



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

AUTORES:ERIK FERNANDO ESTRADA HERNANDEZ

DIEGO ARMANDO LEÓN BRAVO

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA
MECANIZADO ELECTROQUÍMICO DE METALES CON UNA CORRIENTE
DE 75 AMPERIOS, PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE
MANUFACTURA DEL DECEM**

DIRECTOR: ING. SANTIAGO CASTELLANOS

CODIRECTOR: ING: HERNÁN OJEDA

SANGOLQUÍ, JULIO 2014

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA MECANIZADO ELECTROQUÍMICO DE METALES CON UNA CORRIENTE DE 75 AMPERIOS, PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DEL DECEM”**, fue realizado en su totalidad por los señores Erik Fernando Estrada Hernández y Diego Armando León Bravo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniería Mecánica.

Ing. Santiago Castellanos
DIRECTOR

Ing. Hernán Ojeda
CODIRECTOR

Sangolquí, 17 de julio de 2014

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

**Nosotros, ERIK FERNANDO ESTRADA
HERNÁNDEZ Y DIEGO ARMANDO LEÓN BRAVO**

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA MECANIZADO ELECTROQUÍMICO DE METALES CON UNA CORRIENTE DE 75 AMPERIOS, PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DEL DECEM”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas y notas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 17 de julio de 2014

Erik Fernando Estrada Hernández

CC: 1716362353

Diego Armando León Bravo

CC: 1003671805

AUTORIZACIÓN

**Nosotros, ERIK FERNANDO ESTRADA
HERNÁNDEZ Y DIEGO ARMANDO LEÓN BRAVO**

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA MECANIZADO ELECTROQUÍMICO DE METALES CON UNA CORRIENTE DE 75 AMPERIOS, PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DEL DECEM”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 17 de Julio de 2014.

Erik Fernando Estrada Hernández

CC: 1716362353

Diego Armando León Bravo

CC: 1003671805

DEDICATORIA

Primero quiero dedicar esta tesis a Dios por permitirme llegar a este punto a pesar de tantas dificultades y percances que se han tenido, a mi Lolita porque desde primer curso que mi madre me consagro bajo su mirada, uno se siente seguro y decidido

Después quiero dedicar de manera muy especial a mi Papa Manuel y a mi Madre Nilda, tanto esfuerzo y apoyo, tanto económica como sentimentalmente. Sin ustedes no lo habría logrado. Esto es solo un paso en la vida y todavía faltan muchos y sé que siempre estarán ahí para compartirlos conmigo.

Por último quiero dedicar esta tesis a mis hermanos, a Alex, a Renato y a Paula, porque son mi familia, mis hermanos, mi vida y como dice mi papa, cuando hay familia todo se puede

Erik Fernando Estrada Hernández

DEDICATORIA

Dedico todo el esfuerzo y sacrificio de este logro alcanzado a Dios porque me ha brindado su bendición y ha sido esa guía y esa fortaleza necesaria para culminar una etapa más en mi vida.

A mi madre por ser mi mayor inspiración y mi apoyo incondicional durante toda mi vida, que sin duda nada de esto sería posible sin su esfuerzo y sacrificio.

A mi padre y a mi hermano, grandes amigos que siempre estuvieron a mi lado, pendientes y apoyándome en los buenos y malos momentos.

A mis familiares, amigos y maestros que aportaron durante todo el proceso en la realización de este proyecto.

Diego Armando León Bravo

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis padres por tanto apoyo y comprensión, no solo en el desarrollo de esta tesis sino en toda mi vida. Gracias por tanto amor y más que todo gracias por ser más que mis padres, mis amigos.

Agradezco a mi enamorada Mercedes, por creer siempre en mí y apoyarme en las buenas y en las malas, y hacerme sentir que para un problema hay 1000 soluciones. Esto es solo uno de los triunfos que festejaremos en nuestras vidas.

Agradezco a mis amigos porque a su manera cada uno supo ayudarme y siempre darme ánimos.

Deseo agradecer a Diego, porque a pesar de enojos y alegrías no solo durante la tesis sino a lo largo de toda la universidad, siempre ha estado ahí apoyando, y alegrándonos de nuestros triunfos.

Agradezco a mi Director Santiago Castellanos y Hernán Ojeda, por ayudarnos en el desarrollo de esta tesis, por ser tan exigentes cuando se lo tenía que ser y por ser nuestros amigos cuando también lo ameritaba.

Erik Fernando Estrada Hernández

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme y permitirme disfrutar de este logro alcanzado con mi familia y amigos, brindándome salud, vida y sabiduría.

A mis padres y a mi hermano, por ser mi mayor fortaleza y brindarme siempre el apoyo necesario, haciendo posible la culminación de esta etapa importante en mi vida.

A mi compañero Erik, gracias por unir esa fuerza y esa confianza que nos permitió llegar a este punto en nuestras vidas.

A mis maestros, Santiago Castellanos y Hernán Ojeda por impulsar ese espíritu de perseverancia y por brindarme su amistad, tiempo y apoyo, parte esencial en la realización de este proyecto.

A una persona muy especial, Carolina, por brindarme su amor y su apoyo durante todo el camino en la realización de este proyecto para culminar de la mejor manera.

Diego Armando León Bravo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| CAPITULO 1: GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Justificación..... | 3 |
| 1.3. Alcance Del Proyecto | 3 |
| 1.4. Objetivos | 4 |
| 1.4.1. General | 4 |
| 1.4.2. Específicos | 4 |
| 1.5. Requerimientos..... | 4 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1. Procesos de Manufactura Convencionales..... | 6 |
| 2.1.1. Fresado..... | 6 |
| 2.1.2. Taladrado..... | 10 |
| 2.2. Procesos de Manufactura Electroquímicos..... | 15 |
| 2.2.1. Maquinado Por Electro descarga - EDM | 15 |
| 2.2.2. Rectificado Por Electrodescarga - EDG | 18 |
| 2.2.3. Corte Con Alambre Por Electro descarga - EDWC | 18 |
| 2.2.4. Maquinado Por Descarga Electroquímica - ECDM..... | 19 |
| 2.2.5. Rectificado Electroquímico - ECG | 20 |
| 2.3. Maquinado Electroquímico - ECM..... | 21 |
| 2.3.1. Introducción..... | 21 |
| 2.3.2. Equipo | 22 |
| 2.3.3. Electrólisis | 23 |
| 2.3.4. Extracción de Hidrogeno | 24 |
| 2.3.5. Precisión | 24 |
| 2.3.6. Acabado Superficial | 25 |

| | | |
|--|---|----|
| 2.3.7. | Parámetros De Operación | 25 |
| 2.3.8. | Ventajas Del Maquinado Electroquímico..... | 31 |
| 2.3.9. | Desventajas Del Maquinado Electroquímico | 32 |
| 2.3.10. | Aplicaciones Del Maquinado Electroquímico..... | 33 |
| 2.4. | Automatización De Procesos Electroquímicos..... | 35 |
| CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA MÁQUINA | | 37 |
| 3.1. | Requerimientos Técnicos..... | 37 |
| 3.2. | Diseño de Detalle | 38 |
| 3.2.1. | Diseño Modular..... | 38 |
| 3.2.2. | Estructura Modular..... | 39 |
| 3.3. | Principios de Solución | 39 |
| 3.3.1. | Módulo 1: Ánodo – Cátodo | 39 |
| 3.3.2. | Módulo 2: Sistema Eléctrico Central | 42 |
| 3.3.3. | Módulo 3: Sistema HMI – Datos | 43 |
| 3.3.4. | Módulo 4: Solución Electrolítica | 53 |
| 3.3.5. | Módulo 5: Sujeción Pieza de Trabajo | 60 |
| 3.3.6. | Módulo 6: Sujeción Electrodo..... | 61 |
| 3.3.7. | Módulo 7: Sistema de Seguridad..... | 63 |
| 3.3.8. | Módulo 8: Módulo de Control | 65 |
| 3.3.9. | Módulo 9: Sistema de Avance de la Herramienta..... | 67 |
| 3.3.10. | Módulo 10. Sistema Hidráulico y de Extracción | 70 |
| 3.3.11. | Módulo 11: Fuente Eléctrica | 76 |
| 3.3.12. | Módulo 12: Limpieza..... | 80 |
| 3.4. | Planos | 81 |
| 3.4.1. | Estructura Módulo de Trabajo | 81 |
| 3.4.2. | Estructura Módulo de Control..... | 81 |
| 3.4.3. | Electrodo..... | 81 |

| | | |
|---|---|-----|
| 3.4.4. | Soporte Electrodo..... | 81 |
| 3.4.5. | Acople Motor Paso a Paso | 81 |
| 3.4.6. | Soporte Porta Herramienta..... | 81 |
| 3.4.7. | Soporte Pieza de Trabajo | 81 |
| 3.4.8. | Tanque Recolector..... | 81 |
| 3.4.9. | Tanque Reservorio..... | 81 |
| 3.4.10. | Placa Pulsadores..... | 81 |
| 3.4.11. | Ensamble 3D Módulo de Trabajo | 81 |
| 3.4.12. | Ensamble 3D Módulo de Control..... | 81 |
| 3.4.13. | Ensamble en Conjunto | 81 |
| CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE LA MÁQUINA | | 82 |
| 4.1. | Planificación de la Manufactura | 82 |
| 4.2. | Construcción | 83 |
| 4.2.1. | Estructura | 87 |
| 4.2.2. | Área De Trabajo | 87 |
| 4.2.3. | Sistema Hidráulico (Electrolito)..... | 89 |
| 4.2.4. | Sistema de Fuente Eléctrica..... | 90 |
| 4.2.5. | Sistema Eléctrico y de Control | 91 |
| 4.2.6. | Sistema de Avance de la Herramienta | 92 |
| 4.2.7. | Sistema de Seguridad | 93 |
| 4.3. | Pruebas De Funcionamiento..... | 94 |
| 4.3.1. | Prueba para molde..... | 99 |
| 4.3.2. | Prueba de Perforación..... | 101 |
| 4.4. | Manual De Usuario | 103 |
| 4.5. | Manual De Mantenimiento | 103 |
| CAPÍTULO 5: GUÍAS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO | | 104 |
| 5.1. | Guía de Laboratorio | 104 |

| | |
|---|-----|
| 5.2. Trabajo Preparatorio..... | 104 |
| 5.3. Desarrollo de la Práctica..... | 104 |
| 5.4. Informe de la Práctica..... | 104 |
| 5.5. Rúbrica..... | 104 |
| CAPÍTULO 6: ANALISIS FINANCIERO | 105 |
| 6.1. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO | 105 |
| 6.1.1. Costos directos..... | 105 |
| 6.1.2. Costos indirectos..... | 109 |
| 6.1.3. Costo total | 110 |
| CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 111 |
| 7.1. Conclusiones..... | 111 |
| 7.2. Recomendaciones | 111 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 113 |
| ANEXOS..... | 116 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Pieza maquinada con proceso electroquímico..... | 1 |
| Figura 2. Máquina para Mecanizado Electroquímico | 2 |
| Figura 3. Fresas de Diferentes Formas | 7 |
| Figura 4. Tipos de Fresado: Horizontal y Vertical..... | 7 |
| Figura 5. Fresado Superficial | 8 |
| Figura 6. Fresadora Universal Fama Hu 300 | 9 |
| Figura 7. Esquema Fresadora de Cinco Ejes..... | 9 |
| Figura 8. Movimientos del Taladrado..... | 10 |
| Figura 9. Taladro de Banco Truper | 10 |
| Figura 10. Taladro de Columna Multihusillos ERLO TCA-70BV/CM..... | 11 |
| Figura 11. Taladro Múltiple Automático BJK-152A..... | 11 |
| Figura 12. Mandrinadora SOTEC TOS W-100..... | 12 |
| Figura 13. Taladro Radial FAMA TR 50/1100 | 12 |
| Figura 14. Partes de la Broca..... | 13 |
| Figura 15. Elementos Parte Cortante de la Broca | 14 |
| Figura 16. Broca para Metales..... | 14 |
| Figura 17. Esquema de un sistema de EDM | 15 |
| Figura 18. EDM con Alambre | 18 |
| Figura 19. Principio del EDM con alambre..... | 19 |
| Figura 20. Rectificado Electroquímico | 21 |
| Figura 21. Esquema de un sistema de ECM | 22 |
| Figura 22. Celda Electrolítica | 23 |
| Figura 23. Modelos de Maquinados por ECM | 33 |
| Figura 24. Fabricación de moldes por ECM | 34 |
| Figura 25. Perforación mediante ECM..... | 34 |
| Figura 26. Máquina de Afeitar Aplicación de ECM | 34 |
| Figura 27. Disco con álabes utilizado en una turbina de gas..... | 35 |
| Figura 28. Simbología de modularidad..... | 39 |
| Figura 29. Electrodo de Cobre | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 30. Pieza de Trabajo | 42 |
| Figura 31. Diagrama Eléctrico de Poder | 43 |
| Figura 32. PLC Mitsubishi ALPHA 2 | 46 |
| Figura 33. SINUMERIK 802D sl con SINAMICS S120 ⁴⁵ | 47 |
| Figura 34. Pantalla Inicial Software TurboCNC..... | 49 |
| Figura 35. Plataforma Virtual: Página Inicial..... | 51 |
| Figura 36. Plataforma Virtual: Cálculo y Simulación | 52 |
| Figura 37. Plataforma Virtual: Hoja de Reporte de Trabajo | 52 |
| Figura 38. Plataforma Virtual: Simulación | 53 |
| Figura 39. Tanque Reservorio..... | 54 |
| Figura 40. Tanque Recolector..... | 55 |
| Figura 41. Detalle Filtro de Anillos..... | 58 |
| Figura 42. Filtros de Bolsas | 58 |
| Figura 43. Interruptor de Nivel M15-3 | 60 |
| Figura 44. Soporte Pieza de Trabajo | 60 |
| Figura 45. Cuba para Inundación | 61 |
| Figura 46. Mandril Porta Brocas | 62 |
| Figura 47. Eje para Conexión Eléctrica | 62 |
| Figura 48. Soporte Porta Herramientas..... | 63 |
| Figura 49. Conjunto de Sujeción Electrodo..... | 63 |
| Figura 50. Botón Paro de Emergencia Tipo Hongo..... | 64 |
| Figura 51. Micro-switch fin de carrera..... | 65 |
| Figura 52. Pulsadores Iluminados | 66 |
| Figura 53. Placa – Módulo de Control | 66 |
| Figura 54. Diagrama Eléctrico de Control | 66 |
| Figura 55. Mecanismo de Avance | 67 |
| Figura 56. Kit CNC: Controladores y Motores a Pasos..... | 68 |
| Figura 57. Esquema SideStep | 69 |
| Figura 58. Diagrama de Conexión Controladores | 70 |
| Figura 59. Bomba Pedrollo CPM 620 | 71 |

| | |
|--|-----|
| Figura 60. Curva de Funcionamiento Bomba CPM 620 | 72 |
| Figura 61. Caudalímetro de Área Variable..... | 74 |
| Figura 62. Sistema de Tubería y Accesorios..... | 75 |
| Figura 63. Extractor CATA B-10 | 76 |
| Figura 64. Soldadora Inverter TEKNOPRO | 79 |
| Figura 65. Amperímetro DC Analógico..... | 80 |
| Figura 66. Shunt 50 – 250A..... | 80 |
| Figura 67. Esquema de la Máquina de ECM..... | 86 |
| Figura 68. Módulos de trabajo y control..... | 87 |
| Figura 69. Área De Trabajo | 88 |
| Figura 70. Sistema Hidráulico | 90 |
| Figura 71. Sistema De Fuente Eléctrica..... | 91 |
| Figura 72. Sistema Eléctrico Central..... | 92 |
| Figura 73. Sistema De Control..... | 92 |
| Figura 74. Sistema De Avance De La Herramienta..... | 93 |
| Figura 75. Sistemas De Seguridad..... | 93 |
| Figura 76. Sistema De Seguridad De La Bomba | 94 |
| Figura 77. FORMA GEOMÉTRICA; | 95 |
| Figura 78. Distancia Óptima De Maquinado | 97 |
| Figura 79. Caudal Óptimo..... | 98 |
| Figura 80. Plataforma Virtual Para Mecanizado Electroquímico | 99 |
| Figura 81. Plataforma Virtual: Molde..... | 100 |
| Figura 82. Código Mach 3 Demo: Molde..... | 100 |
| Figura 83. Molde Maquinado..... | 101 |
| Figura 84. Plataforma Virtual: Perforación | 102 |
| Figura 85. Mach 3 Demo: Perforación..... | 102 |
| Figura 86. Placa Perforada..... | 102 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Acabado Superficial Procesos Electro-Químicos | 25 |
| Tabla 2. Electrolitos recomendados para el Mecanizado Electroquímico | 27 |
| Tabla 3. Valores típicos de velocidad de remoción específica C. | 30 |
| Tabla 4. Parámetros Generales del Proceso..... | 37 |
| Tabla 5. Capacidad de Memoria Requerida de un PLC | 44 |
| Tabla 6. Especificaciones Técnicas Unidad Base PLC | 45 |
| Tabla 7. Tamaños de Paso en Filtro de Anillos..... | 57 |
| Tabla 8. Requerimientos Técnicos Bomba | 70 |
| Tabla 9. Resumen de las Especificaciones de la Bomba..... | 72 |
| Tabla 10. Planificación De La Manufactura | 82 |
| Tabla 11. Lista De Materiales..... | 83 |

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A: Módulos Mecanizado Electroquímico

ANEXO B: Estructura Modular Mecanizado Electroquímico

ANEXO C: Planos Máquina Para Mecanizado Electroquímico

ANEXO D: Libro De Vida ECM-200

ANEXO E: Guías de Prácticas de Laboratorio

NOMENCLATURA

| | |
|-------------|---|
| ECM | Maquinado Electroquímico |
| EDM | Electrodescarga |
| EDWC | Corte con alambre por Electrodescarga |
| EDG | Rectificado por Electrodescarga |
| ECG | Esmerilado Electroquímico |
| ECDM | Maquinado por descarga Electroquímica |
| ECH | Pulido Electroquímico |
| MRR | Velocidad de remoción de material |
| VI | Volumen de metal removido |
| C | Velocidad de remoción específica |
| I | Corriente |
| t | Tiempo |
| V | Voltaje |
| R | Resistencia |
| g | Separación entre electrodo y pieza de trabajo |
| r | Resistividad del material electrolítico |
| A | Área de superficie de maquinado |
| fr | Velocidad de alimentación |

RESUMEN

El mecanizado electroquímico (ECM) es un proceso de manufactura no convencional que se basa en el principio de electrólisis: desprendimiento de iones de la pieza de trabajo que funciona como ánodo (polo positivo) y se depositan en el electrodo que funciona como cátodo (polo negativo) en un medio inundado de electrolito –solución de NaCl (sal doméstica) con agua–. El ECM permite el desbaste de cualquier material conductor, sin importar su dureza ni forma geométrica a maquinar y sin generar desgaste del electrodo. Éste proyecto contempla el diseño y construcción de una máquina didáctica de mecanizado electroquímico para realizarmarcados y perforaciones sin importar su dificultad geométrica. La máquina está compuesta por una fuente eléctrica de corriente continua, un sistema de suministro y filtración de electrolito, un sistema de control para avance automático de la herramienta en el eje Z y un sistema de extracción de hidrógeno de la cabina generado por la electrólisis. El ECM depende de 6 variables para su proceso, que son: forma geométrica a maquinar, caudal de electrolito, amperaje de fuente eléctrica, velocidad de avance de la herramienta, distancia herramienta–pieza de trabajo y concentración de electrolito. A partir de la experimentación se identificó y determinó los valores de los parámetros óptimos para el correcto funcionamiento de la máquina, comparando los valores de la tasa de remoción de material (MRR) teórica con los valores prácticos obtenidos en las pruebas realizadas. Esta máquina ha sido diseñada con la finalidad de realizar prácticas de laboratorio del DECEM de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, para que los estudiantes adquieran conocimientos de métodos alternativos de mecanizado que utilizan energía química–eléctrica como medio de desbaste.

PALABRAS CLAVES: ECM (ELECTROCHEMICAL MACHINING), ELECTROLITO, ÁNODO, CÁTODO, MRR (MATERIAL REMOVAL RATE).

ABSTRACT

Electrochemical machining (ECM) is a non-conventional manufacturing process, which is based on the principle of electrolysis: Based on anion release the workpiece from the anode (positive pole) and deposited in a cathode electrode (negative pole) in a medium-flooded electrolyte NaCl solution (household salt) with water. The ECM allows roughing of any conductive material, regardless of its hardness, the geometry to be machined without generating any wear on the tool. The development of this project includes the design and construction of a teaching machine which performs the process of electrochemical machining to manufacture marked and geometric perforations regardless of difficulty. The machine consists of an electric current source, a supply system, and filtration of the electrolyte, a control system for automatically moving the tool in the Z axis and a system for extracting hydrogen from the cabin generated by electrolysis. The 6 (six) ECM variables for processing are: the geometric shape to be machined, the flow of electrolyte, amperage from the power source, the feed rate of the tool, the tool-workpiece distance of work and the concentration of electrolyte. From experimentation was identified and determined the values of the optimal parameters for the correct operation of the machine, comparing the values of material removal rate (MRR) theoretical with the practical values obtained in the tests performed. This machine has been designed for DECEM labs in the University of the Armed Forces - ESPE, that through this the students acquire knowledge of alternative methods using chemical machining-electricity as a means roughing.

KEYWORDS: ECM (ELECTROCHEMICAL MACHINING), ELECTROLYTE, ANODE, CATHODE, MRR (MATERIAL REMOVAL RATE).

CAPITULO 1: GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

En la actualidad el laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM no cuenta con equipos que permitan impartir prácticas de procesos de manufactura no convencionales, como es el mecanizado electroquímico.

El laboratorio de Procesos de Manufactura posee máquinas herramientas para mecanizados convencionales, que consisten en la utilización de una herramienta de corte para remover el material de una parte de trabajo para conseguir una forma deseada. Los métodos empleados por estos procesos son: químicos, eléctricos, con láser y otros medios que permiten la remoción de material sin restricción alguna.

Los procesos no convencionales de manufactura presentan ventajas como:

- Mecanizado en materiales con alta dureza y resistencia.
- Formas complejas.
- Mejores acabados superficiales y tolerancias.
- Elimina el aumento de temperatura en la pieza de trabajo y herramienta de corte y exceso de esfuerzos residuales.



Figura 1. Pieza maquinada con proceso electroquímico

La exigencia de la industria obliga al desarrollo de nuevas tecnologías para satisfacer las limitaciones generadas por los procesos de manufactura convencionales. Estas tecnologías emplean métodos químicos y eléctricos principalmente. A partir de la década de 1940 se comenzaron a usar estos métodos avanzados a los que se llamaban maquinado no tradicional o no convencional. Estos métodos no convencionales se caracterizan por la insensibilidad a la dureza del material de trabajo facilitando el trabajo en materiales que hayan sido tratados térmicamente evitando problemas de distorsión y cambios dimensionales.

Éste grupo de métodos no convencionales está conformado por:

- Electrodescarga (EDM)
- Corte con alambre por Electrodescarga (EDWC)
- Rectificado por Electrodescarga (EDG)
- Maquinado Electroquímico (ECM)
- Esmerilado Electroquímico (ECG)
- Maquinado por descarga Electroquímica (ECDM)
- Pulido Electroquímico (ECH)



Figura 2. Máquina para Mecanizado Electroquímico

1.2. Justificación

El Laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM no cuenta con equipos para la realización de prácticas en procesos no convencionales, por lo que es necesario el desarrollo de una máquina que cumpla los requerimientos necesarios para la enseñanza de técnicas de mecanizado electroquímico.

El país requiere de conocimientos en procesos no convencionales de manufactura dado que éstos ya son de manejo en el resto del mundo, y al ver el escaso desarrollo de este tipo de tecnología en el país, es importante que el laboratorio de Procesos de Manufactura cuente con una máquina que permita a los estudiantes adquirir los conocimientos teórico - prácticos en las nuevas tecnologías de mecanizado, que cumplen con altas exigencias de acabados superficiales, formas, tolerancias y sin restricción en cuanto a la dureza de los metales para lograr la competitividad en el campo de la manufactura.

1.3. Alcance Del Proyecto

Desarrollar una máquina didáctica para mecanizado electroquímico que cuente con todos los elementos necesarios para su correcto funcionamiento, junto con guías de prácticas de laboratorio y manual de operación, de manera que asegure la comprensión de los estudiantes en el desarrollo de las prácticas y funcionalidad del equipo.

