir alteraciones en su estructura haciéndola más blanda y deformable, lo que le hace menos capaz para mantener el fluido a presión. Instalación
Tubería hidráulica PVC	Están diseñadas para soportar presiones mucho mayores que la tubería de PVC sanitaria Presenta una alternativa económica para las tuberías de acero en la conducción de ciertos fluidos [27].	Estas tuberías de PVC son ligeras podríamos decir que es una gran ventaja, pero al mismo tiempo puede ser una desventaja porque cuando caen al suelo o se pisan son propensa a romperse. Se tarda más tiempo en instalar tuberías de plástico que otras de hierro fundido.
Tubería metálica	Fuertes. Firmes. Duraderos. Habilidad para resistir cambios extremos de temperatura. Resisten presión y elementos destructivos. Son ideales para cualquier industria. Pueden ser usados en diferentes tipos de aplicaciones. Pueden tener varias formas (redonda, cuadrada o rectangular). Contienen aluminio, manganeso, titanio y tungsteno. [28].	Unión de tuberías por rosca o soldadura y manipulación dificultosa. Pesadas comparadas con las tuberías de plástico Precio elevado Corrosión del tubo si el agua es lo suficientemente agresiva. Dificultad en manipulación por peso y rigidez. La correcta soldadura de acero negro e inoxidable requiere de experiencia.
	Están diseñadas como una unidad compacta, con juntas y sellos herméticos que mantienen el líquido	Como cualquier dispositivo mecánico, siempre existe el riesgo de que tengan

<p>Bomba de agua sumergible</p>	<p>fuera y protegen los componentes internos. Este diseño permite garantizar que la bomba no tenga fugas, cortocircuitos eléctricos.</p> <p>Además, al tener un diseño cerrado hay menos riesgos de que entre en contacto con determinados contaminantes, por lo que necesita un menor mantenimiento. Cuentan con una forma concreta de bombear el agua. Al estar sumergidas usan presión directa en vez de succión. Es decir, pueden mover fluidos a una distancia mayor de manera más eficiente.</p> <p>No requieren de cebado para iniciarse porque ya están sumergida en un fluido. Es decir, no requieren preparación para el arranque.</p> <p>Son más eficientes porque no necesitan gastar mucha energía en el movimiento del agua.</p> <p>Como se colocan directamente sobre el fluido funcionan de manera más eficiente cuando se mueven líquidos a gran distancia.</p> <p>Dentro de las bombas sumergibles existen diferentes tipos que permiten cubrir las necesidades de cada persona: bombas para manejar líquidos, otras para sólidos...</p> <p>Son silenciosas al encontrarse bajo el agua.</p> <p>Además, son más seguras por el motivo anterior ya que no hay riesgo de que las personas se hagan daño con ellas accidentalmente.</p> <p>En los casos en los que se van a utilizar en pozos, permiten adaptarse a las diferentes profundidades igualando el número de etapas necesarias y optimizando el rendimiento [29]</p>	<p>problemas. Uno de ellos puede ser que se rompa la junta y se ponga en peligro la integridad física de la bomba. Esto puede provocar fugas, corroer los componentes internos y hacer que falle. Al estar bajo fluidos puede ser complicado detectar que algo está fallando.</p> <p>Otra desventaja es que al estar sumergidas puede resultar más complicado recuperarlas cuando es necesario repararlas o reemplazarlas.</p> <p>Son más caras que una bomba no sumergible.</p> <p>Hay que tener cuidado de que estén completamente sumergidas ya que si tienen alguna parte fuera del agua se pueden sobrecalentar.</p> <p>Este tipo de bombas no son válidas para todos los usos, hay que asesorarse previamente.</p>
<p>Bomba centrífuga anticorrosiva.</p>	<p>Se destinan a las aplicaciones con fluidos muy cargados de materias abrasivas o que puedan contener sólidos en suspensión [30].</p>	<p>Costos.</p>
<p>Bomba de membrana.</p>	<p>Es auto aspirante. Puede trabajar también en seco. Posee caudal regulable. No requiere necesariamente de una válvula de seguridad. Permite también trasegar líquidos que son agresivos y/o corrosivos [31].</p>	<p>No son prácticas para bombear caudales por encima de los 300 GPM (1150 lt/m).</p> <p>No son fabricadas para operar con presiones de aire mayores de 125 psi (8.6 bar).</p>

		<p>Se puede formar hielo en los motores de aire, pero se puede minimizar el efecto con una adecuada selección y diseño.</p> <p>Los diafragmas tienen una vida finita, fluidos con abrasivos o altas temperaturas de procesos limitan la vida del diafragma.</p>
Filtración a vacío.	<p>La filtración por succión es mucho más rápida que la filtración por gravedad a menudo toma menos de un minuto con buenos sellos y una buena fuente de vacío.</p> <p>La filtración por succión es más eficiente en la eliminación del líquido residual, lo que conduce a un sólido más puro. Esto es especialmente importante en la cristalización, ya que el líquido puede contener impurezas solubles que podrían volver a absorberse en la superficie sólida cuando el disolvente se evapora [32].</p>	<p>La fuerza de succión puede atraer cristales finos a través de los poros del papel de filtro, dando lugar a una cantidad de material que no puede ser recuperado del papel de filtro, y posiblemente una cantidad adicional que se pierde en el filtrado. Por lo tanto, este método funciona mejor con cristales grandes. En pequeñas escalas, la pérdida de material en el papel de filtro y en el filtrado es significativa, por lo que se recomiendan otros métodos para el trabajo en microescala.</p>
Filtración por ósmosis inversa.	<p>Los filtros de agua de ósmosis inversa eliminan muchas bacterias y patógenos del agua del grifo.</p> <p>También elimina el sabor y los olores del cloro; el agua del grifo no solo será más segura.</p> <p>Los sistemas de ósmosis inversa ocupan poco espacio.</p> <p>Debido a que los filtros de agua de ósmosis inversa producen agua altamente purificada, los alimentos cocinados con esta agua tendrán mejor sabor [33].</p>	<p>Los filtros de agua por ósmosis inversa desmineralizan el agua, lo que significa que también eliminan los minerales saludables que se encuentran naturalmente en el agua. Por ello, deben complementarse con un filtro remineralizador.</p> <p>Los sistemas de filtros de agua de ósmosis inversa pueden obstruirse, por lo que es necesario instalar un filtro de sedimentos antes del filtro de ósmosis inversa para filtrar las partículas que, de otro modo, podrían obstruir o dañar la membrana de ósmosis inversa.</p> <p>La filtración por ósmosis inversa es un proceso lento, a diferencia de otros tipos de tecnologías de purificación de agua. Debido a que los filtros de ósmosis inversa necesitan presión para poder purificar el</p>

		agua, producen una menor cantidad de agua para beber que otro tipo de sistemas de purificación.
Microfiltración	<p>Se requiere baja presión de operación. Bajo consumo de energía para la configuración semi sin salida, en comparación con la nanofiltración o la ósmosis inversa.</p> <p>Se requieren pocas acciones manuales. Relativamente barato.</p> <p>No se necesita transferencia de fase que consuma energía.</p> <p>La calidad del permeado producido no está determinada por la gerencia [34].</p>	<p>Solo se eliminó la materia suspendida y las bacterias ((~eliminación de log 5).</p> <p>Sensible a los productos químicos oxidativos (por ejemplo, ácido nítrico, ácido sulfúrico, peróxido y persulfato en altas concentraciones).</p> <p>El daño puede ser causado por partículas duras y afiladas > 0.1 mm, por lo que es necesaria una filtración previa.</p> <p>Daño de la membrana si se vuelve a enjuagar a una presión superior a 1 bar.</p>
Extractor centrífugo.	<p>Desplazan grandes volúmenes de aire.</p> <p>-Se utilizan para la ventilación localizada y general.</p> <p>Extraen partículas más pesadas (polvos, aserrín, tierra).</p> <p>Pueden autolimpiarse</p> <p>Resisten altas temperaturas.</p> <p>Poseen un alto nivel de eficiencia.</p> <p>Gran variedad para distintos usos.</p> <p>Producen altas presiones.</p> <p>Pueden ser utilizados como inyectores y extractores de aire.</p> <p>Disminuyen la temperatura interna generada por: procesos productivos, personas, maquinaria, entre otros.</p> <p>Disponibles en transmisión directa o por correa.</p> <p>Resistentes a la corrosión.</p> <p>Reducen los vapores, olores y partículas suspendidas en el aire.</p> <p>Un ventilador centrífugo se usa para proporcionar una gran presión al fluido con bajos caudales [35].</p>	<p>Costos.</p> <p>Adaptabilidad en el ambiente</p>
Extractor helicocentrífugo.	<p>Resistencia a la corrosión.</p> <p>Características extractor axial y extractor centrífugo [35].</p>	<p>Costos y mantenimiento.</p> <p>Adaptabilidad en el ambiente.</p>
	<p>Un ventilador axial es capaz de mover grandes caudales de aire con poca presión</p>	<p>No presenta mucha resistencia frente a la corrosión.</p>

Extractor axial.	<p>Es perfecto para los baños y otros ambientes pequeños que produzcan grandes cantidades de vapor, humedad y malos olores.</p> <p>De fácil limpieza e instalación, silencioso. Brinda seguridad eléctrica total con un funcionamiento adaptable a todo tipo de decoración o ambiente.</p> <p>Gracias a que Incluye una compuerta antirretorno, se impide la entrada de aire del exterior y de posibles fugas de calefacción en caso el extractor no se encuentre funcionando [35].</p>	
-------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Tabla 9. Ventajas y desventajas subsistemas del módulo de circulación y filtrado.
Autor.

4.2.3 SUBSISTEMAS MÓDULO DE ALIMENTACIÓN Y FUENTE ELÉCTRICA

MÓDULO DE ALIMENTACIÓN Y FUENTE ELÉCTRICA		
Subsistemas	Ventajas	Desventajas
Fuente de poder regulable.	<p>Permite conectar los canales en serie para obtener una elevada tensión de salida o conectarlos en paralelo para lograr una mayor intensidad de salida sea cual sea el número de canales de la unidad adquirida (2, 3 o 4). En todos los casos, los canales tienen un rango de tensión idéntico.</p> <p>Mantiene la tensión estable hasta la intensidad definida por el usuario. A partir de ese punto, la fuente de alimentación limita la intensidad de salida máxima al nivel definido.</p> <p>Permite modificar la tensión de todos los canales en paralelo (por medio de un elemento de ajuste). Esto resulta especialmente útil para alimentar y probar circuitos bipolares [36].</p>	<p>En algunos casos la tensión no es estable.</p> <p>No es un equipo compacto.</p>
Fuente multicanal.	<p>Alta estabilidad</p> <p>Protección de salida general</p> <p>Voltaje y corriente continuamente variables dentro del valor nominal de voltaje y corriente</p> <p>Alta precisión con una interfaz de control fácil.</p> <p>Función de bloqueo de teclado destacado y el cálculo automático de la energía garantizan la salida de corriente estable y la lectura claramente visible.</p>	<p>Bajo ritmo de trabajo.</p> <p>No es un equipo tan compacto.</p>

	Función de memoria de almacenamiento y recuperación. Cuenta con 3 botones con la función de memoria de almacenamiento y recuperación. Extra compacto y portátil [36].	
Soldadora TIG tipo inversor.	<p>Tienen un peso mucho más ligero. Podemos incluso encontrar equipos de menos de 2 Kg.</p> <p>Menor consumo eléctrico. El transformador que incorporan es mucho más eficiente. Requiere menos energía para funcionar.</p> <p>Mayor ritmo de trabajo. debido a su mejor refrigeración y su menor calentamiento.</p> <p>Mejor acabado en materiales finos. Los grupos inverter nos permiten cambiar la polaridad de las pinzas de soldar (soldadura inversa). Con ello, conseguimos calentar menos el electrodo.</p> <p>Válidos para más materiales. Además de soldar hierro y acero, nos facilitan la soldadura del acero inoxidable y nos permiten soldar otros materiales, como el aluminio.</p> <p>Mayor facilidad de uso. La placa electrónica que incorporan estos grupos se encarga de automatizar y facilitar algunos procesos de la soldadura. Además, regula mejor y con más exactitud la intensidad que se quiera utilizar.</p> <p>Permiten su uso con generadores de luz. La gran mayoría de equipos inverter permiten su uso conectado a un generador de luz [37].</p>	<p>Coste más elevado. Su tecnología hace que aumenten los costes de fabricación, con respecto a los grupos convencionales, aunque actualmente la diferencia en precio de venta no es tanta.</p> <p>Mecanismo más delicado. Su placa electrónica es más sensible a sufrir con caídas o subidas de tensión, al igual que con restos de polvo. Se debe ser más cuidadoso en su manejo, limpieza y mantenimiento.</p>

Tabla 10. Ventajas y desventajas subsistemas del módulo de alimentación y fuente eléctrica. Autor.

