

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE CORTE
POR ELECTROEROSIÓN MEDIANTE HILO**

PRESENTADO POR:

**CARLOS FRANCISCO ANTONIO BARRERA MANCÍA
STEVEN ALEXIS GUZMÁN MELARA
OMAR ALEXANDER HEREDIA PERDIDO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARÍA GENERAL :

Lic. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO :

Arq. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO MECÁNICO

Título:

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE CORTE
POR ELECTROEROSIÓN MEDIANTE HILO**

Presentado por:

**CARLOS FRANCISCO ANTONIO BARRERA MANCÍA
STEVEN ALEXIS GUZMÁN MELARA
OMAR ALEXANDER HEREDIA PERDIDO**

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, febrero de 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE CORTE POR ELECTROEROSIÓN MEDIANTE HILO

Estudiantes: Brs. Carlos Francisco Antonio Barrera Mancía¹, Steven Alexis Guzmán Melara² y Omar Alexander Heredia Perdido³
Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz⁴

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha realizado una propuesta de diseño de una máquina de corte por electroerosión mediante hilo. Para esto, se ha investigado la historia de la electroerosión y sus diferentes tipos de aplicaciones, siguiendo con el proceso de corte por electroerosión por hilo. Luego se definen los aspectos generales que tiene este tipo de maquinaria como lo pueden ser ventajas y desventajas, tipos de hilo, fluido dieléctrico y partes de una electroerosionadora, además el diseño de la misma con corte perpendicular a la pieza para la realización de probetas planas para ensayos de tracción, cubriendo aspectos como parámetros de corte según material, selección de hilo de corte, velocidad de corte, diseño y selección de componentes y el diseño de la estructura. Con este fin, se procedió a diseñar y seleccionar los elementos críticos de la máquina que se necesita como ejes, transmisión mecánica, sistemas de control y sistema de bombeo. Se realizó el análisis de factibilidad técnica y económica para demostrar que es posible la elaboración del diseño propuesto que se resume en los planos de los elementos mecánicos que componen a la máquina. Finalmense se presentan los manuales de montaje y mantenimiento de dicha máquina propuesta.

Palabras claves: Electroerosión por hilo; Gap; Dieléctrico; WEDM.

1 E-mail: manciacarlos1989@gmail.com

2 E-mail: alexisgmelara@gmail.com

3 E-mail: omaralexheredia@gmail.com

4 E-mail: jonathan.berrios@ues.edu.sv

DEDICATORIA

Agradecer primeramente a Dios por permitirme finalmente terminar mis estudios, por darme la fortaleza, paciencia, y perseverancia para llegar a este punto en mi vida.

Mi eterna gratitud a mi madre Julia Mancía, y a mi abuela Lidia Mancía (Q.E.P.D) por su apoyo, amor, y por motivarme siempre a concluir mis estudios. Sin ellas, no lo hubiera logrado.

A mi tío Marco Antonio Mancía, mi madrina Rosaura Rodas de Mancía (Q.E.P.D) y mi prima Jazmín Mancía por siempre apoyarme y estar presentes cuando lo he necesitado.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura con los que tuve la oportunidad de convivir y aprender de ellos, en especial al Ing. Ricardo Herrera Mirón por mostrarme el camino en mis primeros años en la universidad y a apasionarme por la matemática, a la M.Sc. Leyla Jimenez Monroy por su apoyo en momentos difíciles de mi vida y al Dr. y M.Sc. Jonathan Berríos Ortiz, quien con paciencia y dedicación nos guió a través del proceso de elaboración de este trabajo de graduación desde que se inició en la asignatura Proyecto de Ingeniería Mecánica.

Finalmente, a mis compañeros Omar Heredia y Steven Guzmán, porque gracias a su esfuerzo y sacrificio, y a pesar de todas las dificultades que cada uno ha tenido, se ha logrado culminar este trabajo de graduación.

Carlos Mancía

DEDICATORIA

Quiero comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a Dios, cuya gracia y guía han sido mi fortaleza durante este camino académico. Su amor incondicional y su dirección han sido fundamentales en cada paso que he dado.

A mis padres, Francis Heredia y Sandra Orellana, les debo todo lo que soy y todo lo que he logrado. Su incansable apoyo, amor incondicional y sacrificio han sido la piedra angular de mi vida y de este sueño. Les estaré eternamente agradecido por el amor incondicional y el apoyo constante que me han brindado a lo largo de este camino.

A mi amada Marbeli Marín, gracias por su apoyo, paciencia y comprensión a lo largo de este camino académico han sido mi mayor fortaleza. Sus palabras de ánimo y su amor incondicional han sido la luz que me guio en los momentos más desafiantes. Su presencia ha sido mi refugio, brindándome equilibrio y motivación en cada etapa de esta meta. Su apoyo ha sido fundamental en mi éxito y estaré eternamente agradecido por su amor y compañía.

Asimismo, a Zeus y Negra, mis fieles compañeros perrunos, quienes, aunque ya no están físicamente a mi lado, siempre vivirán en mi corazón. Gracias por brindarme su amor incondicional y alegría en cada instante. Su compañía fueron una calma y refugio para mi alma durante estos años de estudio y dedicación.

A mi padrastro Mariano Quiñonez, por su constante apoyo, aliento y ejemplo a lo largo de este camino. Sus consejos y sabiduría han sido un faro en mi camino académico.

A mi hermano Francisco Heredia, a pesar de la distancia que nos separa, su apoyo y ánimo han sido invaluable.

A mi querida hermana Mariana Quiñonez, aunque seas pequeña, tu amor, alegría y sonrisas han sido una de mis motivaciones más grandes. Tu inocencia y cariño han sido una fuente de inspiración constante.

A cada uno de ustedes, mi gratitud eterna. Sus ánimos, amor y comprensión han sido los pilares de mi éxito. Este logro es también de ustedes, gracias por estar siempre a mi lado.

Omar Heredia

DEDICATORIA

Quiero iniciar expresando mi agradecimiento al Padre Celestial quien me ha dado fortaleza en momentos de angustia, por su sabiduría y amor a cada momento y que a pesar de todo incondicionalmente ha bendecido mi vida y me ha permitido tener salud y fuerzas necesarias para culminar este proceso.

Gracias a mis Padres, Carmen de Guzmán y Cesar Guzmán por ser mi pilar fundamental y los principales autores de mis sueños, por inculcar en mí el ejemplo de perseverancia, valentía y esfuerzo, por confiar y creer en mí. Gracias a mi madre por su sacrificio, consejos, compañía en las noches de desvelo y entrega durante todos estos años y poder ser partícipe del cumplimiento de esta meta, a mi papá por su apoyo incondicional y consejos para fortalecer mis pensamientos y alcanzar cualquier meta propuesta. Por el amor, sacrificio y educación de ambos he logrado llegar hasta aquí y cumplir este objetivo el cual es para ustedes.

A mis hermanos, José Melara, Karen Guzmán y Katherine Guzmán por haberme apoyado incondicionalmente con sus ánimos y amor, por haber colaborado enormemente y haber sido parte de los sacrificios, a mi primo Ricardo Avelar quien siempre me apoyó cuando lo necesité, al resto de mi familia que de una u otra manera colaboraron en la realización de este sueño infinitas gracias.

A mis compañeros de Trabajo de Graduación, Carlos Mancía y Omar Heredia, gracias por su apoyo incondicional, por la comprensión y paciencia a lo largo de este proceso, lo cual nos permitió alcanzar uno de muchos sueños.

A nuestro asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por brindarnos incondicionalmente el apoyo y asesoría necesaria durante este proceso. Por tener la mejor disposición de aclarar las dudas que surgían.

Steven Guzmán

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Introducción.....	19
1. Marco teórico.....	20
1.1. Historia de la electroerosión	20
1.2. Electroerosión por hilo	21
1.2.1. Descripción	22
1.2.2. Terminología	25
1.2.3. Formación del arco eléctrico	29
1.2.4. Ventajas y desventajas.....	30
1.3. Máquina de corte por electroerosión mediante hilo.....	32
1.4. Hilo y sistema de hilo para electroerosión.....	32
1.4.1. Propiedades del hilo.....	33
1.4.2. Tipos de hilo.....	34
1.4.3. Sistema de alimentación del hilo	37
1.4.4. Sistema de tensión del hilo	38
1.4.5. Parámetros de diseño	38
1.5. Fluido dieléctrico.....	45
1.5.1. Agua desionizada como fluido de trabajo	47
1.6. Sistema de bombeo.....	51
1.6.1. Generalidades	51
1.6.2. Bombas rotodinámicas	52
1.6.3. Bombas de desplazamiento positivo	54
1.7. Sistema de filtrado.....	55
1.7.1. Conceptos de filtración	56
1.8. Pieza de trabajo.....	59
1.8.1. Normas internacionales para ensayos de tracción	59
1.8.2. Norma astm e8	60
1.8.3. Acero sae 1045	66
1.9. Sistema de movimiento	68
1.9.1. Velocidad de corte	68
1.9.2. Tornillos de potencia (rosca acme)	69
1.9.3. Acoplamientos.....	76
1.9.4. Rodamientos de elementos rodantes.....	78
1.10. Sistema de control.....	81
1.10.1. Plataforma electrónica arduino	82

	Pág.
1.10.2. Hardware arduino	83
1.10.3. Escudos o shields	85
1.10.4. Sistema operativo linuxcnc.....	88
1.11. Servomotores	90
1.11.1. Partes de un servomotor.....	92
1.11.2. Tipos de servomotor.....	93
1.11.3. Ventajas del servomotor sobre el motor paso a paso.....	95
1.11.4. Factores clave para seleccionar un servomotor	95
1.12. Generador de pulsos eléctricos	98
1.12.1. Naturaleza física de la eliminación de material.....	101
1.12.2. Representación de la carga de electroerosión	104
1.12.3. Efecto de los parámetros eléctricos	105
1.12.4. Estructura del generador de pulsos.....	106
1.12.5. Clasificación y funcionamiento	107
1.12.6. Eliminación de la vibración del hilo	108
1.12.7. Construcción de generadores de pulsos eléctricos	111
1.13. Diseño de piezas en programa cad/cam.....	113
1.13.1. Camworks	114
1.13.2. Generación de código nc	116
1.14. Soldadura de aceros inoxidables	130
1.14.1. Soldabilidad y clasificación.....	130
1.14.2. Gases de protección	132
1.14.3. Recomendaciones	133
1.14.4. Selección de proceso	136
2. Diseño mecánico e hidráulico de electroerosionadora.....	138
2.1. Diseño del sistema de hilado	139
2.1.1. Selección del tipo de hilo	139
2.1.2. Sistema de alimentación del hilo	140
2.2. Diseño de sistema de movimiento	155
2.2.1. Velocidad de corte	156
2.2.2. Tornillo de potencia.....	156
2.2.3. Selección de rodamientos para tornillo de potencia.....	163
2.2.4. Selección de servomotor para tornillo de potencia	165
2.2.5. Acople flexible para tornillo de potencia	166
2.2.6. Soportes guías de tornillo de potencia	166

	Pág.
2.2.7. Análisis de soportes guías de tornillo de potencia	170
2.3. Diseño de tanque de trabajo	171
2.4. Diseño de la mesa de trabajo	175
2.5. Diseño y análisis de estructura de soporte	183
2.6. Diseño de sistema de bombeo y filtrado	184
2.6.1. Agua desionizada como fluido dieléctrico	185
2.6.2. Selección de bombas hidráulicas	188
2.6.3. Sistema de circulación del fluido dieléctrico	192
2.6.4. Tanques del sistema de circulación de dieléctrico	195
2.6.5. Sistema de filtrado	197
3. Diseño de los sistemas de control	200
3.1. Selección del sistema de control de movimientos	200
3.2. Diseño del sistema de control de bombeo y filtrado	209
4. Factibilidad técnica y económica	224
4.1. Factibilidad técnica	224
4.1.1. Sistemas de hilado, movimiento y estructura	224
4.1.2. Sistema de bombeo y filtrado	227
4.1.3. Sistemas de control.....	230
4.2. Factibilidad económica	235
4.2.1. Costos de materiales de fabricación	236
4.2.2. Costo de mano de obra	242
4.2.3. Costos variables	246
4.2.4. Costo total del proyecto	249
4.3. Parámetros más relevantes del proyecto.....	250
CONCLUSIONES.....	254
Anexos	259
Anexo A: Planos de fabricación	259
Anexo B: Manual de montaje de la máquina.....	281
Anexo C: Manual de mantenimiento de la máquina.....	328
Anexo D: Manual de operación.....	332

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Parámetros en el factor de la condición superficial.	43
Tabla 1.2. Ecuaciones para determinar k_b	43
Tabla 1.3. Valores de k_c según la carga a la que la pieza se somete.	43
Tabla 1.4. Resistencia a carga máxima del acero según temperatura.	44
Tabla 1.5. Factores de confiabilidad.	44
Tabla 1.6. Valor de Se' en función de Sut	44
Tabla 1.7. Dimensiones de probeta rectangular [17].	62
Tabla 1.8. Dimensiones de probeta rectangular con agujeros para pines [17].	64
Tabla 1.9. Propiedades del acero SAE 1045 [19].	67
Tabla 1.10. Designaciones para el acero SAE 1045 en diversas normativas [20].	67
Tabla 1.11. Comparación de los tipos de rodamientos [25].	79
Tabla 1.12. Duración recomendada para rodamientos.	81
Tabla 1.13. Posiciones para las diferentes marcas de servomotores [29].	91
Tabla 1.14. Efecto de la corriente y del tiempo ON en el rendimiento del corte [32].	106
Tabla 1.15. Efecto de los elementos aleantes en el acero inoxidable [36].	130
Tabla 1.16. Soldabilidad de aceros inoxidables [36].	131
Tabla 1.17. Características de procesos de soldadura [36].	137
Tabla 2.1. Especificaciones del hilo de latón [37].	139
Tabla 2.2. Resumen de los datos resultantes de la selección del hilo.	140
Tabla 2.3. Características de servomotor KOLLMORGEN AKM2 2C [41].	145
Tabla 2.4. Coeficientes de fricción f de pares roscados.	157
Tabla 2.5. Características de servomotor KOLLMORGEN.	165
Tabla 2.6. Resultados de la sección transversal de la mesa de trabajo.	178
Tabla 2.7. Selección de boquilla de bomba FVJ05CI [48].	190
Tabla 2.8. Especificaciones técnicas de manguera Tramaflex [49].	193
Tabla 2.9. Especificaciones técnicas tubería PVC [49].	193
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas Válvula de bola inoxidable [49].	194
Tabla 2.11. Características del filtro triple AguaPlusRO [52].	199
Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del generador de pulsos BX18 [55].	204
Tabla 3.2. Especificaciones técnicas C-Arc [56].	206
Tabla 3.3. Especificaciones eléctricas controlador ECT60 [57].	208
Tabla 3.4. Especificaciones técnicas placa Arduino Mega 2560 [59].	211
Tabla 3.5. Especificaciones técnicas tarjeta de conversión de señal [60].	212
Tabla 3.6. Especificaciones técnicas sonda de conductividad eléctrica [60].	213
Tabla 4.1. Costo de materiales de fabricación de la estructura de soporte.	236
Tabla 4.2. Costo de materiales de fabricación del sistema de control de movimientos X,Y.	237
Tabla 4.3. Costo de materiales de fabricación del sistema de control de bombeo y filtrado.	237
Tabla 4.4. Costo de materiales de fabricación del control de hilado.	238
Tabla 4.5. Costo de materiales de fabricación del sistema de movimientos X,Y.	239
Tabla 4.6. Costo de materiales de fabricación de la mesa de trabajo.	239