La máquina utilizará energía eléctrica en un medio químico y tendrá la capacidad de maquinar cualquier tipo de metal sin importar su dureza, contando con una fuente de corriente continua, un electrodo, sistema hidráulico para el fluido electrolítico y un control automatizado para la remoción de material.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Diseñar y construir una máquina para mecanizado electroquímico de metales con una corriente de 75 amperios, que permita realizar perforaciones y marcados, como prácticas en el laboratorio de Máquinas Herramientas del DECEM.

1.4.2. Específicos

- Investigar y analizar los parámetros y requerimientos de los procesos de mecanizados electroquímicos.
- Analizar y desarrollar un equipo didáctico para el proceso de mecanizado electroquímico.
- Implementar el sistema de mecanizado electroquímico en el laboratorio de Procesos de Manufactura y verificar su correcta operación.
- Desarrollar las guías de prácticas de laboratorio y un manual de operación de la máquina.

1.5. Requerimientos

Los requerimientos para el diseño de la máquina, han sido identificados en base a las condiciones del laboratorio de procesos de manufactura y al objetivo de impartir prácticas de laboratorio. Los requerimientos establecidos que debe cumplir la máquina se muestran a continuación:

1. Instalación

CORRIENTE 220 V BIFÁSICA

ÁREA DISPONIBLE 3mx3m

2. Funcionamiento

La máquina debe permitir realizar al menos 2 prácticas de laboratorio distintas: molde y perforación.

Área mínima de trabajo 2500 mm²

3. Dos guías de practicas
4. Manual de operación
5. Máquina didáctica
6. Controles HMI
7. Seguridades en la máquina para los usuarios
8. Amplio campo de visualización del proceso, mínimo 5 personas
9. Diseño de la máquina en dos módulos, facilidad de transporte

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Procesos de Manufactura Convencionales

2.1.1. Fresado

El fresado es uno de los procesos de corte con arranque de viruta más versátil, consiste en arrancar material de una pieza haciéndola pasar por una herramienta multifilo que permanece rotando fija en el eje. Mediante este proceso pueden maquinarse superficies planas o curvadas, interiores o exteriores, de casi todas las formas y tamaños. Una de las tareas complicadas en el fresado, es la manufactura de matrices y moldes para el trabajo de metal y para el procesamiento de plásticos. Con frecuencia, la configuración es compleja y los requerimientos del acabado superficial son altos.

Herramientas de Corte

La herramienta de corte multifilo, se denomina: “fresa” y se construyen generalmente en acero rápido, pero, debido al elevado costo del material, las fresas de mayor tamaño poseen un cuerpo de acero de construcción y en la parte cortante tienen incorporadas cuchillas (o dientes) de acero rápido o bien insertos de corte (widia) que pueden ser permanentes o intercambiables. Las herramientas de fresar se caracterizan por su diámetro exterior, el número de dientes, el paso de los dientes (distancia entre dos dientes consecutivos) y el sistema de fijación de la fresa en la máquina. Existen una multitud de geometrías y tipos de fresas, para distintas operaciones de fresado y trabajos determinados. Debido a las varias clasificaciones que se pueden atribuir, básicamente los tipos de fresados se pueden clasificar de acuerdo con la orientación de la herramienta, es decir, con la orientación de los filos de corte y del eje de rotación, respecto a la pieza de trabajo.



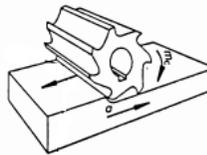
Figura 3. Fresas de Diferentes Formas

Tipos de Fresado

El fresado se puede clasificar según la posición de la herramienta respecto del material de trabajo en:

1. **Fresado horizontal o cilíndrico:** el eje de la fresa es paralelo a la superficie de la pieza de trabajo. Cada diente actúa como un punto de corte de la herramienta.
2. **Fresado vertical o frontal:** El eje de la fresa es perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo. Aquí la herramienta corta solo con una parte de sus dientes.

a) Fresado Horizontal



b) Fresado Vertical

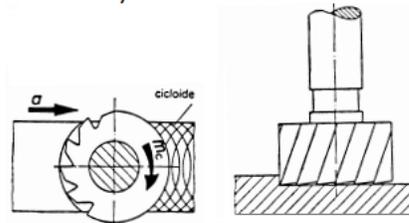


Figura 4. Tipos de Fresado: Horizontal y Vertical

3. **Fresado superficial o de acabado:** Es similar con el fresado vertical, pero se diferencia en que la superficie de la herramienta en contacto con el material no es plana (fresado vertical), sino que tiene filo con formas diferentes.

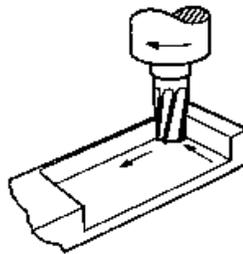


Figura 5. Fresado Superficial

Máquinas Fresadoras

Las fresadoras son máquina herramientas de precisión que se caracterizan porque el movimiento principal lo tiene la herramienta y la mesa de trabajo proporciona el avance y la profundidad de los cortes. En la industria se utilizan de diversas formas y tipos de máquinas fresadoras. Algunas son adecuadas para trabajo general, otras en cambio para manufactura en un proceso de producción en serie y otras programadas para trabajos especiales. Se pueden clasificar en base a dos aspectos generales:

- **Según la orientación de la herramienta:**
 - ♦ **Horizontal:** Permite realizar un fresado de tipo cilíndrico.
 - ♦ **Vertical:** Realizar un fresado frontal.
 - ♦ **Universal:** Combinación de una fresa horizontal y una fresa vertical.



Figura 6. Fresadora Universal Fama Hu 300

- **Según el número de ejes:**

Se encuentran clasificadas según el grado de movimiento durante el mecanizado de las piezas.

- ♦ **Tres Ejes:** Movimiento en los ejes del sistema cartesiano X, Y, Z.
- ♦ **Cuatro Ejes:** Movimiento en los ejes X, Y, Z y giro de la pieza sobre un eje adicional.
- ♦ **Cinco Ejes:** Movimiento en los 3 ejes base y giro de la pieza sobre dos ejes, uno perpendicular a la herramienta y otro paralelo a ella.

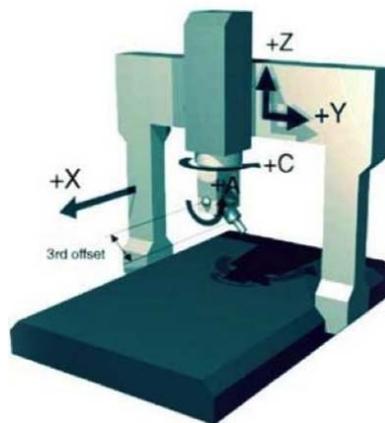


Figura 7. Esquema Fresadora de Cinco Ejes

2.1.2. Taladrado

El taladrado tiene como principio de operación perforar o hacer un agujero en una pieza de cualquier material. Para éste proceso se usa un elemento llamado taladro. El taladro es una máquina que nos permite hacer agujeros debido a la combinación de dos movimientos:

1. **Movimiento rotacional (Movimiento Principal):** Viene dado por el giro de la herramienta, llamada BROCA. Este movimiento es el que genera mayor consumo de potencia y trabaja a mayor velocidad que el movimiento de avance.
2. **Movimiento de avance:** Es un movimiento longitudinal que siempre tendrá dirección paralela al eje de la broca. En ocasiones el movimiento de avance esta combinado con percusión.

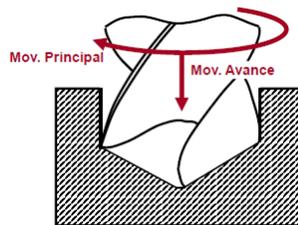


Figura 8. Movimientos del Taladrado

Tipos De Taladros:

Taladros de banco: Es el más sencillo y común, el dispositivo de avance manual de la herramienta es el que permite al operario sentir el efecto del corte en la pieza a trabajar.



Figura 9. Taladro de Banco Truper

Taladro de pedestal: Se diferencia del taladro de banco en que se utiliza para trabajo pesado, permite hacer agujeros más grandes y colocar piezas más grandes en su mesa.

Taladro con husillos múltiples: Este taladro está equipado con una cabeza taladradora. Esta tiene varios husillos que se pueden ubicar para taladrar cierto número de agujeros en un lugar preciso de la pieza y al mismo tiempo.



Figura 10. Taladro de Columna Multihusillos ERLO TCA-70BV/CM

Taladro múltiple: Es una serie de husillos colocados en una mesa larga y común. Dedicada a la producción en serie y realiza operaciones secuenciales sobre una pieza ya que va avanzando de operación en operación a través de todos los husillos. En cada uno de estos husillos se hace una operación diferente, pero sobre la misma pieza.



Figura 11. Taladro Múltiple Automático BJK-152A

Mandrinadora: Taladro tipo pedestal de alta precisión en el cual la pieza se puede colocar, gracia a la mesa de coordenadas, en cualquier posición debajo del husillo. De esta forma se pueden ejecutar huecos en cualquier posición sobre la pieza y de diámetros muy grandes.



Figura 12. Mandrinadora SOTEC TOS W-100

Taladro radial: A diferencia de los taladros anteriores, el taladro radial tiene la mesa de trabajo en la parte inferior, diseñada para cuadrar piezas grandes. Es una máquina de gran tamaño que mueve su cabezal, su mesa de trabajo y el husillo principal con motores independientes. El husillo se puede colocar para taladrar en cualquier lugar dentro del alcance de la máquina por medio de los movimientos proporcionados por la cabeza, el brazo y la rotación del brazo alrededor de la columna.



Figura 13. Taladro Radial FAMA TR 50/1100

Herramienta de Corte: Brocas

La herramienta más importante entre todas las empleadas en los taladros, es la mecha, llamada también broca, es una pieza metálica de corte que crea orificos. Suelen fabricarse de acero al carbono aleado, de acero rápido y extra rápido. Para materiales muy duros y altas producciones pueden tener los cortantes de carburos metálicos. Generalmente, las brocas se fabrican con tres ángulos de desprendimiento, a saber: de $10-13^\circ$ para materiales duros, de $16-30^\circ$ para materiales normales, y de $35-40^\circ$ para materiales blandos.

En las brocas pueden distinguirse las siguientes partes:

- **El vástago o Mango:** Es la parte que se coloca en el husillo y se hace girar. Estos pueden ser rectos o cónicos.
- **Cuerpo:** Es la parte cilíndrica que va desde el vástago hasta la punta. Este en su recorrido tiene unas flautas cuya función es la de dejar entrar el fluido refrigerante y dejar escapar la viruta.
- **Punta o Parte Cortante:** Se encuentra en todo el extremo cortante o filo cónico de la broca.

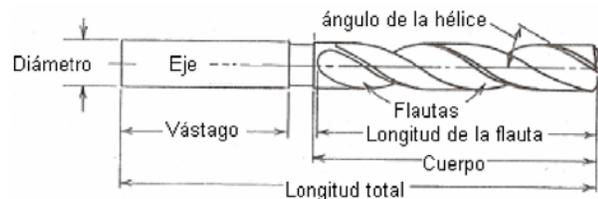


Figura 14. Partes de la Broca

La parte cortante está compuesta de varios dientes, lo más común es que existan 2, en los cuales existen:

- Filo Principal
- Filo secundario
- Superficie de incidencia
- Superficie de Desprendimiento
- Filo Transversal

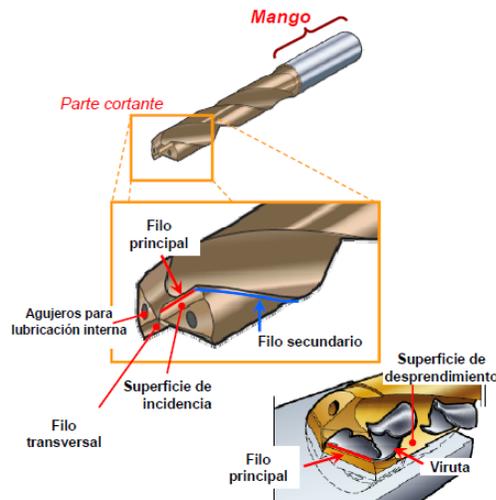


Figura 15. Elementos Parte Cortante de la Broca

Brocas Para Metales

Estas brocas están hechas de acero rápido (HSS), aunque la calidad varía según la aleación, el método y calidad de fabricación.



Figura 16. Broca para Metales

Ventajas Del Proceso De Taladrado

- Operación rápida.
- Precisión y acabado superficial mejorados en comparación con fundición/forja.
- Posibilidad de realizar agujeros de diferentes diámetros.
- Diferentes materiales (limitación en materiales muy duros).

Limitaciones Del Proceso De Taladrado

- Agujeros con elevada relación longitud/profundidad.
- Acabado de agujeros puede ser no suficiente en algunas aplicaciones.
- Principal limitación: trabajo en materiales muy duros

2.2. Procesos de Manufactura Electroquímicos

2.2.1. Maquinado Por Electro descarga - EDM

El EDM (en inglés: Electric DischargeMachining), es un proceso para remoción de metal por la acción de una descarga eléctrica de corta duración y alta densidad de corriente (Amperaje) entre la herramienta y la pieza de trabajo.

El proceso EDM se podría comparar con un rayo diminuto que choca contra una superficie, crea un intenso calor local y funde la superficie de la pieza de trabajo. El maquinado por electro descarga es de especial utilidad para maquinar las aleaciones súper duras y conductoras de la era espacial que habría sido muy difícil de trabajar con métodos convencionales. El EDM ha facilitado el corte de formas complejas, lo cual resultaría imposible con herramientas de corte convencionales.

Principios del EDM

El maquinado por electro descarga (EDM) es un proceso para la remoción controlada de un metal, en el cual se usa una chispa para cortar o erosionar la pieza de trabajo, por medio de un electrodo que es la “herramienta” de corte.

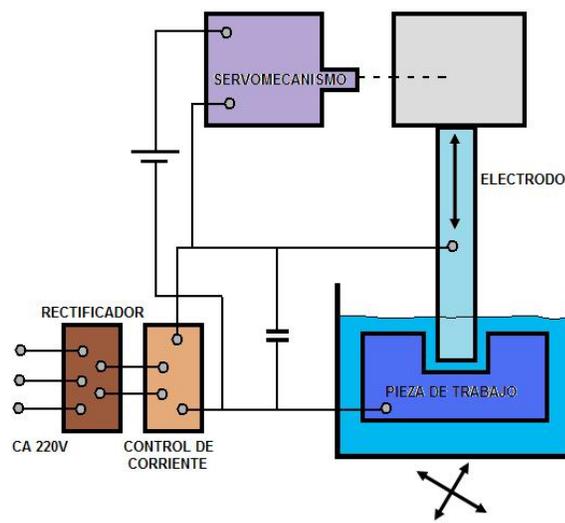


Figura 17. Esquema de un sistema de EDM

El electrodo se hace con material conductor de electricidad, por lo general con carbón (grafito), también se utilizan electrodos de zinc-estaño, aleaciones de cobre y tungsteno, aluminio y acero. Tanto el electrodo, que tiene la forma de maquinado requerida, como la pieza de trabajo se sumergen en un líquido dieléctrico que suele ser un aceite ligero, como diésel o aceite de lubricación. El líquido dieléctrico debe ser no conductor o mal conductor de la electricidad. Para el maquinado por electro descarga se requiere una herramienta o electrodo conductor y un líquido dieléctrico no conductor.

Un servomecanismo mantiene una separación promedio de 0,001 pulgadas (0,025 milímetros) entre el electrodo y la pieza de trabajo para que no hagan contacto. Se aplica una corriente continua de bajo voltaje y alto amperaje al electrodo a razón de 20.000 impulsos eléctricos por segundo mediante un capacitor (condensador). Estos impulsos de corriente conducen chispas que saltan la abertura, entre el electrodo y la pieza de trabajo, a través del dieléctrico. El temporizador en un sistema EDM actúa para iniciar una serie de pulsos durante la operación y regula la longitud de cada pulso y el tiempo entre pulsos, los pulsos son bastante cortos y ocurren a frecuencias altas con tiempos en microsegundos (de 1 a 2999 microsegundos). En el sitio en donde choca la chispa se produce un calor intenso, se funde el metal y se desprende una partícula de metal de la superficie de la pieza de trabajo (el metal se remueve por la erosión de la chispa eléctrica). Además ocurre un desgaste en el electrodo, por lo que un buen acabado requiere chispas débiles, mientras más sea la energía en un pulso (más corriente suministrada al arco), más grande será el desperdicio arrancado de la pieza de trabajo, y puede crear fisuras y dañar la pieza. El líquido dieléctrico que está en circulación constante, arrastra las partículas erosionadas en el metal y también ayuda a disipar el calor ocasionado por la chispa.

Ventajas y Desventajas del Proceso EDM

El maquinado por electro descarga tiene muchas ventajas sobre los procesos convencionales:

- Se puede cortar cualquier material conductor de electricidad cualquiera que sea su dureza, especialmente para carburos cementados y las nuevas aleaciones extra duras que son sumamente difíciles de cortar con métodos convencionales.
- Se pueden trabajar materiales endurecidos y piezas delicadas, con lo cual se elimina la deformación ocasionada por el proceso de endurecimiento.
- Las brocas o machuelos rotos se pueden extraer con facilidad de las piezas de trabajo.
- No produce esfuerzo en la pieza de trabajo porque el electrodo nunca hace contacto con ella.
- Este proceso no deja rebabas.
- Se pueden maquinar secciones delgadas y frágiles sin deformación.
- Se pueden cortar formas complicadas en la pieza de trabajo que son imposibles de lograr con métodos convencionales.
- En el aserrado por maquinado por electroerosión se usa un conjunto parecido a una sierra de cinta o sierra circular, pero sin dientes. Se pueden hacer cortes angostos con grandes tasas de remoción de material. Como las fuerzas de corte son mínimas, se puede usar el proceso también para componentes delgados y esbeltos.

Las desventajas que presenta el Proceso frente a los procesos no convencionales:

- Es demasiado lento para competir con el maquinado ordinario de los materiales comunes particularmente para formas simples.
- Es un proceso de costo elevado, debido a los elementos con los que cuenta la máquina para realizar su función.

2.2.2. Rectificado Por Electrodescarga - EDG

El EDG (en inglés: Electrical-DischargeGrinding), es una variación del proceso EDM, con la diferencia que utiliza como electrodo una rueda de grafito o de latón sin abrasivos, para rectificar. El material es quitado de la pieza por medio de chispas de descarga repetidas entre la piedra giratoria y la pieza.

2.2.3. Corte Con Alambre Por Electro descarga - EDWC

Éste proceso también llamado Electroerosionadora de hilo es una variación del EDM es el EDWC (en inglés: Electrical-DischargeWireCutting). Este proceso es similar al corte con una sierra de cinta, con la diferencia que utiliza un alambre, el cual se mueve con lentitud, describe una trayectoria predeterminada y corta la pieza; las chispas de descarga funcionan como dientes de corte. Este proceso se usa para cortar placas hasta de 300 mm (12 pulg.), y para fabricar punzones, herramientas y matrices de metales duros. También puede cortar componentes intrincados para la industria electrónica.

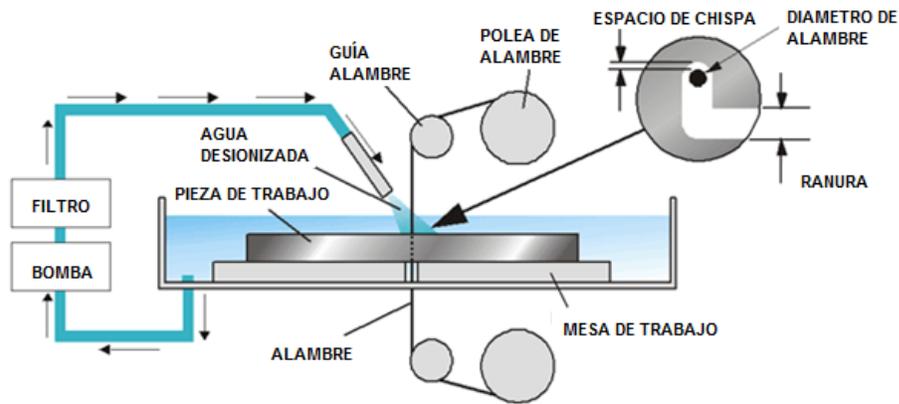


Figura 18. EDM con Alambre

El alambre suele ser de latón, cobre o tungsteno; también se usan recubiertos de zinc, de latón y de varias capas. El diámetro del alambre es normalmente 0.30 mm (0.012 pulg) para cortes de desbaste, y de 0.20 mm (0.008 pulg) para cortes de acabado. El alambre debe tener una resistencia

tenzil (capacidad de estar bajo tensión) y la tenacidad a la fractura suficiente, así como gran conductividad eléctrica y capacidad de arrastrar los desechos producidos durante el corte. En el caso normal, el alambre sólo se usa una vez, y es relativamente poco costoso. Se mueve a velocidades constantes de 0.15 a 9 m/min (6 a 360 pulg/min) y durante el corte se mantiene un espacio constante entre él y la pieza (saque). La tendencia en los fluidos dieléctricos es hacia el empleo de fluidos transparentes y de baja viscosidad.

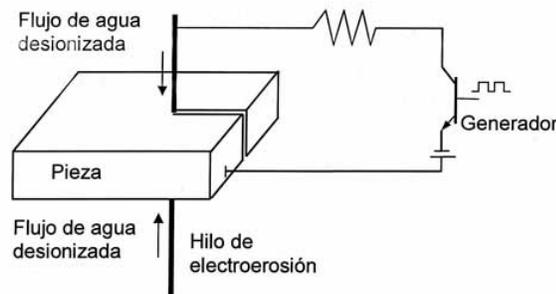


Figura 19. Principio del EDM con alambre

2.2.4. Maquinado Por Descarga Electroquímica - ECDM

El maquinado por descarga electroquímica (ECDM) también se le conoce como el rectificado por descarga electroquímica (ECDG). El proceso EDG se puede combinar con el rectificado electroquímico, y el proceso toma el nombre de Rectificado Electroquímico con Descarga (ECDG). La acción inicial es la del maquinado electroquímico pero el residuo se remueve por pulsos de descargar eléctricas y no por abrasivos como en el esmerilado electroquímico (ECG).

El material se saca con acción química, con las descargas eléctricas de la piedra de grafito, que rompen la capa de óxido, y es arrastrado por el flujo de electrolito. El proceso se usa principalmente para rectificar herramientas y matrices de carburo, pero también se puede usar con partes frágiles, como agujas quirúrgicas, tubos de pared delgada y estructuras de panal. El proceso ECDG es más rápido que el EDG, y el consumo de potencia es mayor.

2.2.5. Rectificado Electroquímico - ECG

En el ECG (en inglés: Electro-ChemicalGrinding), se combina el maquinado electroquímico con el rectificado normal. El equipo que se emplea es parecido a una rectificadora convencional, pero la piedra es un cátodo giratorio. La piedra tiene abrasivos de diamante aglomerado con metal, o de óxido de aluminio, y gira a una velocidad superficial de 1200 a 2000 m/min. Los abrasivos tienen dos funciones:

- Servir como aislantes entre la piedra y la pieza.
- Quitar mecánicamente los productos de la electrólisis en el área de trabajo.

Se produce un flujo de solución de electrolítico para la fase de maquinado electroquímico de la operación. Las densidades de la corriente van de 1 a 3 A/mm². La mayor parte de la remoción de metal en el rectificado electroquímico es por acción electrolítica, en el caso normal se quita menos del 5% del metal por la acción abrasiva de la piedra; en consecuencia, el desgaste de la piedra es muy bajo. Los cortes de acabado se hacen normalmente por la acción abrasiva, pero sólo para producir una superficie de buen acabado y con exactitud dimensional.

El rectificado electroquímico es adecuado en aplicaciones parecidas a las del fresado, rectificado y aserrado. No se adapta a operaciones de excavación de cavidades. Este proceso se ha aplicado bien en carburos y aleaciones de alta resistencia. Tiene una ventaja distintiva sobre el rectificado con piedra de diamante, al trabajar materiales muy duros, cuando el desgaste de la piedra puede ser alto. Actualmente se consiguen máquinas de rectificado electroquímico con controles numéricos, con las que se mejoran la exactitud dimensional. La repetibilidad y la productividad.

