

Tabla de contenido

| | | |
|----------|--|----|
| 1. | Introducción..... | 1 |
| 1.1. | Introducción general | 1 |
| 1.2. | Estado del arte..... | 2 |
| 1.2.1. | Tipos de mecanizados..... | 2 |
| 1.2.2. | Tipos de mecanizados no convencionales (NTM) | 3 |
| 1.2.2.1. | Mecanizado por descarga eléctrica o electroerosión (EDM) | 3 |
| 1.2.2.2. | Mecanizado por ultrasonido (USM)..... | 4 |
| 1.2.2.3. | Mecanizado por láser (LBM) | 5 |
| 1.2.2.4. | Mecanizado por chorro de agua (AWM) | 5 |
| 1.2.2.5. | Mecanizado químico o fresado químico (CM) | 6 |
| 1.2.3. | Mecanizado electroquímico (ECM) | 8 |
| 1.2.3.1. | Historia del proceso..... | 8 |
| 1.2.3.2. | Tipos de mecanizados electroquímicos..... | 11 |
| 1.3. | Objetivos | 16 |
| 1.3.1. | Objetivo general | 16 |
| 1.3.2. | Objetivos específicos | 16 |
| 1.4. | Alcances y limitaciones | 17 |
| 1.5. | Metodología | 17 |
| 1.5.1. | Investigación..... | 18 |
| 1.5.2. | Ingeniería conceptual y básica..... | 18 |
| 1.5.3. | Ingeniería de detalle..... | 18 |
| 1.5.4. | Construcción de planos..... | 20 |
| 1.5.5. | Memoria | 20 |
| 2. | Máquina de erosión electroquímica..... | 21 |
| 2.1. | Introducción | 21 |
| 2.2. | Marco teórico | 21 |
| 2.2.1. | Ecuaciones fundamentales..... | 24 |
| 2.2.2. | Principios mecánicos del ECM | 24 |
| 2.2.2.1. | Precisiones..... | 26 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.2.2.2. | Acabado superficial..... | 26 |
| 2.2.3. | Componentes principales del mecanizado..... | 27 |
| 2.2.3.1. | Electrolito..... | 27 |
| 2.2.3.2. | Corriente y voltaje..... | 29 |
| 2.2.3.3. | Velocidad de remoción de material..... | 29 |
| 2.2.3.4. | Distancia electrodo-pieza de trabajo..... | 31 |
| 2.3. | Ventajas y desventajas del ECM..... | 31 |
| 2.3.1. | Ventajas:..... | 31 |
| 2.3.2. | Desventajas:..... | 32 |
| 2.4. | Requerimientos..... | 33 |
| 3. | Diseño estructural..... | 34 |
| 3.1. | Consideraciones generales..... | 34 |
| 3.2. | Selección de Componentes..... | 35 |
| 3.2.1. | Selección de material estructural..... | 35 |
| 3.2.2. | Selección de uniones y fijaciones..... | 37 |
| 3.2.3. | Selección de pintura..... | 37 |
| 3.2.4. | Selección estructura protectora espacio de trabajo..... | 39 |
| 3.2.5. | Selección otros componentes..... | 39 |
| 3.3. | Prototipo de diseño estructural..... | 41 |
| 4. | Diseño de manejo y control de electrolito..... | 44 |
| 4.1. | Consideraciones generales..... | 44 |
| 4.2. | Selección de componentes..... | 45 |
| 4.2.1. | Electrolito..... | 45 |
| 4.2.2. | Reservorio de electrolito..... | 45 |
| 4.2.3. | Depósito de recuperación..... | 46 |
| 4.2.4. | Diámetro y material de tubería..... | 47 |
| 4.2.5. | Filtro..... | 48 |
| 4.2.6. | Control flujo de electrolito..... | 49 |
| 4.2.7. | Bomba..... | 51 |
| 4.2.8. | Otros componentes..... | 57 |
| 4.3. | Prototipo de diseño de manejo y control de electrolito..... | 57 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5. | Diseño de mecanismo de avance y espacio de trabajo | 59 |
| 5.1. | Consideraciones generales | 59 |
| 5.2. | Selección de componentes | 59 |
| 5.2.1. | Sistema de avance..... | 59 |
| 5.2.2. | Base de soporte para piezas | 67 |
| 5.2.3. | Sistema de alimentación de electrolito | 68 |
| 5.2.4. | Conexión eléctrica al sistema de avance | 69 |
| 5.2.5. | Sujeción de herramientas..... | 70 |
| 5.2.6. | Herramientas..... | 71 |
| 5.2.7. | Otros componentes | 71 |
| 5.3. | Prototipo de sistema de avance y espacio de trabajo | 72 |
| 6. | Sistema de control de posición | 74 |
| 6.1. | Consideraciones generales | 74 |
| 6.2. | Modelo cinemático de SCARA | 74 |
| 6.3. | Estrategias de control..... | 76 |
| 6.4. | Parámetros a considerar al momento de control brazo | 78 |
| 7. | Diseño de sistema eléctrico | 79 |
| 7.1. | Consideraciones generales | 79 |
| 7.2. | Selección fuente de poder para mecanizado | 79 |
| 7.3. | Otros componentes | 81 |
| 7.4. | Diagrama eléctrico | 81 |
| 8. | Prototipo final..... | 84 |
| 9. | Conclusiones..... | 86 |
| 10. | Materiales | 87 |
| 11. | Planos | 89 |
| 12. | Anexos..... | 163 |
| A.1. | Tabla de selección de diámetros de cañería y pérdidas de carga [79]..... | 163 |
| A.2. | Tabla de factor de fricción en tubería y ecuación de flujo turbulento intermedio.. | 164 |