	Pág.
Tabla 4.7. Costo de materiales de fabricación del tanque de trabajo.....	240
Tabla 4.8. Costo de materiales de fabricación del sistema de Bombeo y filtrado.....	240
Continuación.- Tabla 4.9. Costo de materiales de fabricación del sistema de Bombeo y filtrado.	241
Tabla 4.10. Costo de los materiales de fabricación del equipo.	241
Tabla 4.11. Costos de mano de obra de sistema de hilado.	242
Tabla 4.12. Costos de mano de obra de sistema de movimientos.....	243
Tabla 4.13. Costos de mano de obra de la mesa de trabajo.....	243
Tabla 4.14. Costos de mano de obra del tanque de trabajo.	244
Tabla 4.15. Costos de mano de obra de estructura de soporte.	244
Tabla 4.16. Costos de mano de obra de tanques para dieléctrico.	244
Tabla 4.17. Costos de mano de obra del sistema de bombeo y filtrado.....	245
Tabla 4.18. Costos de mano de obra del sistema de control.	245
Tabla 4.19. Costo de mano de obra.	245
Tabla 4.20. Costos de consumo eléctrico por equipo.	247
Tabla 4.21. Porcentajes de precio de maquinaria o bienes muebles usados [69].	247
Tabla 4.22. Costos de depreciación de maquinarias usadas.....	248
Tabla 4.23. Costo de consumibles.....	249
Tabla 4.24. Costos totales del proyecto.....	250
Tabla 4.25. Parámetros de máquina y proceso de corte.....	251
Tabla 4.26. Resumen generador de pulsos BX18.	251
Tabla 4.27. Resumen controlador C-Arc.	251
Tabla 4.28. Resumen placa Arduino Mega 2560.	252
Tabla 4.29. Resumen de sistema de bombeo y filtrado.	252
Tabla 4.30. Costos del proyecto.....	253

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Proceso de electroerosión mediante hilo [2].	23
Fig. 1.2. Fuente de alimentación genera voltaje y amperaje [2].	23
Fig. 1.3. Erosión del material mediante chispas [2].	24
Fig. 1.4. Eliminación de partículas erosionadas en tiempo de apagado [2].	24
Fig. 1.5. Filtrado de partículas y reinicio del ciclo [2].	25
Fig. 1.6. Cráter por electroerosión [3].	26
Fig. 1.7. Tensiones e intensidades eléctricas [3].	29
Fig. 1.8. Fase 1 de formación del arco eléctrico [3].	29
Fig. 1.9. Fase 2 de formación del arco eléctrico [3].	30
Fig. 1.10. Fase 3 de formación del arco eléctrico [3].	30
Fig. 1.11. Sistema de intercambio iónico con resinas [10].	49
Fig. 1.12. Ósmosis inversa e intercambio iónico en dos etapas [10].	50
Fig. 1.13. Clasificación de bombas hidráulicas [12].	52
Fig. 1.14. Bomba de succión axial [12].	53
Fig. 1.15. Direcciones del flujo de las bombas centrífugas [12].	53
Fig. 1.16. Ejemplos de bombas de lóbulo rotativo, tubo y tornillo [12].	54
Fig. 1.17. Tipos de filtración [13].	57
Fig. 1.18. Medios filtrantes [14].	58
Fig. 1.19. Esquema representativo de los medios filtrantes [14].	58
Fig. 1.20. Probeta rectangular [17].	61
Fig. 1.21. Probeta rectangular con agujeros para pines [17].	63
Fig. 1.22. Formas y geometría de roscas de tornillos de potencia [21].	69
Fig. 1.23. Acoplamiento rígido de brida.	77
Fig. 1.24. Nomenclatura de un cojinete de rodillos cónicos [25].	80
Fig. 1.25. Partes de la placa Arduino UNO [27].	83
Fig. 1.26. Montaje de Shield sobre placa Arduino [28].	86
Fig. 1.27. Placa Arduino Motor Shield [28].	86
Fig. 1.28. Placa EmonTx Shield [28].	87
Fig. 1.29. Placa Relay Shield [28].	87
Fig. 1.30. Placa TFT Shield [28].	88
Fig. 1.31. Placa Terminal Shield [28].	88
Fig. 1.32. Interfaz de LinuxCNC.	89
Fig. 1.33. Posiciones del servomotor según la duración del pulso [29].	91
Fig. 1.34. Partes de un servomotor [29].	93
Fig. 1.35. Tipos de servomotores según su movimiento [29].	95
Fig. 1.36. Estructura completa del sistema WEDM [30].	99
Fig. 1.37. Etapas del proceso WEDM [30].	99
Fig. 1.38. Formas de onda de tensión y corriente [30].	100
Fig. 1.39. Efecto del periodo de descarga sobre la superficie cortada [31].	104
Fig. 1.40. Carga EDM: símbolo y circuito equivalente [32].	105
Fig. 1.41. Estructura del generador de pulsos [32].	107
Fig. 1.42. Desviación del hilo [32].	109
Fig. 1.43. Tensión óptima del hilo [32].	110
Fig. 1.44. Generador de pulsos controlado por microordenador [32].	112
Fig. 1.45. Simulación de WEDM en CAMWorks [35].	116
Fig. 1.46. Pestaña CAMWorks.	117

	Pág.
Fig. 1.47. Árbol de rasgos de CAMWorks.....	118
Fig. 1.48. Botón "Extraer rasgos mecanizables".....	121
Fig. 1.49. Elementos mecanizables.....	121
Fig. 1.50. Plan de operaciones para pieza.....	122
Fig. 1.51. Botón "Editar definición".....	124
Fig. 1.52. Cuadro de diálogo para configurar operación.....	124
Fig. 1.53. Botón "Generar trayectoria de herramienta".....	125
Fig. 1.54. Trayectorias de herramienta.....	126
Fig. 1.55. Botón "Simular camino hta.".....	126
Fig. 1.56. Barra de herramientas "Simular camino hta.".....	127
Fig. 1.57. Botón "Postprocesar".....	128
Fig. 1.58. Cuadro de diálogo "Postprocesar".....	129
Fig. 1.59. Código NC generado.....	129
Fig. 2.1. Máquina electroerosionadora propuesta.....	138
Fig. 2.2. Polea motriz.....	141
Fig. 2.3. Polea conducida.....	141
Fig. 2.4. Rueda guía.....	141
Fig. 2.5. Sistema de tensión de hilo.....	142
Fig. 2.6. Geometría del eje de la polea motriz. Cotas en mm.....	147
Fig. 2.7. Reacciones y cargas del eje de la polea motriz. Cotas en mm.....	148
Fig. 2.8. Diagrama de fuerza cortante en eje de polea motriz. Cotas en mm.....	149
Fig. 2.9. Diagrama de momento flector en eje de polea motriz. Cotas en mm.....	149
Fig. 2.10. Diagrama de par de torsión en eje de polea motriz. Cotas en mm.....	150
Fig. 2.11. Estructura de montaje de carrete de hilo.....	154
Fig. 2.12. Sistema de movimiento propuesto.....	155
Fig. 2.13. Reacciones/cargas en el diente de tornillo de potencia rosca ACME.....	157
Fig. 2.14. Análisis de esfuerzos por Von Mises en AutoDesk Inventor.....	162
Fig. 2.15. Análisis de factor de seguridad por Von Mises en AutoDesk Inventor.....	162
Fig. 2.16. Reacciones y cargas del tornillo de potencia. Cotas en mm.....	163
Fig. 2.17. Reacciones y cargas en soportes guías. Cotas en mm.....	167
Fig. 2.18. Diagrama de fuerza cortante en soportes guías. Cotas en mm.....	168
Fig. 2.19. Diagrama de momento flector en soportes guías. Cotas en mm.....	168
Fig. 2.20. Chumacera con buje de desgaste de teflón para ejes de soporte guía.....	170
Fig. 2.21. Comportamiento de esfuerzos en ejes de soporte guía.....	171
Fig. 2.22. Comportamiento de factor de seguridad en ejes de soporte guía.....	171
Fig. 2.23. Dimensiones del tanque de trabajo. Cotas en mm.....	172
Fig. 2.24. Análisis de tanque de trabajo con cargas por presión de fluido.....	174
Fig. 2.25. Mesa de trabajo.....	175
Fig. 2.26. Diagrama de cargas o fuerzas en la Mesa de Trabajo. Cotas en mm.....	176
Fig. 2.27. Diagrama de fuerza cortante en la mesa de trabajo. Cotas en mm.....	177
Fig. 2.28. Diagrama de momento flector en la mesa de trabajo. Cotas en mm.....	178
Fig. 2.29. Geometría de la sección transversal de mesa de trabajo. Cotas en mm.....	178
Fig. 2.30. Centroides, sección transversal, mesa de trabajo. Cotas en mm.....	179
Fig. 2.31. Análisis de mesa de trabajo afectada por diferentes cargas.....	182
Fig. 2.32. Ensamble final de Mesa de trabajo con la pieza de trabajo montada.....	182
Fig. 2.33. Estructura de soporte de WEDM. Cotas en mm.....	183
Fig. 2.34. Análisis de esfuerzos de Estructura de soporte de WEDM.....	184
Fig. 2.35. Sistema de bombeo y filtrado propuesto.....	185

	Pág.
Fig. 2.36. Bomba de chorro Franklin Electric serie Versa Jet FVJ05CI [48].	189
Fig. 2.37. Bomba centrífuga multietapa LEO modelo 2ACm300H [49].	190
Fig. 2.38. Curvas de rendimiento hidráulico Bombas LEO [49].	192
Fig. 2.39. Manguera industrial Tramaflex [49].	193
Fig. 2.40. Tubería PVC [49].	193
Fig. 2.41. Válvula de bola 1 pulg [49].	194
Fig. 2.42. Manguera Loc-Line [50].	194
Fig. 2.43. Componente de manguera Loc-Line ¼ pulg [50].	195
Fig. 2.44. Esponja absorbente [50].	196
Fig. 2.45. Filtro triple de ultrafiltración AguaPlusRO [52].	198
Fig. 3.1. Sistema de control seleccionado [54].	201
Fig. 3.2. Cable EtherCat/Ethernet [54].	201
Fig. 3.3. Cable Adaptador USB a RS485 FTDI [54].	202
Fig. 3.4. Salidas de corriente de BX18 [54].	202
Fig. 3.5. Generador de pulsos BAXEDM BX18 [55].	203
Fig. 3.6. Límites operacionales del generador de pulsos BX18 [55].	205
Fig. 3.7. Controlador C-Arc de BAXEDM [56].	205
Fig. 3.8. Controlador ECT60 [57].	207
Fig. 3.9. Computadora Minis Forum GK41 [58].	208
Fig. 3.10. Placa Arduino Mega 2560 [59].	210
Fig. 3.11. Sensor analógico de conductividad eléctrica [60].	211
Fig. 3.12. Diagrama de conexión de sensor de conductividad [60].	212
Fig. 3.13. Sensor ultrasónico HC-SR04 [61].	213
Fig. 3.14. Zumbador [62].	214
Fig. 3.15. Pantalla LCD 20x4 [63].	215
Fig. 3.16. Espacio de trabajo en simulador Wokwi.	222
Fig. 3.17. Circuito de control de sistema de bombeo y filtrado.	223
Fig. 4.1. Tornillo de potencia. Cotas en mm.	226
Fig. 4.2. Entrada de voltaje del BX18.	231
Fig. 4.3. Carcasa conectada a tierra.	232
Fig. 4.4. Placa con tornillo para conexión a tierra.	232
Fig. 4.5. Conectores del controlador ECT60.	233
Fig. 4.6. Cable USB tipo B [67].	235

LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- ABMA: Asociación Americana de Fabricantes de Rodamientos (American Bearing Manufacturers Association)
- AFNOR: Asociación Francesa de Normalización (Association Française de Normalisation)
- ARM: Máquina RISC Avanzada (Advanced RISC Machine)
- ASTM: Sociedad Estadounidense para ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials)
- AVR: RISC Virtual Avanzado (Advanced Virtual RISC)
- CAD: Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design)
- CAM: Manufactura Asistida por Computadora (Computer-Aided Manufacturing).
- CD: Acero Estirado en Frío (Cold Drawn steel)
- CNC: Control Numérico Computarizado (Computerized Numerical Control)
- CMOS: Semiconductor Complementario de Óxido Metálico (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)
- d_m : Diámetro medio del tornillo
- DIN: Instituto Alemán de Normalización (Deutsches Institut für Normung)
- EDM: Mecanizado por Descarga Eléctrica (Electrical Discharge Machining)
- EN: Normas Europeas (Europäische Norm)
- g: Aceleración debida a la gravedad
- GB/T: Normas nacionales de la República Popular China (National Standards of the People's Republic of China). Normas nacionales recomendadas
- GND: Tierra (Ground). Término usado en electricidad
- HR: Acero laminado en caliente (Hot Rolled steel)
- HRC: Escala de dureza Rockwell C (Hardness Rockwell C Scale)
- I: Par de torsión
- IACS: Norma Internacional para el cobre recocido (International Annealed Copper Standard)
- ICSP: Programación serie en circuito (In-Chip Serial Programming)
- IDE: Entorno de desarrollo integrado (Integrated Development Environment)
- ISO: Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization)
- JIS: Normativa industrial japonesa (Japanese Industrial Standards)

LED: Diodo emisor de luz (Light Emitting Diode)
 MDI: Dispositivo de entrada manual de datos (Manual Data Input)
 PCD: Diamante policristalino (Polycrystalline diamond)
 Pvc: Policloruro de vinilo
 REB: Rodamiento de rodillos (Rolling-Element Bearing)
 RISC: Computador con conjunto de instrucciones reducido (Reduced Instruction Set Computer)
 S_y : Resistencia a la fluencia
 SAE: Sociedad de Ingenieros de Automoción (Society of Automotive Engineers)
 T_s : Par de torsión para subir la carga
 TTL: Lógica transistor a transistor (Transistor-Transistor Logic)
 UNE: Una Norma Española
 UNI: Unificación Italiana Nacional (Ente Nazionale Italiano di Unificazione)
 UNS: Sistema de Numeración Unificado (Unified Numbering System)
 USB: Bus Universal en Serie (Universal Serial Bus)
 VDI: Asociación de Ingenieros Alemanes (Verein Deutscher Ingenieure)
 VFD: Accionamiento de frecuencia variable (Variable Frequency Drive)
 WEDM: Mecanizado por descarga eléctrica por hilo (Wire-electro Discharge Machining)
 W_f : Fuerza debida a la fricción
 W_g : Fuerza debida a la gravedad
 $W_{inercial}$: Fuerza inercial
 ZAT: Zona Afectada Térmicamente
 δ : Esfuerzo flexionante
 γ : Peso específico del material
 ρ : Densidad
 τ : Esfuerzo cortante
 μ : Coeficiente de fricción de la superficie

INTRODUCCIÓN

El mecanizado consiste en eliminar parte del material de la pieza para producir una geometría específica con un grado definido de precisión y calidad superficial. El mecanizado tradicional requiere la presencia de una herramienta de corte más dura que la pieza a mecanizar. Aparte de la maquinabilidad, la complejidad de la forma de la pieza a mecanizar, la necesidad de transmisión automatizada de datos, la alta precisión y la miniaturización durante la práctica de fabricación moderna centran la investigación en procesos de mecanizado no tradicionales.

Según investigaciones, las técnicas más eficaces para la automatización de un sistema de producción como CAM/CAD se pueden integrar fácilmente con algún método de mecanizado no tradicional. De entre una serie de técnicas no tradicionales, los procesos electroquímicos y térmicos están muy extendidos hoy en día en las industrias de corte de metales difíciles de mecanizar. En el grupo de procesos térmicos no tradicionales, el proceso de mecanizado por electroerosión elimina material mediante una serie de descargas eléctricas entre el electrodo de la herramienta y la pieza de trabajo en presencia de fluido dieléctrico.