4.2.4 SUBSISTEMAS MÓDULO DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA

MÓDULO DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA		
Subsistemas	Ventajas	Desventajas
Impresora 3D.	Tamaño del mecanismo. Movimiento tridimensional.	Baja resistencia mecánica. Costo.
Brazo de dos grados de libertad.	Resistencia mecánica. Control distanciamiento entre herramienta y pieza de trabajo. Control de desplazamiento.	Tamaño del mecanismo Costo.
Mecanismo de avance, una sola dirección.	Tamaño del mecanismo. Resistencia mecánica. Mejor manejo operacional.	Desplazamiento en una sola dirección.

	Control distanciamiento entre herramienta y pieza de trabajo.	
Motor paso a paso	<p>Mayor exactitud en la posición y repetición de los movimientos. Error de paso inferior al 5%. Perfecta respuesta en arranque y parada. Confiable y duradero, ya que no existe contacto de escobillas. Ángulo de rotación proporcional a los pulsos de entrada. Gran rango de velocidades de rotación, ya que responde a la frecuencia de pulsos de entrada digitales [38].</p>	<p>Una de las desventajas es que algunos motores son a menudo bastante desiguales. Motores de pasos de calidad inferiores tienen menos posiciones como gire y tienden a hacer saltos más grandes de la posición. Debido a esto, el motor parece moverse de una manera desigual torpe. En la más alta calidad motores hay menos saltos porque hay más posiciones y los saltos son más pequeños y por lo tanto aparecen más suaves.</p>
Servomotor	<p>Ahorro de tiempo en fase de elaboración de proyectos, pudiendo realizar modificaciones sin costes adicionales. Máxima precisión. Elevada torsión. Tamaño y coste de mantenimiento reducidos. Carga ligera. Curva de velocidad lineal, aspecto que reduce el esfuerzo computacional [39].</p>	<p>El alto costo del equipo. Dificultad en la configuración inicial de la calibración del equipo. es imposible hacerlo sin necesidad de conocimientos especiales.</p>
Actuador lineal	<p>Fuerte, ligero, sencillo, rápido. Funcionamiento suave. Muy compacta. Rango de movimiento mayor que la longitud del actuador. La fuerza, la posición y la velocidad son controlables y repetibles. Capaz de altas velocidades y posicionamiento preciso. Mayor fuerza y menos pérdidas que las bobinas móviles [40].</p>	<p>Puede gotear. Requiere retroalimentación de posición para repetibilidad. Requiere bomba hidráulica externa. Fuerza baja a media. Muchas partes móviles son propensas a desgastarse.</p>

Tabla 11. Ventajas y desventajas subsistemas del módulo de avance de la herramienta. Autor.

4.3 EVALUACIÓN SUBSISTEMAS

Al conocer las ventajas y desventajas de cada uno de los subsistemas, se genera la evaluación de cada uno de ellos por medio del método analítico jerárquico, el cual permitirá determinar cuál de estos subsistemas serán seleccionados para la elaboración de la máquina electroquímica.

Este método, cuenta con una escala de calificación con la cual se trabajará, dicha escala es la de Thomas Saaty, quien fue el inventor de este proceso del método AHP.

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
1	Igualmente, importante	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente importante	Preferencia leve sobre un elemento sobre el otro
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte sobre un elemento sobre el otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Mucha más preferencia de un elemento sobre otro. Predominancia demostrada
9	Importancia extremadamente fuerte	Preferencia clara y absoluta sobre un elemento sobre el otro
2,4,6,8		Intermedio de los valores anteriores

Tabla 12. Escala de calificación de Thomas Saaty. Autor.

4.3.1 EVALUACIÓN MÓDULO DE TRABAJO Y SUPERVISIÓN

Para tomar la decisión de cuál subsistema de estructura de trabajo y control se utilizará se determinaron los siguientes rubros con sus respectivos porcentajes de la decisión total como se ve en la Tabla 13.

Matriz de selección subsistema estructura de trabajo y supervisión	Concepto I (Estructura con partes móviles)	Concepto II (Estructura vertical)	Concepto III (Dos estructuras verticales)
Costos de fabricación	0.1195	0.5492	0.3312
Facilidad de transporte de la máquina	0.6173	0.2057	0.1768
Fácil mantenimiento	0.4285	0.1428	0.4285
Distribución de sus componentes	0.1061	0.2604	0.6333
Tamaño de la máquina	0.6333	0.1061	0.2604

Priorización	0.2439	0.3753	0.3806
---------------------	--------	--------	---------------

Tabla 13. Matriz del subsistema estructura de trabajo y supervisión. Autor. Con respecto a la lectura de los resultados de la matriz de decisión anterior se concluye que la mejor opción de diseño, con respecto a los requerimientos de ingeniería, es el del concepto III, ya que este contiene dos estructuras que permite una mejor distribución de sus componentes, permitiendo su fácil manipulación, transporte y adaptación en cualquier espacio.

Matriz de selección subsistema sujeciones ánodo y cátodo	Concepto I (Cabezal - Cuba con red de alcantarillado)	Concepto II (Mandril Dremel - Base con agujeros mediante tornillos autoperforantes)	Concepto III (Mandril porta brocas - Diseño de apoyo)
Compatibilidad con la herramienta y pieza de trabajo	0.1114	0.4923	0.3961
Adaptabilidad al mecanismo	0.5703	0.1711	0.2585
Control y retención ánodo y cátodo	0.5123	0.1581	0.3295
Costo y mantenimiento	0.1038	0.2310	0.6650
Priorización	0.2747	0.3449	0.3803

Tabla 14. Matriz del subsistema sujeciones ánodo y cátodo. Autor.

En este caso, tanto el mandril Dremel y su base con agujeros mediante tornillos autoperforantes junto al mandril porta brocas y su diseño de apoyo resultan efectivos, sin embargo, el tercer concepto, presenta una mejor compatibilidad con la herramienta y la pieza de trabajo para el proceso de mecanizado.

4.3.1.1 EVALUACIÓN MÓDULO DE CIRCULACIÓN ELECTROLITO Y FILTRADO

De igual manera, para tomar la decisión de cuál módulo de circulación del electrolito y su filtrado se le implementara, se determinaron los siguientes rubros con sus respectivos porcentajes de la decisión total como se ve en la Tabla 15.

Matriz de selección subsistema depósito y retorno electrolito	Concepto I (Tanques plásticos)	Concepto II (Tanques fibra de vidrio)	Concepto III (Tanques metálicos)
Resistencia agentes químicos	0.5246	0.3337	0.4647
Resistencia mecánica	0.1065	0.3967	0.1103
Fácil instalación y costos	0.2394	0.1372	0.0496
Facilidad de fabricación	0.0886	0.2528	0.2394
Aislación térmica y química	0.5082	0.1186	0.3731
Priorización	0.3577	0.2823	0.3598

Tabla 15. Matriz del subsistema depósito y retorno electrolito. Autor.

Con respecto a la lectura de los resultados de la matriz de decisión anterior se concluye que la mejor opción es contar con tanques metálicos, ya que estos van a presentar mejores resistencias frente a los agentes químicos los cuales van a estar involucrados la mayor parte del tiempo.

Matriz de selección subsistema de circulación del electrolito	Concepto I (Tubería PVC)	Concepto II (Tubería hidráulico)	Concepto III (Tubería metálica)
Fácil instalación	0.2604	0.6333	0.1061
Resistencia mecánica	0.0908	0.3776	0.5315
Resistencia agentes químicos	0.5322	0.3592	0.1084
Resistencia a presiones	0.4352	0.4865	0.0781
Costo, peso y límites de tamaño	0.4402	0.2351	0.3245
Priorización	0.3777	0.4151	0.2070

Tabla 16. Matriz del subsistema de circulación del electrolito. Autor.

Con los resultados de la matriz de decisión anterior se concluye que es mejor optar por tuberías de PVC hidráulico, al igual que los tanques, estos van a presentar mejores resistencias frente a los agentes químicos, a su vez, nos facilitara su instalación dentro de la estructura de trabajo escogida.

Matriz de selección subsistema transporte del electrolito	Concepto I (Bomba de agua sumergible)	Concepto II (Bomba centrífuga anticorrosiva)	Concepto III (Bomba de membrana)
Costos de mantenimiento	0.6333	0.2604	0.1061
Resistencia sustancias abrasivas	0.0737	0.2828	0.6433
Capacidad de descarga	0.1399	0.2864	0.5736
Ruido producido	0.5736	0.1399	0.2894
Tiempo de trabajo sin mantenimiento	0.1061	0.2604	0.6333
Priorización	0.3505	0.2496	0.3998

Tabla 17. Matriz del subsistema transporte del electrolito. Autor.

Con los resultados de la matriz de decisión para el transporte del electrolito, se concluye que es la opción de la bomba de membrana es la más indicada, debido a que estas bombas están diseñadas para soportar agentes químicos o contaminados sin llegar a afectar su funcionamiento, por lo que no se tendrá que preocupar por el contacto del electrolito con la bomba de membrana.

Matriz de selección subsistema filtrado del electrolito	Concepto I (Filtración a vacío)	Concepto II (Filtración por ósmosis inversa)	Concepto III (Microfiltración)
Eficiencia eliminación material	0.1149	0.4054	0.4795
Fuerza de succión	0.3245	0.2351	0.4402
Velocidad filtración	0.1061	0.2604	0.6333
Costo – Resistencia agentes químicos	0.3333	0.3333	0.3333
Priorización	0.2903	0.0.3554	0.4466

Tabla 18. Matriz del subsistema filtrado del electrolito. Autor.

Con los resultados de la matriz de decisión para la filtración del electrolito, se decidió que la opción del proceso de microfiltración es la más adecuada, este sistema permite que no haya impurezas dentro del electrolito afectando el funcionamiento de la máquina o dañando alguna de los componentes de control dentro de la misma.

Matriz de selección subsistema extracción de gases	Concepto I (Extractor centrífugo)	Concepto II (Extractor helicocentrífugo)	Concepto III (Extractor axial)
Resistencia a la corrosión	0.0781	0.4352	0.4865
Costo y mantenimiento	0.6554	0.1577	0.1867
Extracción de partículas	0.0737	0.2828	0.6433
Adaptabilidad en el ambiente	0.3333	0.3333	0.3333
Priorización	0.4023	0.3623	0.4092

Tabla 19. Matriz del subsistema extracción de gases. Autor.