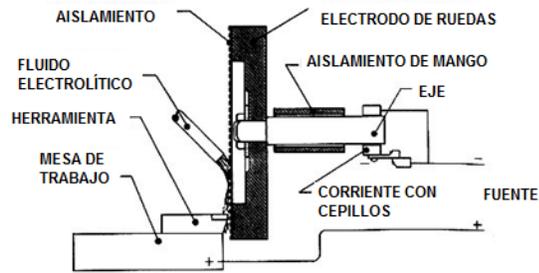


Figura 20. Rectificado Electroquímico

2.3. Maquinado Electroquímico - ECM

2.3.1. Introducción

El Maquinado electroquímico, ECM (en inglés: Electro-Chemical Machining) difiere de las técnicas convencionales para cortes de metales en que se utilizan energía eléctrica y química como herramientas de corte. Con este proceso se remueve el metal con facilidad, sin que importe su dureza, y se caracteriza porque no deja virutas.

La herramienta de corte es un electrodo fijo que tiene la forma de cavidad requerida para el paso de una disolución electrolítica hacia la pieza de trabajo, se pueden producir formas escuadradas o difíciles de cortar. El electrodo se hace con material conductor de electricidad, el material más usado es el cobre, por su gran capacidad conductiva de corriente. Otros materiales usados son el acero inoxidable y grafito. El acero inoxidable no tiene una gran conductividad eléctrica y térmica, pero tiene gran resistencia a la corrosión. Por su parte el grafito presenta facilidad para maquinarlo pero se debe usar impregnado de cobre o de otro material debido a que con altas velocidades del líquido y presiones se erosiona rápidamente. Además, el desgaste de la herramienta es insignificante porque no tiene contacto con la pieza de trabajo.

El maquinado electroquímico es adecuado para producir agujeros redondos pasantes, cuadrados pasantes, ciegos redondos o cuadrados, cavidades sencillas con lados rectos y paralelos y para operaciones de cepillo. Su utilidad es mucho mayor en metales cuya dureza es mayor de 42

rockwell C (400 Brinell). Con este proceso es difícil mantener aristas agudas, secciones inferiores planas o curvaturas exactas debido al ligero exceso de corte que produce. El proceso difiere de la electrodeposición (EDM) en que una reacción electroquímica disuelve el metal de la pieza de trabajo en una solución salina llamada electrolito. Se pasa una corriente continua a través de la solución salina entre el electrodo, que es la “herramienta” que tiene carga negativa y la pieza de trabajo que tiene carga positiva. Esto ocasiona la remoción del metal delante del electrodo al avanzar hacia la pieza de trabajo. La reacción química ocasionada por la corriente continua en el fluido electrolítico disuelve el metal de la pieza de trabajo.

2.3.2. Equipo

El equipo de mecanizado electroquímico tiene los siguientes módulos de operación:

- Fuente Eléctrica
- Sistema de filtrado y recuperación del fluido electrolítico
- Sistema de alimentación de herramienta
- Tanque de Trabajo

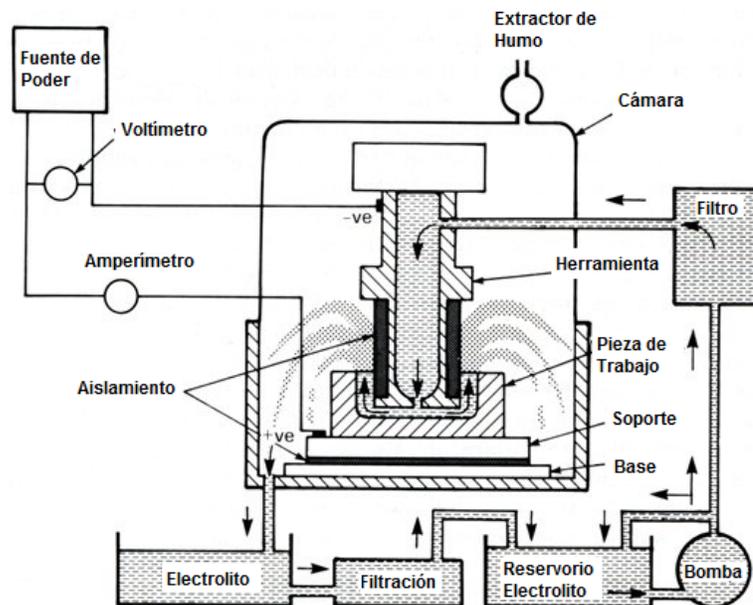


Figura 21. Esquema de un sistema de ECM

2.3.3. Electrólisis

Electrólisis es la reacción química que ocurre cuando se pasa corriente eléctrica entre dos conductores sumergidos en una solución líquida (electrolito), que debe conducir la electricidad para completar el circuito eléctrico.

Las reacciones químicas son denominadas reacciones anódicas o reacciones catódicas dependiendo de si se produce en el ánodo o en el cátodo, respectivamente.

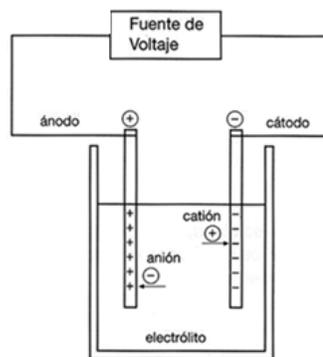


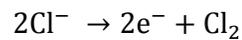
Figura 22.Celda Electrolítica

La mayor diferencia entre electrolitos y conductores metálicos de electricidad es que la corriente es transportada por los electrones en metales, mientras que se lleva por iones en electrolitos. Los iones no son nada más que átomos que han perdido o ganado electrones y de este modo han adquirido una carga positiva o negativa. Los iones cargados positivamente viajan hacia el cátodo y los iones cargados negativamente viajan hacia el ánodo. En el final de la reacción, la cantidad de material perdido por uno de los electrodos es igual a la cantidad de material adquirida por el otro. Por lo tanto, este proceso puede ser utilizado tanto para remoción y adición de material. Las principales aplicaciones de la electrolisis son: la galvanoplastia y electro pulido. (McGeough 2005).

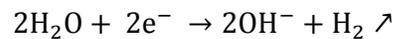
2.3.4. Extracción de Hidrogeno

Durante el proceso de mecanizado electroquímico, en el fluido electrolítico sucede la reacción química de electrólisis, en el ánodo se desprende cloro, pero el sodio no se deposita en el cátodo. De esto se obtiene un desprendimiento de hidrogeno y de sosa (Na^+ , OH^-) alrededor el electrodo.

En el ánodo se depositan los iones Cl^- :



En el cátodo los iones de Na^+ no se descargan, pero hay ionización del fluido electrolítico que recibe los electrones del cátodo:



De esta manera se desprende hidrogeno durante el proceso de mecanizado electroquímico. En el caso que no sea extraído de la celda de trabajo, se va acumulando y cualquier chispa podría producir una explosión. Por ésta razón es necesario colocar un sistema de extracción de hidrógeno en la celda de trabajo. En una instalación de 10000 A se necesitan al menos 1740 m^3 de aire por hora, para reducir la concentración de hidrógeno a niveles no peligrosos.

2.3.5. Precisión

Bajo condiciones ideales y con herramientas debidamente diseñadas, el proceso de Mecanizado Electro Químico (ECM) es capaz de mantener la tolerancia al orden de 0,02 mm y menos. La repetibilidad del proceso ECM también es muy buena. Esto se debe en gran medida al hecho de que el desgaste de la herramienta es prácticamente inexistente, la tolerancia se puede mantener en una base de producción en la región de 0,02 – 0,04mm. Como regla general, cuanto más compleja es la forma del trabajo, más difícil es mantener tolerancias estrictas y mayor es la atención para el desarrollo de un utillaje adecuado y forma del electrodo.

2.3.6. Acabado Superficial

La geometría, condición, y la precisión de la superficie mecanizada depende del tipo de electrolito, la concentración y la intensidad de corriente. El Mecanizado Electroquímico es capaz de producir superficies libres de cualquier alteración metalúrgica. El acabado superficial se rige por el transporte de masa en el ánodo. Un mejor acabado superficial se obtiene en piezas de trabajo con estructura de grano fino (Rajurkar et al. 2006). El acabado superficial que se obtiene con el maquinado electroquímico en comparación de otros procesos se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1.

Acabado Superficial Procesos Electro-Químicos

| | EDM por alambre | Maquinado electroquímico | EDM por penetración | EDM por alambre |
|---|--------------------------------------|-----------------------------|---|---|
| Acabado Superficial (μm) | 2 en Al 1.5 en acero 0.6 en Ti | 0.1 – 1.4 | a 0.15 en Al 5 a 8 en Acero 10 a 50 en Ti | 0.1 corte profundo 1-2 corte de desbaste |

2.3.7. Parámetros De Operación

Los principales parámetros de operación que rigen el proceso de ECM son los valores de: electrolito, corriente y voltaje, distancia entre el electrodo y pieza de trabajo y la velocidad de flujo.

2.3.7.1. Electrolito

El electrolito es uno de los principales componentes del sistema de mecanizado. El movimiento de los electrones desde el cátodo al ánodo depende de las propiedades del electrolito. La conductividad del electrolito

en el espacio entre el cátodo y el ánodo es dependiente de los siguientes parámetros:

- La distancia de partida de los electrodos.
- La concentración de sal en la solución.
- La temperatura local.
- La tasa de flujo de electrolito
- La velocidad del electrodo

El control de la velocidad y dirección de flujo de electrolito es importante para la continuidad del proceso de mecanizado. Se debe mantener un flujo estable de electrolito en la zona de trabajo sin afectar a la estabilidad de la herramienta.

El electrolito elimina los productos de mecanizado generados en los electrodos y disipa el calor generado. El rendimiento de mecanizado se rige por el comportamiento de la pieza de trabajo anódica en un electrolito dado. En micro mecanizado debido a la pequeña distancia entre la herramienta y el electrodo, la densidad de la corriente es muy alta lo que resulta en la vaporización del electrolito. El electrolito debe ser elegido de tal manera que no se vaporiza y lleva los productos de mecanizado fuera de la pieza de trabajo. Las principales funciones del electrolito son:

- Proporcionar las condiciones ideales para la disolución del material de la pieza
- Conducir la electricidad
- Arrastrar los productos de mecanizado no deseados y el calor generado
- Mantener una temperatura constante en el espacio de mecanizado.

Los electrolitos más comúnmente utilizados son el cloruro de sodio, nitrato de sodio y cloruro de potasio, la relación entre la eficiencia de la corriente y densidad de corriente varía para cada electrolito y esta relación rige en última instancia, la tasa de eliminación de material. Los rangos de

concentraciones de electrolito se encuentran entre 100 g/l a 600 g/l para mejorar la disolución de metal sin afectar la herramienta.

Tabla 2.

Electrolitos recomendados para el Mecanizado Electroquímico

| Metal | Electrolito | Conc. (g/l) |
|---|--------------------|--------------------|
| Aceros y aleaciones de hierro, de cobalto y de níquel | NaCl o KCl | 300 |
| | NaNO ₃ | 600 |
| Aluminio y sus aleaciones | NaCl o KCl | 300 |
| | NaNO ₃ | 600 |
| Aleaciones base titanio | NaCl o KCl | 120 |
| Volframio | NaOH | 90-180 |
| Molibdeno | NaOH | 180 |
| | NaCl o KCl | 300 |
| Cobre y sus aleaciones | NaNO ₃ | 600 |
| | NaCl o KCl | 300 |
| Fundiciones | NaCl | 300 |
| | NaNO ₃ | 600 |
| Zirconio | NaCl o KCl | 300 |

2.3.7.2. Corriente y voltaje

La densidad de corriente depende de la velocidad a la cual los iones arriban a los respectivos electrodos, que es proporcional a la tensión aplicada, la concentración de electrolito, la distancia entre los electrodos, y la

velocidad de avance de la herramienta. La baja tensión disminuye el espacio de equilibrio-mecanizado y resulta un mejor acabado de la superficie y el control de la tolerancia. Se requiere que el voltaje a ser aplicado para la reacción electroquímica descienda a un estado de equilibrio. Esa diferencia de voltaje o potencial está alrededor de 2 a 30 V. Los voltajes altos producen los perfiles de los agujeros perforados más amplios.

2.3.7.3. Velocidad de remoción de material – MRR

Para conseguir la remoción de metal, se alimenta el electrodo dentro del trabajo a una velocidad igual a la velocidad de remoción del metal de trabajo. La velocidad de remoción del metal se determina por medio de la primera ley de Faraday, que establece que la cantidad de cambio químico que produce una corriente eléctrica (cantidad de metal disuelto) es proporcional a la cantidad de electricidad transmitida (corriente x tiempo). Esto se expresa mediante:

$$Vl = C \times I \times t \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

$Vl = \text{volumen de metal removido, en pulg}^3(\text{cm}^3)$

$C = \text{cte: velocidad de remoción específica, en } \text{pulg}^3/\text{A} - \text{min} \text{ (cm}^3/\text{A} - \text{seg}).$

Este valor depende del peso atómico, la valencia y la densidad del material de trabajo.

$I = \text{corriente, en A}$

$t = \text{tiempo, en min(seg)}$

Con base en la ley de Ohm, la corriente $I = V/R$, donde: $V = \text{voltaje}$ y $R = \text{resistencia}$. Bajo las condiciones de la operación de maquinado electroquímico, la resistencia se proporciona mediante:

$$R = \frac{gr}{A} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

$g =$ separación entre el electrodo y pieza de trabajo, en pulg (cm);

$r =$ resistividad del material electrolítico, en ohm
– pulg (ohm – cm);

$A =$ área de superficie de maquinado, en pulg² (cm²)

Sustituyendo esta expresión para R en la ley de Ohm, se tiene:

$$I = \frac{VA}{gr} \quad (\text{Ec. 3})$$

Incorporando la expresión anterior, en la ecuación de la ley de Faraday, tenemos:

$$Vl = \frac{C(VAt)}{gr} \quad (\text{Ec. 4})$$

Es necesario convertir esta ecuación a una expresión para velocidad de avance, que es la velocidad a la cual el electrodo puede avanzar dentro del trabajo. Para lo cual se realiza el siguiente procedimiento:

- Dividir la ecuación por At (área x tiempo), para convertir el volumen de metal removido a una velocidad de desplazamiento lineal:

$$\frac{Vl}{At} = fr = \frac{CV}{gr} \quad (\text{Ec. 5})$$

En donde $fr =$ velocidad de alimentación, en pulg/min (cm/seg).

- Sustituir I/A en lugar de V/gr . Por tanto la velocidad de alimentación en el ECM es:

$$fr = \frac{C I}{A} \quad (\text{Ec. 6})$$

Dónde: $A =$ área de superficie de maquinado, en pulg²(cm²). Ésta es el área proyectada de la herramienta en la dirección del avance dentro del trabajo.

Esta ecuación supone una eficiencia del 100% en la remoción de metal. La eficiencia real está en el rango del 90 al 100% y depende de la forma de la herramienta, el voltaje y la densidad de corriente, así como de otros factores.

Los valores de la velocidad de remoción específica C para materiales de trabajos seleccionados en el maquinado electroquímico se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Valores típicos de velocidad de remoción específica C.

| Material de Trabajo | Velocidad de remoción específica C | |
|----------------------------|---|-------------------------------|
| | <i>pulg³/A – min</i> | <i>cm³/A – seg</i> |
| Aluminio (3) | 1,26E-04 | 3,44E-05 |
| Cobre (1) | 2,69E-04 | 7,35E-05 |
| Hierro (2) | 1,35E-04 | 3,69E-05 |
| Aceros | | |
| De baja aleación | 1,10E-04 | 3,00E-05 |
| De alta aleación | 1,00E-04 | 2,73E-05 |
| Inoxidable | 9,00E-05 | 2,46E-05 |
| Níquel (2) | 1,25E-04 | 3,42E-05 |
| Titanio (4) | 1,00E-04 | 2,73E-05 |

La valencia más común se proporciona entre paréntesis (), y se supone para determinar la velocidad de remoción específica C. Para una valencia

diferente, C se calcula multiplicando este valor por la valencia más común y dividiéndola por la real.

2.3.7.4. Distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo

La longitud del electrodo y su posición con respecto a la pieza de trabajo determina la distancia entre los electrodos. A medida que la distancia se hace más grande se requieren tensiones superiores para mantener la densidad de corriente correcta. Por lo contrario si la distancia es demasiada corta, el flujo de electrolito no es el adecuado y produce características de mecanizado estrechas, como mal acabado y más aún si existe contacto del electrodo con la pieza de trabajo se realiza corto circuito y se genera el desgaste del electrodo, además del recalentamiento de la fuente, causando daños al equipo. Como una cuestión práctica, la distancia de separación por lo general se mantiene dentro de un rango de 2 a 6 mm.

2.3.8. Ventajas Del Maquinado Electroquímico

El maquinado electroquímico, presenta varias ventajas con respecto a los procesos no convencionales de mecanizado:

- No existe fuerza mecánica – proceso sin contacto
- No existen esfuerzos de corte.
- No existe una zona afectada por el calor.
- Puede mecanizar cualquier metal sin importar su dureza.
- Excelentes acabados superficiales
- Puede mecanizar geometrías complejas
- El producto está libre de rebabas después de procesar
- El proceso no provoca deformación térmica o física en el material.
- Se pueden procesar productos de 3 dimensiones, en un solo paso
- Alto nivel de calidad posible ($Ra < 0,05 \mu m$) dependiendo del material.
- La dureza, tenacidad y resistencia térmica no afectan la tasa de remoción de material.

- Para el mecanizado del producto también es irrelevante si se procesa antes o después de un tratamiento de paso de calor (endurecimiento).
- "No" desgaste del electrodo.

2.3.9. Desventajas Del Maquinado Electroquímico

El proceso de mecanizado electroquímico presenta ciertas desventajas.

Referente a los componentes del proceso:

- Cada producto y material requiere una nueva investigación, se requiere maquinar la forma del electrodo con radios de curvatura y buen acabado, por lo que requiere ser maquinado en una máquina herramienta como una fresadora o una CNC.
- Se requiere grandes cantidades de corriente eléctrica para ejecutar el proceso. Pero en general inferior a otras técnicas de mecanizados no convencionales.
- El equipo del proceso ECM, por lo general tiene un valor elevado debido a los componentes que requieren protección superficial o aislamiento debido al ambiente altamente corrosivo que genera el electrolito.

Desventajas referentes a los resultados del proceso:

- El maquinado electroquímico no es conveniente para producir esquinas agudas ni fondos planos, debido a la tendencia que tiene el electrolito a erosionar y quitar perfiles agudos.
- Puede ser difícil el control del electrolito, por lo que las cavidades irregulares podrán no tener la forma deseada con la exactitud dimensional aceptable.
- Los diseños deben tener en cuenta que las cavidades y orificios que se maquinen tendrán una ligera conicidad.

2.3.10. Aplicaciones Del Maquinado Electroquímico

La tasa de eliminación de material o mecanizado no es dependiente de las propiedades mecánicas o físicas del material de trabajo. Es sólo depende del peso atómico y valencia del material de trabajo y la condición que debe ser eléctricamente conductor. Así el mecanizado electroquímico puede mecanizar cualquier material de trabajo eléctricamente conductor, independientemente de su dureza, resistencia o incluso propiedades térmicas. Además, como el mecanizado electroquímico lleva la disolución a nivel atómico, el acabado superficial es excelente, con superficie mecanizada libre de esfuerzos y sin ningún daño térmico.

Normalmente, el mecanizado electroquímico se utiliza para la fabricación de piezas de forma compleja a partir de materiales que son difíciles de mecanizar por procesos convencionales.



Figura 23. Modelos de Maquinados por ECM

El mecanizado electroquímico es usado para:

- **Moldeado:** Crear moldes con una forma específica
- **Perforación:** Crear orificios con diámetros y formas distintas.
- **Redondeo:** Crear un redondeado con un radio definido
- **Pulido:** Optimizar las características de la superficie.
- **Contorneado:** Aplicar la geometría del cátodo en la pieza de trabajo
- **Desbarbado:** Eliminación de rebabas en las salidas del taladro y en las intersecciones de los orificio



Figura 24. Fabricación de moldes por ECM

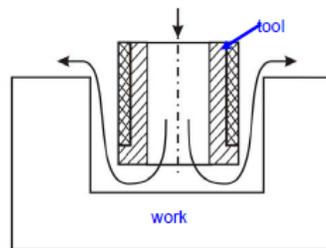


Figura 25. Perforación mediante ECM

El mecanizado electroquímico es usado en el sector automotriz, en los componentes de inyección de combustible. El proceso es utilizado, en las regiones sometidas a grandes esfuerzos para reducir las tensiones y para asegurar que el producto puede funcionar a altas presiones (hasta 3000bar en algunos casos). El resultado de las presiones de funcionamiento más altas es una reducción en las emisiones del motor. El mecanizado electroquímico también se utiliza para producir las ranuras en las cabezas de máquina de afeitar eléctricas. Los cortes no deben tener rebabas de modo que el riesgo de traumatismo en los usuarios potenciales se elimina, por lo que las exigencias de calidad del proceso son bastante altas.



Figura 26. Máquina de Afeitar Aplicación de ECM

En el sector de la salud ECM ofrece un medio para producir patrones en los implantes de soporte de carga de titanio utilizados en la cirugía ortopédica. En el sector aeroespacial, el proceso se utiliza para la fabricación **Blisk** (disco con álabes), es un solo componente de motor que consiste en un disco de rotor y palas, que pueden ser ya sea moldeado integralmente o mecanizado a partir de una pieza sólida de material.



Figura 27. Disco con álabes utilizado en una turbina de gas

2.4. Automatización De Procesos Electroquímicos.

Un parámetro importante a controlar en el proceso de mecanizado electroquímico es la distancia entre electrodos, las variaciones de la distancia entre la pieza de trabajo y el electrodo útil afectan de manera directa en la forma del perfil obtenido y el tipo de acabado ya que trascienden en la conductividad eléctrica y cavitación del fluido, generando grietas y erosión no deseada. Debido a las consecuencias que tiene la distancia entre electrodos en el acabado de la pieza, es necesario controlar la velocidad de aproximación del electrodo útil hacia la pieza de trabajo, para lo cual se necesita de un sistema de automatización en el eje de avance del electrodo.

El sistema de automatización permite transferir tareas realizadas por operadores humanos a un conjunto de elementos que realizan los mismos procesos de manera más precisa y continua sin afectar la ergonomía del operario. El sistema automatizado consta de dos partes principales:

- Parte de Mando
- Parte Operativa

La Parte Operativa actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación deseada. Estos son accionadores y captadores como motores, cilindros, sensores, finales de carrera, etc. Por su parte la parte de mando suele ser una tecnología programable como tarjetas electrónicas o módulos lógicos. Éstos pueden ser autónomos o necesitar de equipos particulares como computadores o pantallas para visualizar la información administrada.

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA MÁQUINA

3.1. Requerimientos Técnicos

Los requerimientos técnicos para realizar el proceso de mecanizado electroquímico varían entre los siguientes parámetros y rangos de valores:

Tabla 4.

Parámetros Generales del Proceso

| Fuente de Energía | |
|-------------------------------|---|
| Tipo | Corriente Continua |
| Voltaje | 2 a 35 V |
| Corriente | 50 a 40 000 A |
| Densidad de Corriente | 0.1 A/mm ² a 5 A/mm ² |
| Electrolito | |
| Material | NaCl / NaNO ₃ |
| Temperatura | 20°C – 50°C |
| Caudal | 10 a 20 lpm por 100 A |
| Presión | 0.5 a 20 bar |
| Dilución | 100 g/l a 500 g/l |
| Distancia de trabajo | 0,1 mm a 3 mm |
| Avance | 0.5 mm/min a 15 mm/min |
| Material del Electrodo | Cobre, Acero Inoxidable |

3.2. Diseño de Detalle

En base a los requerimientos establecidos se procede a realizar el diseño de la máquina para mecanizado electroquímico. El diseño está basado en la metodología que presenta el Diseño Concurrente, tomando en cuenta elementos como la calidad, el entorno, los recursos humanos, gama del producto, equipos de trabajo multidisciplinarios, gestión de proyectos, estructura modular, tecnológicas de la información y comunicaciones.

3.2.1. Diseño Modular

Para facilitar la representación de las funciones y de los flujos de la estructura funcional del sistema se utilizó la simbología propuesta por la norma VDI 2222 la que permite establecer una estructura funcional suficientemente articulada que sirva de guía para fijar la estructura modular del sistema y generar los principios de solución.