Gracias al desarrollo de potentes generadores y servocontroladores de avance, el proceso de electroerosión mejoró mucho después de 1960. A mediados de la década de 1970, la electroerosión por hilo demostró ser una técnica comercialmente viable que ayudó a dar forma a la industria metalúrgica tal y como es hoy en día. A mediados de los mediados de los 80, las técnicas de electroerosión se transfirieron a una máquina herramienta. En el proceso de corte por electroerosión mediante hilo se utiliza un hilo pequeño como electrodo, la pieza de trabajo se monta en la mesa de la máquina herramienta y el medio dieléctrico se aplica en la zona entre el hilo y la pieza a cortar, donde el movimiento del alambre se controla numéricamente para conseguir la trayectoria deseada. Con la tecnología WEDM, se pueden realizar fácilmente perfiles 2D o 3D complicados de materiales difíciles de cortar, además, se hace más popular para su aplicación en industria aeroespacial/aeronáutica, industria médica y áreas relacionadas con el corte de materiales conductores.

1. MARCO TEÓRICO

A través de la historia, el mecanizado ha formado parte de los diferentes avances tecnológicos y ha ido evolucionando aceleradamente. Este proceso se ha dividido en muchos tipos, utilizando diferente maquinaria y descubriendo nuevos campos de aplicación, como el maquinado por electroerosión. A continuación, se presenta una recopilación de datos históricos y de aplicación para el corte de electroerosión por hilo.

1.1. HISTORIA DE LA ELECTROEROSIÓN

El efecto erosivo de las descargas eléctricas fue observado por primera vez en 1770 por el físico inglés Joseph Priestley [1].

Dos científicos soviéticos, B. R. Lazarenko y N. I. Lazarenko, se encargaron en 1943 de investigar formas de evitar la erosión de los contactos eléctricos de tungsteno debida a las chispas. Fracasaron en esta tarea, aunque descubrieron que la erosión se controlaba con mayor precisión si los electrodos se sumergían en un fluido dieléctrico. Esto los llevó a inventar una máquina de electroerosión para trabajar materiales difíciles de mecanizar, como el tungsteno. La máquina de los Lazarenko se conoce como máquina de tipo RC, por el circuito de resistencia condensador (circuito RC) utilizado para cargar los electrodos.

Simultáneamente, aunque de forma independiente, un equipo estadounidense formado por Harold Stark, Víctor Harding y Jack Beaver desarrolló una máquina de electroerosión para extraer brocas y machos de roscar rotos de piezas de fundición de aluminio. Así, unas unidades de chispa más potentes, combinadas con la repetición automática de la chispa y la sustitución del fluido con un dispositivo de interrupción electromagnética produjeron máquinas prácticas. Las máquinas de Stark, Harding y Beaver eran capaces de producir 60 chispas por segundo. Las máquinas posteriores basadas en su diseño utilizaban circuitos de tubos de vacío que eran capaces de producir miles de chispas por segundo, aumentando significativamente la velocidad de corte.

El tipo de máquina de corte por hilo surgió en la década de 1960 para fabricar herramientas de acero templado. El electrodo en la electroerosión por hilo es un hilo metálico. Para evitar que la erosión del hilo provoque su rotura, éste se enrolla entre dos bobinas, de modo que la parte activa del hilo cambia constantemente. Las primeras máquinas de control numérico eran conversiones de fresadoras verticales de cinta perforada. La primera máquina de control numérico disponible comercialmente construida como máquina de electroerosión por corte de hilo se fabricó en la URSS en 1967. En los años 60, el grupo de David H. Dulebohn de la Andrew Engineering Company desarrolló máquinas que podían seguir ópticamente las líneas de un plano maestro para fresadoras y rectificadoras. Más tarde, los planos maestros se produjeron mediante trazadores controlados numéricamente por ordenador para obtener una mayor precisión. En 1974 se fabricó una máquina de electroerosión por hilo que utilizaba el plóter de dibujo CNC y técnicas de seguimiento óptico de líneas. Más tarde, Dulebohn utilizó el mismo programa CNC de trazado para controlar directamente la máquina de electroerosión, y la primera máquina de electroerosión CNC se fabricó en 1976.

La capacidad y el uso de la electroerosión por hilo comercial han avanzado sustancialmente durante las últimas décadas. Las velocidades de avance han aumentado y el acabado superficial se puede controlar con precisión. A medida que el sector avanza hacia la cuarta revolución industrial, se espera que las máquinas de electroerosión se vuelvan más inteligentes a medida que los fabricantes incorporen más funciones avanzadas para mejorar la productividad y la eficacia del sistema.

1.2. ELECTROEROSIÓN POR HILO

El proceso de corte aplicando la electroerosión por hilo es un proceso complejo que requiere conocimiento de conceptos, proceso, materiales a utilizar, intervalos de operación, etc., para así poder realizar un proceso lo más eficiente posible, en cuanto a tiempos de operación y materiales a utilizar. A continuación, se describirá en que consiste este proceso.

1.2.1. DESCRIPCIÓN

La electroerosión por hilo es un proceso de corte no convencional, es decir, no corta la pieza por métodos mecánicos sino por un efecto erosivo termoeléctrico. Se utiliza un electrodo de hilo móvil que atraviesa la pieza de trabajo y que es supervisado con precisión por un sistema CNC [2].

Como ya se mencionó, la electroerosión por hilo elimina material con electricidad mediante la erosión por chispas, por lo que el material a cortar debe ser eléctricamente conductor. Se generan pulsos eléctricos rápidos de corriente continua entre el electrodo y la pieza. Entre el alambre y la pieza se tiene una interfaz de agua desionizada, denominada dieléctrico. El agua pura es un aislante, aunque el agua del grifo suele contener minerales que la hacen demasiada conductora para la electroerosión por hilo. Para controlar la conductividad del agua, ésta pasa por un depósito de resina para eliminar gran parte de sus elementos conductores, lo que se denomina agua desionizada. A medida que la máquina corta, la conductividad del agua tiende a aumentar, y una bomba fuerza automáticamente el paso del agua por un depósito de resina cuando la conductividad del agua es demasiado alta.

Cuando se aplica una tensión eléctrica suficiente, el fluido se ioniza y una chispa controlada erosiona con precisión una pequeña sección de la pieza, provocando su fusión y vaporización. Estos pulsos eléctricos se repiten miles de veces por segundo. El dieléctrico enfría el metal vaporizado y lo expulsa del hueco las partículas erosionadas resolidificadas. El fluido dieléctrico pasa por un filtro que elimina los sólidos en suspensión. La resina elimina las partículas disueltas y los filtros eliminan las partículas en suspensión. Para mantener la precisión del proceso, el fluido dieléctrico pasa por un enfriador para mantener el líquido a una temperatura constante (ver Fig. 1.1).

Servomotores de corriente directa o corriente alterna mantienen una separación de 0.05 a 0.08 mm entre el electrodo de hilo y la pieza, evitando que el electrodo entre en cortocircuito con la pieza de trabajo y haciendo avanzar la máquina a medida que corta la forma deseada. Como el hilo nunca toca la pieza, la electroerosión por hilo es una operación de corte sin tensiones residuales.

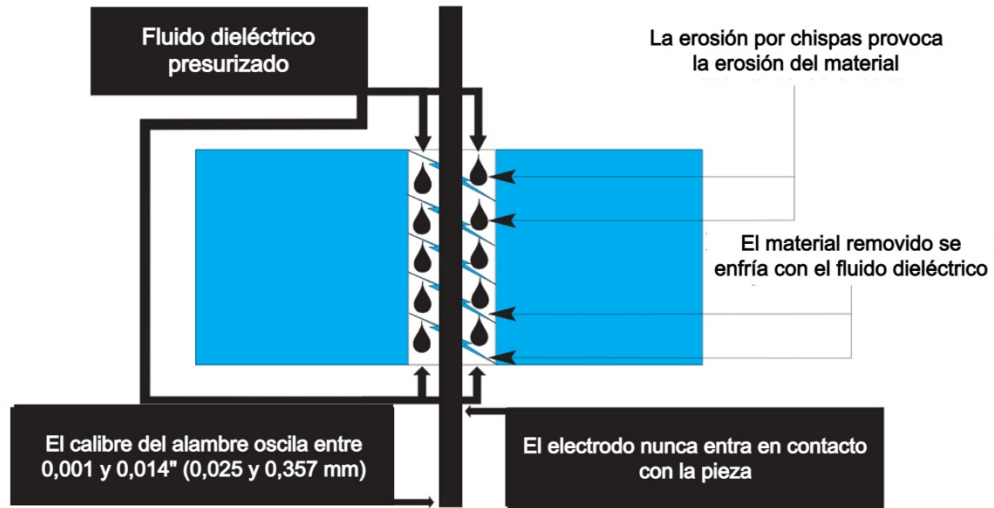


Fig. 1.1. Proceso de electroerosión mediante hilo [2].

El hilo se comercializa en bobinas, siendo el más común de latón o alambre de latón y zinc de 0.0254 a 0.0356 mm de espesor. A veces se utiliza hilo de molibdeno o tungsteno. Constantemente se introduce hilo nuevo, lo que explica la extrema precisión y repetibilidad de la electroerosión por hilo.

A continuación, se ilustran los pasos que sigue el proceso de corte por electroerosión mediante hilo [2].

- La fuente de alimentación genera voltaje y amperaje requerido: El agua desionizada rodea el electrodo mientras la fuente de alimentación genera voltios y amperios para producir la chispa (ver Fig. 1.2).

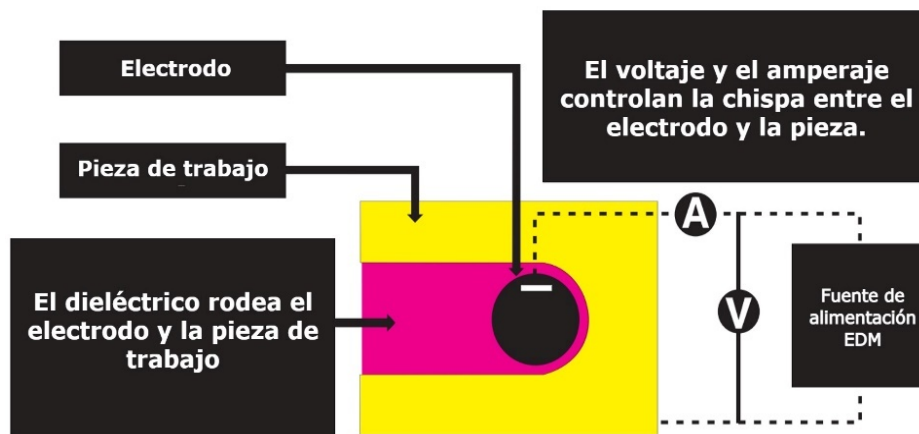


Fig. 1.2. Fuente de alimentación genera voltaje y amperaje [2].

- Durante el tiempo de encendido, la chispa controlada erosiona el material: Las chispas funden y vaporizan el material con precisión (ver Fig. 1.3).

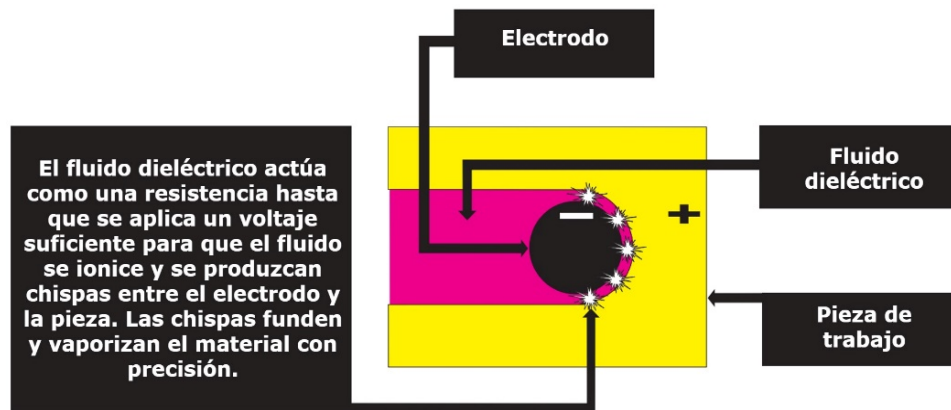


Fig. 1.3. Erosión del material mediante chispas [2].

- El tiempo de apagado permite que el fluido elimine las partículas erosionadas: Durante el ciclo de apagado, el fluido dieléctrico presurizado enfría inmediatamente el material y arrastra las partículas erosionadas (ver Fig. 1.4).

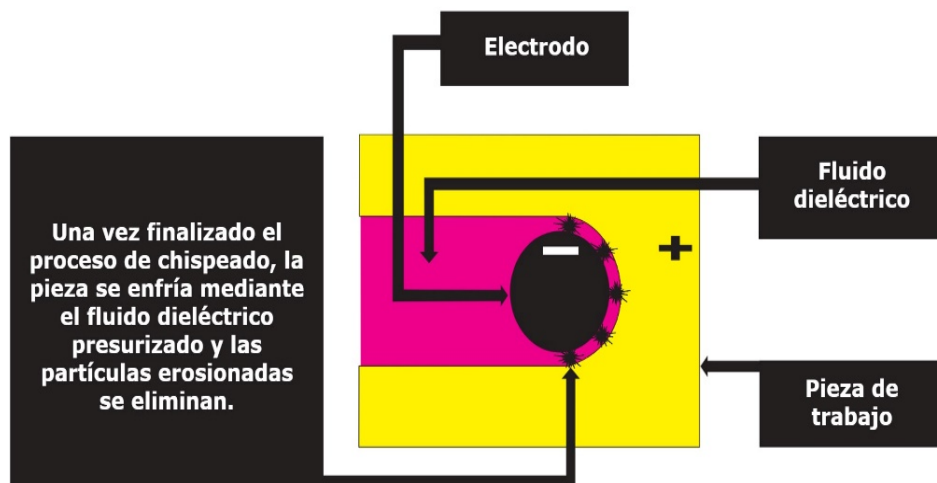


Fig. 1.4. Eliminación de partículas erosionadas en tiempo de apagado [2].

- El filtro elimina las virutas mientras se repite el ciclo: Las partículas erosionadas son eliminadas y separadas por un sistema de filtrado (ver Fig. 1.5).

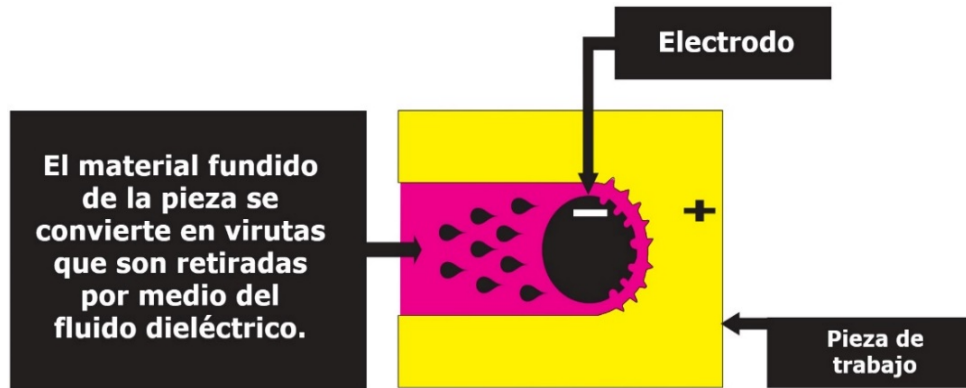


Fig. 1.5. Filtrado de partículas y reinicio del ciclo [2].