Con los resultados de la matriz de decisión anterior se concluye que es mejor optar por un extractor axial, debido a que este equipo cumplirá con la extracción del hidrogeno generado por el proceso de micromecanizado, y a su vez su instalación será sencilla dentro de la estructura de trabajo.

4.3.2 EVALUACIÓN MÓDULO DE ALIMENTACIÓN Y FUENTE ELÉCTRICA

Para tomar la decisión de cuál subsistema de fuente de alimentación y fuente eléctrica se utilizará se determinaron los siguientes rubros con sus respectivos porcentajes de la decisión total como se ve en la Tabla 20.

Matriz de selección subsistema de alimentación y fuente eléctrica	Concepto I (Fuente de poder regulable)	Concepto II (Fuente multicanal)	Concepto III (Soldadora TIG tipo inversor)
Facilidad de uso	0.1061	0.2604	0.6333
Ritmo de trabajo	0.2883	0.2632	0.4484
Tensión estable	0.1428	0.4285	0.4285
Compacto, portátil	0.2106	0.2409	0.5484
Modificación de tensión	0.2518	0.1592	0.5888
Priorización	0.2211	0.2544	0.5244

Tabla 20. Matriz del subsistema de alimentación y fuente eléctrica. Autor.

Con respecto a la lectura de los resultados de la matriz de decisión anterior se concluye que la mejor opción es la del concepto III, al hacer uso de una soldadora TIG tipo inversor se trabaja con amperajes grandes, manteniendo su tensión estable con una facilidad de uso, por lo que será ideal como fuente eléctrica y servirá para la alimentación de los componentes electromecánicos.

4.3.2.1 EVALUACIÓN MÓDULO DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA

Para tomar la decisión de cuál subsistema de avance de la herramienta se utilizará se determinaron los siguientes rubros con sus respectivos porcentajes de la decisión total como se ve en la Tabla 21.

Matriz de selección subsistema mecanismo de avance	Concepto I (Impresora 3D)	Concepto II (Brazo de dos grados de libertad)	Concepto III (Mecanismo de avance, una sola dirección)
Eficaz - uso de energía	0.2106	0.2409	0.5484
Tamaño mecanismo	0.5246	0.1415	0.3337
Fácil manejo	0.1095	0.3091	0.5812
Control del GAP	0.0896	0.3033	0.6070
Control desplazamiento	0.1698	0.3873	0.4428
Priorización	0.2149	0.2805	0.5044

Tabla 21. Matriz del subsistema mecanismo de avance. Autor.

Con respecto a los resultados de la matriz del mecanismo de avance, se concluye que la mejor opción es la del concepto III, ya que, al ser de solo una dirección, dará un mejor control, precisión y manejo de la herramienta, para obtener mejores respuestas del GAP a la hora de realizar su aproximación durante el mecanizado, aparte de estos criterios, el tener un mecanismo que solo se mueva en una sola dirección, es una decisión acertada ya que esto permitirá un estudio más centralizado del comportamiento del proceso electroquímico al ser una nueva tecnología que se está empleando a nivel mundial.

Matriz de selección subsistema motor	Concepto I (Motor paso a paso)	Concepto II (Servomotor)	Concepto III (Actuador lineal)
Control altas y bajas velocidades	0.5666	0.2166	0.2166

Precisión	0.1513	0.3767	0.4719
Costo y mantenimiento	0.6033	0.2579	0.1386
Exactitud en la posición y repetición movimientos	0.6348	0.2276	0.4708
Priorización	0.4997	0.2654	0.3926

Tabla 22. Matriz del subsistema motor. Autor.

Con los resultados de la matriz del motor, se evidencia que la mejor opción es la del motor paso a paso, son una buena elección porque producen un torque más alto a velocidades más bajas que otros motores fuera de eso, económicamente estos motores tienden a ser más baratos que los servomotores y actuadores lineales, por lo que la selección de este motor nos proporcionara una mayor precisión, velocidad controlada y además no se necesita un gran torque ya que no existe un contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo.

4.4 DISEÑO CONCEPTUAL DEFINITIVO

A partir de las matrices del método AHP, se tomarán los componentes elegidos, formando una máquina de micromecanizado electroquímico, de esta manera se cumplirá con los requerimientos de ingeniería, dando paso al desarrollo del diseño de detalle con base a los subsistemas seleccionados.

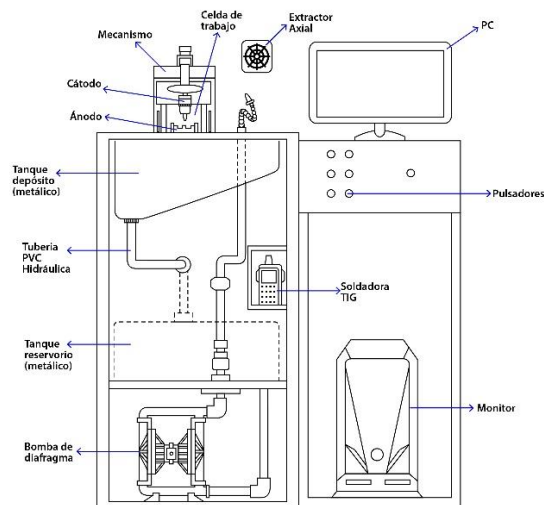


Figura 27. Concepto definitivo. Autor.

5 DISEÑO DE DETALLE PARA UNA MÁQUINA DE MICROMECHANIZADO ELECTROQUÍMICO

Con la selección de todos los subsistemas, en este capítulo se recopilarán y generarán los resultados e información para el dimensionamiento en detalle para el desarrollo de la máquina de micromechanizado electroquímico. El diseño de detalle presentado, se sustenta con la elaboración de cálculos y las decisiones de los equipos de la máquina electroquímica, por esta razón, los componentes presentarán una justificación detallada por medio de cálculos y análisis, sin embargo, en caso de que alguno de los componentes no presente una justificación mediante cálculos, se sustentará con base a las decisiones de su funcionalidad a los que estarán sometidos.

Con base a los requerimientos y necesidades debidamente establecidos se procede a desarrollar el diseño de la máquina para micromechanizado electroquímico,

5.1 MÓDULO DE TRABAJO Y SUPERVISIÓN

5.1.1 CÁTODO (HERRAMIENTA) Y ÁNODO (PIEZA DE TRABAJO)

El ánodo como material de trabajo y el cátodo como herramienta o selección del electrodo, van a depender de las necesidades y restricciones de la industria biomédica en Colombia, ya que este proceso puede variar según los parámetros de los usuarios, llegando a afectar la manera de mecanizar. Generalmente, tanto el cátodo como el ánodo, van a estar diseñados y conformados con metales con buena conductividad eléctrica y térmica.

5.1.2 CÁTODO

Uno de los factores con más influencia en los procesos de micromechanizado es el diseño de la herramienta o cátodo, ya que esto nos ayudara a minimizar los inconvenientes en el mecanizado y así conservar un flujo a lo largo de toda la superficie en la herramienta, debido a las posibles generaciones de cavitaciones e irregularidades, el material que más se emplea en los procesos electroquímicos es el cobre por la gran conductividad que posee, su costo y la facilidad para trabajar,

también se ha empleado el acero inoxidable, ya que posee resistencia a la corrosión, permitiendo su utilización en el proceso electroquímico, sin embargo, en este diseño la herramienta estará elaborada con cobre, facilitando operaciones de perforación y moldeo.

5.1.3 SUJECIÓN ELECTRODO

Para la sujeción del cátodo o del electrodo, con la ayuda del subsistema previamente escogido, se utilizan otros elementos que nos brindan estabilidad y el flujo de corriente a la herramienta, a continuación, se presentaran dichos elementos que conformaran la sujeción del electrodo en la máquina.

5.1.4 MANDRIL

El electrodo estará asegurado mediante un mandril porta brocas de apertura y cierre con llaves, esto permitirá un fácil ensamble para la herramienta de trabajo.



Figura 28. Mandril porta brocas [41].

5.1.5 EJE CONEXIÓN ELÉCTRICA

En la conexión de la herramienta se va a desarrollar un eje de acero inoxidable, este va a presentar una perforación en la parte superior del eje a fin de obtener su respectiva conexión y sujeción a la fuente de alimentación, y a su vez, estará roscada en la parte inferior para el ensamble con el mandril.



Figura 29. Eje para la conexión eléctrica. Autor.

5.1.6 CONJUNTO PARA LA HERRAMIENTA DE TRABAJO

Este conjunto permite que haya un aislamiento eléctrico del cátodo, con el fin de acoplar todo el sistema de la herramienta de trabajo al mecanismo para su avance vertical.

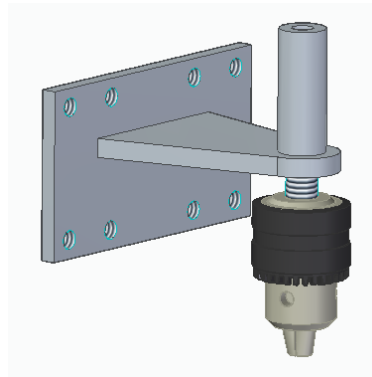


Figura 30. Conjunto herramienta de trabajo. Autor.

5.1.7 SUJECIÓN DEL ÁNODO O PIEZA DE TRABAJO

Para la sujeción del ánodo se implementa en el diseño un apoyo que presente un material que no sea conductor eléctrico, para evitar inconvenientes con el paso de corriente con el fluido electrolítico.

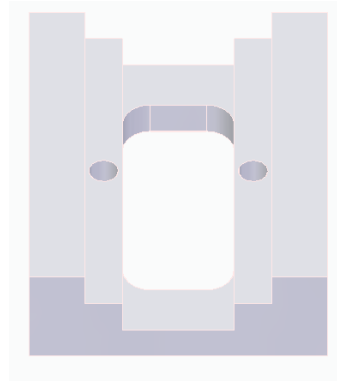


Figura 31. Soporte herramienta de trabajo. Autor.

Esta sujeción se va a encontrar dentro de una cubeta, donde va a estar inundada por el electrolito, ya que su función principal es conservar al ánodo inundado y así aumentar la eficiencia eléctrica y mantener constante la corriente para desarrollar el micromecanizado.

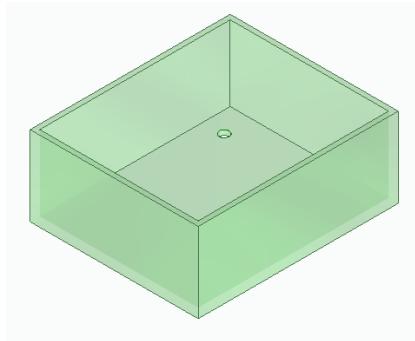


Figura 32. Soporte herramienta de trabajo. Autor.

5.1.8 MÓDULO DE SUPERVISIÓN

Para la supervisión de todos los subsistemas eléctricos del equipo electroquímico se desarrollará por medio de pulsadores on y pulsadores off, los cuales se van a encontrar en el módulo de supervisión del sistema, estos pulsadores se encargarán del control y funcionamiento de la fuente eléctrica, la bomba centrífuga y de la fuente de alimentación del mecanismo de avance.



Figura 33. Pulsadores On/Off [42].