Los símbolos utilizados son los siguientes:

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Función: | Rectángulo de línea continúa |
| Flujo de material y dirección: | Flecha de doble línea continua |
| Flujo de energía y dirección: | Flecha de línea continua |
| Flujo de señal y dirección: | Flecha de línea discontinua |

Las descripciones de los siguientes conceptos se realizan de la siguiente manera:

Funciones. Se sitúan dentro del rectángulo y preferentemente se definen con un verbo seguido de un predicado: transferir pieza; mover brazo; controlar posición.

Flujos. Su objeto se indican encima de las flechas correspondientes: De pieza en bruto, acabada; de alimentación eléctrica, de accionamiento de cabezal; de señal de puesta en marcha, de posición.

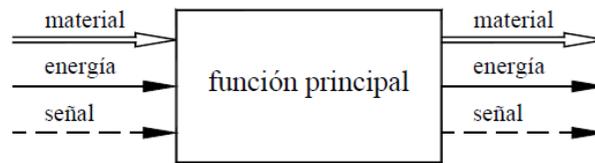


Figura 28. Simbología de modularidad

Para el desarrollo del diseño modular, es necesario determinar el proceso para la operación de la máquina, donde se incluya cada uno de los pasos a realizar, con el propósito de identificar los diferentes módulos que constituirán la estructura modular de la máquina. En el proceso de identificación de módulos se parte de la función global y se continúa con la estructura funcional, dando como resultado la obtención de niveles y subniveles de información cada vez más específica y puntal con el objetivo de determinar el elemento necesario para cumplir la función del módulo.

3.2.2. Estructura Modular

El detalle del procedimiento a seguir para realizar la operación de mecanizado electroquímico incluye todas las actividades que debe realizar el operario siguiendo un orden definido y agrupados de manera que permita la identificación de los diferentes módulos. Ir Anexo A.

La estructura modular de la máquina se encuentra identificada en tres niveles modulares: nivel cero, nivel uno y nivel dos. Ir Anexo B.

3.3. Principios de Solución

3.3.1. Módulo 1: Ánodo – Cátodo

La selección del electrodo, material de la pieza de trabajo y la forma a mecanizar, se encuentra establecida en las guías de práctica de laboratorio de la máquina por lo que es una restricción para los usuarios.

3.3.1.1. Herramienta (Electrodo)

Uno de los aspectos más importantes en el mecanizado electroquímico es el diseño de la herramienta. Para el diseño de la herramienta se debe

tomar en cuenta ciertas reglas básicas para reducir los problemas que pueden encontrarse y mantener un flujo homogéneo a lo largo de toda la superficie en la herramienta que puede producir cavitación y generar irregularidades en el maquinado. El electrolito circula entrando por un lado de la herramienta para obligarle a que fluya a través de su cara enfrentada con la pieza de trabajo y permita su evacuación.

Materiales de Construcción de la Herramienta

El material que se va a utilizar como electrodo en el mecanizado electroquímico debe poseer ciertas propiedades que lo hagan útil para éste proceso y son:

- Elevado punto de fusión y de ebullición.
- Buena conductividad eléctrica
- Buena conductividad térmica
- Buena capacidad de resistencia al desgaste por abrasión.
- Buen factor económico

El material más usado es el cobre, debido a que tiene una gran conductividad, costo relativamente económico y es fácil de trabajar. El acero inoxidable no tiene una gran conductividad eléctrica y térmica, pero tiene una gran resistencia a la corrosión por lo que también es muy usado. El grafito impregnado de cobre o de otro material es una alternativa de material utilizado para el proceso porque tiene la ventaja de ser maquinado fácilmente.

La máquina va a tener una herramienta de cobre, para perforación y moldeo, dependiendo de la práctica a realizar y la forma a mecanizar. El electrodo cuenta con un mango para sujeción, un agujero lateral para el ingreso de fluido electrolítico y una perforación interna en su longitud para el paso de electrolito, además el orificio de salida debe poseer un radio de curvatura mínimo de 0,762 mm.

Especificaciones

| | |
|---------------------------|----------|
| Longitud total | 70mm |
| Longitud mango | 10mm |
| Ø mango | Max 10mm |
| Ø cuerpo | 20mm |
| Ø orificio lateral | 12mm |
| Ø interno | 16mm |
| Material | Cobre |



Figura 29. Electrodo de Cobre

3.3.1.2. Pieza de Trabajo

Al ser ésta máquina didáctica, el área de trabajo tiene restricciones dimensionales, para lo cual la pieza a mecanizar deberá tener las siguientes características:

- Placa de 50 mm x 50 mm de largo y ancho respectivamente
- Máximo 1,2 mm de espesor

Para las prácticas, dado que la dureza de material es irrelevante en el proceso de mecanizado electroquímico, se requerirá de dos placas de los siguientes materiales:

- Acero de Baja Aleación
- Acero Inoxidable

La pieza de Trabajo se debe cubrir con Papel Contact, en el cual se debe cortar la forma que se desea maquinar, para la precisión del proceso se requiere cortes exactos en él. El polo positivo de la fuente de poder que hace contacto con la pieza de trabajo (ánodo), es un eje de acero inoxidable conectado a través de una pinza tipo lagarto.

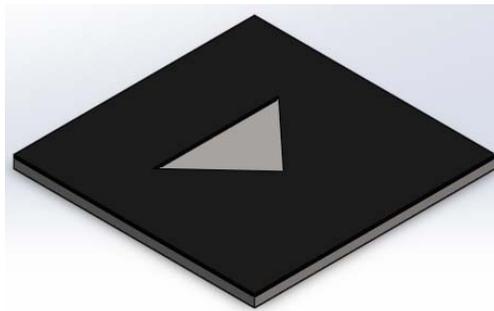


Figura 30. Pieza de Trabajo

3.3.2. Módulo 2: Sistema Eléctrico Central

La máquina debe ser conectada a una red bifásica de 220V. El sistema eléctrico central, se va componer de un disyuntor y de un selector ON/OFF, que permita al usuario energizar toda la máquina, distribuyendo 110V y 220V para los elementos eléctricos según lo necesiten, los cuales serán conectados a través de contactores. Todos estos elementos forman parte del sistema eléctrico de poder.

Diagrama Unifilar de Poder

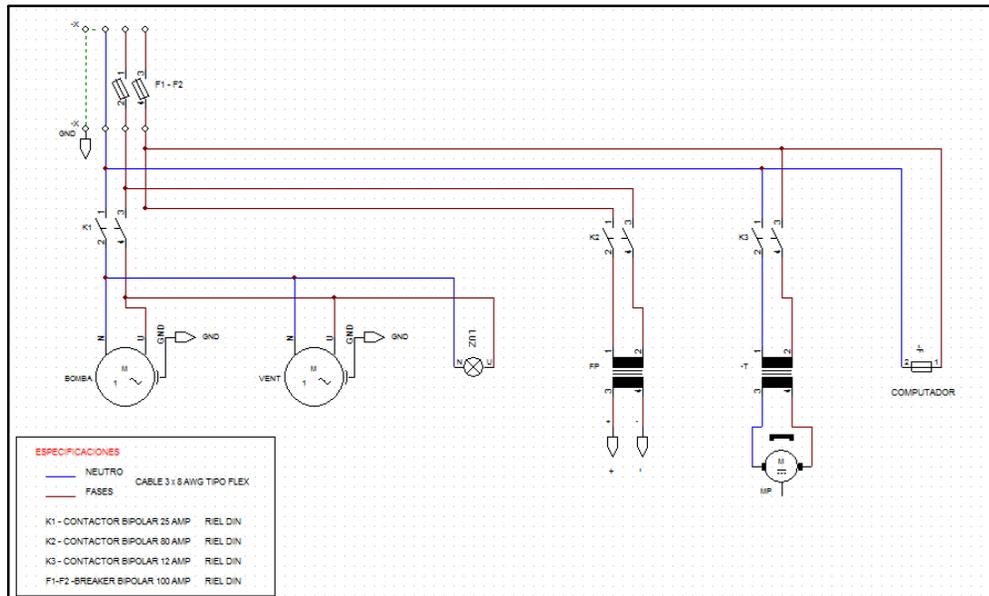


Figura 31. Diagrama Eléctrico de Poder

3.3.3. Módulo 3: Sistema HMI – Datos

3.3.3.1. Sistema HMI

Para el manejo de la máquina se necesita de un sistema que permita la interacción hombre – máquina, de manera que se pueda controlar y visualizar datos y parámetros del proceso. Existen varios sistemas en el mercado que permiten interactuar entre el usuario y la máquina, para diferentes aplicaciones y distintos tipos, modelos, rangos y valores. Entre los cuales para la aplicación actual se encuentran:

3.3.3.1.1. Equipo PLC

Requerimientos:

- 3 Interruptores ON/OFF
- 2 Sensores Capacitivos
 - Nivel de Fluido en Reservorio
 - Seguridad Puerta Área de Trabajo
- 1 Sensor de Flujo de Agua

Desarrollo:

Tabla 5.

Capacidad de Memoria Requerida de un PLC

| Elemento | No. | Memoria | Input/Output | Tipo de Señal |
|-------------------|-----|----------|---------------------------|---------------|
| Interruptor | 3 | 1 bit | Input | Digital |
| Sensor Capacitivo | 2 | 1 bit | Input | Digital |
| Sensor de Caudal | 1 | 1 bit | Input | Analógica |
| TOTAL | | 5 | Entradas Digitales | |
| | | 1 | Entrada Analógica | |

Fuente: Autores

Cálculo de Memoria:

$$1 \text{ bytes} \rightarrow 8 \text{ bits}$$

$$3 + 2 = 5 \text{ bits} \rightarrow 1 \text{ bytes}$$

$$(1 * 12) = 12 \text{ bits} \rightarrow 2 \text{ bytes}$$

$$\text{Memoria Requerida} = 3 \text{ bytes}$$

Unidad Base

Unidades Base con 10–24 E/S

| Especificaciones | AL2-10MR-A | AL2-10MR-D | AL2-14MR-A | AL2-14MR-D | AL2-24MR-A | AL2-24MR-D |
|------------------------------------|--|------------|--------------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|
| Especificaciones eléctricas | | | | | | |
| Entradas/salidas integradas | 10 | 10 | 14 | 14 | 24 | 24 |
| Fuente de alimentación | 100–240 V AC | 24 V DC | 100–240 V AC | 24 V DC | 100–240 V AC | 24 V DC |
| Entradas digitales | 6 | 6 | 8 | 8 | 15 | 15 |
| Entradas analógicas | — | 6 | — | 8 | — | 8 |
| Canales | — | 6 | — | 8 | — | 8 |
| Salidas integradas | 4 | 4 | 6 | 6 | 9 | 9 |
| Consumo máx. de energía | W 4,9 | 4,0 | 5,5 | 7,5 | 7,0 | 9,0 |
| Consumo típico de energía | Todas las E/S ON/OFF W 3,5/1,85 240 V AC 3,0/1,55 120 V AC | 2,5/0,75 | 4,5/2,0 240 V AC 3,5/1,5 120 V AC | 4,0/1,0 | 5,5/2,5 240 V AC 4,5/2,0 120 V AC | 5,0/1,0 |
| Peso | kg 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,35 | 0,3 |
| Dimensiones (AnxAlxLa) | mm 71,2x90x55 | 71,2x90x55 | 124,6x90x52 | 124,6x90x52 | 124,6x90x52 | 124,6x90x52 |
| Inform. pedido | Nº de art. 215070 | 215071 | 215072 | 215073 | 215074 | 215075 |
| Accesorios | Fuentes de alimentación para carriles DIN o para montaje directo de dispositivos de 24-V (véase la sección "fuentes de alimentación" en este catálogo) | | | | | |

Especificaciones Eléctricas

| Datos de la alimentación de corriente | | Módulos para alimentación DC (AL2-□MR-D) | Módulos para alimentación AC (AL2-□MR-A) | Datos de salida | | Todos los módulos |
|---|--------|---|--|---------------------------|-------------------|---|
| Fuente de alimentación | | 24 V DC | 100–240 V AC (50/60 Hz) | Tipo | | Relé |
| Corriente de fuga al arrancar | | ≤7,0 A (con 24 V DC) | ≤6,5 A (con 240 V AC) | Tensión de conexión máx. | V | 250 V AC, 30 V DC |
| Tiempo máx. permitido de corte de tensión | | 5 ms | 10 ms | Corriente nominal | | 10M, 14M: 8 A/salida 24M (001-004): 8 A/salida 24M (005-009): 2 A/salida |
| Entradas digitales | | | | | | |
| Tensión de entrada | | 24 V DC (+20 %/-15 %) | 100–240 V AC (+10 %/-15 %), 50/60 Hz | Potencia de conexión máx. | - carga inductiva | 14M, 24M: 249 VA, 250 V AC/373 VA, 250 V AC 24M: 93 VA, 125 V AC/93 VA, 250 V AC |
| Corriente de entrada | | La corriente de entrada cambia en función de la polaridad: NPN: (AL2-10/14/24MR-D) = 5,5 mA, 24 V DC PNP: (AL2-10/14MR-D) = 6,0 mA, 24VDC (AL2-24MR-D) = 5,5 mA, 24 V DCC | I01–I08 0,13 mA/120 V AC* 0,25 mA/240 V AC* I09–I15 0,15 mA/120 V AC* 0,29 mA/240 V AC* | Carga mínima | | 10 mA, 5 V DC |
| Tiempo de respuesta | OFF→ON | ms 10–20 | 35–85 ms, 120 V AC 25–55 ms, 240 V AC | Tiempo de respuesta | ms | ≤10 |
| | ON→OFF | ms 10–20 | 35–85 ms, 120 V AC 50–130 ms, 240 V AC | | | |
| Entradas analógicas | | | | | | |
| Rango analógico de entrada | | 0–500 | — | | | |
| Resolución | | 9 bits, (10 V/500) | — | | | |
| Velocidad de conversión | ms | 8 | — | | | |
| Tensión | | 0–10 V DC | — | | | |
| Impedancia | kΩ | 142 ±5 % | — | | | |
| Precisión | | ±5 % (0,5 V DC) | — | | | |

* La corriente de fuga de los sensores conectados en las entradas puede ser suficiente para conectar la entrada. Por ello no se deben emplear sensores de 2 hilos.

Fuente De Alimentación 24V

| Especificaciones | ALPHA POWER 24-0.75 | ALPHA POWER 24-1.75 | ALPHA POWER 24-2.5 |
|---|---|----------------------|---------------------|
| Aplicable para | Fuente de alimentación unidades base de 24 V de la serie ALPHA | | |
| Condiciones generales de funcionamiento | En correspondencia con las unidades base de la familia FX y de la serie ALPHA | | |
| Tensión primaria de entrada | 100–240 V (45–65 Hz) | | |
| Tensión de salida | 24 V DC (+/-1 %) | | |
| Corriente de salida nominal | 0,75 A (con T=55 °C) | 1,75 A (con T=55 °C) | 2,5 A (con T=55 °C) |
| Corriente máx. de salida | 1,4 A | 3,75 A | 4,4 A |
| Temperatura ambiente permitida | -25–+70 °C (Funcionamiento), -40–+85 °C (Almacenamiento) | | |
| Humedad permitida del aire | Máx. 95 % (sin condensación) | | |
| Peso | kg 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| Dimensiones (AnxAlxLa) | mm 36x90x61 | 54x90x61 | 72x90x61 |
| Inform. pedido | N° de art. 209029 | 209030 | 209031 |

Especificaciones Técnicas PLC

Tabla 6.

Especificaciones Técnicas Unidad Base PLC

| | |
|-------|---------------------|
| Marca | MITSUBHISI ELECTRIC |
| Serie | ALPHA 2 |

Continua 

| | |
|------------------|---------------------|
| Modelo | AL2-10MR-D |
| N° de Referencia | 215071 |
| Cantidad | 1 Unidad |
| Fuente 24 V DC | ALPHA POWER 24-0.75 |

Fuente: Autores



Figura 32. PLC Mitsubishi ALPHA 2

3.3.3.1.2. Controlador CNC

El sistema SINUMERIK de Siemens es un controlador que presenta una solución de CNC perfecta para una máquina herramienta. Este sistema controlador de CNC es una plataforma de sistema completa que satisface cualquier necesidad hasta el nivel del accionamiento. Este controlador de CNC, compacto, robusto y flexible, satisface todas las necesidades desde la fabricación en taller hasta la fabricación en serie.

SINUMERIK 802D si

El SINUMERIK 802D “Solution Line” es un panel de control operativo que se pone a disposición de todos los componentes de control numérico (NC, PLC, HMI) en una sola unidad. Equipado con un máximo 5 ejes (dos de los cuales puede realizarse como cabezales), este control es perfectamente adecuado para tornos y fresadoras en la gama baja y media.



Figura 33. SINUMERIK 802D sl con SINAMICS S120

3.3.3.1.3. Software MACH 3

Es uno de los programas más utilizados para control CNC disponible como freeware o con soporte comercial. Mach3 convierte un PC (Windows) estándar en un controlador CNC que permite utilizar hasta 6 ejes con todas las funciones. Sus pantallas, botones y acciones son editables y personalizables lo que abre un sin fin de posibilidades. CNC RouterParts es un distribuidor autorizado de Mach3 software controlador CNC.

Características Principales que Incluyen:

- Permite la importación directa de DXF, BMP, JPG y archivos HPGL a través de LazyCam
- Representación visual G-code
- Genera G-code través LazyCam o Wizards
- Interfaz completamente personalizable
- M-códigos y macros personalizados con VBScript

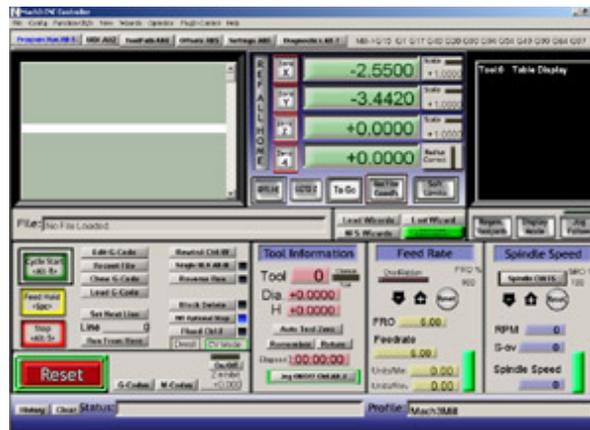


Figura 34.Pantalla Principal MACH 3 Demo

Requisitos Mínimos:

PC de escritorio 32-bit (a través del puerto paralelo)

- Versión de 32 bits de Windows 2000, Windows XP, Windows Vista, o Windows 7 (64 bits no funcionará)
- 1Ghz CPU
- 512 MB de RAM
- Tarjeta de vídeo no integrada con 32 MB RAM
- Informática Básica (posibilidad de copiar / renombrar archivos, navegar por los directorios, etc.)

Laptop / PC de escritorio 64 bits (utilizando un controlador de movimiento externo)

- Un controlador de movimiento externo
- Sistema Operativo: Windows 2000, Windows XP, Windows Vista o Windows 7
- 1Ghz CPU
- 512 MB de RAM
- Informática Básica (posibilidad de copiar / renombrar archivos, navegar por los directorios, etc.)

3.3.3.1.4. Software TurboCNC

Otro programa popular de control CNC disponible como shareware. Funciona bajo MSDOS lo que permite utilizarlo en PC's de muy escasa potencia. Maneja hasta 8 ejes y aunque su interfaz gráfica es muy sencilla tiene incondicionales adeptos por el control preciso de movimientos.



Figura 35. Pantalla Inicial Software TurboCNC

Requisitos Mínimos

- PC de escritorio con al menos 4 MB de RAM y un sistema de archivo compatible con MSDOS.
- Puerto paralelo de 25 pines
- 500K de espacio libre en disco (7M de código fuente y herramientas de desarrollo). TurboCNC se puede ejecutar desde un disquete.

Casi cualquier sistema de computadora en casa o en la oficina hecha después de 1993 cumple estos requisitos. Sin embargo, algunos equipos de control industrial bastante modernos no los cumplen.

3.3.3.2. Solución Módulo 3

Para la interacción hombre-máquina de la máquina de mecanizado electroquímico se va a utilizar el software MACH 3 DEMO, debido a que permite trabajar con la versión demo y es uno de los programas más usados en la automatización de sistemas de máquinas herramientas, por lo que permite además a los estudiantes familiarizarse con el programa. Para la instalación del software la máquina de ECM va a contar con computador de las siguientes características:

Especificaciones

| | |
|-------------------|----------------------------------|
| Sistema Operativo | Windows 7 Starter, 32 bits |
| Memoria RAM | 1,00 GB |
| Procesador | Intel(R) Pentium(R) Dual 2.4 GHz |

3.3.3.3. Determinación de Datos: Parámetros de Funcionamiento

La determinación de los parámetros de funcionamiento para realizar el mecanizado se determina mediante una plataforma desarrollada para el proceso.

Plataforma Virtual para Prácticas de Laboratorio

La plataforma virtual diseñada es una página web que integra una hoja inicial con información general del proceso, una hoja de simulación y un programa de cálculo que genera un reporte del trabajo realizado en formato PDF. La finalidad de la página inicial de la plataforma educativa es brindar a los estudiantes una introducción al proceso de mecanizado electroquímico, mediante información básica y ayuda multimedia.

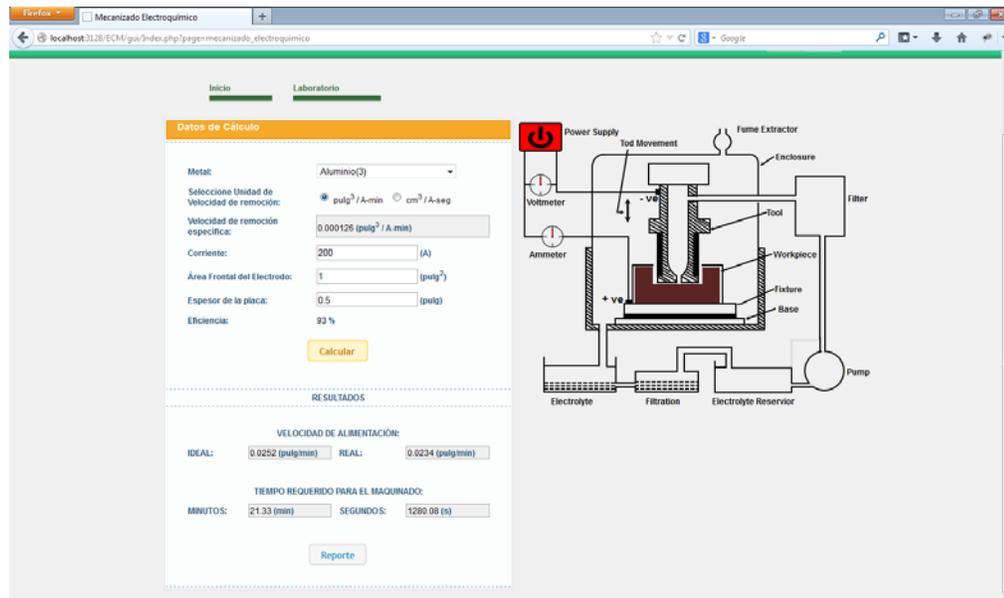


Figura 37. Plataforma Virtual: Cálculo y Simulación



Figura 38. Plataforma Virtual: Hoja de Reporte de Trabajo

Finalmente la plataforma virtual presta la facilidad de poder descargar las guías de prácticas de laboratorio en formato PDF desde la página de simulación.

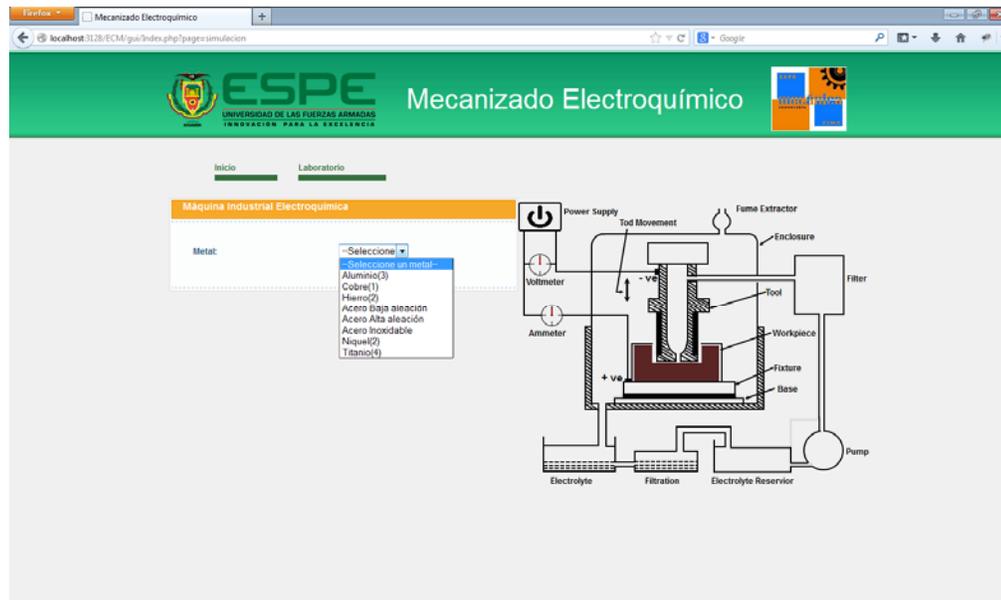


Figura 39. Plataforma Virtual: Simulación

3.3.4. Módulo 4: Solución Electrolítica

3.3.4.1. Preparación y Mezcla del Electrolito

En base a los datos de la Tabla “Electrolitos recomendados para el Mecanizado Electroquímico”, el electrolito que se va a utilizar es el Cloruro de Sodio (NaCl) con una concentración de 300 g/l de agua a temperatura ambiente, para los materiales seleccionados de la pieza de trabajo.