1.2.2. TERMINOLOGÍA

Entre los términos más comunes utilizados en la electroerosión mediante hilo se encuentran los siguientes [3]:

- Arco: Sucesión de descargas eléctricas que se sitúan localizadas en un punto, con efecto destructor.
- Aspiración: Succión del líquido dieléctrico a través de la pieza o electrodo.
- Cortocircuito: Situación dada cuando existe contacto directo entre los dos electrodos (electrodo y pieza). No tiene efecto destructor, aunque sí negativo para el proceso.
- Cráter: Cavity realizada por cada uno de los pulsos sobre la superficie que se está mecanizando (ver Fig. 1.6).
- Desgaste: Se denomina desgaste volumétrico relativo (Q_v) a la relación de volumen de material erosionado del electrodo con el volumen erosionado de la pieza. Se mide en porcentaje (Ec. 1.1).

$$Q_v = \left(\frac{\text{Volumen erosionado del electrodo}}{\text{Volumen erosionado de la pieza}} \right) (100\%) \quad (1.1)$$

- Desionización: Retorno después de cada descarga eléctrica a la situación normal no conductora del líquido dieléctrico.

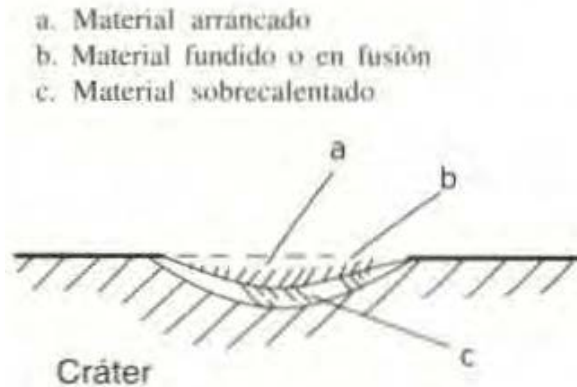


Fig. 1.6. Cráter por electroerosión [3].

- Líquido dieléctrico: Líquido no conductor de electricidad que se utiliza en electroerosión. En éste se sumerge la pieza y el electrodo.
- Electrodo: Es la herramienta de trabajo que se utiliza en electroerosión.
- Estabilidad de funcionamiento: Una máquina de electroerosión trabaja de forma estable cuando existe ausencia de cortocircuitos y de arcos; además, el amperímetro no oscila y el reloj comparador de medida de profundidad sigue una marcha uniforme.
- Estado de superficie: El estado superficial de electroerosión es multidireccional. Dicho estado superficial se relaciona con la rugosidad media (R_a) por medio del número de rugosidad (N_r) VDI 3400, donde R_a se expresa en μm (Ec. 1.2).

$$N_r = 20 \log(10R_a) \quad (1.2)$$

- Gap es el espacio entre el electrodo y pieza en el cual se producen las descargas.
- Limpieza por inyección de dieléctrico: Introducción de dieléctrico en el gap por inyección a una presión dada.
- Ionización: Periodo anterior al paso de la descarga eléctrica durante el cual el líquido dieléctrico se convierte en conductor en una zona dada. Para ello se ha de aplicar tensión eléctrica a ambos polos.
- Lavado: Limpieza de dieléctrico que se encuentra polucionado dentro del gap, sustituyéndolo por otro limpio.

- Medida menor por lado: Medida lateral de seguridad empleada en el cálculo de los electrodos de desbaste, para tener en consideración eventuales errores en el centrado del electrodo.
- Pieza: elemento que se corta con el electrodo.
- Polución: Grado de suciedad del dieléctrico del gap. Este contiene restos del cracking del dieléctrico y del material erosionado.
- Presión del dieléctrico: Unidades de fuerza por unidad de superficie que actúa sobre las paredes por las que circula el dieléctrico; sus unidades son kg/cm^2 y bar.
- Rendimiento: Se define como la conjunción entre una buena velocidad de arranque de material y un desgaste lo más bajo posible. Para un buen rendimiento, la primera condición es una buena estabilidad en el trabajo.
- Rigidez dieléctrica: Se define “rigidez dieléctrica de un dieléctrico” al campo eléctrico que es capaz de aguantar dicho dieléctrico sin perforar, o sin volverse conductor, se mide en kilovatios/cm.
- Viscosidad: La viscosidad de un fluido corresponde a la resistencia de rozamiento que ejerce el desplazamiento relativo de sus moléculas cuando se halla el fluido en movimiento. La viscosidad dinámica de un fluido es la fuerza por unidad de superficie que se tiene que aplicar a una superficie plana sólida, que está en contacto con el fluido para desplazarla en su plano, manteniendo la superficie plana considerada y un plano paralelo a esta superficie, considerado en el fluido a una distancia de la superficie igual a la unidad. La viscosidad cinética de un fluido es igual a su viscosidad dinámica dividida por la masa. Unidades: Stokes (St), centiStokes (cSt).

Entre los términos eléctricos más comunes utilizados en la electroerosión se tienen los siguientes [3]:

- Descarga: Paso de corriente a través de algún punto del gap, debido a un pulso de tensión.
- Descarga isoenergética: Caso en el que se cumple que todas las descargas tienen la misma energía.
- Descarga isofrecuencial: Caso en el que se cumple que la frecuencia de descargas es constante.
- Frecuencia de pulso (fp): Número de pulsos que se producen en 1 s.

- Periodo (t_p): Tiempo que pasa desde el comienzo de un pulso hasta el comienzo del pulso siguiente.
- Relación de pulso (τ): Relación que existe entre el tiempo de pulso y el periodo, medida en porcentaje (Ec. 1.3).

$$\tau = \left(\frac{t_i}{t_p} \right) (100\%) \quad (1.3)$$

- Tensión de descarga (U_f): Tensión entre electrodo y pieza, después de creada la descarga (ver Fig. 1.7).
- Tensión en vacío (U_0): Tensión entre electrodos si no se tiene descarga (ver Fig. 1.7).
- Pulso de tensión: Tensión aplicada a ambos electrodos durante un tiempo muy corto.
- Intensidad media de corriente (I_{fm}): Valor medido de la corriente que circula por el gap durante todo el mecanizado. Es el valor leído en el amperímetro (ver Fig. 1.7).
- Intensidad de pulso (i_f): Intensidad que circula por el gap durante una descarga (ver Fig. 1.7).
- Tiempo de descarga (t_f): Tiempo durante el cual pasa la descarga hasta que eléctricamente se corta la corriente (ver Fig. 1.7).
- Tiempo de pulso (t_i): Tiempo que dura el pulso de erosión entre ambos electrodos (ver Fig. 1.7).
- Tiempo de pausa (t_0): Intervalo de tiempo que transcurre entre el final de un pulso y el comienzo del siguiente. Se verifica que $t_p = t_i + t_0$ (ver Fig. 1.7).
- Tiempo de retraso o de descarga (t_d): Tiempo que transcurre entre la aplicación de pulso de tensión y el comienzo de descarga. Suele ser muy pequeño, de 0.5 a 2 segundos. Se cumple que $t_i = t_d + t_f$ (ver Fig. 1.7).

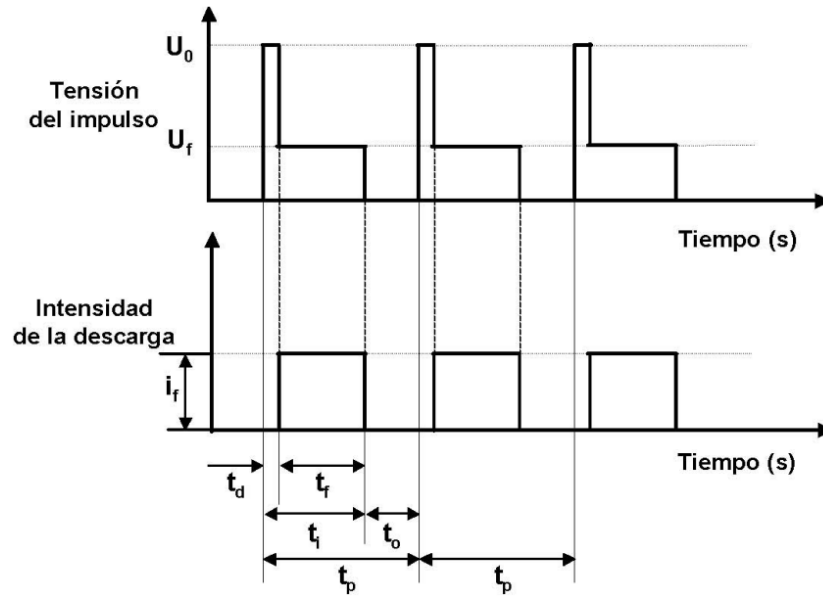


Fig. 1.7. Tensiones e intensidades eléctricas [3].

1.2.3. FORMACIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico se origina por la tensión creada entre el electrodo y la pieza. Se puede representar en las fases siguientes [3]:

- Fase 1: Se forma un campo eléctrico en la totalidad del espacio intermedio, concentrándose en el dieléctrico, generándose un puente entre la pieza y el electrodo. Se produce una ionización por choque que crea partículas de carga positiva y negativa (ver Fig. 1.8).

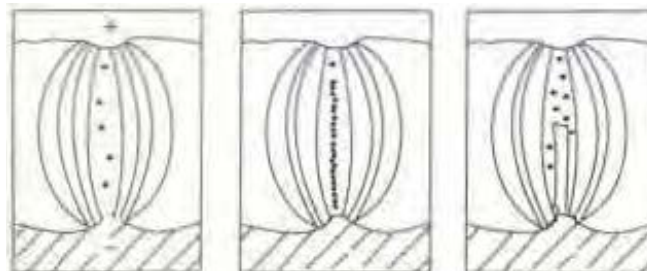


Fig. 1.8. Fase 1 de formación del arco eléctrico [3].

- Fase 2: Se genera un flujo de corriente eléctrica, aumentando la temperatura y la presión en la zona, apareciendo también burbujas de vapor (ver Fig. 1.9).

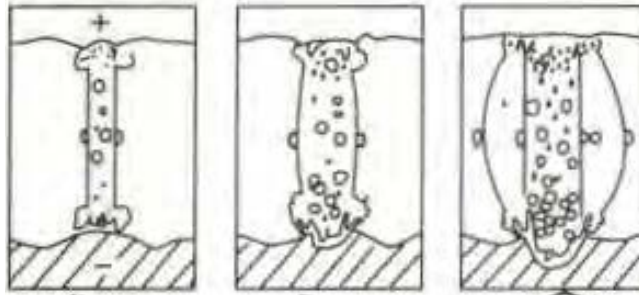


Fig. 1.9. Fase 2 de formación del arco eléctrico [3].

- Fase 3: Se produce un flujo de calor y se reduce la cantidad de partículas cargadas eléctricamente, disminuyendo la presión y el arco eléctrico. Esto eleva la temperatura donde la superficie sobrecalentada se evapora explosivamente y arranca material fundido, arrojando finísimas partículas metálicas y productos desintegrados del dieléctrico (ver Fig. 1.10).

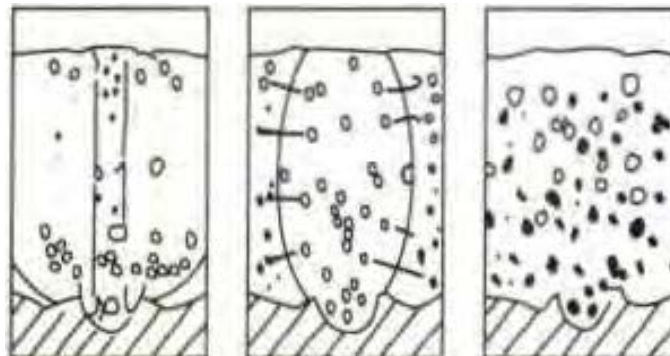


Fig. 1.10. Fase 3 de formación del arco eléctrico [3].

1.2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Entre las ventajas que presenta el proceso de corte por electroerosión mediante hilo se tienen [4]:

- Concepción de las piezas:
 - Simplificación de piezas, por la posibilidad de realizar matrices más complicadas.
 - Normalización de elementos, por la utilización de placas normalizadas sobre las que se pueden mecanizar mediante la electroerosión con hilo toda clase de orificios de corte, centrado, etc.

- Preparación del trabajo:
 - Preparación rápida del trabajo, no es necesario el estudio de electrodos ni su fabricación.
 - Puesta en fabricación inmediatamente.
 - Tecnología simplificada, las variables de trabajo son menos que en el mecanizado convencional.
- Fabricación:
 - El electrodo de hilo es universal y sirve para cualquier configuración de pieza.
 - Trabajo automático, el trabajo se desarrolla sin vigilancia suplementaria.
 - Alta utilización de la máquina, como consecuencia de la posibilidad de trabajo automático.
 - Mano de obra sin cualificación especial, porque el mecanizado mediante electroerosión por hilo no exige conocimientos tecnológicos previos especiales y el operario puede ser formado en poco tiempo.
- Calidad:
 - Menos rechazos, debido a que el trabajo se desarrolla automáticamente y a la posibilidad de comprobación gráfica previa del programa.
 - Tiempos de control reducidos, los controles intermedios no son necesarios.
 - Se evitan las deformaciones de tratamiento térmico, puesto que el tratamiento se realiza antes del corte.
- Flexibilidad:
 - Facilidad de modificación, los programas pueden ser fácilmente modificables sobre la misma máquina.
 - Rapidez de puesta a punto, posibilidad de corte rápido de prototipos para su ensayo.
- Integración:
 - Posibilidad de coordinar, de manera sencilla, el diseño, la preparación del trabajo y la fabricación, en virtud de las facilidades ofrecidas por el sistema de corte por hilo y la programación de la máquina.

Entre las desventajas que presenta el proceso de corte por electroerosión mediante hilo se tienen [5]:

- Únicamente se aplica a materiales conductores. Ya que la eliminación del material se efectúa usando cargas eléctricas controladas.
- No es recomendable para cortar tuberías. Este proceso está diseñado para cortar materiales sólidos.
- Puede oxidar la superficie de corte. Según el metal que se desee trabajar, puede que se cree una capa de óxido en la superficie de corte. Gracias a esto posiblemente se requiera de una limpieza secundaria que pueda aumentar el coste del servicio.

1.3. MÁQUINA DE CORTE POR ELECTROEROSIÓN MEDIANTE HILO

Las electroerosionadoras por hilo tienen una serie de componentes básicos, donde sobresalen los siguientes:

- Electrodo o hilo.
- Pieza de trabajo.
- Fluido dieléctrico.
- Sistema de filtrado y bombeo de dieléctrico.
- Generador de corriente eléctrica.
- Sistema de movimiento del electrodo o mecanismo de avance.

Las características de cada uno de estos componentes dependen directamente del equipo al que van destinados y del tipo de pieza a cortar. A continuación, se realizará un análisis de cada uno de los componentes anteriormente citados.

1.4. HILO Y SISTEMA DE HILO PARA ELECTROEROSIÓN

En los inicios de la electroerosión mediante hilo, existían sólo dos opciones de electrodo para realizar el proceso: cobre o latón. Actualmente, se tiene más opciones de electrodos: hilos de calidad económica, hilos para velocidad, hilos para metal duro y diamante policristalino, entre otros. A continuación, se describen las distintas propiedades del hilo para electroerosión y los distintos tipos de hilo y sus aplicaciones [6].