5.2 MÓDULO DE CIRCULACIÓN DEL ELECTROLITO Y FILTRADO.

El electrolito que se va a emplear es el Cloruro de Sodio (NaCl) con una concentración de 300 g/l, el NaCl es un tipo de electrolito de pasivación y el que más se utiliza durante el proceso electroquímico, sin embargo, se pueden emplear otro tipo de electrolitos para el mecanizado de diferentes metales, como se evidencia en la Tabla 22.

MATERIAL	ELECTROLITO (kg/l)	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Aceros y aleaciones de hierro.	NaCl, KCl o (0.25 - 0.6)	Barato. no tóxico Sin peligro de incendio. Se puede utilizar para una variedad de materiales Produce una mezcla suave del área maquinada con las superficies circundantes. A alta concentración, la conductividad es fácil de controlar. La eficiencia actual es alta.	Elimina material de las superficies acabadas circundantes. Tiende a mecanizar selectivamente los límites de grano de los aceros inoxidable. La conductividad se ve afectada por la temperatura.
Aceros y aleaciones de hierro.	NaNO ₃ (0.5)	Produce un mejor acabado de las superficies. Mecanizado perdido menor.	Más costoso que el NaCl. Es un peligro de incendio. Se requiere una alta concentración para una buena conductividad. La resistividad eléctrica puede variar con la velocidad del flujo para producir líneas de flujo.

			Se requieren voltajes más altos. La conductividad se ve afectada por la temperatura.
Aceros y aleaciones de hierro.	NaClO ₃ (0.2 – 0.5)	Produce una superficie brillante muy suave que es resistente a la corrosión posterior. Conductividad relativamente insensible a la temperatura. Sin pérdida de mecanizado o picaduras de superficies adyacentes. Aplicable para mecanizado preciso.	Alto costo. Tóxico. Alto riesgo de incendio si se deja secar sobre materiales combustibles. Requiere manipulación y almacenamiento especiales. Baja eficiencia de corriente a menor concentración. Se requieren voltajes altos (alrededor de 20 V) para obtener los mejores resultados. Sin mecanizado a < 9 V.
Aluminio y sus aleaciones	NaCl (0.01 – Ácido cítrico)	El ácido cítrico previene la formación de precipitados de hidróxido metálico. Adecuado para operar con un tamaño de GAP muy pequeño para la definición de formas de trabajo intrincadas. Se pueden emplear presiones de electrolito más bajas, en la operación de electrodos delgados como los que se usan en la perforación profunda.	Muy caro si se usa para otras piezas pequeñas e intrincadas. El electrolito debe cambiarse con frecuencia.
Hierro fundido	NaCl (0.2) o NaNO ₃ (0.5)	Produce un buen acabado superficial.	Se deben usar tamaños de GAP de mecanizado grandes (0,5 - 0,8 mm) para permitir que las partículas de grafito se limpien.
Níquel y aleaciones a base de cobalto	NaCl (0.1) + NaNO ₃ (0.1)	La mezcla económica produce un buen acabado superficial.	Produce líneas de flujo en la superficie de trabajo. Superficie maquinada caries carbón gris ligeramente adherido.
Níquel y aleaciones a base de cobalto	NaNO ₃ (0.5)	La mezcla económica produce un buen acabado superficial.	Produce líneas de flujo en la superficie de trabajo. Superficie maquinada caries carbón gris ligeramente adherido. Más costoso.

			Es un peligro de incendio. Necesita mayor voltaje de funcionamiento.
Níquel y aleaciones a base de cobalto	NaCl (0.25)	Produce superficies lisas. Las superficies no necesitan limpieza posterior.	Corrosión intergranular que reduce drásticamente la resistencia a la fatiga de los componentes mecanizados con este electrolito. Peligro de picaduras en las superficies adyacentes al área maquinada.
Níquel y aleaciones a base de cobalto	NaCl (0.25) + NaF (0.002)	Los materiales que muestran películas irregulares de óxido negro cuando se mecanizan con cualquiera de los electrolitos anteriores se mecanizarán hasta obtener un buen acabado con este electrolito.	Mismas desventajas que las enumeradas para el NaCl.
Aleaciones de titanio	NaCl (0.15) + NaBr (0.05) + NaF (0.002)	Produce un buen acabado superficial. Características de las películas de óxido superficiales insensibles a la velocidad del flujo. Dimensión de contorno fácil de controlar.	Un voltaje más alto reduce la posibilidad de pasividad. Queda una película suelta de óxido gris en la superficie de trabajo. Peligro de picaduras en la superficie adyacente al área de mecanizado.
Aleaciones de titanio	NaCl menos de (0.1)	Puede producir acabados superficiales mejores que los electrolitos anteriores. La superficie maquinada no tiene ninguna película de óxido suelta.	Se requieren altos voltajes. Se pueden formar líneas de flujo en la superficie de trabajo. La superficie es más propensa a la pasividad durante el mecanizado. Las dimensiones de contorno cerrado son difíciles de mantener. Se producen picaduras en las superficies adyacentes al área de mecanizado.

Tabla 23. Electrolitos empleados con su concentración requerida para diferentes metales. Autor [43] .

5.2.1 RESERVORIO DE ELECTROLITO

En el diseño de la máquina de micromecanizado consta de tanques para el depósito del electrolito, esto pueden fabricarse de distintos materiales como aluminio, aceros o resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio, el tanque reservorio debe ser resistente a la corrosión, cubiertos con pintura electrostática, ya que esto permite una resistencia físico química frente a impactos y agentes químicos.

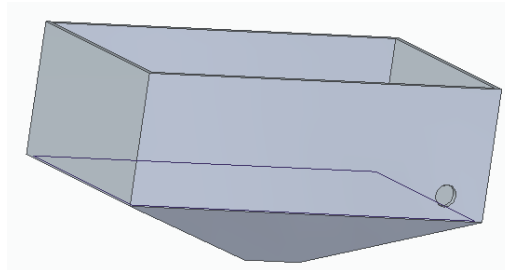


Figura 34. Reservorio. Autor.

5.2.2 RECOLECTOR DE ELECTROLITO

Donde se realiza el micromecanizado de las piezas se encuentra un tanque recolector, en el que presenta una inclinación inferior la cual permite el descenso del fluido hacia la tubería para su regreso al reservorio, de esta manera, el retorno será rápido y total de electrolito.

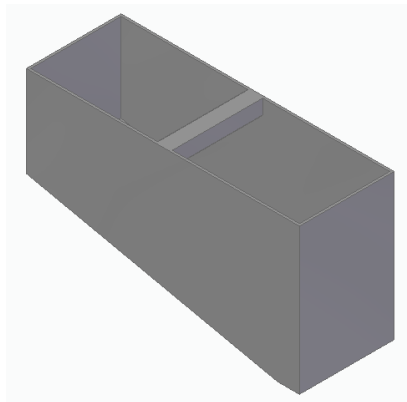


Figura 35. Recolector. Autor.

5.2.3 ACCESORIOS Y TUBERÍA

Como la máquina electroquímica va a estar trabajando con electrolitos que son corrosivos, se utilizara PVC hidráulico ya que fue la mejor alternativa para el sistema de transporte. En este punto las tuberías se unirán a los tanques por medio de coplas o uniones de PVC, generalmente se aplican uniones machos por presentar hilo roscado, tuerca y goma sellante para prevenir posibles filtraciones. El modelo para el sistema de transporte para el fluido electrolítico es el siguiente.

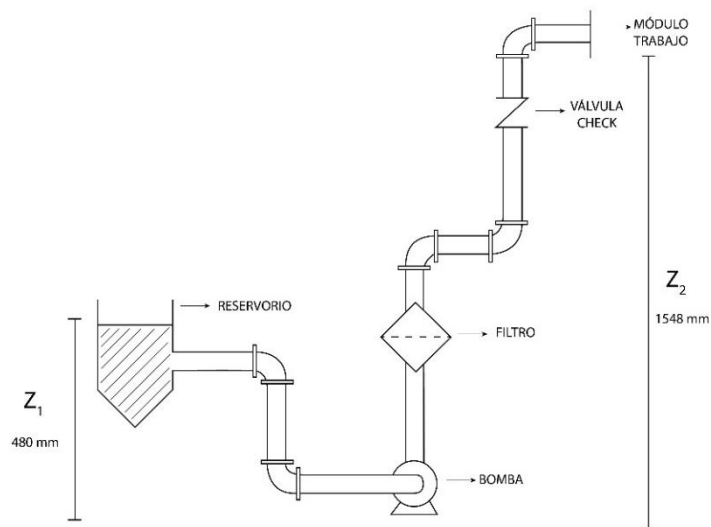


Figura 36. Modelo sistema de transporte de fluido. Autor.

Para este diseño el tanque reservorio va a tener una capacidad de 10 litros, por lo que se maneja un caudal máximo de 10 litros por minuto, donde el transporte del electrolito al módulo de trabajo no va a ser mayor a 2 metros.

Para saber que diámetro de tubería se empleara, se realizan cálculos hidráulicos donde se estiman velocidades a diferentes diámetros, de esta forma se obtendrá una tubería de PVC hidráulica adecuada para el transporte del cloruro de sodio a la celda de trabajo.

Al saber el caudal con el cual se va a operar el proceso de mecanizado que en este caso son de 10 litros por minuto, pero sin saber a qué velocidad y diámetro se va a operar, se toma en cuenta la ecuación de continuidad, ya que aquí nos indica que el área en cualquier parte de la tubería y el caudal que pase por dicha área, tiene

que ser el equivalente en cualquier parte de la sección de la tubería, de manera general, el caudal que ingrese tiene que ser el mismo que va a salir.

Se parte de la siguiente ecuación para el cálculo de las velocidades a diferentes diámetros con un caudal predeterminado.

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \tag{2}$$

Una vez estimadas estas velocidades, se dice que, sin importar el diseño, la velocidad deber ser menor a 5 m/s, pero mayor a un valor de 0.25 m/s. Como se evidencia en la Tabla 23.

NO.	DIÁMETRO (m)	VELOCIDAD (m/s)
1	0.021	0.481
2	0.026	0.314
3	0.031	0.221
4	0.036	0.164
5	0.041	0.126
6	0.046	0.100
7	0.051	0.082
8	0.056	0.068

Tabla 24. Cálculo de velocidades a diferentes diámetros. Autor.

Sin embargo, con la ecuación de continuidad, lo más recomendable es que la velocidad sea de 1 m/s, por lo que, con la siguiente ecuación, se asume este valor para saber el diámetro base para el transporte del fluido. Solo dos diámetros cumplen con esta condición, por lo que sería ideal utilizar alguna de estas dos opciones.

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v}} \tag{3}$$

Calculando:

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.000166 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 1 \text{ m/s}}} = 0.015 \text{ m}$$

(4)

NO.	DIÁMETRO (m)	VELOCIDAD (m/s)
1	0.021	0.481
2	0.026	0.314
3	0.031	0.221
4	0.036	0.164

Tabla 25. Diámetros para selección de la tubería. Autor.

Teniendo estos valores en cuenta, se seleccionará una tubería que cumpla con estos parámetros. Buscando en catálogos, se escogió una tubería RDE 9 PVC de PAVCO, donde presenta un diámetro de 21mm.



Figura 37. Tubería RDE 9 PVC [44].

5.2.4 FILTRADO DE LA MAQUINA ELECTROQUÍMICA

El objetivo del sistema de filtrado es impedir que algún tipo de partícula llegue antes a la celda de trabajo, ya que la presencia de estos sólidos en el fluido generara marcas sobre la pieza mecanizada ocasionando bajos acabados superficiales.