| A.3. | Dimensiones de controlador LCD | 165 |
| A.4. | Ficha técnica motor con reductor [56]..... | 166 |
| A.5. | Ficha técnica motor con reductor [61]..... | 168 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| A6. Perfiles aluminio [80] | 169 |
| 13. Referencias | 171 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mecanizado con arranque de viruta, torno realizando desbaste..... | 2 |
| Figura 2. Mecanizado no convencional, corte por chorro de agua..... | 3 |
| Figura 3. Esquema de funcionamiento EDM e imagen de aplicación..... | 3 |
| Figura 4. Esquema de USM e imagen de aplicación..... | 4 |
| Figura 5. Esquema de LBM e imagen de aplicación..... | 5 |
| Figura 6. Esquema de componentes de AWM e imagen de aplicación. | 6 |
| Figura 7. Esquema de funcionamiento de CM e imagen de aplicación. | 7 |
| Figura 8. Esquema básico de componentes y funcionamiento de ECM [11]..... | 9 |
| Figura 9. Máquina de mecanizado CI 400 de EMAG. | 10 |
| Figura 10. ECM de perforación..... | 12 |
| Figura 11. Aplicación de ECM de perforación..... | 12 |
| Figura 12. Proceso de ECM de perforación. | 13 |
| Figura 13. Piezas típicas de aplicación de ECM de desbarbado. | 14 |
| Figura 14. Efectos del ECM de desbarbado. | 14 |
| Figura 15. Aplicaciones de pECM. | 15 |
| Figura 16. a) Geometría de herramienta y pieza de trabajo inicial; b) Forma obtenida después del ECM [19]..... | 21 |
| Figura 17. Fenómenos físicos relevantes en ECM [19]..... | 22 |
| Figura 18. Representación de reacción química en ECM [21]..... | 23 |
| Figura 19. Piezas realizadas con ECM. | 25 |
| Figura 20. Esquema básico de componentes y funcionamiento de ECM [24]..... | 25 |
| Figura 21. Pruebas de acabado superficial. | 27 |
| Figura 22. Esquema de comportamiento de electrolito ($NaNO_3$) [13]. | 28 |
| Figura 23. Diseño estructural realizado en Autodesk Inventor. | 34 |
| Figura 24. Placas de MDF RH. | 35 |
| Figura 25. Tornillos M3 autoperforantes para madera. | 37 |
| Figura 26. Esmalte epóxico Heavy Duty de empresas Tricolor. | 38 |
| Figura 27. Láminas de acrílico poli metil metacrilato..... | 39 |
| Figura 28. Ruedas de goma, diámetro 100mm..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 29. Cierres del tipo push lock. a) Cierre de contacto. b) Cierre con pulsador y cerradura. | 40 |
| Figura 30. Diseño estructural de máquina ECM. | 41 |
| Figura 31. Diseño estructural de máquina ECM, vista compartimientos interiores. | 42 |
| Figura 32. Diseño estructural de máquina ECM, vista compartimientos interiores. | 42 |
| Figura 33. Diseño estructural de máquina ECM, vista de espacio de trabajo. | 43 |
| Figura 34. Esquema básico de componentes y funcionamiento de ECM, presentado en capítulo 2 [24]. | 44 |
| Figura 35. Reservorio de electrolito. | 46 |
| Figura 36. Depósito de recuperación. | 47 |
| Figura 37. Modelo de sistema de alimentación de electrolito. | 47 |
| Figura 38. Tuberías PVC hidráulico. | 48 |
| Figura 39. Carcasa y filtro de polipropileno, 10 pulgadas de alto. | 49 |
| Figura 40. Esquema de control de electrolito. | 49 |
| Figura 41. Kit de control de flujo DN20. | 50 |
| Figura 42. Gráfica de ejemplos sensado, flujo vs frecuencia. | 50 |
| Figura 43. Bomba HV-25M, desarrollada por SAILFLO [48]. | 56 |
| Figura 44. Interruptor de nivel, junto a esquemas de funcionamiento. | 57 |
| Figura 45. Diseño prototipo con sistema de alimentación de electrolito. | 57 |
| Figura 46. Diseño prototipo con sistema de alimentación de electrolito, vista detallada. | 58 |
| Figura 47. Diseño prototipo con sistema de alimentación de electrolito, vista espacio de trabajo. | 58 |
| Figura 48. Configuración SCARA. | 60 |
| Figura 49. Volumen de trabajo de configuración SCARA. | 60 |
| Figura 50. Vista general de diseño tomado como referencia [53]. | 61 |
| Figura 51. Corte transversal de diseño tomado como referencia [53]. | 61 |
| Figura 52. Robot SCARA diseñado como mecanismo de avance. | 62 |
| Figura 53. Brazo SCARA, vista en detalle de sistema transmisión para brazos. | 63 |
| Figura 54. Brazo SCARA, vista en detalle de sistema transmisión para eje z. | 64 |
| Figura 55. Brazo SCARA, vista en detalle de sensores inductores. | 64 |
| Figura 56. Brazo SCARA, vista en detalle de límites para eje z. | 65 |