1.4.1. PROPIEDADES DEL HILO

Es necesario conocer en que consiste cada propiedad del hilo electrodo para hacer la mejor selección de este, según las necesidades requeridas para realizar un corte preciso y óptimo durante el proceso de corte por electroerosión mediante hilo. A continuación se explican las principales propiedades del hilo para electroerosión:

- Resistencia a la tracción: Es la capacidad máxima de carga de un material basada en su capacidad para resistir el estiramiento y la rotura. Viene determinada por la carga máxima dividida por el área de la sección transversal del hilo. El hilo de electroerosión de alta resistencia a la tracción proporciona una mejor rectitud de los bordes, por lo que es una buena elección para piezas de una sola pasada. En los hilos de diámetro pequeño y fino, una alta resistencia a la tracción reduce la rotura de estos.
- Resistencia a la fractura: Esta propiedad se puede describir como la tenacidad o resiliencia del hilo. Es la capacidad del hilo para resistir las condiciones en el gap, donde se producen las descargas eléctricas.
- Conductividad: Es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. En electroerosión, cuanto mayor es la conductividad del hilo, más potencia se puede transmitir a la pieza. Debido que una mayor conductividad es más eficaz, el resultado habitual es una mayor velocidad de corte.
- Temperatura de fusión/evaporación: Una baja temperatura de fusión/evaporación del hilo resultará mejor para la limpieza o lavado del gap. Se necesita que las pequeñas partículas que se desprenden del hilo durante el proceso de corte se vaporicen, que se conviertan rápidamente en gases, en lugar de contaminar el hueco con virutas resolidificadas. Cuando se utilizan tiempos de encendido más largos (desbaste), se produce fusión. Aunque la fusión produce virutas, las aleaciones de electrodos de baja temperatura (recubiertas de zinc) producirán cráteres más grandes en la superficie del hilo para transportar más agua y contaminantes fuera del hueco, ayudando al lavado. Los hilos de molibdeno y tungsteno, con altas temperaturas de fusión/evaporación, cortan lentamente y limpian mal, aunque son satisfactorios para cortes de desbaste en los que la velocidad no es un problema, aunque sí la rectitud de la pieza y una geometría nítida.

- Dureza: El término dureza se confunde a menudo con el de resistencia a la tracción. La dureza o temple de un hilo se refiere a la ductilidad del hilo, o a su capacidad de elongación. Los hilos de electroerosión se clasifican en blandos o duros. Un hilo duro proporcionará la mayor fiabilidad de autohilado.

1.4.2. TIPOS DE HILO

Para seleccionar el hilo electrodo que mejor se acople a las necesidades de corte por electroerosión mediante hilo según material a cortar, voltaje y corriente eléctrica, etc., se requiere conocer sus características. A continuación, se describe cada tipo de hilo disponible comercialmente, así:

- Hilo de cobre: El primer hilo utilizado para la electroerosión por hilo fue el cobre. Su disponibilidad y alta conductividad (100% IACS) lo convirtieron en la mejor elección para un electrodo de electroerosión en su tiempo, aunque a medida que los generadores se hicieron más potentes, la limitada velocidad de corte del cobre y su baja resistencia a la tracción (entre 234 y 414 MPa) revelaron sus limitaciones.
- Hilo de latón: El zinc se añade al cobre para producir hilo de latón, que es el hilo más común actualmente. Suelen tener una relación Cu/Zn 63/37 (América y Europa) y 65/35 (Asia). El zinc tiene un punto de fusión de 419.5 °C, más bajo que el del cobre (1,085 °C), lo que lo convierte en un material de electrodo mejor que el cobre, por lo que cuanto más zinc haya en la superficie de un hilo para electroerosión, más rápido cortará. Sin embargo, surgen dificultades de fabricación cuando el volumen de zinc se aproxima al 40% y su estructura cristalina cambia a una fase gamma, lo que hace que el hilo se vuelva muy quebradizo y difícil de estirar. Sin embargo, se tiene hilos que se fabrican con un contenido de 60/40 Cu/Zn para velocidades de corte más rápidas. La resistencia a la tracción de los hilos de latón oscila entre 372 y 1,193 MPa, dependiendo de la composición de la aleación y de su temple. Los hilos de latón suelen ser de color latón brillante. Los hilos de latón con un acabado mate y sin brillo o con manchas o decoloración son indicios de oxidación o contaminación.

- Hilo revestido: Son aquellos a los que se ha aplicado una capa muy fina (2-3 μm) de zinc puro sobre un núcleo de latón o cobre. La electrogalvanización es el método más preciso de aplicación, depositando zinc puro sobre el cuerpo del hilo, asegurando un espesor uniforme y la uniformidad de la superficie. La inmersión en caliente es otro método de recubrimiento del hilo. Es un método de revestimiento más rápido y menos preciso, y estos hilos suelen ser menos caros.

Estos hilos están disponibles en resistencias a la tracción de 421 – 896 MPa y pueden tener un revestimiento de zinc puro o de óxido de zinc, dependiendo de la aplicación. Los revestimientos de zinc puro tienen un color plateado brillante, mientras que los de óxido de zinc son de color gris apagado. Los hilos recubiertos de zinc cortan mucho más rápido y se rompen con menos frecuencia que los hilos de latón puro y se recomiendan para el desbaste rápido y el acabado de aceros. Los hilos recubiertos de zinc producirán un acabado superficial superior y una mejor integridad de la superficie, especialmente contra carburos y diamante policristalino.

- Hilo recocido por difusión: Los hilos con un alto contenido de zinc constituyen un mejor electrodo de electroerosión, aunque los hilos de electroerosión con porcentajes de zinc cercanos al 40% son difíciles de producir, por lo que se ha ideado un método especial para producir hilos con una superficie de zinc más elevada. Se aplica una capa gruesa de zinc puro a la superficie exterior (18-35 μm) de un núcleo de cobre o latón. El recocido en un horno especial difunde el revestimiento de zinc puro en una mezcla de casi 50% de latón y 50% de zinc (en realidad, el contenido de zinc es de aproximadamente 45-47%), que es superior al umbral del 40% que era la limitación de fabricación anterior. Los hilos recocidos por difusión están disponibles en resistencias a la tracción de 427 – 883 MPa y tienen un color entre amarillo y marrón. Estos hilos son adecuados para el corte rápido de piezas de gran espesor, de producción en volumen y en condiciones de lavado deficientes. Se pueden utilizar con una amplia gama de materiales, incluidos aceros para herramientas, aluminio y grafito.
- Hilo de molibdeno: Se trata de un hilo de muy alta resistencia, con una resistencia a la tracción superior a 1,896 MPa. Sin embargo, debido a que el hilo de molibdeno tiene temperaturas de fusión y vaporización muy elevadas, entre 2,625 y 5,560 °C

respectivamente, es un material para electrodo relativamente pobre. Debido a sus altas temperaturas de trabajo, los cráteres de electroerosión dejados en la superficie del hilo son muy pequeños comparados con los dejados en un hilo con base de latón y, por lo tanto, no se limpiarán tan eficientemente. Este hilo se utiliza a menudo en diámetros pequeños (entre 0.1016 y 0.1524 mm) y finos (menos de 0.1016 mm) para cumplir los requisitos de los planos de cortes estrechos y radios de esquinas interiores casi afilados. Debido a su alta resistencia a la tracción, el hilo de molibdeno ayuda a mantener una excelente rectitud de la pared y a reducir el número de roturas de hilo, habituales en muchos hilos de latón finos. En aplicaciones especiales (médicas y militares), no puede haber contaminación de cobre o zinc en la superficie de corte del hilo. Esto elimina la utilización de todos los hilos de la familia del cobre y obliga a utilizar un hilo de molibdeno o tungsteno. El uso de hilo de molibdeno debe ser específico para cada aplicación debido a su elevado coste, su reducida capacidad de hilado y sus lentos tiempos de mecanizado.

- Hilo con núcleo de acero: Tiene un núcleo de acero al carbono de alta resistencia a la rotura y está revestido con una gruesa capa de latón recocido por difusión, rico en zinc para proporcionar buenas cualidades de corte. La combinación de resistencia a la rotura con el rendimiento del latón puede convertir a este hilo en una solución para aplicaciones difíciles. Los hilos finos con núcleo de acero (0.0254 – 0.1016 mm) tienen una resistencia a la tracción de 2,000 MPa, superior a la del molibdeno, y con características de corte mucho mejores. Los diámetros mayores (0.1524 – 0.3048 mm) tienen una resistencia a la tracción de 800 – 1,000 MPa. El hilo con núcleo de acero es una opción cuando se trata de piezas extremadamente gruesas, piezas que requieren una buena rectitud y cuando existen malas condiciones de lavado.
- Hilo de tungsteno: Suele ser una de las últimas opciones para resolver una aplicación difícil. Aunque este hilo es muy caro, corta mal y es difícil trabajar con él, a veces es la única solución a un problema de electroerosión. Con temperaturas de fusión y vaporización aún más altas que el molibdeno, 3,410 y 5,930 °C respectivamente, es el electrodo de hilo menos eficaz en cuanto a rendimiento de corte. Disponible en diámetros pequeños (0.0254 – 0.0508 mm), el hilo de tungsteno tiene la mayor resistencia a la tracción de todos los hilos de electroerosión. Esto le permite cortar

detalles muy finos y de paredes muy rectas con una definición nítida. Al igual que el hilo de molibdeno, el hilo de tungsteno también se utiliza en aplicaciones que deben estar libres de cobre o zinc en las superficies cortadas.

1.4.3. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL HILO

El sistema de alimentación del hilo consta de un carrete que contiene el hilo y un mecanismo para alimentarlo de manera controlada. El carrete debe estar diseñado para desenrollar el hilo sin que forme un enredo. Las partes que componen este sistema se describen a continuación, así:

- Guía del hilo. Es un componente crítico que asegura que el hilo se mantenga en la posición correcta durante el corte. Debe ser ajustable y precisa para evitar desviaciones del hilo y garantizar cortes precisos.
- Polea motriz y conducida. Recibe el hilo y lo guía a los canales correspondientes. Se tiene una polea igual que lleva el hilo al sistema de recolección de este. En su diseño se deben considerar aspectos de construcción de canales, ya que una de las funciones principales es el tensado del hilo y tenerlo en su lugar correspondiente. De igual forma, estos canales ayudan a guiar el hilo a medida que se desenrolla y se alimenta a través del sistema de corte [7].

Un punto muy importante para tomar en consideración es la distribución de carga en una polea acanalada, y esto se refiere a como se distribuye la tensión y la carga a lo largo del cuerpo del hilo durante el proceso de corte. Haciendo énfasis en las transmisiones de las bandas en V, con respecto a la relación de las geometrías de las poleas, así como la correa, en que, si la banda no se coloca correctamente o no queda, ocurren algunos problemas, los cuales son:

- Si la correa está demasiado desplazada hacia un costado, se puede deslizar o salir de la polea durante el funcionamiento, lo que resultaría en una pérdida de potencia mecánica.

- Si la correa no se ajusta adecuadamente en el canal de la polea, la fricción entre ambos cuerpos puede disminuir, lo que también afectaría negativamente a la potencia mecánica.
- Ruedas guías para el hilo. su función es darle continuidad, tensión y guía al hilo. Estas ruedas guías no son más que rodamientos rígidos de bolas con la adición de un canal en el centro.

1.4.4. SISTEMA DE TENSIÓN DEL HILO

Para mantener la tensión adecuada en el hilo, se requiere un sistema de tensión. La tensión del hilo debe ser suficiente para evitar el estiramiento excesivo o la rotura del hilo durante el corte. El sistema de tensión de hilo se compone de poleas acanaladas, ruedas guías y distancias entre estas lo suficientemente para generar una tensión aceptable.

1.4.5. PARÁMETROS DE DISEÑO

Los parámetros a tener en cuenta para un adecuado diseño del sistema de tensión de hilo se explican a continuación:

- Tasa de arranque de material. La tasa de eliminación de material de la pieza de trabajo durante el tiempo de trabajo se estima mediante la Ec. 1.4:

$$MRR = \frac{M_i - M_f}{T_p} \quad (1.4)$$

donde: MRR es la tasa de eliminación de material en kg/s,

M_i es la masa inicial de la pieza de trabajo en kg,

M_f es la masa final de la pieza de trabajo en kg,

T es el tiempo de mecanizado en s, y
 ρ es la densidad de la pieza de trabajo en kg/m³.

- Velocidad del hilo. La velocidad con la que el hilo avanza a través del sistema de alimentación del hilo se puede expresar mediante la Ec. 1.5:

$$V = \frac{\text{MRR}}{2(R + S)h} \quad (1.5)$$

donde: R es el radio del hilo de corte en mm,
S es el gap en mm,
h es el espesor de la pieza de trabajo en mm, y
V es la velocidad del hilo en m/s.

- Potencia de trabajo en poleas motrices. La potencia de trabajo es un parámetro necesario para seleccionar el servomotor que moverá el mecanismo de entrada y salida. Debido a que no se tiene un procedimiento de cálculo para este tipo de mecanismo, se realiza un proceso de cálculo similar al de bandas en V, debido a que es el mismo principio y únicamente cambia el medio de transmisión de potencia. La fuerza del lado de mayor tensión del hilo depende del efecto de tracción que tiene sobre la superficie transversal del hilo, por lo que se puede calcular mediante la Ec. 1.6:

$$F_{\text{tracción}} = F_1 = (\sigma_{\text{tracción}})(A_{\text{hilo}}) \quad (1.6)$$

Luego se calcula la fuerza en el lado flojo del hilo, que se representa con F_2 , mediante la Ec. 1.7:

$$\frac{F_1 - F_c}{F_2 - F_c} = e^{0.5123\theta} \quad (1.7)$$

En el factor 0.51230 en el exponente se considera un coeficiente de fricción efectivo que está dado por $f/\sin(f/2)$, lo que corresponde a las ranuras o canales de la polea y siendo “f” el coeficiente de fricción efectivo. Este se tabula contra ángulos de ranura o canal de la polea de 30, 34 y 38°, con lo cual los valores tabulados son 0.50, 0.45 y 0.40, respectivamente.

La Gates Rubber Company declara que su coeficiente de fricción efectivo K_c es de 0.51230 para ranuras. Por lo que en el presente trabajo de graduación se asumirá como una aproximación para que el hilo de latón no deslice. Se hallará F_c que es la fuerza centrífuga mediante la Ec. 1.8:

$$F_c = K_c \left(\frac{V}{1000} \right)^2 \quad (1.8)$$

La potencia mecánica nominal que tiene la polea acanalada se calcula por medio de la Ec. 1.9:

$$\text{Potencia}_{\text{nom}} = \frac{(F_1 - F_2)V_{\text{avance}}}{33000} \quad (1.9)$$

Se calcula la velocidad de giro de la polea motriz mediante la Ec. 1.10:

$$V = \frac{\pi D_{\text{polea motriz}} N}{12} \quad (1.10)$$

donde: $D_{\text{polea motriz}}$ es el diámetro de la polea motriz en pulg,

N es la velocidad de giro en rpm, y

V es la velocidad del hilo en pies/min.

El par de torsión generado en la polea motriz se calcula mediante la Ec. 1.11:

$$\text{Potencia}_{\text{nom}} = \frac{T_n}{63000} \quad (1.11)$$

- Criterio de falla: Los criterios de falla son conjuntos de condiciones o ecuaciones que se utilizan para predecir cuándo y cómo un material o estructura dejará de ser capaz de soportar las cargas o fuerzas aplicadas sin experimentar una deformación excesiva o una fractura. Estos criterios son esenciales para el diseño seguro y eficiente de estructuras y componentes, ya que ayudan a determinar los límites de carga y las condiciones bajo las cuales una estructura podría fallar. En el presente trabajo de graduación se utilizarán los criterios de falla de Goodman modificada y Tresca.