Para la preparación del electrolito se va a utilizar sal doméstica en presentaciones comerciales de 1Kg o 2Kg. La cantidad de electrolito a preparar para la realización de una práctica es de 20 litros, por lo que se debe mezclar 6kg de sal en 20 litros de agua, en un recipiente plástico externo. Para realizar la mezcla del electrolito se puede utilizar un motor eléctrico o hacerlo de forma manual. El motor eléctrico debe acoplarse con una hélice para generar el movimiento del fluido, lo cual no es necesario debido a que la solución no es sobresaturada por lo que sería una inversión innecesaria. El realizar la mezcla de manera manual con una hélice en el recipiente convierte a la práctica más didáctica, involucrando aún más a los estudiantes. Convirtiéndose en la mejor opción para el diseño actual.

3.3.4.2. Reservorio de Electrolito

Los tanques de electrolito pueden fabricarse de resinas epoxi reforzadas con fibra de vidrio o de acero revestido de pvc o caucho. Bajo estas especificaciones el tanque reservorio de electrolito debe ser resistente a la corrosión, para lo cual se utilizó planchas de acero de 2mm de espesor cubiertos con pintura electrostática y recubrimiento interior con Bate Piedra, producto elaborado en base a polímeros emulsionados diseñados para establecer una barrera que impida la acción del agua impermeabilizando y sellando juntas y grietas.

Especificaciones del Producto:

| | |
|-----------------------------|--|
| Color: | Negro |
| Sólido en peso: | 47.8 +/- 1.00% |
| Sólidos en volumen: | 35.3 +/- 1.00% |
| Densidad: | 1.241 +/- 0.03 Kg/l |
| Rendimiento teórico: | 2.5m ² /l a un espesor seco de 5 mils |

Diseño del Reservorio

El tanque reservorio tiene una capacidad máxima de 50 litros, con un diseño sin aristas que ayuda a la limpieza y evitar la acumulación de residuos.

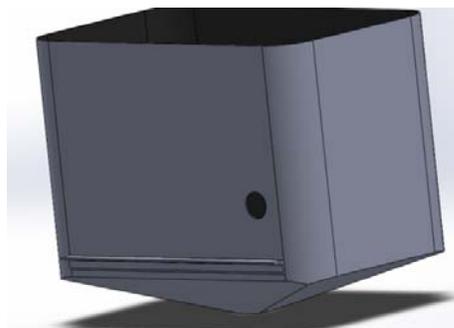


Figura 40. Tanque Reservorio

3.3.4.3. Tanque Recolector de Electrolito

En la celda de trabajo, donde se realiza el maquinado de la pieza se encuentra un tanque de diseño no regular, con una inclinación inferior que permite caer al fluido de manera libre hacia la conexión con la tubería de retorno, consiguiendo un retorno rápido y total de electrolito. El tanque recolector cuenta con las mismas propiedades aislantes que el tanque reservorio.

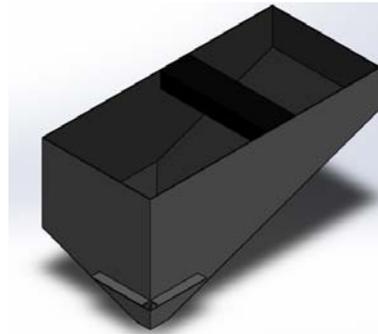


Figura 41. Tanque Recolector

3.3.4.4. Sistema de Filtrado

El sistema de filtrado tiene como objetivo retener cualquier tipo de partículas antes que lleguen a la pieza de trabajo, debido a que una partícula en el fluido se marcará en la superficie mecanizada, obteniendo un mal acabado superficial.

En la maquina se establece dos sistemas de filtrados:

- Sistema de Filtrado a la salida de la bomba
- Sistema de Filtrado de retorno al reservorio

Sistema de filtrado a la salida de la bomba

Para evitar que cualquier tipo de partícula sólida llegue a la salida de fluido electrolítico en la celda de trabajo, se necesita un tipo de filtro de retención más no de purificación de agua. Hay dos tipos de filtros de agua para retención de partículas sólidas: filtros de malla y filtros de disco.

Filtros de Malla

Los filtros de malla sirven para detener el paso de partículas y algunas impurezas del agua, el problema de estos filtros es que si el agua tiene muchas partículas, el filtro se bloqueará provocando pérdida de presión, teniendo que limpiarlo constantemente.

Filtros de Disco

Los filtros de disco por lo contrario no se tapan tan fácilmente, ya que no tienen una malla sino anillos o discos de plástico compactados, por lo que las partículas no se concentran en una sola capa sino en varias. Por lo que es ideal para la aplicación de la máquina de mecanizado electroquímico. El agua es filtrada al pasar por los pequeños conductos formados entre dos anillos consecutivos. Dependiendo del número de ranuras de cada disco varía la calidad del filtrado. La forma de las ranuras no es uniforme, por lo tanto, los pequeños conductos que se forman tienen diferentes secciones y tamaños, logrando una filtración en profundidad, al quedar los sólidos retenidos a lo largo del canal de filtración según su tamaño.

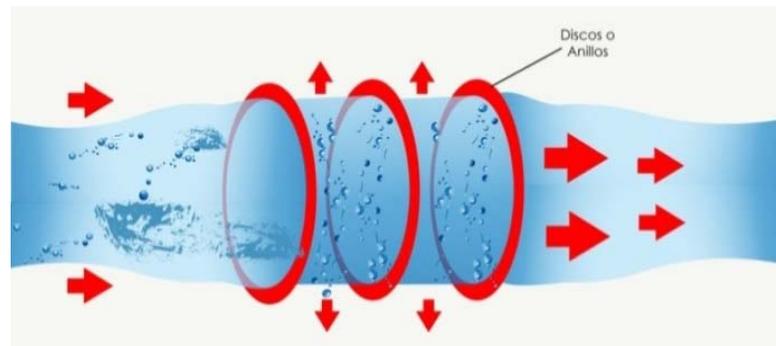


Figura 42. Sistema de Filtrado por Discos

Existen anillos con diferentes tamaños de paso identificado por colores, según la tabla siguiente:

Tabla 7.

Tamaños de Paso en Filtro de Anillos

| Código de Colores | | | | | | |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Código | | | | | | |
| Mesh | 40 | 80 | 120 | 140 | 200 | 600 |
| Micrón | 400 | 200 | 130 | 100 | 55 | 20 |

El tamaño de las partículas que es capaz de retener un filtro de anillos se suele dar por medio del número de Mesh. En este caso el número de Mesh para un filtro de anillos se establece por comparación, asignándole al filtro el número de Mesh correspondiente al filtro de malla que retiene partículas del mismo tamaño.

Filtro de Anillos Seleccionado

Datos Técnicos

| | |
|--------------------------------------|--|
| Diámetro Nominal / Conexión | 1" BSP |
| Caudal Máximo Recomendado | 6m ³ /h - 26gpm |
| Superficie Filtrante (Discos) | 180cm ² – 28in ² |
| Mesh | 120 |
| Material | Polipropileno |

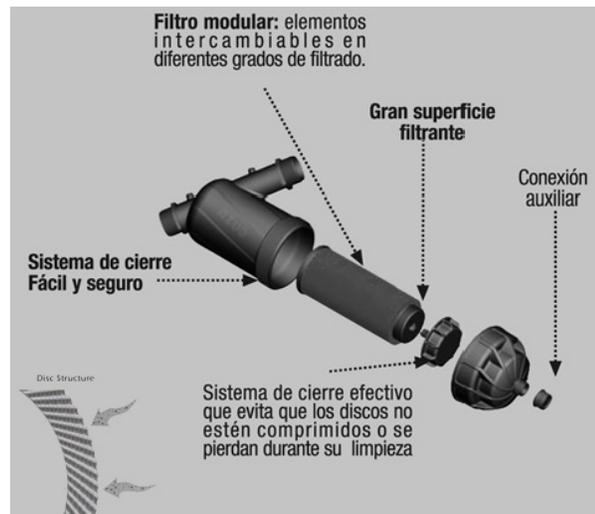


Figura 43. Detalle Filtro de Anillos

Sistema de filtrado en retorno al reservorio

Antes de verter el electrolito en el tanque reservorio es necesario que pase por un sistema filtrado para evitar que partículas de sal sin diluir penetren en el sistema y ocasionen ralladuras en la superficie maquinada. Además se va a colocar el mismo tipo de filtrado en el retorno del reservorio con el objetivo de retener cualquier partícula proveniente de la celda de trabajo como producto del maquinado.

Para este sistema de filtrado se va a utilizar filtros de bolsa que trabajan por el principio de la micro filtración. El líquido es purificado en bolsas pasando a través de poros permeables. Las bolsas de filtros pueden ser usadas para grandes cantidades de agua. Los tamaños de los poros están entre 1-200 micras.



Figura 44. Filtros de Bolsas

3.3.4.5. Control de Nivel de Fluido

Para evitar que la bomba de agua se encienda y trabaje con el reservorio vacío o con poca cantidad de fluido, es necesario colocar un sensor de nivel, que permita el encendido de la bomba únicamente cuando exista electrolito en el tanque reservorio. Existe una gran variedad de sistemas que realizan este control, que pueden ser: sondas de nivel con un controlador, sensores capacitivos conectados a un PLC o un switch de nivel tipo flotador. El requerimiento de sensores convierte al sistema más complejo y costoso, además el ambiente altamente corrosivo donde se van a instalar es una limitación para su instalación, debido a que se requerirá instalaciones extras para protegerlos.

El sistema más adecuado y generalmente usado para el control de fluidos en pozos, canales y recipientes pequeños es un interruptor de nivel tipo flotador. Un interruptor de nivel tipo flotador de plástico presenta resistencia contra el agua contaminada y ventajas como ajuste automático, operación fácil, instalación simple, no necesita mantenimiento ni protección contra el medio ambiente.

Interruptor de nivel Seleccionado

Datos Técnicos

| | |
|-------------------------------|--------------------------|
| Tensión Nominal | 250V (380V) |
| Corriente Nominal | 8A (5A) |
| Temperatura de Trabajo | 0°C – 80°C |
| Presión de Trabajo | Max. 1 bar |
| Resistencia Mecánica | ≥500,000 switch workings |
| Resistencia Eléctrica | ≥100,000 switch workings |
| Conexiones Eléctricas | Común, N.A. y N.C |
| Material | P.P. |



Figura 45. Interruptor de Nivel M15-3

3.3.5. Módulo 5: Sujeción Pieza de Trabajo

Para el soporte de la pieza de trabajo se utiliza un banco de apoyo fabricado en un material no conductor eléctrico de preferencia plástico de manera que no se vea afectado por el paso de corriente con el fluido electrolítico, en el cual se va a conectar el polo positivo de la fuente eléctrica para realizar contacto con la pieza de trabajo y permitir el paso de corriente.

Especificaciones

| | |
|-------------------------------|--------------------------|
| Largo | 100 mm |
| Ancho | 80 mm |
| Distancia entre apoyos | 50 mm |
| Profundidad | 30 mm |
| Material | Duralón - Teconopolímero |

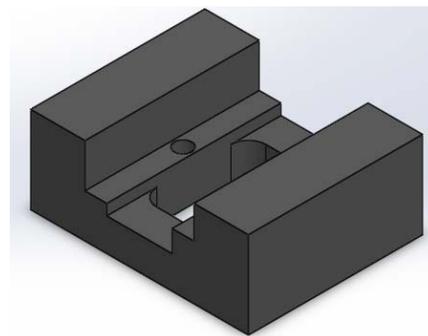


Figura 46. Soporte Pieza de Trabajo

El soporte se va a colocar en una cuba la cual va a ser inundada para realizar el mecanizado. El objetivo de la cuba es mantener inundada la pieza de trabajo para mejorar la eficiencia eléctrica y mantener constante la corriente durante el mecanizado. La cuba debe tener las siguientes características:

Especificaciones

| | |
|-----------------|----------|
| Largo | 260 mm |
| Ancho | 200 mm |
| Alto | 100 mm |
| Material | Acrílico |

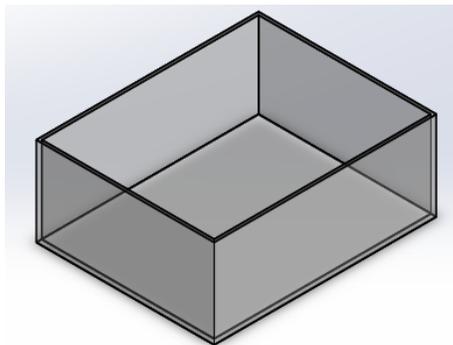


Figura 47. Cuba para Inundación

3.3.6. Módulo 6: Sujeción Electrodo

Para la sujeción de la herramienta de trabajo se utiliza un conjunto de elementos que permitan una buena estabilidad y además el paso de corriente a la herramienta. Éste conjunto de elementos se encuentra conformado por:

3.3.6.1. Mandril Porta Brocas

El diseño del electrodo permite ser sujetado en su mango mediante un mandril porta brocas de apertura y cierre con llaves, este mandril debe tener

características especiales que permitan el paso de corriente, fácil acople en el área de trabajo. El porta brocas cuenta con las siguientes especificaciones:

Especificaciones

| | |
|----------------------------|---------------|
| Marca | T.W. |
| Abertura en mm | 1,5 – 10 |
| Abertura en pulgada | 3/8" |
| Rosca | 3/8" – 24 UNF |
| Material | Acero |



Figura 48. Mandril Porta Brocas

3.3.6.2. Eje para Conexión Eléctrica

Para la conexión del polo negativo de la fuente eléctrica (cátodo), se va a utilizar un eje de acero inoxidable, roscado en la parte inferior para el ensamble con el porta brocas, y perforado en la parte superior para la conexión y sujeción del cable de la fuente de poder.



Figura 49. Eje para Conexión Eléctrica

3.3.6.3. Soporte Porta Herramientas

El soporte porta herramientas es un elemento fabricado en grilón que permite el aislamiento eléctrico, para evitar resistencia eléctrica del cátodo y diseñado con el objetivo de acoplar el porta herramienta a un mecanismo para el avance vertical.

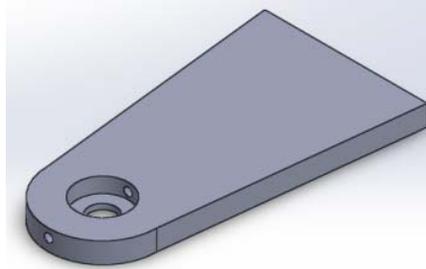


Figura 50. Soporte Porta Herramientas

Conjunto de Sujeción del Electrodo

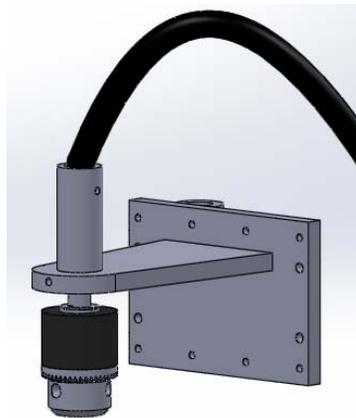


Figura 51. Conjunto de Sujeción Electrodo

3.3.7. Módulo 7: Sistema de Seguridad

La máquina debe contar con un sistema de seguridad para evitar accidentes por contacto eléctrico, debido a que se trabaja con valores de corriente elevados y peligrosos. Existen dos sistemas de seguridad:

- Botones – Pulsadores de paro de emergencia
- Interruptores para puertas de la celda de trabajo

Los botones son paros de emergencia tipo hongo y se van a instalar un botón en el módulo de trabajo y otro en el módulo de control, de las siguientes características:

Especificaciones

| | |
|------------------------------|----------------|
| Contacto | 1NC 10A 400VAC |
| Diámetro Cabezal | 40mm |
| Diámetro de Montaje | 22mm |
| Bisel y Base Metálico | |



Figura 52. Botón Paro de Emergencia Tipo Hongo

Para el sistema de seguridad de las puertas en la celda de trabajo, se puede utilizar sensores inductivos para detectar el cierre de puertas y cerrar el circuito eléctrico, este tipo de sensores presenta la desventaja de poder ser activados fácilmente con la aproximación de cualquier elemento, lo cual es un riesgo para los operarios. También se puede utilizar micro-switch de fin de carrera con palanca para cada puerta, colocados en la parte superior de la cabina de trabajo, los cuales se activan únicamente si las dos puertas están cerradas. Es un sistema electro-mecánico más económico que un sensor inductivo, conexión directa a la red y brinda mayor seguridad para el diseño de la máquina.

Las especificaciones de los micro-switch seleccionados se muestran a continuación:

Especificaciones

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| Soporte | 16A - 125VAC/250VAC |
| Configuración | C – NO – NC |
| No. de Terminales | 3 |
| Largo de la Palanca | 27 mm |
| Rango de Temperatura | -25°C a +80°C |



Figura 53. Micro-switch fin de carrera

3.3.8. Módulo 8: Módulo de Control

El control de los elementos eléctricos de la máquina se va realizar mediante pulsadores ON para encendido y pulsadores OFF para apagado, los cuales se van a instalar en una placa de acero inoxidable que se colocará en el módulo de control. La función de los pulsadores es activar y desactivar los contactores del sistema eléctrico central para el encendido y apagado de los elementos eléctricos que son: fuente eléctrica, bomba de agua y fuente de poder del mecanismo de avance automático.

Los pulsadores presentan las siguientes características:

Especificaciones

| | |
|------------------------------|--------------------|
| Contacto | 1NA + 1NC |
| Diámetro de Montaje | 22mm |
| Voltaje | 120VAC |
| Led Indicador | Rojo, Verde y Azul |
| Base y Bisel Metálico | |

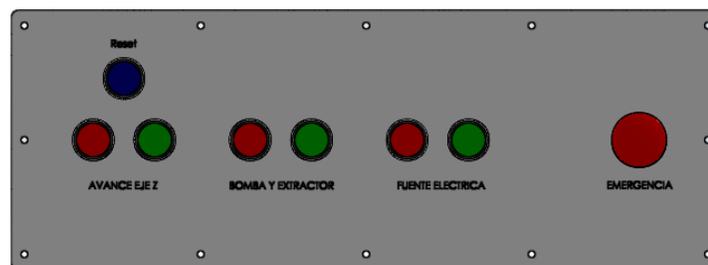


(a) Contacto NA

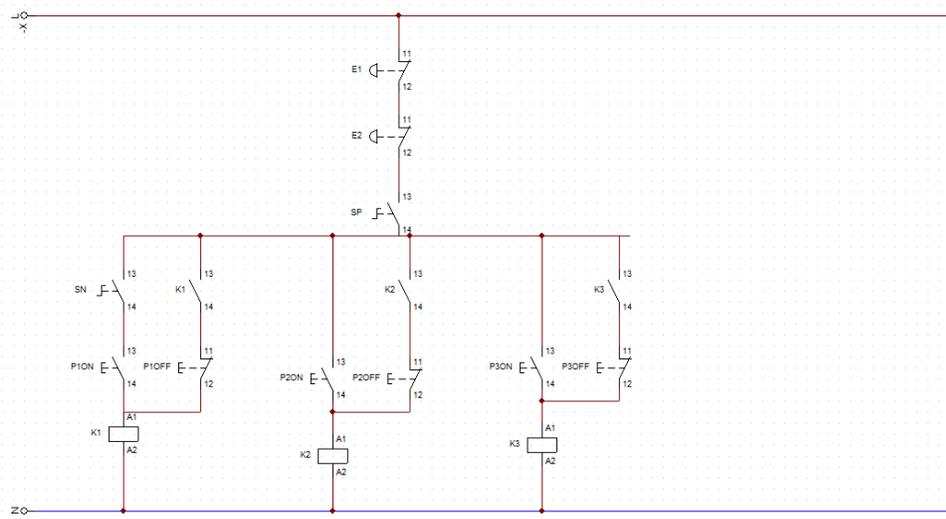
(b) Contacto NC

Figura 54. Pulsadores Iluminados

La placa donde se va a instalar los botones de control va a contener 6 botones pulsadores 3 de encendido y 3 de apagado, además va a contener un botón de paro de emergencia tipo hongo y en la sección de controladores del avance un led indicador de configuración de software.

**Figura 55.** Placa – Módulo de Control

Las conexiones de los pulsadores y paros de emergencia se muestran en el diagrama de control.

**Figura 56.** Diagrama Eléctrico de Control

3.3.9. Módulo 9: Sistema de Avance de la Herramienta

3.3.9.1. Mecanismo de Avance

El mecanismo de avance de la herramienta tiene como objetivo controlar la velocidad de avance y la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo, siendo necesario un conjunto de elementos que garantice su función, el cual está conformado por:

- Placas de PVC de alta densidad de 0,3" de espesor, aislante eléctrico y resistente a la corrosión.
- 2 ejes guías de acero inoxidable
- 4 cojinetes lineales de alta precisión y rigidez
- Tornillo de avance de acero inoxidable M8x1,25
- Tuerca anti-backlash
- 2 rodamientos de bolas de soporte final
- Junta flexible para eje del motor
- Motor para movimiento
- Tuerca final de sujeción del tornillo de avance

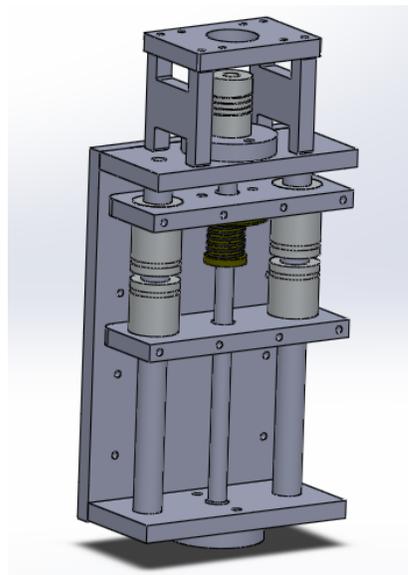


Figura 57. Mecanismo de Avance

3.3.9.2. Controladores

El mecanismo necesita ser acoplado a un motor que genere el movimiento de avance requerido para el sistema, para este tipo de aplicaciones se puede utilizar motores paso a paso o servo motores.

La velocidad es uno de los criterios más importante para elegir entre un servo o motor a pasos. En los motores por pasos existe una relación inversa entre velocidad y torque, cuando la velocidad aumenta el par decrece. Los motores servo tienen un par constante hasta la velocidad nominal. Como criterio general para valores mayores de 1000 rpm, debe seleccionarse un servo motor y si la velocidad es menor a 500 rpm, los motores por pasos son una buena elección porque producen un par más alto que el servomotor de tamaño equivalente. En el aspecto económico los motores por pasos tienden a ser un 10-20% más barato que los servomotores.

Con estas características, la mejor opción para cubrir las necesidades del sistema de avance como son: excelente precisión, velocidad baja, además no se necesita un par elevado debido a que no existe un contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo, es un motor a pasos.

El motor paso a paso seleccionado es un motor marca Probotix, modelo HT23 con 260 pasos por revolución, dando una precisión al mecanismo de 0,0048 mm.