5.2.5 FILTRACIÓN DE LA BOMBA

Para prevenir que algún residuo del fluido llegue a la celda de trabajo, se empleará un filtro para la retención de las partículas a la salida de la bomba, por lo que un

filtro de anillos es el más apropiado debido a que si hay un paso de muchas impurezas, este no se bloqueara como pasaría en un filtro de malla que se tendría que limpiar constantemente.



Figura 38. Filtro de anillos [45].

5.2.6 FILTRACIÓN DEL RESERVORIO

Es necesario que cuando el fluido empiece su retorno al tanque reservorio pase por otro equipo de filtración, de esta manera, se evitara que los residuos del material de la pieza no entren en el sistema y produzcan daños en la superficie del ánodo. Se implementará un filtro de bolsa donde los tamaños de los poros se encuentran entre 1 a 200 micras, permitiendo un manejo de grandes caudales debido a que funcionan por el principio de microfiltración.



Figura 39. Filtro de bolsa [46].

5.2.7 CONTROL NIVEL DEL ELECTROLITO

Para que la bomba no comience a operar con poca cantidad de electrolito en el tanque, se implementará un sensor de nivel para el funcionamiento de la bomba

solo cuando exista fluido dentro del reservorio, uno de los sistemas más utilizados en la industria para el control de varios fluidos es el interruptor de nivel tipo flotador, este presenta una gran resistencia contra fluidos contaminados y consta de una instalación simple sin un mantenimiento.



Figura 40. Interruptor de nivel tipo flotador [47].

5.2.8 BOMBA DE SUMINISTRO DE ELECTROLITO

La bomba quien va ser la que suministra electrolito al módulo de trabajo, será una parte importante del diseño de la maquina electroquímica, por lo que en este punto se realizarán los cálculos pertinentes, donde se estimara la potencia necesaria que debe tener la bomba.

Para comenzar, se calcula la densidad del electrolito seleccionado.

$$\rho \text{ solución} = \text{agua} + 400g \text{ NaCl} \quad (5)$$

Sabiendo que la máxima solubilidad de NaCl en agua es 359 g/l y su densidad es de 2.16 g/cm³.

$$400g \text{ NaCl} \rightarrow V_{\text{NaCl}} = \frac{m_{\text{NaCl}}}{\rho_{\text{NaCl}}} = \frac{0.4 \text{ kg}}{2160 \text{ kg/m}^3} = 1.852 * 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (6)$$

Sabiendo que:

$$V \text{ agua} = 1 \text{ litro} = 1 * 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (7)$$

Donde:

$\rho_{solución}$ = Densidad electrolito (kg/m³).

V_{NaCl} = Volumen de NaCl (m³).

m_{NaCl} = Masa cloruro de sodio (kg).

ρ_{NaCl} = Densidad cloruro de sodio (kg/m³).

V_{agua} = Volumen agua (m³).

Entonces:

$$m_{total} = 1 \text{ kg agua} + 0.4 \text{ kg NaCl} = 1.4 \text{ kg} \quad (8)$$

Tal que:

$$V_{total} = 1 * 10^{-3} \text{ m}^3 + 1.852 * 10^{-4} \text{ m}^3 = 1.1852 * 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (9)$$

$$\rho_{solución} = \frac{m_{total}}{V_{total}} = \frac{1.4 \text{ kg}}{1.1852 * 10^{-3} \text{ m}^3} = 1181.235 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (10)$$

Donde:

m_{total} = Masa electrolito (kg)

V_{total} = Volumen solución (m³)

Tras esto, se debe buscar la viscosidad de la solución, donde se evidencia en la siguiente grafica experimental [48], que la viscosidad cinemática de la solución tiene un valor de $1.50 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

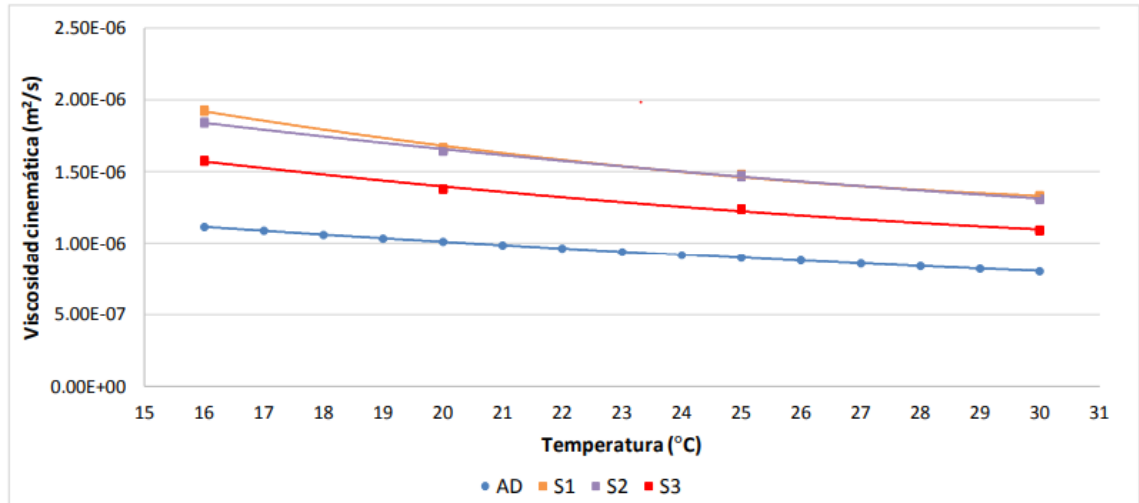


Figura 41. Viscosidad cinemática de la solución [48].

Una vez definida la velocidad del fluido en la tubería, la viscosidad del fluido y el diámetro de tubería se debe calcular el número de Reynolds, el cual permitirá determinar el tipo de flujo, siendo turbulento o laminar.

La fórmula es la siguiente:

$$Re = \frac{v * D}{v \text{ solución}} \tag{11}$$

Donde:

v = Velocidad del fluido en la tubería (m/s)

D = Diámetro tubería (m)

$v \text{ solución}$ = Viscosidad cinemática fluido (m)

Obteniendo:

$$Re = \frac{0.481 \frac{m}{s} * 0.021 m}{1.50 * 10^{-6} m^2/s} = 6734 \tag{12}$$

Como el número de Reynolds es mayor a 4000, el flujo de electrolito es turbulento. Posteriormente, se determina el factor de fricción en tubería. Aquí se obtiene gracias a la tabla de rugosidad del libro Haestad Methods [49].

Donde:

$$Re = 6734$$

$$\varepsilon = 0,0015 \text{ mm}$$

$$D = 21 \text{ mm}$$

$$\frac{\varepsilon}{d} = 7,14 * 10^{-5}$$

Con estos datos se obtiene el factor de fricción con la siguiente ecuación:

$$f = [1.8 \log(\frac{Re}{6.9})]^{-2} \tag{13}$$

Obteniendo:

$$f = [1.8 \log(\frac{Re}{6.9})]^{-2} = 0.034 \tag{14}$$

Para continuar, se calcula la pérdida de carga en tubería:

$$\Delta h_f = \frac{f * L * v^2}{D * 2g} \tag{15}$$

Calculando y teniendo en cuenta que el largo de tubería es de aproximadamente 1.8 m:

$$\Delta h_f = \frac{0.034 * 1.8 * 0.481^2}{0.021 * 2(9.81)} = 0.0343 \text{ m. c. a} \tag{16}$$

Donde:

Δh_f = Pérdida de energía por fricción.

f = factor de fricción.

L = Largo tubería (m).

v = velocidad de fluido en tubería (m/s).

D = Diámetro tubería (m).

g = Aceleración de gravedad (m/s²).

Tras esto se debe calcular la pérdida de accesorios del sistema.

$$\Delta h_a = k \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Donde:

Δh_a = Pérdida por accesorios.

k = Coeficiente de resistencia específico para cada accesorio.

$k_{\text{codos}} = 30 * 0.034 = 1.02$ m.c.a. Cinco codos a 90°

$k_{\text{válvula}}$ = Según fabricante, la pérdida de carga es de 0,05 bar, equivalentes a 0.51 m.c.a.

k_{filtro} = Según fabricante, la pérdida de carga es de 0,2 bar, equivalentes a 2.04 m.c.a.

$k_{\text{entrada}} = 1$ m.c.a.

$k_{\text{salida}} = 0.50$ m.c.a.

$$\Delta h_a = 1 \frac{0.481^2}{2 * 9.81} + \left(1.02 \frac{0.481^2}{2 * 9.81} \right) * 5 + 0.51 + 2.04 + 0.50 \frac{0.481^2}{2 * 9.81}$$
$$\Delta h_a = 2.627 \text{ m. c. a} \quad (17)$$

Como resultado, la pérdida de carga total en el sistema es de 2.627 m.c.a.

Se determina la energía total proviene de la ecuación de Bernoulli:

$$H_b = \Delta h + \Delta h_{total} + \frac{v^2}{2g} \tag{18}$$

Donde:

Δh = Diferencia altura entre niveles de solución entrada-salida.

H_b = Cabeza de la bomba

Calculando:

$$H_b = 1.068 + 3.0183 + \frac{0.481^2}{2 * 9.81} = 4.098 \text{ m. c. a} \tag{19}$$

De esta forma se buscará la bomba de membrana o diafragma requerida, donde se identificará el caudal y la cabeza de la bomba para la correcta selección del equipo, como se puede evidenciar en la figura 42, donde se presenta la siguiente curva de rendimiento, de esa forma se sabrá si el equipo es ideal para el sistema y transporte del electrolito.

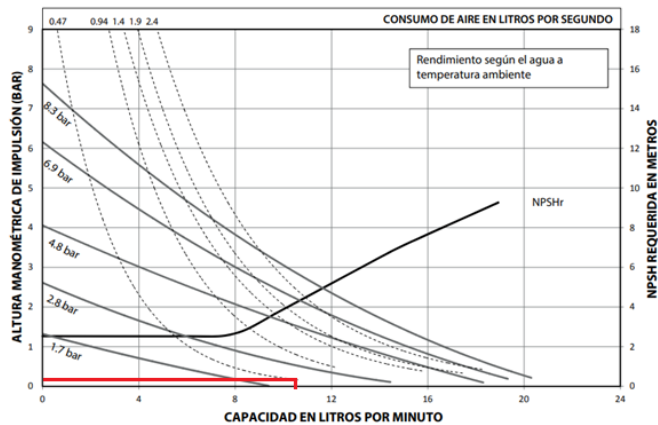


Figura 42. Curva de funcionamiento bomba [50].

En la curva de funcionamiento se evidencia que las características de la bomba de diafragma no metálica de 1/4 de pulgada de referencia PD01P-HPS-PCC-A serán las adecuadas para el transporte del fluido al módulo de trabajo de la máquina electroquímica.



Figura 43. Bomba de diafragma [50].

5.2.9 CONTROL DE CAUDAL

Durante el micromecanizado hay que mantener un control en la operación del flujo de electrolito suministrado, este factor resulta clave para un mejor acabado superficial de la pieza mecanizada, por lo que optar por un componente de control y medición, teniendo en cuenta el tipo de fluido, temperatura, caudal y presión de trabajo, se escogerá un instrumento que cumpla estos aspectos, en este caso, se emplea un caudalímetro, rotámetros, caudalímetros ultrasónicos o caudalímetros magnéticos.



Figura 44. Rotámetro [51].