El criterio de falla de Goodman modificada es una variante del criterio de Goodman, que se utiliza para predecir la vida útil de componentes sometidos a ciclos repetitivos de carga en materiales que experimentan fatiga. Este criterio es particularmente relevante en situaciones donde las cargas varían en magnitud con el tiempo, lo que puede llevar a la fatiga y eventual fractura del material. Se representa mediante la Ec. 1.12:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \quad (1.12)$$

donde: n es el factor de seguridad,

σ'_a es el esfuerzo alternante equivalente en psi o Pa,

σ'_m es el esfuerzo medio equivalente en psi o Pa,

S_e es el límite de resistencia del material en psi o Pa, y

S_{ut} es la resistencia a carga máxima del material en psi o Pa.

El esfuerzo alternante equivalente y el esfuerzo medio equivalente se representan por las Ecs. 1.13 y 1.14, respectivamente:

$$\sigma'_a = (\sigma_a^2 + 3\tau_a^2)^{1/2} \quad (1.13)$$

$$\sigma'_m = (\sigma_m^2 + 3\tau_m^2)^{1/2} \quad (1.14)$$

donde: σ_a es el esfuerzo por flexión alternante,
 τ_a es el esfuerzo por torsión alternante,
 σ_m es el esfuerzo por flexión medio, y
 τ_m es el esfuerzo por torsión medio.

Los esfuerzos anteriormente citados se representan por las Ecs. 1.15, 1.16, 1.17 y 1.18, respectivamente:

$$\sigma_a = \frac{M_a c}{I} = 32 \frac{M_a}{\pi d^3} \quad (1.15)$$

$$\tau_a = \frac{T_a c}{J} = 16 \frac{T_a}{\pi d^3} \quad (1.16)$$

$$\sigma_m = \frac{M_m c}{I} = 32 \frac{M_m}{\pi d^3} \quad (1.17)$$

$$\tau_m = \frac{T_m c}{J} = 16 \frac{T_m}{\pi d^3} \quad (1.18)$$

Para calcular el límite de resistencia a la fatiga del material S_e , se utiliza la Ec. 1.19:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (1.19)$$

donde: k_a es el factor de modificación de la condición superficial,
 k_b es el factor de modificación por el tamaño,
 k_c es el factor de modificación por la carga,
 k_d es el factor de modificación por la temperatura,
 k_e es el factor de confiabilidad, y
 S'_e es el límite de resistencia a la fatiga.

Así, el factor k_a se calcula mediante la Ec. 1.20:

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (1.20)$$

donde: S_{ut} es la resistencia a carga máxima,

a es un coeficiente en función de la resistencia a carga máxima, y

b es un exponente en función del acabado superficial.

Así, a y b se pueden obtener de la Tabla 1.1.

El factor k_b se calcula mediante una de las ecuaciones presentadas en la Tabla 1.2, en función del diámetro de la pieza a analizar:

Destacar que para carga axial no existe efecto de tamaño, por lo cual $k_b = 1$.

Para el factor k_c , se especifican los valores medios en la Tabla 1.3:

Tabla 1.1. Parámetros en el factor de la condición superficial.

Acabado superficial	a , ksi	b
Esmerilado	1.34	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.7	-0.265
Laminado en caliente	14.4	-0.718
Como sale de la forja	39.9	-0.995

Tabla 1.2. Ecuaciones para determinar k_b .

Ecuación de k_b	Intervalo del diámetro de la pieza
$(d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107}$	$0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg}$
$0.91d^{-0.157}$	$2 < d \leq 10 \text{ pulg}$
$(d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107}$	$2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$
$1.51d^{-0.157}$	$51 < d \leq 254 \text{ mm}$

Tabla 1.3. Valores de k_c según la carga a la que la pieza se somete.

Tipo de carga	k_c
Flexión	1
Axial	0.85
Torsión	0.59

El factor k_d se selecciona de la Tabla 1.4, en función de la temperatura de operación de la pieza a analizar.

Tabla 1.4. Resistencia a carga máxima del acero según temperatura.

Temperatura, °C	k_d
20	1.000
50	1.010
100	1.020
150	1.025
200	1.020
250	1.000
300	0.975
350	0.943
400	0.900
450	0.843
500	0.768
550	0.672
600	0.549

El factor k_e se determina en función del porcentaje de confiabilidad de la pieza a analizar. Los valores se presentan en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Factores de confiabilidad.

Confiabilidad, %	K_e
50	1.000
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659
99.9999	0.620

Finalmente, para determinar el límite de resistencia a la fatiga, se selecciona un valor de los presentados en la Tabla 1.6 en función de la resistencia a carga máxima de la pieza a analizar.

Tabla 1.6. Valor de S_e' en función de S_{ut} .

S_e'	Intervalo de S_{ut}
$0.5S_{ut}$	$S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)}$
100 ksi	$S_{ut} > 200 \text{ kpsi}$

El criterio de falla de Tresca, también conocido como el criterio de corte máximo, es un enfoque utilizado en la mecánica de materiales para predecir cuándo un material dúctil experimentará una falla plástica debido a la carga. Este criterio se centra en la resistencia del material a las tensiones de corte y se aplica principalmente a situaciones en las que las deformaciones plásticas son una preocupación importante. Su ecuación se expresa en la Ec. 1.21:

$$n = \frac{0.5S_y}{\tau_{\text{máx}}} \quad (1.21)$$

donde: n es el factor de seguridad,

S_y es la resistencia a la fluencia, y

$\tau_{\text{máx}}$ es el esfuerzo combinado por cortante máximo.

1.5. FLUIDO DIELECTRICO

La misión del dieléctrico es la de crear un campo donde se concentren las chispas en un punto, con ello se logra una capacidad de erosión muy superior a la que se daría si entre ambos electrodos hubiese un gas o aire. También este debe permitir la ionización momentánea, el aislamiento, el enfriamiento y la eliminación de partículas, además de mantener una temperatura regulada en los materiales de trabajo en esta misma zona.

La principal característica eléctrica de un aislante es su rigidez dieléctrica. Al aumentar la diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza, llega un instante en que el líquido se ioniza ligeramente permitiendo el paso de una pequeña corriente eléctrica. Esto hace aumentar la ionización, con lo que la resistencia eléctrica del líquido dieléctrico baja bruscamente y tiene lugar una descarga eléctrica en forma de avalancha, que caracteriza a las descargas erosivas.

Una vez terminada la descarga eléctrica, el líquido se debe de desionizar y la descarga siguiente se podrá producir en el punto en que el campo eléctrico entre el electrodo y la pieza sea capaz de volver a ionizarlo y de formar la columna a través del cual se dará la descarga siguiente, ocurriendo así un reparto al azar de las descargas

eléctricas sobre la superficie a erosionar. Si la desionización es rápida la velocidad de arranque de material aumenta mucho, mientras el desgaste relativo se reduce considerablemente.

Entre las funciones más importantes del dieléctrico durante el proceso de corte por electroerosión mediante hilo son:

- El arrastre de las partículas ya erosionadas de la zona de trabajo o gap, mediante un procedimiento de limpieza adecuado, para evitar problemas de estabilidad en el proceso.
- Refrigerar el electrodo y la pieza, ya que, debido al efecto térmico de las descargas, se tienden a calentar durante el corte.

La elección del tipo de dieléctrico según la tarea a realizar es importante para asegurar las mejores condiciones en el gap. En el caso de la electroerosión por hilo, la distancia entre la pieza y el electrodo es muy reducida, lo que impide a líquidos viscosos fluir fácilmente, por lo que se aconseja usar líquidos derivados del petróleo o agua desionizada. Este dieléctrico debe poseer las características siguientes [8]:

- Tener rigidez dieléctrica para soportar los campos eléctricos que se forman por la diferencia de potencial entre la pieza y el electrodo, y que permita el paso de corriente en forma de descarga para que haya erosión.
- Presentar baja viscosidad y baja tensión superficial, para que acceda con facilidad al gap y cumpla las condiciones de aislamiento.
- Tener baja volatibilidad para evitar pérdidas.
- Tener un punto de inflamación elevado, para evitar riesgos de incendios.
- No deben desprender vapores nocivos que originen irritaciones en la piel, ni olores desagradables.
- Conservar sus propiedades en todas las condiciones de corte.
- Su precio no debe ser excesivo y la obtención en el mercado debe ser fácil.

Se pueden identificar dos familias de dieléctricos: agua y aceites. Para el corte por electroerosión mediante hilo se recomienda el agua destilada o desmineralizada (desionizada). Los usos y aplicaciones del agua desionizada son:

- Debido a su baja conductividad eléctrica, se utiliza para sistemas de enfriamiento de equipos de alta potencia, donde evita las posibles obstrucciones por formación de depósitos de minerales.
- En sistemas de refrigeración y circuitos de enfriamiento.
- En procesos de las industrias textil, química, automotriz, entre otros, donde se requiera agua libre de minerales.

1.5.1. AGUA DESIONIZADA COMO FLUIDO DE TRABAJO

El uso de agua desionizada como fluido de trabajo en el proceso de electroerosión mediante hilo trae consigo grandes y diferentes beneficios, donde se destacan [8]:

- Evita la corrosión: Ya que no contiene impurezas ni minerales que puedan reaccionar con la pieza de trabajo. El proceso de electroerosión mediante hilo es muy sensible a la corrosión y cualquier daño a la pieza de trabajo puede afectar negativamente la precisión del corte.
- Reduce la resistencia eléctrica: Tiene una resistencia eléctrica mucho menor que el agua normal, mejorando la eficiencia del proceso de electroerosión por hilo y reduce el tiempo de corte.
- Evita la acumulación de sedimentos: El agua normal contiene minerales y otros sedimentos que se pueden acumular en la pieza de trabajo y el equipo de corte durante el proceso de electroerosión por hilo. Estos sedimentos pueden afectar negativamente la calidad del corte y reducir la vida útil del equipo.

Tomando en consideración lo anterior, es importante conocer de manera general los métodos por los cuales se puede obtener el agua desionizada. Los dos más importantes son el Intercambio iónico y la osmosis inversa [8]:

- Intercambio iónico: Son reacciones químicas de sustitución entre un electrolito en solución y un electrolito insoluble con el cual se pone en contacto la solución. Es una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido no soluble, son intercambiados equivalentemente, por iones de igual carga en solución. El sólido tiene

una estructura en forma de red de pesca abierta y los iones móviles neutralizan eléctricamente a los grupos cargados, o potencialmente cargados, que están adheridos a la matriz sólida, conocido como intercambiador iónico. El intercambio catiónico es el desplazamiento de un ion positivo por otro ion positivo; el intercambio aniónico por su parte es el desplazamiento de iones negativos o aniones por otros iones negativos. La naturaleza de esta reacción implica que hasta cierto punto sea reversible. Al proceso de retornar el intercambiador iónico a su estado original se denomina regeneración de lecho.

Pese a que el intercambio es una reacción “reversible”, con cada regeneración del lecho, se pierde cierta capacidad de intercambio, bien sea por la pérdida de sitios de intercambio superficiales, sometimiento a condiciones rigurosas de pH y temperatura y/o por acción de oxidantes severos [9].

La desionización supone la eliminación de sustancias disueltas cargadas eléctricamente (ionizadas) sujetándolas a lugares cargados positiva o negativamente en una resina al pasar el agua a través de una columna rellena con esta resina. Este proceso es llamado intercambio iónico y se puede usar de diferentes maneras para producir agua desionizada de diferentes calidades. Existen diferentes sistemas o métodos para su obtención, aunque el más comúnmente utilizado es el sistema de resina catiónica de ácido fuerte + anión básico fuerte. Este sistema consiste en dos recipientes, uno conteniendo una resina de intercambio catiónico en forma de protones (H^+) y el otro conteniendo una resina aniónica en forma hidroxilos (OH^-) [10] (ver Fig. 1.11).

El agua fluye a través de la columna catiónica, con lo cual todos los cationes son sustituidos por protones (H^+). El agua que cede cationes luego fluye a través de la columna aniónica. Esta vez, todos los cationes cargados negativamente son intercambiados por iones hidroxilo (OH^-), los cuales se combinan con los protones para formar agua (H_2O).

Estos sistemas eliminan todos los iones, incluyendo la sílice. En la mayoría de los casos se aconseja reducir el flujo de iones que se pasan a través del intercambiador iónico por medio de la instalación de una unidad eliminadora de CO_2 entre los recipientes de intercambio iónico. Esto reduce el contenido de CO_2 a unos

pocos miligramos por litro y ocasiona una reducción subsiguiente del volumen de la resina aniónica de base fuerte y en los requerimientos de regeneración de los reactivos.

En general este sistema de resina de catión ácido fuerte y anión básico fuerte es el método más simple y con éste se puede obtener agua desionizada que puede ser usada en una amplia variedad de aplicaciones.

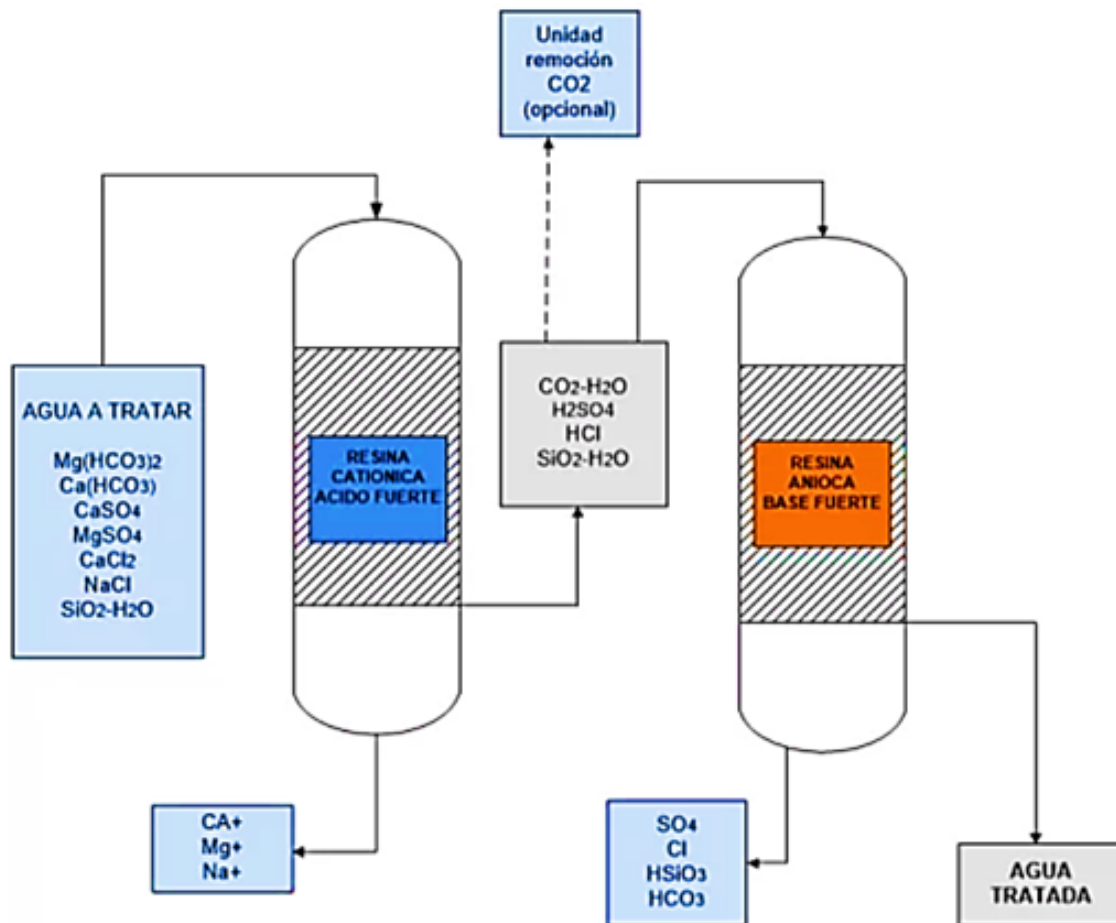


Fig. 1.11. Sistema de intercambio iónico con resinas [10].