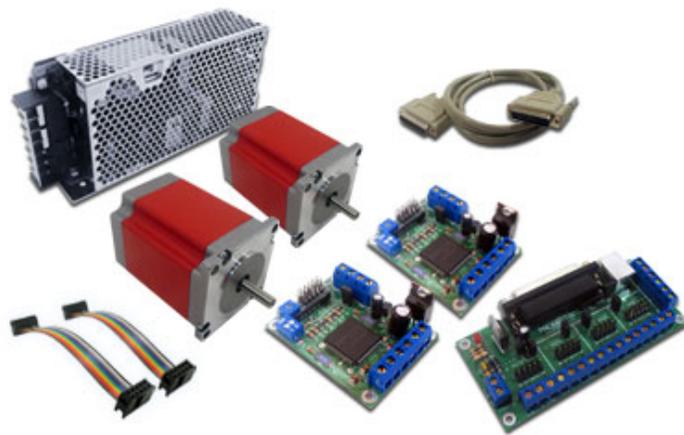


Figura 58. Kit CNC: Controladores y Motores a Pasos

El motor paso a paso posee un controlador modelo SideStep, diseñado para operar motores paso a paso bipolar en su totalidad con capacidad de transmisión de salida de 32V y hasta 2.5 A. Este controlador tiene capacidad de operar en modo lento, rápido y mixto. El controlador presenta el siguiente esquema:

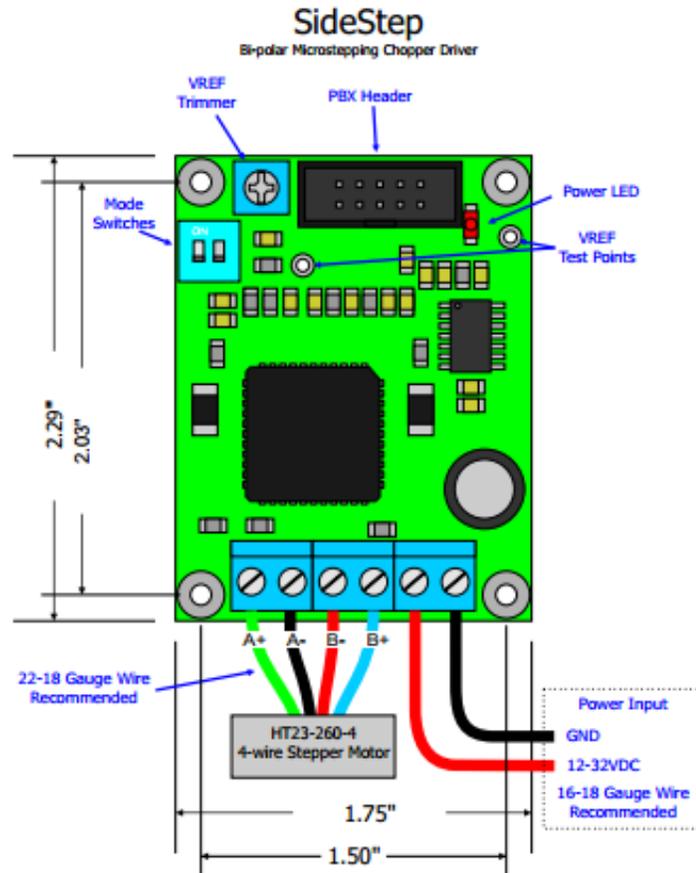


Figura 59. Esquema SideStep

Para su completo funcionamiento, el controlador debe conectarse a un adaptador y una fuente de poder como se muestra en el siguiente diagrama:

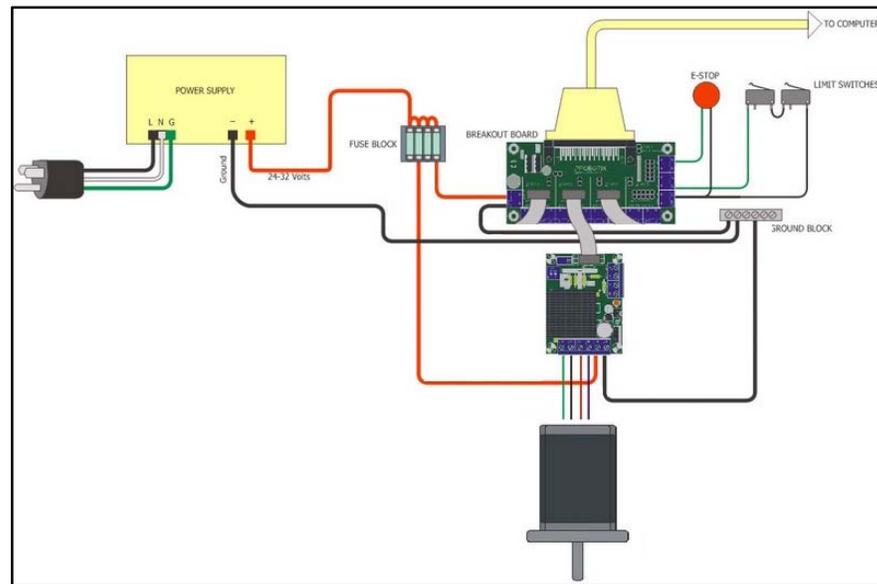


Figura 60. Diagrama de Conexión Controladores

3.3.10. Módulo 10. Sistema Hidráulico y de Extracción

3.3.10.1. Bomba de Suministro de Electrolito

La bomba que suministra electrolito a la celda de trabajo es una parte importante del equipo. Las bombas que dan mejores resultados son las centrífugas, tanto simple como multi-etapas. Las bombas de desplazamiento positivo no son convenientes, debido a su caudal pulsante, excepto un tipo llamado mono-bombas.

La selección de la bomba se ha realizado bajo el criterio de conservación de caudal, lo requerimientos técnicos de la bomba en el mecanizado electro químico viene dado por:

Tabla 8.

Requerimientos Técnicos Bomba

| Bomba centrífuga o mono-bomba | |
|-------------------------------|-----------------------|
| Caudal | 10 a 20 lpm por 100 A |
| Presión | 0.5 a 20 bar |

Con éste parámetro se seleccionó la bomba con las siguientes características:

Marca: Pedrollo

Modelo: Electrobomba Centrifuga CPm 620

Lugar de Fabricación: Italia

Datos Técnicos

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Voltaje / Frecuencia | MONOFÁSICO 110 – 60Hz |
| Potencia | 0,75 kW – 1Hp |
| Caudal | 10 ÷ 100 lpm |
| Altura Manométrica | 34 ÷ 19 m |
| Temperatura máxima | 90 °C |



Figura 61. Bomba PedrolloCPm 620

La misma que tiene la siguiente curva de funcionamiento:

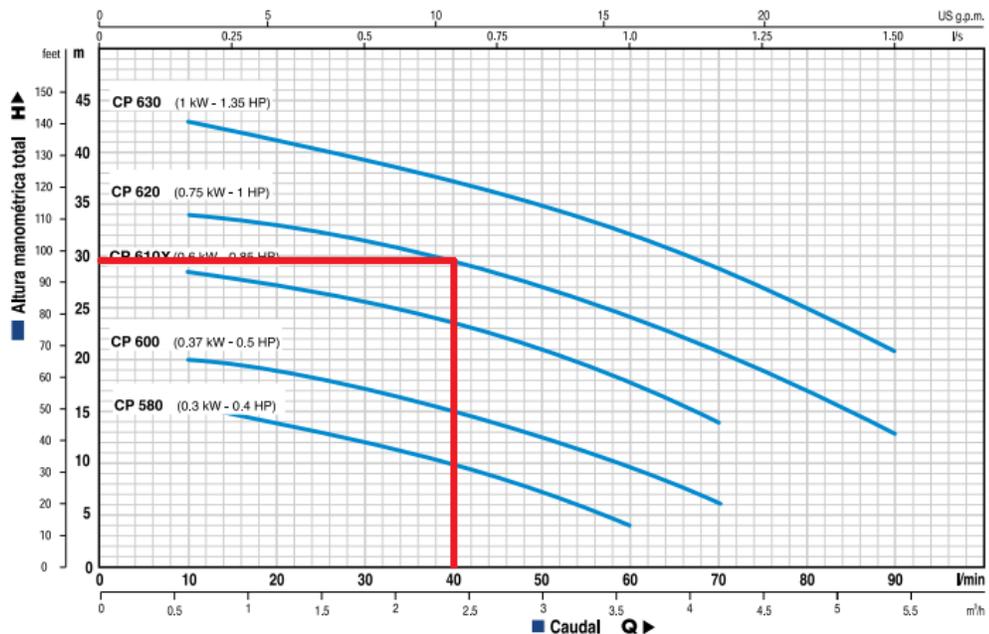


Figura 62. Curva de Funcionamiento Bomba CPm 620

En la curva se puede determinar que al caudal máximo que necesita el proceso de 40 lpm, va a tener una altura manométrica de 30 m. Por lo tanto las características técnicas de la bomba PedrolloCPm 620 serán las siguientes:

Tabla 9.

Resumen de las Especificaciones de la Bomba

| | Valores Máximos | | Requerimientos |
|---------|-----------------|----------------------|---------------------|
| Caudal | 40 lpm | 40 lpm | 10 a 20 lpm por 100 |
| Presión | 30 m | 2,94 bar – 42,67 psi | 0.5 a 20 bar |

3.3.10.2. Control de Caudal

Para mantener un control de los parámetros de operación del proceso de maquinado como el flujo de electrolito, que es un factor determinante en el acabado superficial de la pieza, es necesario contar con un sistema de

control y medición. Existe una gran cantidad de instrumentos y para elegir el instrumento adecuado se debe considerar aspectos como: líquido que se va a utilizar, temperatura de trabajo, caudal de trabajo y presión de trabajo.

Tomando en cuenta los aspectos de trabajo como fluido electrolito (altamente corrosivo), temperatura máxima de trabajo de 35°C y un caudal máximo de 40lpm si es requerido. La mejor solución es utilizar un caudalímetro, entre los cuales se pueden seleccionar caudalímetros de área variable (rotámetros), caudalímetros ultrasónicos o caudalímetros magnéticos.

El rotámetro o caudalímetro de área variable consiste un tubo cónico y un flotador. Es el más utilizado debido a su bajo coste, sencillez, baja caída de presión y rango relativamente amplio. Un caudalímetro ultrasónico (no intrusivo o Doppler) se utiliza generalmente en aplicaciones de aguas sucias o mezclas que causan daño en los sensores convencionales como obstrucción o deterioro acelerado. Por su parte un caudalímetro magnético no tiene partes móviles y son ideales para aplicaciones de aguas sucias o cualquier líquido conductor en tubos grandes de serie de 2" NPT.

El medidor de caudal que se va a utilizar en el sistema hidráulico, es un rotámetro con las siguientes características:

| Especificaciones | |
|-----------------------|------------------------------|
| Rango | 0,25 – 2.5 m ³ /h |
| Conexión | ¾" NPT |
| Flotador | PVDF con imán |
| Longitud | 220 mm |
| Instalación | Vertical |
| Conexiones PVC | |

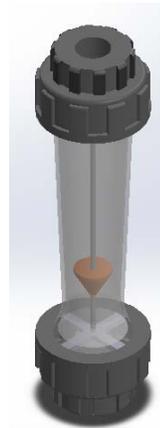


Figura 63. Caudalímetro de Área Variable

3.3.10.3. Sistema de Tubería y Accesorios

El sistema de transporte para el fluido electrolítico, se va a realizar con tubería PVC roscable, 360 psi norma INEN ASTM D-1785 de 1" y accesorios de su misma línea.

Accesorios Utilizados:

| Cant. | Descripción |
|-------|---------------------------------|
| 2 | Válvula de Bola Compacta PVC 1" |
| 1 | Adaptador para Tanque 1" |
| 12 | Codo 90° |
| 3 | Tee 1" |
| 2 | Bushing 1" x 1/2" |
| 9 | Neplo Corrido 1" |
| 1 | Válvula de Pie 1" C/C plástica |
| 1 | Válvula Check PVC 1" |
| 2 | Unión 1" |
| 1 | Unión Universal |



Figura 64. Sistema de Tubería y Accesorios

3.3.10.4. Sistema de Extracción

El proceso de maquinado electroquímico genera hidrógeno, por lo cual es necesario su extracción. En una instalación de 10000 A se necesitan al menos 1740 m³ de aire por hora, para reducir la concentración de hidrógeno aniveles no peligrosos.

Cálculos de Extracción:

Corriente máx: 100 Amp

Requerimiento: 1740 $\frac{m^3}{h}$ en 10000Amp

$$\text{Caudal de Extracción: } 100 \text{ Amp} * \frac{1740 \frac{m^3}{h}}{10000 \text{ Amp}} = 17,4 \frac{m^3}{h}$$

El caudal mínimo de extracción necesario es de 17,4 m³/h, bajo este requerimiento se determinó un extractor con las siguientes características:

Extractor con cuerpo y hélice de material plástico (ABS Poliester) resistente a la corrosión, equipado con protector térmico para trabajar a temperatura hasta 40°C y con fácil instalación a pared.

Marca: Cata

Modelo: B-10 MATIC

Datos Técnicos

| | |
|--------------------------------|----------------------|
| Capacidad de Extracción | 98 m ³ /h |
| Diámetro | 4" |
| Alto | 140 mm |
| Ancho | 140 mm |
| Fondo | 98 mm |
| Tensión | 110 V |
| Velocidad | 2500 r.p.m. |



Figura 65. Extractor CATA B-10

3.3.11. Módulo 11: Fuente Eléctrica

El proceso de maquinado electroquímico se caracteriza por que tanto la energía eléctrica como la química son los filos cortantes de la herramienta. Además se diferencia de los procesos de electro mecanizado porque utiliza corriente continua de alta intensidad (Amperaje) conectado entre la herramienta (cátodo "+") y la pieza de trabajo (ánodo "-"), que circula a través de un fluido electrolítico. Los valores operacionales del proceso presentan un amplio rango de intensidad de corriente a utilizar para el

proceso, por lo cual la fuente de poder es el parámetro fundamental para establecer la capacidad de trabajo de la máquina.

Básicamente existe dos opciones que cumplen con los requisitos que la fuente de poder requiere, estas son: un transformador y una máquina soldadora:

- Un transformador, presenta la ventaja que puede ser construido específicamente para el funcionamiento de la máquina con los elementos e intensidad de corriente requeridos, el inconveniente que presenta es su elevado costo de fabricación.
- Una máquina soldadora se caracteriza por ser una fuente de poder con valores elevados de corriente existentes en una gran variedad de modelos, capacidades de trabajo, tecnologías utilizadas y costos más bajos que un transformador.

Tecnología Inverter

La tecnología actual en soldadura es el sistema INVERTER, esta tecnología es un sistema de control y cuando se aplica a la soldadura hace posible desarrollar fuentes de alimentación que son compactas debido a que usa componentes electrónicos para producir mayores frecuencias dentro del transformador, por lo cual tienen bajo consumo de energía y también hace posible un mayor control del proceso de soldadura. En comparación con una soldadora tradicional, una soldadora inverter pesa mucho menos y permite un mayor rendimiento energético. Un equipo de soldadura con tecnología inverter es un aparato que proporciona una única fuente de alimentación que es capaz de proporcionar una corriente de alta frecuencia. El funcionamiento de una soldadora inverter es muy simple, la soldadora utiliza una serie de rectificadores e interruptores de estado sólido para convertir 60 Hz de corriente alterna (CA - que es el corriente de entrada) en alta frecuencia de corriente continua (CC - que es el corriente de salida). La cantidad de corriente continua y voltaje disponible durante el proceso de soldadura es controlando por software. Una soldadora tradicional utiliza un transformador

que tiene un núcleo de hierro para convertir 60 Hz bajo amperaje (alta voltaje de CA) en 60 Hz alta amperaje (bajo voltaje de CA). Después, utiliza un rectificador para convertir CA en CC. Alternativamente, una soldadora inverter utiliza un rectificador para convertir la entrada de 60 Hz CA en 60 Hz CC.

Detalles del equipo

Para la selección de la fuente eléctrica de la máquina se ha establecido una máquina soldadora con tecnología inverter, de las siguientes características:

SOLDADORA INVERTER

Marca: TEKNOPRO

Modelo: I 10250/220M

Lugar de Fabricación: China

Datos Técnicos

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Voltaje / Frecuencia | MONOFÁSICO 220V – 60Hz |
| Potencia | 6500W |
| Capacidad de electrodo | 2,5 – 5,0 mm |
| Rango de Amperaje | 20 – 250 A |
| Aislación | CLASE I |
| Peso | 8 Kg – 17,6 lb |

Rangos de Operación

| | | |
|---------------------------|-------|-------|
| Factor de Potencia | 0,93 | |
| Ciclo de Trabajo | 80% | 100% |
| Amperaje | 250 A | 222 A |
| Voltaje | 30 V | 29 V |

Características:

- TURBO VENTILADA – alta eficiencia en la refrigeración.
- Regulación de amperaje de infinitos puntos intermedios.
- Protegida por fusible térmico de corte y reinicio automático.
- Tecnología IGBT (del inglés, InsulatedGate Bipolar Transistor): el transistor bipolar de puerta aislada es un dispositivo semiconductor que se aplica como interruptor controlado en circuitos electrónicos de alta potencia.



Figura 66. Soldadora Inverter TEKNOPRO

Control de Corriente

Como parte de la fuente eléctrica, la máquina cuenta con un amperímetro analógico de corriente continua instalado en el módulo de control, que permite visualizar el valor de corriente con el cual se está trabajando.

Especificaciones

| | |
|-----------------------|----------------------------------|
| Medida en C.C. | 0 – 200 A |
| Clase | 1.5%, 90°, vidrio antirreflexivo |
| Conexión | A través de Shunt |



Figura 67. Amperímetro DC Analógico

Sensor para Amperímetro

La conexión del amperímetro se debe realizar a través de shunt que es un sensor para amperímetros, consiste en resistencia a través de la cual se deriva la corriente eléctrica. La resistencia Shunt amplía la escala de medición, es conectada en paralelo al amperímetro y ahorra el esfuerzo de tener otros amperímetros de menor rango de medición a los que se van a medir realmente.

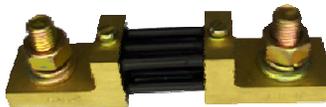


Figura 68. Shunt 50 – 250A

3.3.12. Módulo 12: Limpieza

La limpieza completa de la máquina se realiza de manualmente por parte del usuario. El diseño de la tubería y tanques de electrolito se han diseñado de manera que permitan la limpieza del sistema con una manguera instalada a la red de agua. Una vez culminado el proceso de mecanizado se debe vaciar todo el electrolito del sistema y llenar el tanque reservorio con agua limpia, para hacerla circular por todo el sistema hidráulico permitiendo la limpieza de la tubería, accesorios y elementos.

En el área de trabajo es necesario limpiar la superficie horizontal y la cabina de vidrio. Además es necesario realizar la limpieza de la cuba y

soporte de la herramienta. Para el sistema de avance de la herramienta es necesario limpiar con un paño húmedo y engrasar todo el mecanismo.

3.4. Planos

Los planos y modelados 3D de la máquina para mecanizado electroquímico se encuentran en el Anexo C.

3.4.1. Estructura Módulo de Trabajo

3.4.2. Estructura Módulo de Control

3.4.3. Electrodo

3.4.4. Soporte Electrodo

3.4.5. Acople Motor Paso a Paso

3.4.6. Soporte Porta Herramienta

3.4.7. Soporte Pieza de Trabajo

3.4.8. Tanque Recolector

3.4.9. Tanque Reservorio

3.4.10. Placa Pulsadores

3.4.11. Ensamble 3D Módulo de Trabajo

3.4.12. Ensamble 3D Módulo de Control

3.4.13. Ensamble en Conjunto

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE LA MÁQUINA

4.1. Planificación de la Manufactura

El desarrollo de la máquina para mecanizado electroquímico se programó para un tiempo de 3 meses 15 días, en lo que está contemplado la construcción de la estructura de la máquina, instalación de los sistemas hidráulico, eléctrico y fuente de poder, acabados de la máquina y pruebas de funcionamiento, con un protocolo para el afinamiento del proceso. En la tabla 10 se observa la planificación del proceso de manufactura.

Tabla 10.

Planificación De La Manufactura

| MÁQUINA PARA MECANIZADO ELECTROQUÍMICO | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|----------------------------------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|
| ACTIVIDADES | TIEMPO | CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | dic-13 | | | | ene-14 | | | | feb-14 | | | | mar-14 | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. CONSTRUCCIÓN ESTRUCTURA | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1. Área de Trabajo | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1.1 Corte de Material | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1.2 Ensamble Área de Trabajo | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1.3 Masillado y pulido de las estructura | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1.4 Recubrimiento Área de Trabajo Con planchas | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1.5 Reservorio y Tanque de deposito | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.2. Área de Control | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.2.1 Corte de Material | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.2.2 Ensamble Área de Trabajo | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.2.3 Masillado y pulido de las estructura | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.2.4 Recubrimiento Área de Trabajo Con planchas | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.3. Pintado al Horno, puertas y acabados | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. SISTEMA HIDRAULICO | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.1. Construcción, Ensamble y Pruebas | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Continua 

1.4. 5 Discos de Feldespato

1.5. 1/2 Galón de Masilla Mustang

1.6. 6 Planchas de 1.2 mm

2. SISTEMA HIDRAULICO

2.1. Materiales

2.1.1. 2 Tubería Roscable PVC 1"

2.1.2. 3 Tee

2.1.3. 12 Codos

2.1.4. 9 Niple Corrido

2.1.5. 2 Unión de 1"

2.1.6. 1 Adaptador para Tanque

2.1.7. 1 Válvula de pie

2.1.8. 1 Válvula Check

2.1.9. 1 Caudalímetro

2.1.10. 1 Filtro de anillos

2.1.11. 2 Bushing 1"-1/2"

2.1.12. 2 Mangueras 1/2"

2.1.13. 2 Válvula de Bola Compacta PVC 1"

2.1.14. 20 Teflón y 2 Permatex

2.1.15. Bomba Pedrollo 1HP

2.1.16. 1 Unión Universal

Continua 

3. SISTEMA ELECTRICO

3.1. Materiales

3.1.1. 3 Pulsadores ON

3.1.2. 3 Pulsadores OFF

3.1.3. 1 Pulsador Azul Indicador

3.1.4. 3 Contactores

3.1.5. 2 Interruptores tipo hongo Emergencia

3.1.6. 1 Luz giratoria

3.1.7. 1 Interruptor Encendido Central

3.1.8. 1 Extractor

3.1.9. 1 Kit Controladores Motor Paso a Paso

3.1.10. 2 Fines de Carrera

3.1.11. 1 Sensor de nivel

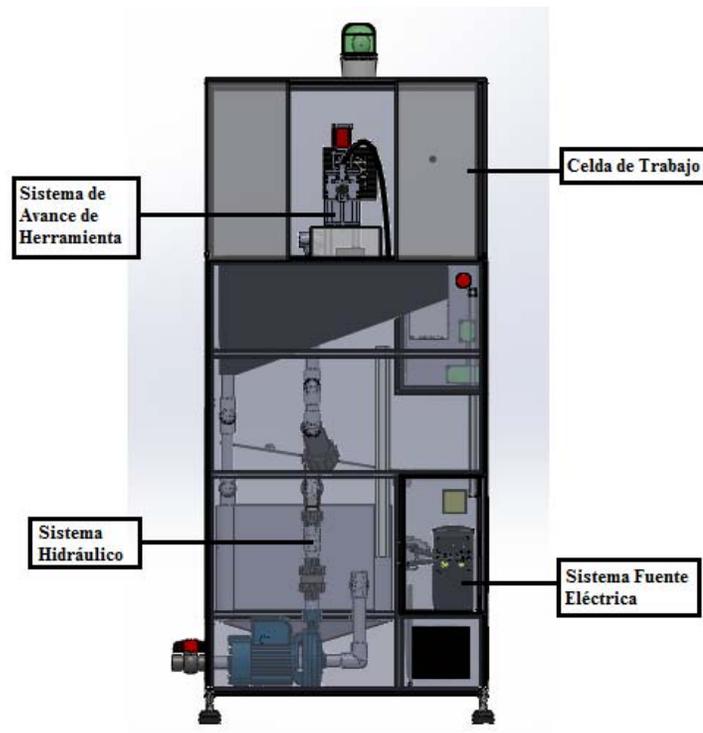
3.1.12. 1 Sensor de nivel

4. SISTEMA DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA

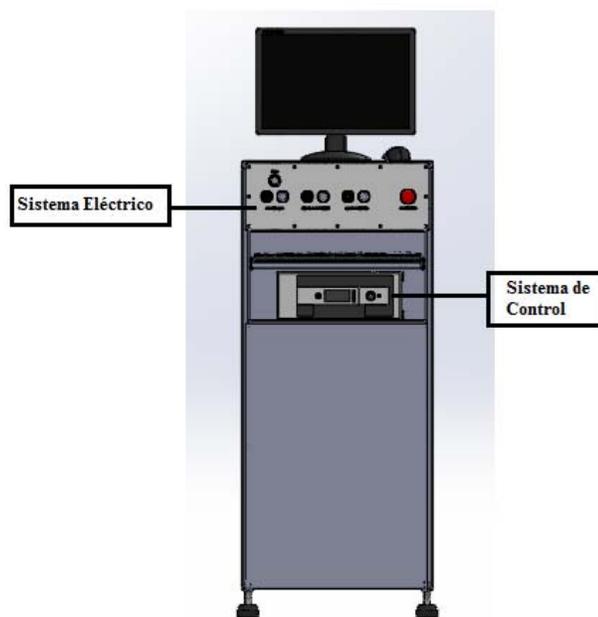
4.1. Materiales

4.1.1. Mecanismo de avance Eje Z

La máquina de mecanizado electroquímico tiene un esquema que permite de una manera fácil y didáctica la interacción con el operario. Consiste en 2 módulos, los cuales son: el módulo de trabajo y el módulo de control. Como se muestra a continuación.