Durante el micromecanizado electroquímico hay una generación de hidrógeno en el ambiente, para esto hay que implementar un equipo para su adecuada extracción, teniendo en cuenta que la maquina estará en un laboratorio, se usaran las adecuadas horas para renovación por horas que oscilan entre 6 a 8 horas [52].

$$0.8 * 0.44 * 0.4 = 0.1408 m^3$$

$$0.1408 m^3 * 8 \frac{R}{h} = 1.1264 m^3/h$$

(20)

Obtenemos que el volumen de esta área de trabajo es de 0.1418 m³, que al multiplicarlo por las 8 renovaciones/hora nos dará un caudal necesario mínimo de extracción de 1.1264 m³ /h.



Figura 45. Extractor axial [53].

5.3 MÓDULO DE ALIMENTACIÓN Y FUENTE ELÉCTRICA

5.3.1 FUENTE ELÉCTRICA

La energía eléctrica y química son las principales características de corte de la herramienta, este proceso consta de corriente continua de alta intensidad que va a ir conectado entre cátodo de polo positivo o herramienta y al ánodo de polo negativo o pieza de trabajo, que circula a través de un electrolito. En este caso se busca la miniaturización de equipos para la micromanufactura en los procesos no convencionales, debido al poco conocimiento de esta área, se buscará trabajar con aspectos ya definidos de diferentes literaturas, investigaciones y trabajos experimentales dentro de los procesos electroquímicos y por electroerosión. [54]– [59].

Donde se presentan rangos de intensidad de corriente a utilizar para su desarrollo, en estos casos se requiere de una fuente de poder como un transformador o una máquina de soldar.

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE MECANIZADO	
NIVEL DE INTENSIDAD	
Desbaste (A)	Acabado (A)
6	2
5	1.5
4	1
TIEMPO DE IMPULSO	
Desbaste (seg)	Acabado (seg)
9	3
Electrodos	Grafito
	Cobre
PROFUNDIDAD DE CORTE (1 MM)	
Desbaste (mm)	Acabado (mm) (entre 0.20 – 0.30% de la profundidad de corte)
0.75	0.25
GAP	Entre 0.025 y 0.050

Tabla 26. Parámetros óptimos en el mecanizado en electroerosión. Autor [60].

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE MECANIZADO	
Material	Densidad de corriente A/cm²
Acero	1100
A-286	1100
17-7 Ph	1180
Aluminio	1190
Cobalto	1195
Niquel	1200
Rene 41	1350
HS-25	1425
Titanio	1490

Tabla 27. Densidades de corriente eléctrica utilizadas para el mecanizado electroquímico de algunos metales. Autor [61].

Para este caso, se tomarán en cuenta estos datos experimentales, donde los valores de corriente oscilan entre los 2 a los 10 amperios, donde la opción más utilizada en varias investigaciones es la máquina de soldar, ya que esta presenta una tecnología Inverter, ya que, al ser un sistema de control, es posible generar fuentes de alimentación que son compactas.



Figura 46. Soldadora Inverter ET 300iP [62].

Donde sus datos técnicos son:

Renegade ET 300iP	
Rango de Corriente	(monofásico) 5 - 200 A (trifásico) 5 - 300 A
Tensión de Alimentación	1Ø, 220 VAC (±10%) 3Ø, 220-480 VAC (±10%)
Frecuencia de Alimentación	50/60 Hz
Capacidad de soldadura	(TIG) (GTAW) 300 A / 22 V @ 40% 250 A / 20 V @ 60%
Ciclo de trabajo (40 °C)	(MMA) (Electrodo) 300 A / 32 V @ 40% 250 A / 30 V @ 60% 200 A / 28 V @ 100%
Eficiencia en Máxima Corriente	(TIG) 83 % (MMA) 86 %
Tensión en vacío (con VRD)	34 V
Tensión en vacío (sin VRD)	48 V
Factor de Potencia en la Máxima Corriente	0,96
Dimensiones (An x L x Al)	200 x 460 x 320 mm
Peso / con unidad de refrigeración	16,8 kg / 26,6 kg
Protección recomendada	1Ø, 220 V - 35 A 3Ø, 220 V - 20 A 3Ø, 380 V - 16 A 3Ø, 440 V - 10 A
Clase de Protección	IP 23
Clase de Aplicación	S
Normas técnicas	IEC 60.974-1

Figura 47. Datos técnicos soldadora Inverter ET 300iP [62].

5.3.2 CONTROL DE LA CORRIENTE

Para la visualización de la corriente durante el proceso de micromecanizado, el equipo contará con un amperímetro analógico de corriente continua que se encontrará instalado en el módulo de supervisión.



Figura 48. Amperímetro analógico [63].

5.4 MÓDULO DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA.

5.4.1 MECANISMO DE AVANCE Y SELECCIÓN DEL MOTOR

Con la selección del mecanismo de avance, el diseño contará con un conjunto de accesorios y componentes donde la mayoría de ellos estarán fabricados de acero inoxidable que garantizarán el funcionamiento adecuado durante su proceso, como se puede apreciar en la Tabla 25.

ACCESORIOS	CANTIDAD
Placas de PVC de alta densidad	4
Cojinetes lineales	4
Tornillo de avance	1
Tuerca anti backlash	1
Motor paso a paso con junta flexible para su eje	1
Tuerca de sujeción tornillo de avance	1
Ejes guías	2
Rodamientos de bolas de soporte final	2

Tabla 28. Accesorios para mecanismo de avance. Autor.

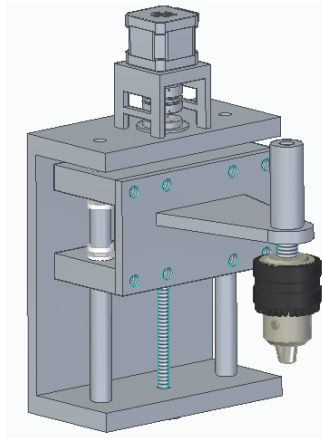


Figura 49. Mecanismo de avance. Autor.

El mecanismo de avance va a estar acoplado al motor paso a paso que generará el movimiento de avance requerido para el sistema. Como se puede evidenciar en la Tabla 21, los parámetros planteados muestran cual es la mejor elección para el mecanismo de avance de la máquina de micromecanizado electroquímico, por lo que se procederá a escoger alguna referencia que cumpla con el funcionamiento del mecanismo.

5.4.2 SELECCIÓN MOTOR PASO A PASO

Para este punto se procede a realizar los respectivos cálculos del motor seleccionado y verificar que cumpla con todos los requerimientos.

NOMBRE	ENTRADA	SALIDA	UNIDAD
Carga	15		lb
Velocidad	1.9685		ft/min
Potencia de salida		0.001278	HP
Eficiencia sistema		39%	E
Potencia de entrada		0.0033	HP
Torque		0.09	N*m
Onzas por pulgada		12.89	OZ-IN
Revolución por minuto	100		RPM
Onzas por pulgada del motor seleccionado	200		OZ-IN

Tabla 29. Cálculos selección motor paso a paso, Autor.

Una vez realizados los cálculos pertinentes para la selección del motor, se evidencia que se genera un torque de 0.09 N*m o de 12.89 OZ-IN, esta última unidad se reconoce en los motores paso a paso ya que es muy común usar como medida de torque en OZ-IN, este torque es bajo, ya que en el proceso electroquímico no hay contacto entre la herramienta y la pieza a mecanizar, con esto podemos seleccionar un motor que cumpla con estas características.



Figura 50. Motor a paso a paso [64].

Características del motor: A continuación, se presenta una tabla de las especificaciones del motor paso a paso escogido.

ESPECIFICACIÓN	DATOS
Par de retención	2.0 2.0 1.4 N.m + - 10%
Corriente nominal	4.2 2.1 3.0 amperios / fase
Resistencia	0.46 1.84 0.92 ohmios / fase 7 – 10%
Inductancia	2.2 8.8 2.2 mH / fase + - 20%
Inercia del rotor	480 g.cm ²
Peso del motor	1.0 kg
Longitud del motor	76 mm
Número de alambres	8

Tabla 30. Matriz de decisión de la selección del motor. Autor.

El motor paso a paso seleccionado, es de la marca Probotix, modelo HT23-280-8, este le da una precisión al mecanismo de avance mínimo de centésimas de milímetro hasta un valor máximo de micras.

Teniendo en cuenta que en el sistema de avance para el proceso de micromecanizado el torque es bajo, el motor paso a paso nos proporcionara a bajas velocidades un torque elevado de aproximadamente 1.4 N.m, como se puede evidenciar en la siguiente figura la velocidad y el torque específico para este modelo.

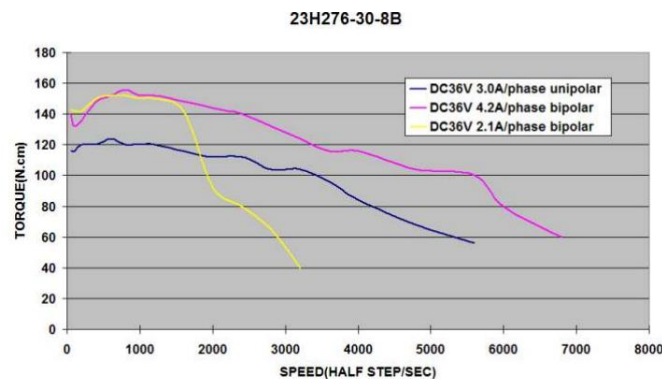


Figura 51. Motor a paso a paso [64].

Este sistema de control del motor paso a paso consta de una tarjeta Arduino, y un controlador Easy Driver, este permite manipular y dar la secuencia correcta a las fases del motor paso a paso, con esto se logra enlazar el controlador con el Arduino, se consigue la precisión y el funcionamiento requerido para el motor seleccionado, como se evidencia en la figura 53.

El motor paso a paso va a transmitir su torque a un tornillo de bolas que está en el sistema de avance de la máquina, por lo que se parte del análisis del torque del motor seleccionado y así proceder a su debido calculo.

En este caso, se necesita calcular el torque de elevación y descenso para dos casos, uno con un collarín de deslizamiento con fricción y otro con un collarín con un cojinete de bolas, en ambos casos, se calcularán por separado, para fines de comparación, las contribuciones del tornillo y el collarín al torque y al efecto combinado.

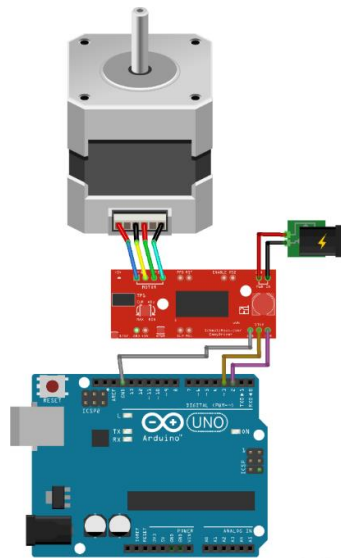


Figura 52. Control motor paso a paso. Autor [64].

5.4.3 TORNILLO DE POTENCIA

El motor paso a paso va a transmitir su troque a un tornillo de bolas que está en el sistema de avance de la máquina, por lo que se parte del análisis del torque del motor seleccionado y así proceder a su debido calculo.

En este caso, se necesita calcular el torque de elevación y descenso para dos casos, uno con un collarín de deslizamiento con fricción y otro con un collarín con un cojinete de bolas, en ambos casos, se calcularán por separado, para fines de comparación, las contribuciones del tornillo y el collarín al torque y al efecto combinado.