- Osmosis inversa: El agua desionizada puede ser producida en plantas de ósmosis inversa. La ósmosis inversa es la filtración más perfecta conocida y permitirá la eliminación de partículas tan pequeñas como los iones de una disolución. Esta técnica se usa para purificar el agua y eliminar sales, además de otras impurezas para mejorar el color, sabor y otras propiedades del fluido. La ósmosis inversa es capaz de rechazar las bacterias, sales, azúcares, proteínas, partículas, tintes, y otros constituyentes que

tengan un peso molecular de más de 150 - 250 Daltons. La ósmosis inversa cumple con la mayoría de los estándares de agua con un sistema de un solo paso y los estándares más altos con un sistema de doble paso (ver Fig. 1.12).

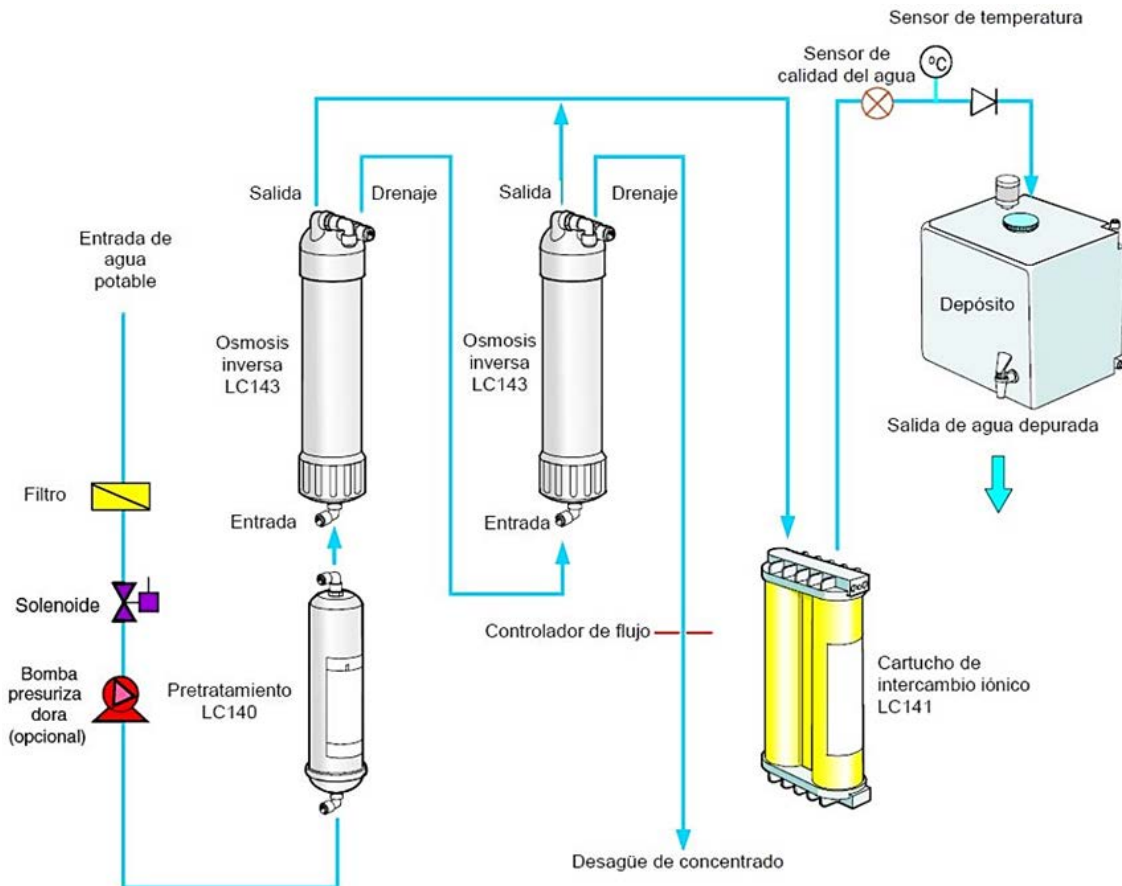


Fig. 1.12. Ósmosis inversa e intercambio iónico en dos etapas [10].

La fuerza promotora del proceso de purificación por ósmosis inversa es una presión del intervalo de 0.34 a 6.9 MPa. Es mucho más eficiente energéticamente que los procesos de cambio de fase (destilación) y más eficiente que los productos químicos fuertes requeridos para la regeneración de los procesos de intercambio iónico. La separación de iones con ósmosis inversa es asistida por partículas cargadas. Esto significa que los iones disueltos que portan una carga, tales como las sales, es más probable que sean rechazados por la membrana que aquellos que no están cargados, tales como los compuestos orgánicos. Cuanto más grande sean la carga y la partícula, mayor probabilidad habrá de que sea rechazada [11].

Habiendo conocido de manera general los procesos por los cuales se puede obtener el agua desmineralizada o desionizada, se llega a la conclusión de que debido a la naturaleza del Trabajo de Graduación y por la cantidad de elementos que componen los sistemas de desmineralización del agua, estos robustecerían las dimensiones y disposición de la electroerosionadora, por lo tanto es más factible comprar el agua desmineralizada de algún distribuidor nacional, y satisfaciendo los requerimientos del proceso de corte por electroerosión mediante hilo.

1.6. SISTEMA DE BOMBEO

Como parte de los sistemas auxiliares que componen a la máquina de electroerosión mediante hilo se tiene el sistema de bombeo y de recirculación del fluido dieléctrico. Existe una gran cantidad de tipos de bombas que pueden cumplir los requisitos necesarios para el buen funcionamiento de la electroerosionadora a diseñar, por lo que se debe hacer una revisión de las características de cada una de ellas y así determinar la más conveniente, sobre la base de parámetros técnicos y de diseño, los cuales se profundizarán en el Capítulo 2 de este Trabajo de Graduación.

Como se ha citado, el fluido dieléctrico debe recircular constantemente y así arrastrar los sedimentos que resulten del proceso de electroerosión, por lo tanto, la bomba deberá suministrar un caudal constante. A continuación, se hace una breve introducción a los tipos de bombas disponibles comercialmente [12].

1.6.1. GENERALIDADES

Existen dos grupos principales de bombas: rotodinámicas y de desplazamiento positivo. Los nombres provienen de cómo las bombas transfieren la energía al medio que bombean, es decir, impulsor mediante un rotor impulsor que transfiere energía por una acción dinámica o moviendo un fluido por desplazamiento.

Los grupos de bombas disponibles en el mercado se dividen en subgrupos, de acuerdo con los aspectos mecánicos de la bomba. Cada tipo de bomba es más apropiado para determinados usos, ya que se adapta mejor a determinadas demandas del proceso (ver Fig. 1.13) [12].

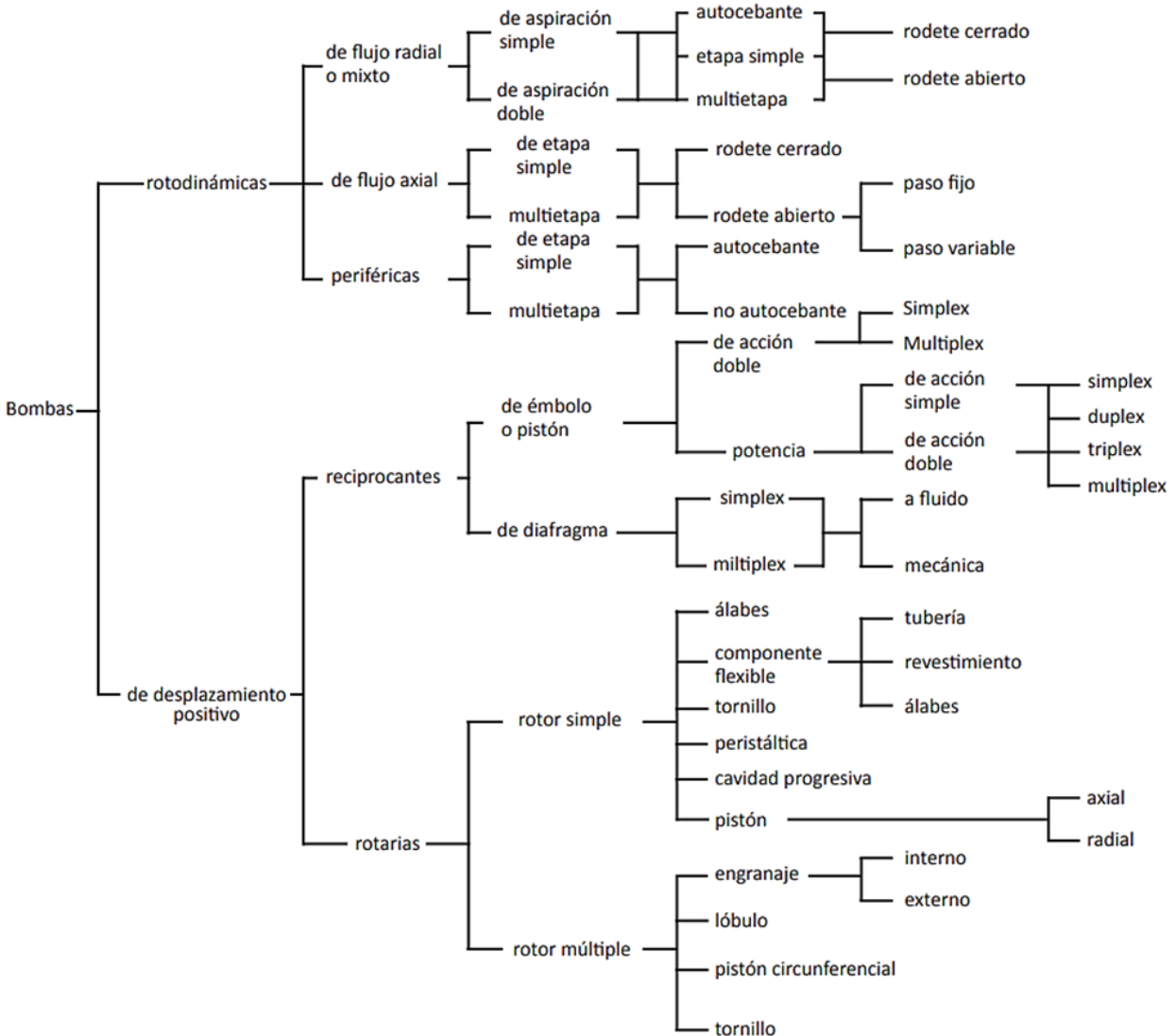


Fig. 1.13. Clasificación de bombas hidráulicas [12].

1.6.2. BOMBAS ROTODINÁMICAS

Las bombas rotodinámicas o centrífugas transfieren energía a un fluido a través de un impulsor o rotor impulsor. El líquido ingresa en la succión de la bomba y pasa al

centro del impulsor en donde se acelera hasta que alcanza una gran velocidad. Luego pasa a través de un difusor que convierte la carga de velocidad en carga de presión que sale a través de la descarga de la bomba (ver Fig. 1.14).

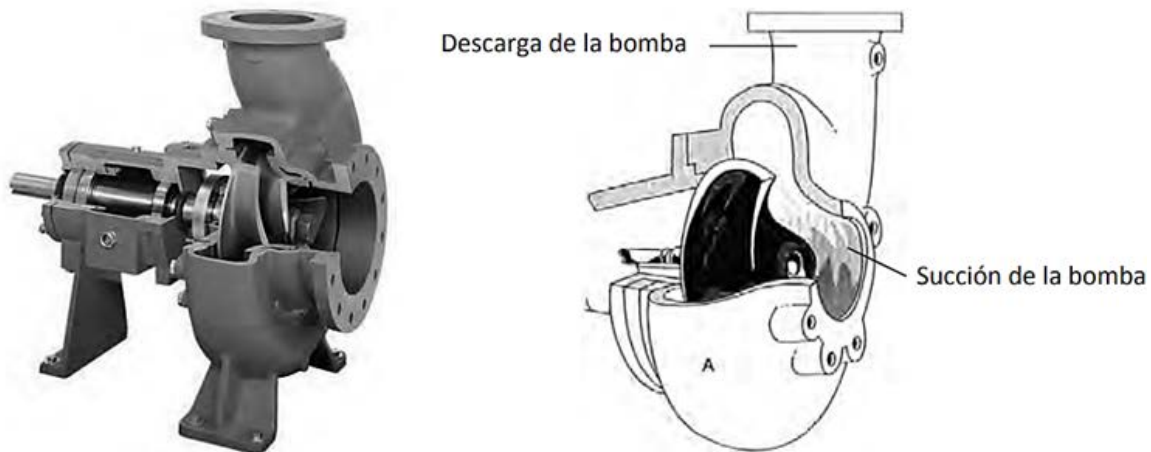


Fig. 1.14. Bomba de succión axial [12].

Las bombas centrífugas pueden ser horizontales o verticales, y existen montadas en bastidor o de acoplamiento directo. Existen también tres categorías de bombas centrífugas según la dirección del flujo: radial, mixto y axial [12] (ver Fig. 1.15).

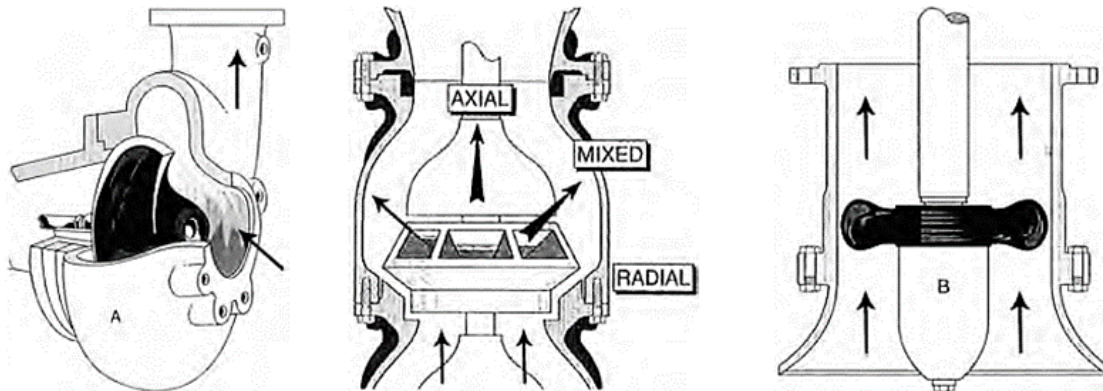


Fig. 1.15. Direcciones del flujo de las bombas centrífugas [12].

- Bombas de flujo radial: la succión y la descarga de la bomba están a 90° grados.
- Bombas de flujo mixto: la succión y la descarga están en un ángulo inferior a 180° aunque superior a 90°.

- Bombas de flujo axial: se empuja el agua desde la succión hasta la descarga, que están directamente enfrentadas.

1.6.3. BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Las bombas de desplazamiento positivo tienen en el extremo de la succión una cavidad que se expande y en el extremo de la descarga una cavidad que se encoge. A medida que la cavidad del extremo de la succión se expande, el líquido fluye dentro de la bomba y sale por el extremo de la descarga a medida que la cavidad se contrae.

En teoría, a una determinada velocidad o cantidad de rpm, las bombas de desplazamiento positivo producen el mismo caudal, independientemente de la presión de descarga. En realidad, la presión está limitada por el par del motor y por fugas internas (deslizamiento). No obstante, la presión puede alcanzar niveles peligrosos, por lo que normalmente se coloca en el lado donde se tiene presión una válvula limitadora de presión, de seguridad o de alivio para evitar daños en el sistema. La válvula puede ser externa o interna.