(a)



(b)

Figura 69. Esquema de la Máquina de ECM

a) Módulo de trabajo; b) Módulo de control

4.2.1. Estructura

La estructura es la encargada del soporte de los elementos y los sistemas de la máquina, está fabricada con tubos cuadrados de 1 pulg x 1.2mm, y recubierta con Tol galvanizado de 1.2 mm con pintura electrostática para evitar la corrosión. También posee 4 patas niveladoras en cada módulo para poder nivelar la máquina. El módulo de trabajo tiene una altura total de 1.75m de alto, y 1.25m hasta el área de trabajo. El segundo, módulo de control tiene una altura de 1.20m y una distribución como se muestra en la figura.

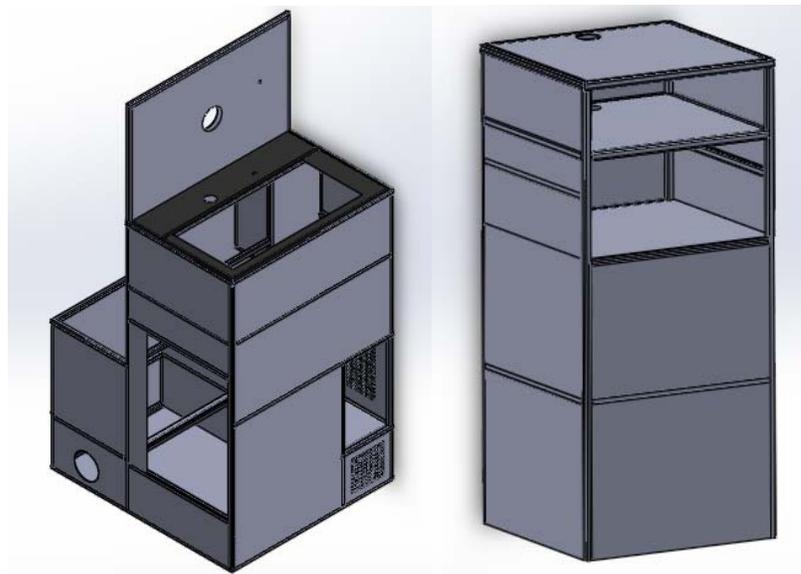


Figura 70. Módulos de trabajo y control.

4.2.2. Área De Trabajo

El área de trabajo se encuentra cubierta por una cabina de vidrio de 6mm de espesor, para poder visualizar y aislar el proceso, la misma que está sujeta con perfiles F de aluminio y atornillado a la estructura, el vidrio superior se encuentra soportado por los vidrios laterales y adherido con silicón transparente, cada puerta de vidrio está sujeta con bisagras para montaje en superficie, una superior y una inferior, además se encuentran selladas con un perfil de plástico.

En el área de trabajo se encuentra la cuba para la inundación, el soporte de la pieza de trabajo, el sistema de avance y el elemento de sujeción de la herramienta, la extracción de hidrógeno producto de la electrólisis, el ingreso de suministro de electrolito y el ingreso de los cables de conexión de la fuente eléctrica. La cuba es fabricada en láminas de acrílico transparente, con un espacio suficiente para el soporte de la pieza de trabajo y poder manipular la sujeción de la herramienta. El soporte de la pieza es fabricada en duralón un tecnopolímero (Nylon de alto peso molecular), el mismo que es resistente a la corrosión y no es conductor eléctrico, su función es solo sujetar la pieza a mecanizar. El sistema de avance de la herramienta está sujeto a la estructura por medio de un pórtico soldado directamente a ella, está fabricado en PVC de alta densidad y los ejes de acero inoxidable igual que el tornillo de avance, la junta al motor paso a paso es de aluminio asegurando de esta manera que no se corroa nada del sistema. La sujeción de la herramienta es por medio de un mandril porta brocas de hasta 10mm de apertura. El sistema de extracción de hidrógeno se encuentra ubicado en la cara posterior de la parte superior con una perforación de 10 pulgadas. El suministro de electrolito llega al área de trabajo por medio de 2 mangueras de ½ pulgada rígidas de plástico. Los cables de la fuente eléctrica llegan a área de trabajo el cátodo por la parte superior del soporte de herramienta, y el ánodo por la parte inferior y se sujeta a la pieza de trabajo por medio de una masa de acero inoxidable la cual va sujeta por una abrazadera, si no existiera éste elemento, dentro de la cuba no existiría un cierre de circuito y por lo tanto no existiese el mecanizado.



Figura 71. Área De Trabajo

4.2.3. Sistema Hidráulico (Electrolito)

El sistema hidráulico o suministro de electrolito consiste en un tanque reservorio, un tanque de depósito, una bomba de fluido, una válvula de pie, una válvula check, un caudalímetro, un filtro de anillos, dos mangueras plásticas rígidas, una llave de media vuelta para regulación de caudal y una llave de media vuelta para desfogue del reservorio.

El sistema de suministro de electrolito es crucial en el proceso, porque de este depende el acabado final de la pieza a maquinar, para lo cual se debe tener un flujo constante y uniforme en la herramienta de trabajo (electrodo), una temperatura entre 15 y 35°C. El tanque reservorio tiene una capacidad de 50 litros, fabricado en planchas de acero de 2 mm, con pintura electrostática y recubierta internamente con aislante bate piedra para evitar la corrosión, geoméricamente no posee aristas para que no exista acumulamiento de residuos o lodos. El tanque de depósito se encuentra en el área de trabajo, sirve para recoger el electrolito después de maquinar y retornarlo al reservorio, es fabricado con las mismas características que el tanque reservorio. El sistema posee una bomba centrifuga para poder mantener el caudal constante, de 1 Hp monofásica 110V, con una capacidad de caudal de 10-100 lpm, altura manométrica de 34-19 m y una temperatura máxima de trabajo de 90°C. Como sistemas de seguridad de la bomba, posee un interruptor de nivel, una válvula de pie en la absorción y una válvula check en el desfogue. Para controlar el caudal se cuenta con un caudalímetro de capacidad 0.25 a 2.5 m³/h (4-40 lpm), el cual se regula por medio de un bypass. Para evacuar el electrolito del sistema, en la parte inferior del reservorio existe una llave de media vuelta. Para el filtrado se utiliza un filtro de anillos de 1 pulgada con capacidad de 200 micrones de filtrado y caudal máximo de 40 lpm. Todo el sistema de la circulación es en tubería roscable de PVC de 1 pulgada de diámetro, como se muestra a continuación.

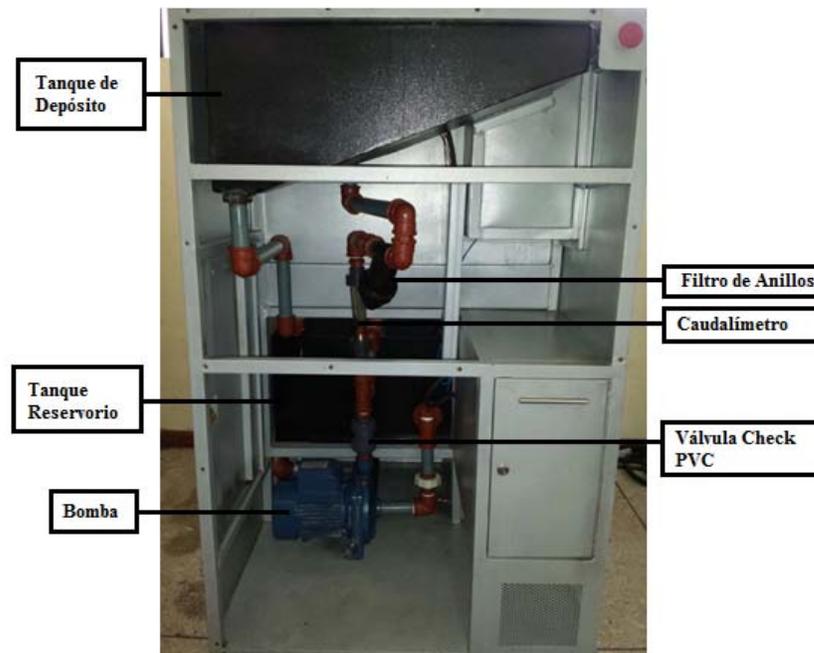


Figura 72. Sistema Hidráulico

4.2.4. Sistema de Fuente Eléctrica

El proceso de mecanizado electroquímico trabaja en rangos desde 10 a 5000 amperios. El objetivo es buscar la fuente que más amperaje ofrezca con corriente continua para trabajar mayores áreas en menor tiempo. El sistema eléctrico consiste en una fuente eléctrica, cable de soldadura #2 para el ánodo y el cátodo, un shunt y un indicador análogo para medición del amperaje. El proceso trabaja con valores altos de amperaje en corriente continua, siendo el positivo (ánodo) la pieza de trabajo y el negativo (cátodo) la herramienta. La fuente eléctrica que se utiliza es una soldadora TIG tipo inverter con capacidad de 250 amperios, los cables #2 con capacidad para 250 amperios.



Figura 73. Sistema De Fuente Eléctrica

4.2.5. Sistema Eléctrico y de Control

El sistema eléctrico o sistema de poder de la máquina se encuentra en el módulo de trabajo y cuenta con componentes electromecánicos como son: contactores, disyuntores y un selector ON/OFF, para conectar los componentes eléctricos de la máquina, la selección de estos elementos se realizó de acuerdo al consumo de corriente. La conexión central es de 220V bifásica, de la cual se distribuye 110V para las tarjetas del motor paso a paso, la bomba de agua y ventilador y 220V para la fuente eléctrica.



Figura 74. Sistema Eléctrico Central

El sistema de control cuenta con pulsadores ON y pulsadores OFF con señal luminosa led, sujetas en una placa de acero inoxidable, para el encendido y apagado de los componentes eléctricos. Las conexiones de este sistema se encuentran en el módulo de control y se conectan a través de cables cubiertos por manguera de protección al módulo de trabajo, a través de tres conectores de 6 pines. El sistema eléctrico de control se muestra a continuación.



Figura 75. Sistema De Control

4.2.6. Sistema de Avance de la Herramienta

El sistema de control de avance de la herramienta está guiado por medio de un motor paso a paso para poder controlar la velocidad de avance de la herramienta durante el proceso de mecanizado, para esto posee un mecanismo con dos ejes, 4 rodamientos lineales, un tornillo sin fin, una junta flexible, 2 rodamientos, soporte de la herramienta y un computador. Todo el mecanismo de avance de la herramienta está fabricado con acero inoxidable los ejes, tornillo, junta y rodamientos; los soportes del mismo son de PVC de alta densidad. Se encuentra sujetado a la máquina por un pórtico empotrado al área de trabajo. La conexión desde las tarjetas de control de motor paso a paso ubicadas en el área de trabajo y el área de control es por medio de un

cable DB25. El computador tiene instalado el programa MACH 3 DEMO, el mismo que sirve para el control automático del avance.



Figura 76. Sistema De Avance De La Herramienta

4.2.7. Sistema de Seguridad

El sistema de seguridad tiene como objetivo salvaguardar la integridad física del operario y de los elementos eléctricos. Para el cuidado del operario la máquina cuenta con 2 botones de emergencia ubicados en el área de trabajo y en el área de control, dos fines de carrera en las puertas, de tal manera que de no estar perfectamente cerradas el sistema no se energiza; en caso de apertura de puerta o accionamiento de los botones de emergencia, se corta la corriente para la bomba, control de avance de la herramienta y la fuente eléctrica.



Figura 77. Sistemas De Seguridad

Como sistemas de seguridad en los equipos, la fuente eléctrica cuenta con un sistema propio de seguridad con una luz indicadora de temperatura elevada y apagado automático. La bomba posee un sistema de seguridad con un interruptor de nivel tipo flotador que en el caso de tener el nivel de agua inferior al necesario la bomba se apaga y no se acciona hasta que se nivele el electrolito en el reservorio.



Figura 78. Sistema De Seguridad De La Bomba

4.3. Pruebas De Funcionamiento

El proceso de mecanizado electroquímico tiene 6 parámetros importantes que son: la intensidad de corriente eléctrica, la forma geométrica a mecanizar, la concentración de electrolito, la distancia entre cátodo y ánodo, el caudal y la velocidad de avance de la herramienta. La intensidad de corriente se mantiene constante en 75 amperios durante el proceso, puesto que el aumento de la misma genera sobrecalentamiento en la fuente eléctrica. Para evitar esto, también se restringe las dimensiones de la pieza de trabajo, a placas de 50x50x1.2 mm. Otra característica del proceso es que se realiza con la pieza de trabajo inundada, de esta manera la eficiencia de corriente eléctrica de la fuente es de 83% y el control del flujo laminar del electrolito es mayor.

En el protocolo de pruebas se analiza cada una de las variables que afectan al proceso. La primera variable a analizar es la forma geométrica. Para la primera prueba realizada, se mantuvo constante el caudal en 0.5 m³/h, sin avance del electrodo y un tiempo de maquinado de 1 minuto. Con esto se busca determinar cuál es el mejor método para maquinar la forma geométrica deseada. Inicialmente se maquinó directamente un electrodo

circular sobre una placa. Se generó muchas salpicaduras, un bajo acabado y mala precisión en la forma geométrica, como se muestra en la figura 79 (a). Luego se procedió a utilizar un restrictor, el cual consiste en una pieza realizada en duralón, con la forma geométrica deseada. Se realizó un restrictor con forma circular, el resultado mejoró, se eliminaron las salpicaduras pero la forma obtenida no era exacta, tomada la forma del restrictor, con baja precisión, como se muestra en la figura 79 (b). Por último se utilizó papel contact, de tal manera que se protegía totalmente a la placa de las salpicaduras y solo mecaniza el área expuesta al fluido electrolítico. El resultado fue el óptimo, se mecaniza únicamente el área libre del papel contact y el resto que se encontraba cubierto no se afectaba superficialmente como se muestra en la figura 79 (c). Con este método se consigue realizar cualquier forma geométrica sea para perforación o para molde.



(a)



(b)



(c)

Figura 79. FORMA GEOMÉTRICA;

- a) Mecanizado directo; b) Mecanizado con restrictor; c) Mecanizado con papel contact

El siguiente parámetro a considerar es el fluido electrolítico, que tiene como función aumentar la eficiencia de transferencia eléctrica. La elaboración del electrolito consiste en la mezcla de agua con NaCl (sal). La teoría indica que es recomendable el uso de 100 a 500 g/l. [4]. La primera prueba realizada se utilizó un electrolito con una concentración de 100g/l, con una corriente máxima de 35 amperios como resultado. Se subió la concentración a 500 g/l, consiguiendo una corriente de 75 amperios pero una solución sobresaturada. La siguiente prueba se realizó una solución saturada, la cual fue con una concentración de 300g/l y se consiguió una corriente de 75 amperios, siendo de ésta manera 300g/l la concentración óptima de mecanizado.

Para determinar el siguiente parámetro, la distancia optima entre el ánodo y cátodo, se mantuvo constante el caudal en 0.5 m³/h, sin avance del electrodo y un tiempo de maquinado de 1 minuto, para buscar obtener un buen acabado superficial. Las pruebas se realizaron a 0.5, 2, 3, 4, 5 y 6 milímetros de distancia. A 0.5 mm no maquinó toda el área, únicamente lo más cercano al electrodo como muestra la figura 80 (a). A 2, 3, 4 y 5 mm se generaban cavitaciones en la pieza de trabajo, aunque buen acabado, esto se generó por una turbulencia en el fluido y una falta de maquinado en todo el área de trabajo de la pieza como se muestra en la figura 80 (b). A 6 mm de distancia se obtuvo un acabado superficial perfecto y un maquinado de toda el área, como se muestra en la figura 80 (c) siendo 6 mm la distancia óptima de mecanizado.



(a)



(b)



(c)

Figura 80. Distancia Óptima De Maquinado

a) A 0.5 mm; b) A 2, 3, 4 y 5 mm; c) A 6 mm

Para determinar el caudal óptimo se mantuvo constante la distancia entre electrodos de 6mm, la concentración del electrolito en 300 g/l., sin avance del electrodo y un tiempo de maquinado de 1 minuto.

Las pruebas se realizaron a 0.5, 0.75 y 1 m³/h. A 0.5 m³/h se obtuvo un acabado muy bueno y cubrió todo el área de maquinado, como se muestra en la figura 81 (a). A 0.75 m³/h comenzó a existir mucha porosidad por turbulencia del fluido como se muestra en la figura 81 (b), y estas porosidades fueron más evidentes al probar un caudal de 1 m³/h como se indica en la figura 81 (c).

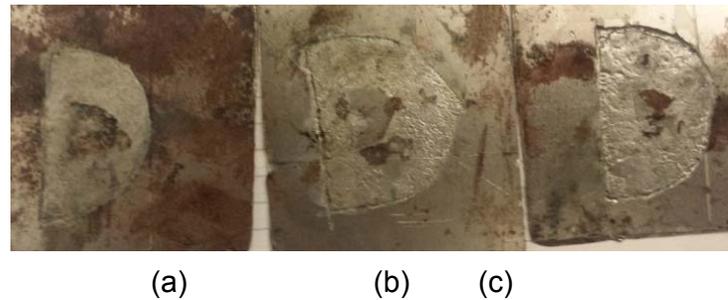


Figura 81. Caudal Óptimo

a) A 0.5 m³/h; b) A 0.75 m³/h; c) A 1 m³/h

El siguiente parámetro que a determinar es la velocidad de avance del electrodo, para lo cual se necesita saber la velocidad de remoción específica del material (MRR) [5]. La misma que se muestra en la tabla 1.

| Material de Trabajo | Velocidad de remoción específica C | |
|---------------------|--|--|
| | <i>pulg</i> ³ / <i>A</i> – <i>min</i> | <i>cm</i> ³ / <i>A</i> – <i>seg</i> |
| Aluminio (3) | 1,26E-04 | 3,44E-05 |
| Cobre (1) | 2,69E-04 | 7,35E-05 |
| Hierro (2) | 1,35E-04 | 3,69E-05 |
| Aceros | | |
| De baja aleación | 1,10E-04 | 3,00E-05 |
| De alta aleación | 1,00E-04 | 2,73E-05 |
| Inoxidable | 9,00E-05 | 2,46E-05 |
| Niquel (2) | 1,25E-04 | 3,42E-05 |
| Titanio (4) | 1,00E-04 | 2,73E-05 |

Cada material cuenta con una velocidad de remoción distinta y por lo tanto la velocidad de avance es distinta para cada material. Para esto se utiliza una plataforma virtual, en la que se ingresa los parámetros necesarios para determinar la velocidad de alimentación de la herramienta, lo cuales son: selección del metal a maquinar, selección de la unidad de velocidad de remoción (automáticamente muestra la velocidad de remoción específica), se ingresa la corriente, el área de maquinado, profundidad de maquinado para moldes o espesor de la placa para perforación. Al ingresar estos parámetros muestra la velocidad de remoción ideal, y la velocidad de

remoción real dada por la eficiencia de la fuente eléctrica y el tiempo requerido para el maquinado. La plataforma da la facilidad de ver una simulación del proceso de mecanizado electroquímico, también cuenta con la opción de generar un reporte en formato PDF, en el cual detalla toda la información obtenida en la plataforma. La estructura de la plataforma se muestra en la figura 82.

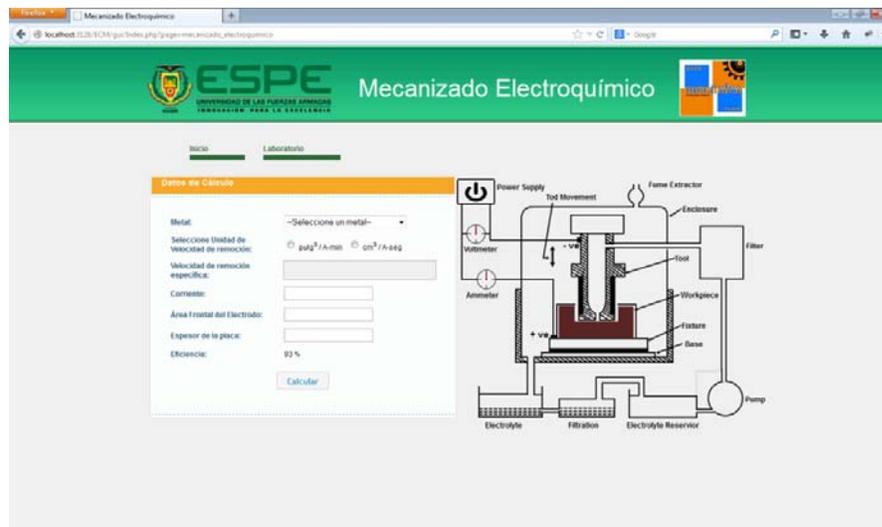


Figura 82. Plataforma Virtual Para Mecanizado Electroquímico

Una vez determinados el caudal, el avance del electrodo, la concentración del electrolito y la distancia óptima entre ánodo y cátodo, se procedió a realiza una prueba conjunta, primero para molde y luego para perforación. Las dos pruebas fueron realizadas en una placa de 50x50x1.2 de un acero de baja aleación con forma triangular con área de 4.62 cm² realizada en papel contact.

4.3.1. Prueba para molde

Primero se determina la velocidad de avance de la herramienta en la plataforma virtual, ingresando un acero de baja aleación, con unidades métricas, con una corriente de 75 amperios, un área de 4.62 cm² y una

profundidad de 0,6 mm. Esto determina una velocidad de alimentación real de 0.0004 cm/s como se muestra en la figura 83.

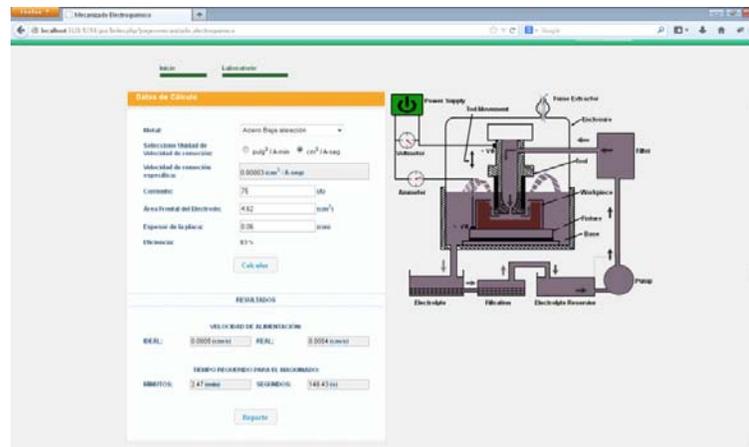


Figura 83. Plataforma Virtual: Molde

Después de determinar la velocidad de alimentación, se utiliza el software MACH 3 DEMO. Para esto primero se debe encender la máquina, acercándola hasta hacer contacto con la placa y encerrando el sistema. El dato de la velocidad de alimentación se debe utilizar en milímetros por minuto (mm/min) lo cual equivale a 0.24 mm/min. Con este se escribe el código G, con una posición inicial a 6 mm de la pieza de trabajo. Como se muestra en la figura 84.