| | |
|---|----|
| Figura 57. Motor Stepper con caja reductora Crouzet RC65 [56]. | 65 |
| Figura 58. Esquema de cálculo de tornillo de potencia [60]. | 66 |
| Figura 59. Motor Stepper con caja reductora Nema 17 PHG42S/PTP36E. | 67 |
| Figura 60. Base de soporte de Technyl poliamida. | 68 |
| Figura 61. Soportes para manguera articulada. | 69 |
| Figura 62. Portaherramientas energizado. | 69 |
| Figura 63. Base de soporte con placa energizada. | 70 |
| Figura 64. Mandril de Dremel de 4 mm. | 70 |
| Figura 65. a) Herramienta hueca, flujo electrolito interior. b) Herramienta maciza, flujo electrolito exterior. | 71 |
| Figura 66. Brazo SCARA instalado en espacio de trabajo. | 72 |
| Figura 67. Prototipo de ECM con sistema de avance y diseño de espacio de trabajo. | 73 |
| Figura 68. Parámetros para brazo SCARA y representación en plano XY. | 75 |
| Figura 69. Matriz de cinemática directa del brazo SCARA. | 75 |
| Figura 70. Ecuaciones de cinemática inversa del brazo SCARA. | 76 |
| Figura 71. Soldadora Inverter Bauker ARC-200A IGBT. | 81 |
| Figura 72. Diagrama de potencia. | 82 |
| Figura 73. Diagrama de control. | 83 |
| Figura 74. Prototipo de máquina ECM, vista isométrica. | 84 |
| Figura 75. Prototipo de máquina ECM, vista espacio de trabajo. | 84 |
| Figura 76. Prototipo de máquina ECM, vista detalle. | 85 |
| Figura 77. Prototipo de máquina ECM, vista isométrica posterior. | 85 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Electrolitos recomendados para metales con concentraciones [25] | 29 |
| Tabla 2. Velocidades de remoción específica para metales (C) [26]. | 31 |
| Tabla 3. Requerimientos para diseño de ECM. | 33 |
| Tabla 4. Propiedades físico-mecánicas del MDF [28]. | 36 |
| Tabla 5. Selección de tornillos según espesor de placa [29]. | 37 |
| Tabla 6. Datos para calcular sistema de alimentación de electrolito..... | 48 |
| Tabla 7. Características técnicas de bombas de diafragma de alto flujo de cinco cámaras [48]. | 56 |
| Tabla 8. Parámetros de Denavit-Hartenberg (DH)..... | 75 |
| Tabla 9. Parámetros para control de brazo SCARA..... | 78 |
| Tabla 10. Parámetros técnicos de soldadoras Inverter Bauker [78]. | 80 |
| Tabla 11. Lista de materiales con valor referencial..... | 87 |
| Tabla 12. Lista de componentes. | 89 |

Abreviaciones

| | |
|--------|---|
| AWM | : Mecanizado por chorro de agua (Abrasive Waterjet Machining) |
| CM | : Mecanizado químico o fresado químico (Chemical Milling) |
| ECM | : Mecanizado electroquímico (Electrochemical Machining) |
| ED | : Disolución electroquímica (Electrochemical Disolution) |
| EDM | : Mecanizado por descarga eléctrica o electroerosión (Electrical Discharge Machining) |
| EHS | : Sistema de manipulación de electrolito (Electrolyte Handling System) |
| LBM | : Mecanizado por láser (Laser Beam Machining) |
| MDF | : Tablero de fibras de mediana densidad (Medium Density Fiber) |
| MDF RH | : Tablero de fibras de mediana densidad resistente a la humedad (Medium Density Fiber board Resistant Humidity) |
| NTM | : Mecanizado no convencional (Non-Traditional Machining) |
| pECM | : Mecanizado electroquímico de precisión (precision Electrochemical Machining) |
| PVC | : Policloruro de vinilo (Polyvinyl Chloride) |
| SCARA | : Brazo robótico de montaje con acomodación selectiva (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) |
| USM | : Mecanizado ultrasónico (Ultra Sonic Machining) |