Tabla 11-3 Dimensiones principales de cuerdas estándares Acme

Consulte la referencia 2 para información más completa sobre dimensiones y tolerancias

Diámetro mayor (in)	Cuerdas por pulgada	Paso de la cuerda (in)	Diámetro de paso (in)	Diámetro menor (in)	Área de esfuerzo por tensión (in ²)
0.250	16	0.063	0.219	0.188	0.032
0.313	14	0.071	0.277	0.241	0.053
0.375	12	0.083	0.333	0.292	0.077
0.438	12	0.083	0.396	0.354	0.110
0.500	10	0.100	0.450	0.400	0.142
0.625	8	0.125	0.563	0.500	0.222
0.750	6	0.167	0.667	0.583	0.307
0.875	6	0.167	0.792	0.708	0.442
1.000	5	0.200	0.900	0.800	0.568
1.125	5	0.200	1.025	0.925	0.747

Tabla 31. Dimensiones cuerdas ACME [65].

NOMBRE	ENTRADA	SALIDA	UNIDAD
Carga	15		lb
Diámetro primitivo	0.333		inch
Diámetro mayor	0.375	0.001278	Inch
Coeficiente de tornillo y tornillo de bolas	0.02	39%	
Coeficiente de tornillo y collarín	0.15	0.0033	
Coeficiente de tornillo y tuerca	0.15	0.09	
Coeficiente de tornillo y rodamiento	0.02	12.89	
Número de hilos por pulgada	12		
Diámetro medio collarín	1.75		inch
Diámetro medio rodamiento	2.75		inch
Longitud de avance		0.08333	inch
Angulo de ataque grados	14.5		Grados
Angulo de ataque radianes		0.256072	Rad
Coseno ángulo de ataque		0.96814	Grados
TORNILLO Y TUERCA ACME			
Torque ascendente		0.59321	lb*inch
Torque descendente		0.18571	lb*inch
Torque collarín		1.9687	lb*inch
Torque rodamiento		0.2625	lb*inch
TORNILLO Y TUERCA ACME – RODAMIENTO			
Torque ascendente		0.85571	lb*inch
Torque descendente		0.4482	lb*inch
TORNILLO Y TUERCA ACME – COLLARÍN			
Torque ascendente		2.56196	lb*inch
Torque descendente		2.15446	lb*inch

TORNILLO Y TUERCA DE BOLAS – RODAMIENTO			
Torque ascendente		0.25095	lb*inch
Torque descendente		-0.14710	lb*inch
Torque rodamiento		0.2625	lb*inch
Torque ascendente total		0.51345	lb*inch
Torque descendente total		0.11539	lb*inch

Tabla 32. Cálculo tornillo de potencia. Autor [65].

Concluyendo los cálculos del tornillo de potencia, la opción de usar rodamiento en tornillo tuerca ACME es más optimizable que la del collarín debido a que se usa menos torque en desplazamientos, teniendo en cuenta que un torque negativo de descenso significa que se debe aplicar un torque de freno en sentido opuesto al torque de elevación, con la finalidad de sostener la carga.

CONCLUSIONES	
La opción de usar rodamiento en tornillo tuerca ACME es as optimizable que la del collarín debido a que se usa menos torque en desplazamientos.	
Según esta fórmula se auto bloquea el tornillo de potencia.	$\mu \geq \frac{L}{\pi d_p} \cos \alpha$
Auto bloqueo	0.077119861
Es mayor en el caso del rodamiento, implica que permite que el desliz del tornillo de potencia sea más libre	
El troque hallado tanto de subida como bajada es mejor en el tornillo de bolas, lo cual afirma que sería más deseado tener un tornillo con esta característica	

Tabla 33. Conclusiones cálculo tornillo de potencia. Autor [65].

5.5 MÓDULO DE SISTEMA DE SEGURIDAD

El diseño de la máquina contará con componentes de seguridad para prevenir eventualidades por contacto eléctrico, ya que en el proceso electroquímico se trabajan con valores elevados de corriente, por lo que la implementación de botones o pulsadores de paro de emergencia tipo hongo y de interruptores, se instalarán tanto en la estructura de trabajo como en la estructura de supervisión.



Figura 53. Pulsador de emergencia [66].

Para cerrar el circuito eléctrico y las puertas en la celda de trabajo, se utilizarán finales de carrera en cada compuerta que estarán ubicados en la parte superior de la estructura de trabajo, activándose solo las compuertas están cerradas, la implantación de este componente electro-mecánico proporcionará un empalme directo a la red, brindando mayor seguridad para el diseño del equipo.



Figura 54. Final de carrera. [67].

6 IMPACTOS

Los impactos que con lleva la realización de máquinas electroquímicas para la industria biomédica en Colombia, será una de las revoluciones que más beneficios traerá a este sector, gracias a las diversas ventajas que nos trae la implementación y desarrollo de estas máquinas, por su desgaste reducido de la herramienta, lo que se convierte en una de las condiciones ideales para la producción en serie, con una calidad de superficie elevada, mecanizado de precisión y la ausencia de sollicitaciones térmicas o mecánicas sobre los componentes evita que se alteren las propiedades de los materiales, por lo que para la industria biomédica Colombiana, la fabricación de contornos de menor tamaño y grosor, se convertirá en un proceso de fabricación más sencillo y eficiente, sin necesidad de acabados tales como desbastado o pulido, por lo que esto generara un mayor auge y reconocimiento biomédico e industrial del país.

Para la Universidad Santo Tomás, tendrá un gran impacto teórico y práctico, ya que la implementación de un nuevo equipo en los laboratorios o talleres, permitirá explotar y expandir el conocimiento del proceso de micromecanizado electroquímico sobre los futuros ingenieros, que podrán ser parte de la exploración de nuevas metodologías para la generación de una maquina con subsistemas más afines o precisos, que permitirán obtener mejores rendimientos del proceso electroquímico, ya que esta área recién se está investigando y aplicando en la industria biomédica a nivel mundial.

7 CONCLUSIONES

- Con el desarrollo del diseño conceptual y en detalle del equipo de micromanufactura electroquímica se contribuyó en el entendimiento de los procesos de remoción de material a microescala sobre materiales conductores.
- Con el diseño del equipo de micromecanizado electroquímico se contribuyó en el estudio de alternativas no convencionales para el mecanizado de materiales de alta dureza, mitigando el uso de mano de obra calificada que se requieren en los procesos convencionales por arranque de viruta.
- Se identificó que las metodologías de diseño como QFD y AHP sirven para el diseño de equipos vinculados a los procesos de micromanufactura, definiéndose por medio de entrevistas a los clientes finales, determinando las principales variables de ingeniería del diseño con las que deben contar los equipos de microfabricación, expuestas con detalle en el proyecto de grado correspondiente.
- Se determinaron las principales variables de diseño en los equipos electroquímicos, a las que además se le determinaron los rangos de operación y el nivel de importancia que tienen para el funcionamiento del equipo, para esto, se diseñó una tabla denominada casa de la calidad para evaluar las posibles alternativas planteadas en la solución de la máquina electroquímica.

8 RECOMENDACIONES

- Con el desarrollo de la investigación de este proceso no convencional y el diseño o selección de subsistemas, se recomienda la fabricación del equipo para trabajos futuros, donde la presencia de variables y parámetros que presentan una complejidad en su control y al no ser manejados durante el proyecto, como lo son el diseño de herramientas específicas para nuevos procesos con mayor dificultad, así mismo, qué alternativas de alimentación nos puede ofrecer un uso adecuado de la corriente de diversas fuentes de poder, son temáticas que se ofrecen como parte de la investigación de futuros proyectos.
- Para futuras investigaciones se recomendaría contar con la cooperación del sector industrial y así obtener resultados mas acertados del proceso de manufactura en desarrollo.
- Concentrar esfuerzos específicamente en los subsistemas mecánico para el avance del electrodo y el control de pulsos de corriente eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Universidad Politécnica de Madrid.” <https://www.upm.es/UPM/Centros/CampusCiudadUniversitaria/ETSIaeronauticaEspacio> (accessed Apr. 25, 2022).
- [2] “Estado - Uninorte.” <https://www.uninorte.edu.co/web/grupo-renta/noticia?articleId=239093&groupId=73923> (accessed Apr. 25, 2022).
- [3] “GrupLAC - Plataforma SCienTI - Colombia.” <https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=0000000014642> (accessed Apr. 25, 2022).
- [4] “SFCM 11/12 16: Micromecanizado electroquímico de materiales metálicos. - YouTube.” https://www.youtube.com/watch?v=0_Ha_cfCDCg&t=2115s (accessed Apr. 25, 2022).
- [5] V. Rathod, B. Doloi, and B. Bhattacharyya, “Electrochemical Micromachining (EMM): Fundamentals and Applications,” pp. 275–335, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-52009-4_8.
- [6] “Electromechanics and MEMS - Thomas B. Jones, Nenad G. Nenadic - Google Libros.” <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=cLchAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=Micromachining.+In+Electromechanics+and+MEMS+Jones&ots=2bdqm7WJzN&sig=OnYAgcJeSWqN3fHNXDLnIAvg4Yg#v=onepage&q=Micromachining.%20In%20Electromechanics%20and%20MEMS%20Jones&f=false> (accessed Apr. 25, 2022).
- [7] “TMS 2011 140th Annual Meeting and Exhibition, General Paper Selections - The Minerals, Metals & Materials Society (TMS) - Google Libros.” https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=2WKwuVASXjEC&oi=fnd&pg=PA325&dq=Profile+of+electromechanical+machined+microcomponents,&ots=MAc50C3dIV&sig=VlgblG3aa_9wroz8iwnPozPFx0k#v=onepage&q=Pr

ofile%20of%20electromechanical%20machined%20microcomponents%2C&f=false (accessed Apr. 25, 2022).

- [8] “Fundamentos de los Procesos de Mecanizado.” <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn38.html> (accessed Apr. 26, 2022).
- [9] “PROCESOS DE MECANIZADO NO CONVENCIONALES - PDF Descargar libre.” <https://docplayer.es/22669465-Procesos-de-mecanizado-no-convencionales.html> (accessed Apr. 26, 2022).
- [10] P. Rodriguez, D. Hidalgo, and J. E. Labarga, “Optimization of Pulsed Electrochemical Micromachining in Stainless Steel,” *Procedia CIRP*, vol. 68, pp. 426–431, 2018, doi: 10.1016/J.PROCIR.2017.12.090.
- [11] V. Venkatesh, N. Swain, G. Srinivas, P. Kumar, and H. C. Barshilia, “Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 32, no. 3, pp. 235–262, Feb. 2017, doi: 10.1080/10426914.2016.1151045.
- [12] “4 consideraciones para el electropulido de partes mecanizadas | Modern Machine Shop México.” <https://www.mms-mexico.com/articulos/4-consideraciones-para-el-electropulido-de-partes-mecanizadas> (accessed Apr. 26, 2022).
- [13] M. V. A. Ramakrishna and S. Venugopal Rao, “Fabrication of ECM and study of its parameters in NaCl electrolyte,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 934–939, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.01.181.
- [14] G. Liu, Y. Li, Q. Kong, and H. Tong, “Research on ECM process of micro holes with internal features,” *Precision Engineering*, vol. 47, pp. 508–515, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2016.10.006.
- [15] F. Klocke, M. Zeis, A. Klink, and D. Veselovac, “Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, EDM and ECM for Titanium-

and Nickel-based Blisks,” *Procedia CIRP*, vol. 2, no. 1, pp. 98–101, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.PROCIR.2012.05.048.