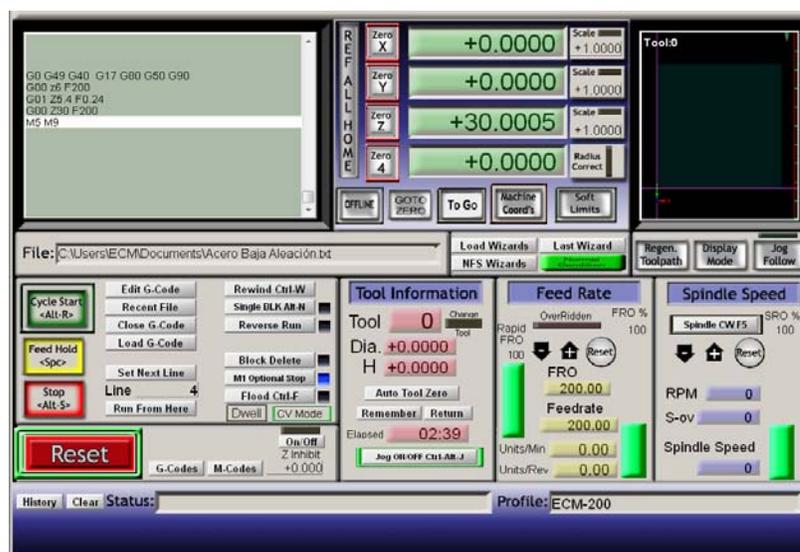


Figura 84. Código Mach 3 Demo: Molde

Después de ingresar el código G, se procede a iniciar el proceso de maquinado, primero se enciende la bomba y se espera a que la cuba se inunde totalmente, luego se enciende la fuente eléctrica y se espera a que la corriente aumente hasta 75 amperios, finalmente se da inicio al ciclo del software MACH 3 DEMO. En caso de no marcar 75 amperios, significa que la placa no está haciendo buen contacto con la masa. Una vez que se acabe el ciclo se apaga la fuente, la bomba y los controladores del avance. La pieza maquinada se muestra en la figura 85.



Figura 85. Molde Maquinado

4.3.2. Prueba de Perforación

El proceso para perforación es exactamente igual que para molde, pero con una distancia de 3mm de separación entre el electrodo y la pieza de trabajo, y además se debe ingresar una penetración con 0.3 mm mayor al espesor de la placa para asegurar la perforación, esto se puede diferenciar en la plataforma (figura 84) y en el código G (figura 85). En este caso la placa es de 1.2 mm de espesor, y en el código se colocó un espesor de 1.5 mm.

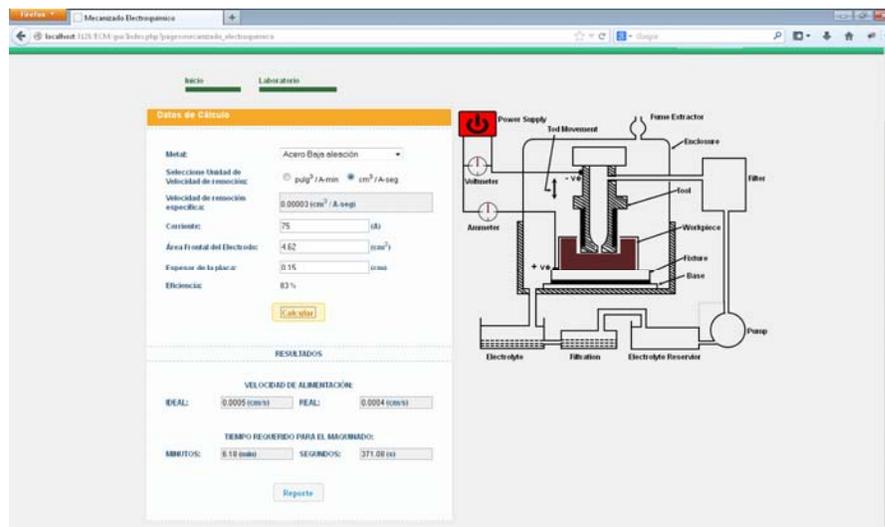


Figura 86. Plataforma Virtual: Perforación

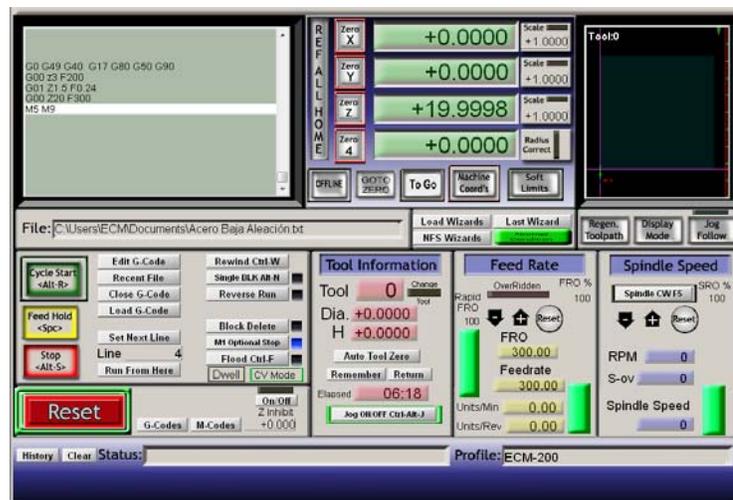


Figura 87. Mach 3 Demo: Perforación

El proceso de mecanizado es el mismo. La pieza perforada se muestra en la figura 86.



Figura 88. Placa Perforada

4.4. Manual De Usuario

Ver Anexo D: Libro de Vida

4.5. Manual De Mantenimiento

Ver Anexo D: Libro de Vida

CAPÍTULO 5: GUÍAS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Las guías de práctica de laboratorio para el proceso de mecanizado electroquímico se encuentra en el Anexo E: Prácticas de Laboratorio ECM-200. El documento contiene los siguientes elementos:

- 5.1. Guía de Laboratorio**
- 5.2. Trabajo Preparatorio**
- 5.3. Desarrollo de la Práctica**
- 5.4. Informe de la Práctica**
- 5.5. Rúbrica**

CAPÍTULO 6: ANALISIS FINANCIERO

6.1. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

6.1.1. Costos directos

Los costos directos, son aquellos que influyen directamente en el costo de la máquina, a continuación se muestra los costos separados en: costos de la estructura, costos de sistema eléctrico, costos del sistema hidráulico y costos de elementos para el maquinado.

| ESTRUCTURA ECM | | |
|----------------|-------------------------------|----------|
| Cant. | Descripción | Costo |
| 8 | Tubos Cuadrados 1"x1.1 | \$ 53,76 |
| 2 | Discos Corte 7x1/16" | \$ 4,85 |
| 3 | Kilo Suelda C13 6011-1/8" AGA | \$ 10,93 |
| 2 | Disco Lija FLAP 45 | \$ 6,18 |
| 2 | Litro Masilla MUSTANG | \$ 10,50 |
| 2 | Tool 1,22x2,44 X 0,7 | \$ 32,71 |
| 18 | Bolas de Guaipe | \$ 1,44 |
| 1 | Disco Desbaste Abracol 4" | \$ 1,22 |
| 5 | Lija Agua Fandeli 150 | \$ 1,41 |
| 2 | Lija Agua Fandeli 400 | \$ 0,61 |
| 1 | Disco Corte Acero Inox 7x1/16 | \$ 2,55 |
| 2 | Lija Agua Fandeli 100 | \$ 0,62 |
| 2 | Lija Hierro Fandeli 80 | \$ 0,81 |
| 3 | Disco Lija FLAP 7" | \$ 23,82 |
| 2 | Canaleta 20x10x2m | \$ 1,82 |
| 1 | Riel Cajón 35cm | \$ 1,23 |
| 1 | Disco Corte Acero Inox 9x1/16 | \$ 3,19 |
| 1 | Disco Multihojas Abracol | \$ 3,85 |
| 20 | Perno Allen M6x40 - Tuercas | \$ 4,64 |
| 6 | Colepatos 3/4x12 | \$ 0,24 |
| 3 | Cerradura Cajón Triangle | \$ 6,08 |

Continua 

| | | |
|----|----------------------------------|------------------|
| 1 | Broca Titanio 3/16 | \$ 0,78 |
| 1 | Broca Titanio 1/4 | \$ 1,24 |
| 1 | Galón Desoxidante Muria | \$ 8,84 |
| 1 | Brocha C/Blanco 1-1/2" | \$ 0,48 |
| 1 | Litro Bate Piedra Cóndor | \$ 4,00 |
| 2 | Pintura Spray Evans Aluminio | \$ 3,70 |
| 1 | Sikasil E Transparente 300ML | \$ 3,08 |
| 1 | Perfil Plástico para Vidrio 6mm | \$ 4,82 |
| 2 | Perno Hexagonal 5/16x2 | \$ 0,34 |
| 2 | Rodela Plana 5/16 | \$ 0,08 |
| 9 | Pernos - Tuercas M6 | \$ 4,12 |
| 15 | Perno ALLEN Avellanado 6*40 | \$ 5,10 |
| 1 | Repisa 60x30 Aluminio Melamínico | \$ 11,14 |
| 6 | Planchas de Segunda | \$ 40,18 |
| 5 | Filos de Plancha | \$ 40,18 |
| 1 | Pintura Electroestática | \$ 130,00 |
| | | |
| | SUBTOTAL | \$ 430,54 |
| | IVA 12% | \$ 51,66 |
| | TOTAL | \$ 482,20 |

| SISTEMA ELÉCTRICO ECM | | |
|------------------------------|---|--------------|
| Cant. | Descripción | Costo |
| 3 | Pulsadores NC con lámpara tipo LED Rojo | \$ 15,39 |
| 3 | Pulsadores NO con lámpara tipo LED Verde | \$ 12,81 |
| 1 | Contactador 25AMP AC3 110VAC 3P+NO | \$ 14,76 |
| 1 | Contactador 80AMP AC3 110VAC, 3P+NO+NC | \$ 76,88 |
| 1 | Mini Interruptor 100AMP Weg | \$ 51,19 |
| 2 | Pulsadores de Emergencia Rojo base metálica | \$ 7,04 |
| 1 | Lámpara Rotativa Verde | \$ 11,62 |
| 1 | Interruptor rotativo para candado | \$ 35,00 |
| 1 | Pulsador NA con lámpara tipo LED | \$ 5,13 |
| 1 | Control de nivel tipo flotador Cámara Doble | \$ 11,30 |

Continúa 

| | | |
|----|---|------------------|
| 1 | Contactador 12AMP AC3 110VAC | \$ 11,62 |
| 2 | Unión USB Hembra/Hembra T-7 | \$ 3,00 |
| 2 | Micro SW 3P C/PAL C/ROD Peq. | \$ 1,16 |
| 2 | Micro SW 3P C/PAL Larga | \$ 2,00 |
| 6 | Sócalo 6A6 GRANDE | \$ 11,40 |
| 36 | Term. Plano Macho Largo S/C | \$ 3,60 |
| 6 | Tornillo Inoxidable AV 5*40 | \$ 1,14 |
| 18 | Rod. Inoxidable Plana 6mm | \$ 0,72 |
| 6 | Rod. Presión 3/16 | \$ 0,06 |
| 1 | Canalera Ranurada 25x25 Gris | \$ 4,57 |
| 2 | Barredera PVC Gris 10CM | \$ 8,29 |
| 1 | Manguera Vinil 1/4" Multiuso | \$ 0,78 |
| 1 | Adaptador Flex 1" | \$ 0,33 |
| 9 | Tubo Anillado Flex 1/2 PLG Negra (m) | \$ 1,77 |
| 2 | Bloque de Contacto 1NA+1NC, Montaje Sup | \$ 12,04 |
| 1 | Cable Paralelo - Paralelo 25P | \$ 8,00 |
| 1 | Adaptador Paralelo 25P H-H | \$ 3,50 |
| 3 | Cable Superflex 3x8 c/m | \$ 14,28 |
| 3 | Cable Sucre 3x12 AWG | \$ 5,73 |
| 2 | Toma Indust. De Empotramiento 20AMP | \$ 1,84 |
| 2 | Enchufe 3P 15A 125V Vertical Caucho | \$ 1,93 |
| 1 | Organizador D/Cable Negro | \$ 5,42 |
| 1 | Cortapicos Polarizado 270J P/Pared | \$ 1,78 |
| 1 | Resbalón Adhesivo 30mm | \$ 1,99 |
| 1 | Placa Simple Baquelita Redonda Voltech | \$ 0,70 |
| 1 | Varilla Coperwell | \$ 4,24 |
| 1 | Amperímetro CSC 96x96_200ADC SHT | \$ 12,92 |
| 1 | Resistencia Shunt CSC 200A/50mV | \$ 14,92 |
| 1 | Enchufe macho 220v 50 Amp | \$ 12,00 |
| | | |
| | SUBTOTAL | \$ 392,85 |
| | IVA 12% | \$ 47,14 |
| | TOTAL | \$ 439,99 |

| SISTEMA HIDRÁULICO | | |
|---------------------------|--------------------------------|--------------|
| Cant. | Descripción | Costo |
| 1 | Silicón Negro ABRO 1200 | \$ 3,81 |
| 1 | Tee 1 Hidro 3 Polimex | \$ 1,77 |
| 2 | Tapón Macho 1" Plastigama | \$ 1,34 |
| 2 | Unión 1" Polimex | \$ 2,14 |
| 9 | Neplo Corrido 1 Plastigama | \$ 11,75 |
| 12 | Codo 1x90 | \$ 16,99 |
| 10 | Teflón Alemán C/Roja | \$ 2,15 |
| 2 | Bushing 1x1/2 Plastigama | \$ 2,04 |
| 1 | Neplo 1x15 | \$ 1,42 |
| 2 | Tubo PVC Roscable 1" | \$ 20,06 |
| 1 | Adaptador P/Tanque Polipro 1" | \$ 4,53 |
| 2 | Válvula de Bola Compacta 1" | \$ 7,40 |
| 1 | Neplo Polipro 1" x 10cm | \$ 0,34 |
| 1 | Válvula de Pie 1" C/C plástica | \$ 13,32 |
| 1 | Permatex 1B 3 oz. | \$ 2,42 |
| 10 | Cinta Teflón de 1/2" | \$ 2,77 |
| 3 | TEE 1" | \$ 8,28 |
| 1 | Válvula Check PVC 1" | \$ 13,75 |
| 1 | Silicón Negro ABRO 1200 | \$ 4,27 |
| 4 | Alambre Sólido #10 (m) | \$ 2,35 |
| 2 | Empaque lavabo 1 x 1/4 | \$ 0,30 |
| 1 | Bushing 1x3/4 Plastigama | \$ 1,22 |
| 1 | Broca Titanio 5/32 | \$ 0,58 |
| 1 | Universal 1 Hidro 3 | \$ 4,71 |
| 1 | Filtro de Anillos - Agua | \$ 22,13 |
| 1 | Bomba Centrífuga 1HP | \$ 267,90 |
| 1 | Caudalímetro | \$ 150,00 |
| 1 | Acoples | \$ 25,72 |
| 2 | Mangueras Refrigerante VHK | \$ 66,82 |
| | | |
| | Sub Total | \$ 662,28 |

Continua 

| | | |
|--|--------------|------------------|
| | IVA 12% | \$ 79,47 |
| | TOTAL | \$ 741,76 |

| ELEMENTOS PARA MECANIZADO | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Cant. | Descripción | Valor |
| 1 | Libro: Electromecanizado | \$ 63,00 |
| 1 | Soldadora Inverter | \$ 245,11 |
| 1 | Cable de Soldar # 2 x 3m | \$ 45,92 |
| 1 | Kit 2 Axis Stepper Motor | \$ 339,09 |
| 1 | Kit CNC7x7 | \$ 393,87 |
| 1 | Computador | \$ 180,00 |
| 1 | Mandril de Rosca UNF TW 3/8" | \$ 19,95 |
| 1 | Balde Industrial 22 litros | \$ 8,24 |
| 1 | Cabina Vidrio Área de Trabajo | \$ 60,00 |
| 1 | Señalética ECM-200 | \$ 12,00 |
| 1 | Cuba de Trabajo Acrílico Transparente | \$ 12,50 |
| 1 | Soporte | \$ 7,00 |
| | | |
| | SUBTOTAL | \$ 1.386,68 |
| | IVA 12% | \$ 166,40 |
| | TOTAL | \$ 1.553,08 |

| | |
|------------------------------|--------------------|
| TOTAL GASTOS DIRECTOS | \$ 3.217,03 |
|------------------------------|--------------------|

6.1.2. Costos indirectos

Los costos indirectos son aquellos que no influyen directamente al costo de la máquina, como por ejemplo gastos de cobre para la fabricación de electrodos en las pruebas, elementos de limpieza y mano de obra requerida para su fabricación. Estos costos se muestran a continuación:

| INDIRECTOS | |
|--|--------------------|
| Descripción | Valor |
| Transporte ECM | \$ 32,00 |
| Envío CostaMar | \$ 210,00 |
| Impuesto Aduana | \$ 50,00 |
| Tela Limpión | \$ 15,86 |
| Fresa 2mm | \$ 14,00 |
| Cobre | \$ 54,00 |
| Pintura Huneran (lt) | \$ 7,04 |
| Antiox Brillante Gris 1LT | \$ 5,61 |
| Limpiavidrios 901 1LT | \$ 3,08 |
| Cortes y Doblado de Planchas | \$ 25,00 |
| 2 Enchufes Macho 220v 50 Amp | \$ 24,00 |
| 1 Enchufe Hembra 220V 50 Amp | \$ 14,00 |
| Mano de Obra Estructura | \$ 280,00 |
| Mano de Obra Eléctrico | \$ 400,00 |
| Mano de Obra Ingeniería, diseño, construcción y pruebas | \$ 4.000,00 |
| | |
| TOTAL GASTOS INDIRECTOS | \$ 5.134,59 |

6.1.3. Costo total

El costo total de la máquina para su fabricación se muestra a continuación.

| | |
|-------------------------|--------------------|
| Total gastos directos | \$ 3.217,03 |
| Total gastos indirectos | \$ 5.134,59 |
| COSTO TOTAL | \$ 8.351,62 |

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- La turbulencia del fluido electrolítico genera porosidad en la pieza por el fenómeno de cavitación.
- La función del papel contact es aislar eléctricamente y proteger a la superficie de la pieza que no se desea maquinar.
- Realizar el proceso con la cuba inundada permite mantener una intensidad de corriente constante y con eficiencia alta dado que al no inundar máximo se obtiene 50 Amp., no constantes.
- El proceso genera buen acabado al trabajar con temperaturas entre 15 y 35°C del electrolito, a una temperatura mayor se genera defectos.
- La velocidad de avance de maquinado es directamente proporcional a la intensidad de corriente continua; a mayor corriente mayor velocidad de avance y menor tiempo de maquinado.
- La masa de acero inoxidable se desgasta durante el trabajo de maquinado dado a que se encuentra inmerso en la misma cuba.

7.2. Recomendaciones

- Trabajar con un flujo laminar para evitar la cavitación y obtener un buen acabado superficial.
- La curvatura de 1mm de radio a la salida en la herramienta ayuda a mantener un flujo laminar de fluido.
- Es necesario filtrar el electrolito antes de verterlo en el tanque reservorio para retener cualquier impureza y partículas de NaCl (sal doméstica), para evitar algún tipo de defecto superficial en la pieza.
- Tomar la temperatura del electrolito después de 15 minutos de maquinado para evitar exceder la temperatura de trabajo.

- Cambiar la masa de acero inoxidable cuando su desgaste sea visible y no genere contacto eléctrico, que se evidencia en el amperaje alcanzado.

BIBLIOGRAFÍA

- John A. Schey. Procesos de Manufactura. Tercera Edición, 2002. Mc Graw Hill.
- Budynas, Richard G. y Nisbet, J. Keith. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley Octava Edición. Mc Graw Hill.
- Aaron D. Deutschman, Walter J. Michels, Charles E. Wilson. Mechine Design; Theory and Practice. Primera Edición, 1975. Prentice Hall.
- KalpakjianSerope, Schmid Steven R. Manufactura, ingeniería y tecnología. Cuarta Edición, 2002. Prentice Hall.
- Lawrence E. Doyle, Carl A. Keyser y otros. Materiales de Procesos de Manufactura para Ingenieros. Tercera Edición 1988. Prentice Hall.
- P. Molera Solá, “Electromecanizado, Electroerosión y mecanizado electroquímico”, Editorial Marcombo S.A., 1989.
- Bruce C. Bingham, Atanas A. Atanasov, John P. Parmigiani, “The design and fabrication of an electrochemical machinig test apparatus”, San Diego, California 2013.
- Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” (s.f.). FRESADO Y TALADRADO PROTOCOLO. (09 de septiembre del 2013). Obtenido de http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/5128_taladro.pdf
- CEDE (s.f.). MECANIZADO Y MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS. (09 de septiembre del 2013). Obtenido de https://www.serina.es/empresas/cede_muestra/301/TEMA%20MUESTRA.pdf
- El prisma (2000). Operaciones de Mecanizado. Recuperado el 09 de septiembre del 2013 de http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/operacionesmecanizado/default2.asp
- FAMA S.A. (2000). Catálogo de Productos – Fresadoras. (09 de septiembre del 2013). <http://www.famasa.com/>

- PRO CNC (2012).5 Axis Machine Tool Technology. Recuperado el 09 de septiembre del 2013 de http://procnc.com/resources/newsletter/march_2012_-_5_axis_machine_tool_technology/
- Universidad del País Vasco. Módulo III: Mecanizado por arranque de viruta TEMA 11: Taladrado. (09 de septiembre del 2013). Obtenido de http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/725_ca.pdf
- Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” (s.f.). FRESADO Y TALADRADO PROTOCOLO. (09 de septiembre del 2013). Obtenido de http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/5128_taladro.pdf
- Ajuste Mecánico. El Taladro. Recuperado el 09 de Septiembre del 2013 de <http://ajuste.wordpress.com/2009/11/17/el-taladrado/>
- Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” (s.f.). FRESADO Y TALADRADO PROTOCOLO. (09 de septiembre del 2013). Obtenido de http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/5128_taladro.pdf
- Universidad del País Vasco. Módulo III: Mecanizado por arranque de viruta TEMA 11: Taladrado. Recuperado el 09-09-2013 de http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/725_ca.pdf
- Gustavo. (2009, Julio, 5). PROCESOS DE ELECTRO-MAQUINADO [Web log post]. Recuperado el 30 de Abril del 2013 de <http://electromaquinado.blogspot.com/>.
- GarethW.(2011, Octubre, 25).Electro-discharge wire cutting (EDWC) [Web log post].Recuperado el 30 de Abril del 2013 de [http://www.mechanicaldesignforum.com/content.php?16-Electro-discharge-wire-cutting-\(EDWC\)](http://www.mechanicaldesignforum.com/content.php?16-Electro-discharge-wire-cutting-(EDWC))
- Yusrin B. (2009, Noviembre, 13).Electrochemical Grinding Drawing.[Web log post].Recuperado el 10 de Septiembre del 2013 de <http://teampolypd.blogspot.com/>

- Agashe S. (2013). Study of Electrochemical machining process. Recuperado el 31 de Julio del 2013 de <http://coep.vlab.co.in/?sub=34&brch=105&sim=1423&cnt=1>
- Apez H & Cruz J. (2010, Noviembre, 9). Celda Electrolítica [Web log post]. Recuperado el 09 de Agosto del 2013 de <http://celdaelectrolitica.blogspot.com/>
- F. R. Morral Y E. Jimeno Y P. Molera (1985.) Metalurgia General (Primera Edición). España: Editorial Reverté.
- Mikell P. Groover. (1997) Fundamentos de Manufactura Moderna. (Primera Edición). Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- ECM Technologies. (2010). ElectrochemicalMachining. (11 de Abril del 2013) Tomado de <http://www.mikrocentrum.nl/assets/Themadagen/SIG/Electrochemical-Machining-nov16th2010.pdf>
- KENNAMETAL (2013). Mecanizado Electroquímico (ECM). Recuperado el 11 de Julio del 2013 de <http://www.kennametal.com/kennametal/es/products/precision-surface-management/machining-processes/electrochemical-machining.html>
- CARL DIVER.(s.f.).ElectroChemical Machining.(30 de Abril del 2013). Obtenido de <http://www.cdamc.ie/html/documents/ElectrochemicalMachining.pdf>
- Siemens AG 2010, Catálogo [en línea], (13 de Abril del 2013). Obtenido de: http://www.automation.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/mc/Documentsu20Catalogs/NC61_2010_S2_es.pdf
- HYDROENVIRONMENT (s.f.). Válvulas de aire y filtros de agua. Recuperado el 06 de Marzo del 2014 de http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=117&chapter=11ç
- Anónimo (s.f.). Filtros de Anillas. Recuperado el 06 de Marzo del 2014 de <http://galeon.com/elregante/anillas.html>

ANEXOS