- [16] M. Kock, V. Kirchner, and R. Schuster, “Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses—a versatile method with lithographical precision,” *Electrochimica Acta*, vol. 48, no. 20–22, pp. 3213–3219, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0013-4686(03)00374-8.
- [17] “Montageprozesse.” <https://www.sitec-technology.de/montageprozesse> (accessed Apr. 26, 2022).
- [18] “ELECTROCHEMICAL MACHINE (ECM): Construction and working of electrochemical Machining process. - YouTube.” https://www.youtube.com/watch?v=b1nX7WVIN7U&ab_channel=ADTWlearn (accessed Apr. 26, 2022).
- [19] Y. He, H. Xiao, W. Gan, Q. Yu, and F. Yin, “The Electrochemical Dissolution Behavior Research of Titanium Alloy under Different Electrolyte,” *Procedia CIRP*, vol. 68, pp. 751–756, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROCIR.2017.12.132.
- [20] L. K. Gillespie, *Design for Advanced Manufacturing: Technologies and Processes*. McGraw-Hill Education, 2017. Accessed: Apr. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259587450>
- [21] K. P. Rajurkar, D. Zhu, J. A. McGeough, J. Kozak, and A. de Silva, “New Developments in Electro-Chemical Machining,” *CIRP Annals*, vol. 48, no. 2, pp. 567–579, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0007-8506(07)63235-1.
- [22] Y. Wang, Y. Zeng, and W. Zhang, “Improving the machining efficiency of electrochemical micromachining with oscillating workpiece,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019 102:5, vol. 102, no. 5, pp. 2695–2708, Feb. 2019, doi: 10.1007/S00170-019-03379-W.

- [23] “¿Tanques de acero o tanques de plástico? ¡Entra y entérate!”
<https://rotoplas.com.ar/agroindustria/tanques-de-acero-vs-tanques-de-plastico/> (accessed May 10, 2022).
- [24] “Piscinas de fibra de vidrio: ventajas y desventajas.”
<https://es.slideshare.net/Motorexpe/piscinas-fibra-vidrio> (accessed May 10, 2022).
- [25] “Tanques de Acero Inoxidable Ventajas y Desventajas - Tecnotanques. Tanques y Cisternas.” <https://tecnotanques.com/tanques-de-acero-inoxidable-ventajas-y-desventajas/> (accessed May 10, 2022).
- [26] “PVC-O, características y ventajas | Molecor.” <https://molecor.com/es/pvc-o-caracteristicas-ventajas> (accessed May 10, 2022).
- [27] “Ventajas y desventajas de tuberías PVC | Aquifontaneros.”
<https://aquifontaneros.es/blog/ventajas-tuberias-pvc/> (accessed May 10, 2022).
- [28] “Ventajas y desventajas de tubos PVC.”
<https://desatascos.online/madrid/tubo-pvc.html> (accessed May 10, 2022).
- [29] “Ventajas y desventajas de las bombas sumergibles - Iprecom.”
<https://www.iprecom.com/ventajas-y-desventajas-de-las-bombas-sumergibles/> (accessed May 10, 2022).
- [30] “Componentes, funcionamiento, ventajas y desventajas de los tipos de b....”
<https://es.slideshare.net/raiemmanuellopezjimenez/componentes-funcionamiento-ventajas-y-desventajas-de-los-tipos-de-bombas> (accessed May 10, 2022).
- [31] “Bomba de membrana: Usos y ventajas operativas - Cromtek.”
<https://www.cromtek.cl/2020/10/02/bomba-de-membrana-usos-y-ventajas-operativas/> (accessed May 10, 2022).

- [32] “Filtración al vacío • Técnicas de laboratorio • Quimicafacil.net.”
<https://quimicafacil.net/tecnicas-de-laboratorio/filtracion-al-vacio/> (accessed May 10, 2022).
- [33] “Ósmosis inversa: ventajas y desventajas - WaterStation.”
<https://waterstation.mx/agua-y-salud/osmosis-inversa-ventajas-y-desventajas/> (accessed May 10, 2022).
- [34] “Ventajas y desventajas de la microfiltración y macrofiltración.docx - Ventajas y desventajas de la microfiltración y | Course Hero.”
<https://www.coursehero.com/file/94083194/Ventajas-y-desventajas-de-la-microfiltraci%C3%B3n-y-macrofiltraci%C3%B3ndocx/> (accessed May 10, 2022).
- [35] “Diferencias entre un extractor de aire industrial y un ventilador | S&P.”
<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/diferencias-entre-extractor-de-aire-industrial-y-un-ventilador/> (accessed May 10, 2022).
- [36] “Descubra las principales ventajas de las fuentes de alimentación modernas | ROHDE & SCHWARZ | SOS electronic.”
<https://www.soselectronic.es/articulos/rohde-schwarz/descubra-las-principales-ventajas-de-las-fuentes-de-alimentacion-modernas-2364>
(accessed May 10, 2022).
- [37] “Diferencias entre soldadores · LEROY MERLIN.”
<https://www.leroymerlin.es/hazlo-tu-mismo/consejos/que-diferencias-existen-entre-un-soldador-de-arco-y-uno-inverter> (accessed May 10, 2022).
- [38] “Motor paso a paso: cuándo y por qué utilizarlo – Blog CLR.”
<https://clr.es/blog/es/motor-paso-a-paso-cuando-utilizarlo/> (accessed May 10, 2022).
- [39] “Servomotor.” <http://ftl-maquinas.es/index.php/articles/158-servomotor>
(accessed May 10, 2022).

- [40] “Ventajas < Actuadores Lineales - Industrias Mecánicas Welter S.A.” <https://www.imwsa.com/es/Productos-2/Actuadores-Lineales-4/Ventajas-9> (accessed May 10, 2022).
- [41] “mandril porta broca FERTEC COLOMBIA S.A – ferteccolombia.” https://ferteccolombia.com/?attachment_id=705 (accessed May 10, 2022).
- [42] “Pulsador CAMSCO Metálico Simple 22mm - Gonzaga & Rodriguez Cia. Ltda.” <https://electricoindustrial.com.ec/producto/pulsador-camsco-metalico-simple/> (accessed May 10, 2022).
- [43] “Modern Machining Processes - P. C. Pandey, H. S. Shan - Google Libros.” <https://books.google.as/books?id=uC3rHzhogmMC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false> (accessed May 19, 2022).
- [44] “Manuales técnicos.” <https://pavcowavin.com.co/manuales-tecnicos> (accessed May 10, 2022).
- [45] “LAMA Sistemas de Filtrados.” <https://lama.es/> (accessed May 10, 2022).
- [46] S. de Filtración, “VALIDATED FILTRATION SOLUTIONS FOR INDUSTRY LEADERS® (SOLUCIONES DE FILTRACIÓN VALIDADAS PARA LÍDERES DE INDUSTRIA)”, Accessed: May 10, 2022. [Online]. Available: www.filtrationgroup.com
- [47] “M15-3, Interruptor de flotador flotador agua magnética Controlador, Controles de flotación, Interruptor de flotador de controlador de nivel de agua - China Interruptor de flotador, interruptor.” https://es.made-in-china.com/co_kovylin/product_M15-3-Float-Switch-Magnetic-Water-Float-Controller-Float-Controls-Water-Level-Controller-Float-Switch_hoihrhhy.html (accessed May 10, 2022).
- [48] A. Triadú, J. Sanz, M. Sánchez-Juny, D. Niñerola, and A. Andreu, “Determinación experimental de la viscosidad de una salmuera”.

- [49] “Coeficientes de rugosidad (haestad).”
<https://es.slideshare.net/cosmeacr/coeficientes-de-rugosidad-haestad>
 (accessed May 10, 2022).
- [50] “Productos Para manejo de Fluidos Y Bombeo Industrial | ARO.”
<https://www.aronzone.com/es-co> (accessed May 10, 2022).
- [51] “Rotámetro escala 150-1500 litros DN32 1 1/4" PVC/Juntas VITON/Flotador PVDF.”
https://suministrosbox.com/epages/85cfeff5-7dcb-4fd6-99a5-6058d52a710f.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/85cfeff5-7dcb-4fd6-99a5-6058d52a710f/Products/2500%5B5%5D (accessed May 10, 2022).
- [52] “Hojas técnicas Ventilación ambiental III – S&P.”
<https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-ventilacion-ambiental-iii/>
 (accessed May 10, 2022).
- [53] “Extractores De Olores Para Baño O Cocina Ef-14 | Linio Colombia - GE063OT0D9VBQLCO.”
<https://www.linio.com.co/p/extractores-de-olores-para-ban-o-o-cocina-ef-14-vdxbgv> (accessed May 10, 2022).
- [54] “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL ‘MANUAL DE OPERACIONES Y MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN, LA PRENSA EXCÉNTRICA Y LA MÁQUINA FRESADORA ROUTER CNC 5 EJES HY-3040 CHINA MINI DEL TALLER DE CAD-CAM DE LA FACULTAD DE MECÁNICA.’ ALDO ISRAEL CALUÑA CALUÑA TRABAJO DE TITULACIÓN TIPO: PROYECTO TÉCNICO Previa a la obtención del Título de: INGENIERO INDUSTRIAL”.
- [55] “Design of a Pulse Power Supply Unit for Micro ECM”.
- [56] F. Xiaolong, L. Peng, Z. Yongbin, and Z. Di, “Research on Multiple Wires Electrochemical Micromachining with Ultra-Short Voltage Pulses,” *Procedia CIRP*, vol. 42, pp. 423–427, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCIR.2016.02.225.

- [57] T. Mole, B. McDonald, S. Mullery, C. Diver, and D. Tormey, "The Development of a Pulsed Power Supply for μ ECM," *Procedia CIRP*, vol. 42, pp. 809–814, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCIR.2016.02.324.
- [58] S. Castellanos, H. Ojeda, E. Estrada, and D. León, "Diseño y Construcción de una Máquina Didáctica para Mecanizado Electroquímico de Metales, con una corriente de 75 Amperios".
- [59] "DSpace Biblioteca Universidad de Talca (v1.5.2): Diseño de máquina de erosión electroquímica." <http://dspace.utalca.cl/handle/1950/12310> (accessed May 21, 2022).
- [60] "UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO".
- [61] "Electromecanizado, electroerosion y mecanizado electroquimico - Molera Solà, Pere - Google Libros." https://books.google.com.ec/books?id=3-_fVPR9HN4C&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false (accessed May 21, 2022).
- [62] "ESAB Argentina - CONARCO - Equipos, Máquinas y Consumibles para Soldadura y Corte, Automatización, Corte CNC, corte por plasma, EPP y accesorios." <https://www.esab.com.ar/ar/sp/index.cfm> (accessed May 21, 2022).
- [63] "Amperímetro analógico - BM A series - CIRCUTOR - DC / en riel DIN." <https://www.directindustry.es/prod/circutor/product-11644-437071.html> (accessed May 21, 2022).
- [64] "STEPPER MOTORS." <https://www.probotix.com/CNC-CONTROL-SYSTEMS/STEPPER-MOTORS> (accessed May 10, 2022).
- [65] "(PDF) Diseño de Maquinas 4edi Norton | MARCO ANTONIO OSUNA TORRES - Academia.edu."

https://www.academia.edu/38323857/Dise%C3%B1o_de_Maquinas_4edi_Norton (accessed May 10, 2022).

[66] “Build it in”, Accessed: May 10, 2022. [Online]. Available: www.eaton.eu

[67] “FINALES DE CARRERA DE POSICION Y SEGURIDAD - LOVATO ELECTRIC - Catálogo PDF | Documentación técnica | Brochure.” <https://pdf.directindustry.es/pdf/lovato-electric/finales-carrera-posicion-seguridad/14382-3322.html> (accessed May 10, 2022).

ANEXOS