Las bombas de desplazamiento positivo son máquinas de flujo constante. Por lo general, el caudal es proporcional a la velocidad de la bomba, por lo que resultan ideales para controlar caudal mediante velocidad variable. Se usan para presiones altas y fluidos viscosos.

Los dos tipos principales de bombas de desplazamiento son las bombas reciprocantes y las rotativas. Estos dos grupos principales se dividen en varios subgrupos, como bombas de lóbulo rotativo, tubo y tornillo (ver Fig. 1.16).

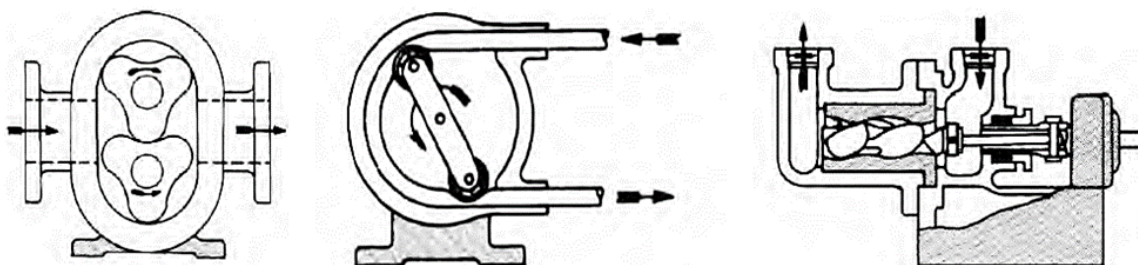


Fig. 1.16. Ejemplos de bombas de lóbulo rotativo, tubo y tornillo [12].

Habitualmente, las bombas rotativas de desplazamiento positivo trabajan a presiones de hasta 3.5 MPa. Transfieren líquidos desde la succión hasta el extremo con presión mediante la acción de rotores, tornillos, lóbulos, engranajes, rodillos, etc., que rotan dentro de una carcasa rígida. Las bombas reciprocantes de desplazamiento positivo trabajan a presiones de hasta 50 MPa. Transfieren líquidos mediante cambios del volumen interno, por ejemplo, a través de la acción de un pistón en un cilindro. Por lo general, tienen válvulas de retención en los extremos de ingreso y salida de la bomba [12].

Tomando en consideración las características que ofrece cada tipo de bomba, en el Capítulo 2 del presente Trabajo de Graduación se realizará la selección de las bombas hidráulicas haciendo uso de parámetros técnicos, como pérdidas por fricción por accesorios, entre otros, además de considerar los parámetros de diseño de la máquina y fórmulas para calcular su potencia.

1.7. SISTEMA DE FILTRADO

Los filtros en los sistemas de electroerosión deben ser sinónimo de calidad, tanto en máquinas de corte por hilo, como en las de penetración, debido a que las partículas contaminantes en el medio dieléctrico, desde la zona de trabajo hacia la zona de filtrado, deben ser correctamente filtradas para garantizar la estabilidad del proceso.

Además, un dieléctrico en óptimas condiciones permite que el desgaste del electrodo disminuya, a su vez que el arranque de material sea más preciso y eficiente; partículas de carbón y burbujas de gas provenientes de la descomposición (cracking) del dieléctrico y las impurezas procedentes de la erosión disminuyen la calidad del proceso, ya que si no son filtradas adecuadamente pueden llegar a taponar los sistemas que permiten al líquido dieléctrico circular durante el proceso. Si los sistemas de filtrado fallan y la contaminación del dieléctrico es visible, se puede ocasionar la formación de arcos y cortocircuitos que dañen tanto al electrodo como a la pieza.

Por ejemplo, en máquinas equipadas con filtros que retienen partículas de menos de cinco micras, si el filtro presenta fallas o llega a estallar, esto ocasionará que los

sedimentos retenidos en el filtro lleguen a las mangueras, y debido a la complejidad de los sistemas de estas máquinas, ocasionen un taponamiento de las válvulas, lo que impide el normal funcionamiento de la máquina, y un daño prematuro [13].

A continuación, se realiza un análisis este tema, abordando los aspectos importantes de manera general, con el fin de conocer las características que ofrecen los diferentes modelos de filtros, ya que cada uno cumple con diferentes requerimientos y tienen determinadas aplicaciones. El propósito principal de un sistema de filtración es el control de la contaminación, ya sea de un agente externo o un agente que puede ser creado durante el proceso de manufactura [14].

Según sea el fluido, ya sea aire, agua, solvente, pintura, aceites, etc., existen sistemas de filtración específicos a cada tipo de fluido y a sus condiciones de operación. Es importante que, para diseñar, seleccionar u operar un sistema de filtración se conozcan los elementos y conceptos básicos en torno a la filtración.

1.7.1. CONCEPTOS DE FILTRACIÓN

Filtración se define como el proceso de separación de sólidos en la corriente de un fluido a través del uso de un medio filtrante el cual puede ser un tamiz, papel filtro, membrana, etc.

En un proceso de filtración, se le conoce como fluido filtrado al fluido limpio que cumple con las características establecidas y como residuo a los elementos o partículas que quedan atrapados o retenidos en el medio filtrante.

A continuación, se presentan diversos conceptos que ayudarán a comprender de la mejor manera en que consiste el proceso de filtración:

- Tipos de Filtración: Dependiendo del tamaño de los poros del material filtrante empleado, el proceso de filtración puede ser clasificado en distintos tipos: filtrado ordinario, microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa (ver Fig. 1.17).



Fig. 1.17. Tipos de filtración [13].

- Medio Filtrante: Se define como cualquier material que, en condiciones de operación específica, es permeable a uno o más componentes de una mezcla, solución o suspensión e impermeable a los componentes restantes. El principal rol de un medio filtrante es causar la separación de partículas de un fluido con el mínimo consumo de energía. Existen varios tipos de medios filtrantes, estos tienen la característica de tener o formar poros.
 - a) Mallas y telas tejidas: Metálicas, Poliméricas o fibras naturales
 - b) Materiales no tejidos: Fibras termo adheridas, polímeros espumados.
 - c) Membranas: Polímeros o Cerámicos.

En la Fig. 1.18 se presenta como son físicamente los medios filtrantes antes citados.

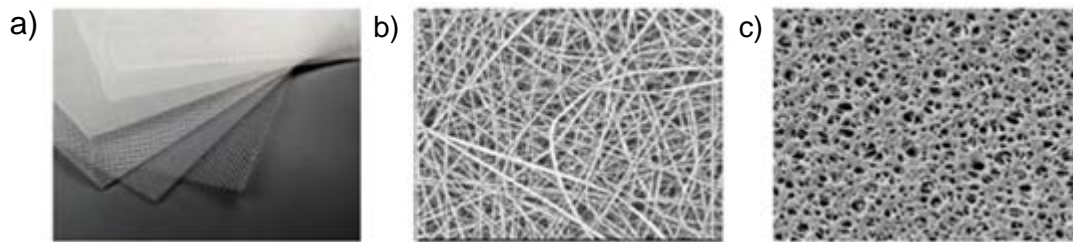


Fig. 1.18. Medios filtrantes [14].

➤ **Categorías de Filtración:** Generalmente un medio filtrante puede ser dividido en dos categorías:

a) **Filtros de superficie:** retienen las partículas en la superficie del elemento filtrante, donde forman una capa de residuos que ayuda a aumentar la eficiencia de filtración. Este medio filtrante depende de la intercepción directa para atrapar las partículas y se recomienda para fluidos que no tengan gran cantidad de contaminantes (ver Fig. 1.19).

b) **Filtros de profundidad:** retienen las partículas con un medio filtrante de un espesor considerable y múltiples pasos. Las partículas pueden quedar atrapadas en la superficie o en la profundidad de los medios filtrantes. Se pueden atrapar partículas más pequeñas que el del tamaño del poro y se recomienda para la retención de gran cantidad de partículas o para retener partículas deformables (pinturas, resinas). A continuación, se esquematiza el funcionamiento de las categorías de filtración anteriormente descritas (ver Fig. 1.19).

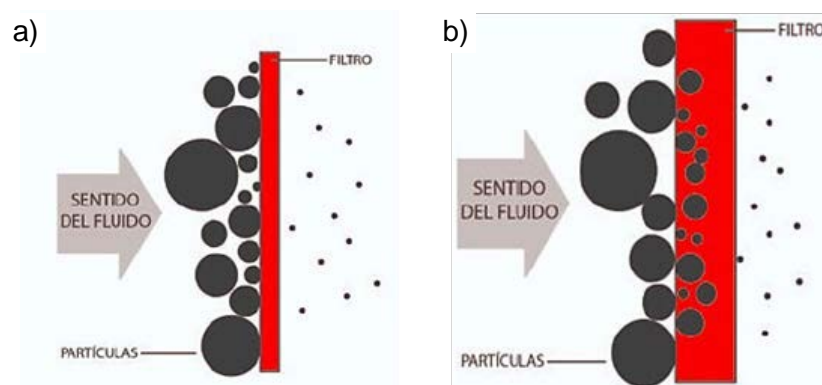


Fig. 1.19. Esquema representativo de los medios filtrantes [14].

➤ **Grados de Filtración:** En la filtración de líquidos existen dos clasificaciones que se utilizan para definir la eficiencia con la que un determinado filtro puede atrapar

partículas a un determinado número de micras: grado nominal y grado absoluto. Los filtros de grado nominal atrapan un gran porcentaje de las partículas de un determinado tamaño, aunque nunca el 100%. Un indicador arbitrario es asignado por el fabricante y rara vez es definido correctamente, por lo que no es reproducible. Los filtros de grado absoluto ofrecen la más alta eficiencia de filtración al atrapar la mayor parte de las partículas para las que están diseñados, al menos el 99% de todas las partículas son retenidas por este medio filtrante de gran eficiencia.

1.8. PIEZA DE TRABAJO

Como se ha citado, el presente Trabajo de Graduación consiste en el diseño de una electroerosionadora mediante hilo. El propósito de esta máquina se enfoca en poder cortar un material metálico y obtener de éste una probeta plana para poder realizar ensayos de tracción y determinar las propiedades mecánicas de dicho material.

Las probetas serán diseñadas según la norma ASTM E8 y se obtendrán de acero SAE 1045. A continuación, se profundizará tanto en la norma como en las características del material.

1.8.1. NORMAS INTERNACIONALES PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN

Las normas internacionales permiten a los consumidores confiar en que sus productos son seguros, fiables y de buena calidad. Los fabricantes de metales, incluidos los productores de materias primas o productos metálicos acabados, tienen que pasar las normas internacionales de conformidad antes de enviar su producto [15].

Los ensayos de tracción son imprescindibles para garantizar un material seguro y de alta calidad. Las normas internacionales ISO 6892-1 "Materiales metálicos - Ensayo de tracción, Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente" y ASTM E8 "Métodos de ensayo normalizados para pruebas de tracción de materiales metálicos" abarcan los ensayos de tracción de materiales metálicos en cualquiera de sus formas a temperatura

ambiente y los métodos de determinación del límite elástico, la resistencia a la tracción, la elongación y la reducción de área.

Aunque ambas se utilizan en todo el mundo, la ASTM E8 se usa sobre todo en América y la ISO 6892-1 en Europa. Los organismos de normalización asiáticos, como JIS y GB/T, han adoptado la mayor parte de la norma ISO 6892-1.

La principal diferencia entre estas dos normas internacionales es que la norma ISO 6892-1 dicta información general sobre las probetas de ensayo correspondientes a su forma y dimensiones, sean mecanizadas o sin mecanizar, tipos de probetas y preparación de estas. Sin embargo, la norma ASTM E8 proporciona información detallada sobre las probetas de ensayo y sus dimensiones. Estas se pueden expresar como probetas tipo placa, tipo lámina, barra rectangular, probetas para piezas forjadas, piezas fundidas, hierro maleable, entre otros [16].

Debido a que la norma ASTM E8 es más detallada con respecto a las características de las probetas planas y su obtención, en el presente Trabajo de Graduación se trabajará con esta norma.

1.8.2. NORMA ASTM E8

Esta norma internacional proporciona los métodos de prueba para ensayos de tracción de materiales metálicos. Los valores indicados en esta norma en unidades del Sistema Internacional se deben considerar independientes de las unidades del sistema inglés ya que no son equivalentes exactos, por lo que cada sistema se debe utilizar independientemente del otro. La combinación de valores de los dos sistemas puede dar lugar a la no conformidad con la norma [17].

La ubicación del eje de la probeta de ensayo, a menos que se especifique lo contrario, estará dentro del material base de la manera siguiente:

- Para productos de 40 mm o menos de espesor, diámetro o distancia entre planos: En el centro.
- Para productos de más de 40 mm de espesor, diámetro o distancia entre planos: en medio, desde el centro a la superficie del producto.

Es importante tener cuidado en la preparación de las probetas, especialmente en el mecanizado, para maximizar la precisión y minimizar la desviación en los resultados de los ensayos. También se debe tener mucho cuidado con la sección reducida de la probeta. El punzonado o troquelado en esta sección puede producir rebabas significativas de trabajo en frío o de cizalladura, o ambas, a lo largo de los bordes, que se deben eliminar mediante mecanizado. En el caso de materiales frágiles, se deben utilizar redondeos de radio grandes en los extremos de la longitud de referencia de la probeta. El área de la sección transversal de la probeta debe ser la más pequeña en el centro de la sección reducida para garantizar la fractura dentro de la longitud calibrada. Con respecto al acabado superficial de las probetas, al ensayar materiales con condiciones superficiales distintas a las de fabricación, el acabado superficial de las probetas debe ser el indicado en las especificaciones del producto.

La norma recomienda diversos tipos de probetas, según el tipo y espesor del material en bruto que se quiere ensayar. A continuación, se describen estas recomendaciones.

- Probeta tipo placa: La probeta estándar tipo placa que la norma exige para los ensayos de tracción de materiales metálicos en forma de placa, perfiles y material plano con un espesor nominal igual o superior a 5 mm (0.188 pulg) se presenta en la Fig. 1.20 [17].

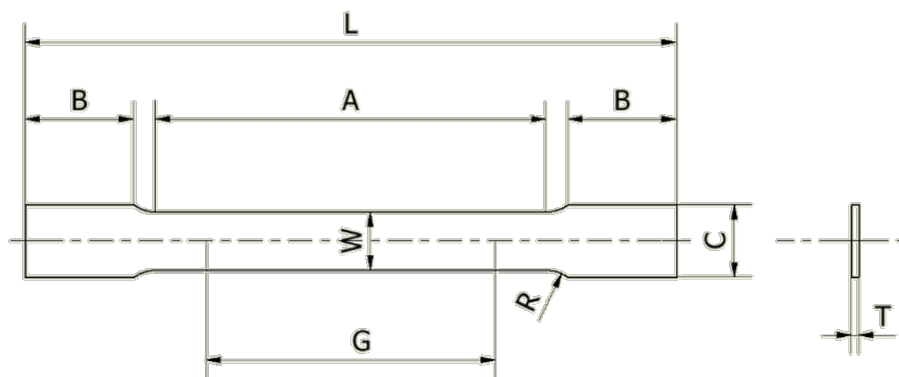


Fig. 1.20. Probeta rectangular [17].

Las dimensiones de la probeta rectangular según la norma, así como notas importantes para ella se especifican en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Dimensiones de probeta rectangular [17].

	Probetas estándar		Probeta disminuida
	Tipo placa 40 mm ancho, mm	Tipo lámina 12.5 mm ancho, mm	6 mm ancho, mm
G - longitud calibrada (Nota 1 y Nota 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W – Ancho (Nota 3 y Nota 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T – Espesor (Nota 5)	Espesor del material		
R – Radio del filete, mínimo (Nota 6)	25	12.5	6
L - longitud total, mínima (Nota 2, Nota 7 y Nota 8)	450	200	100
A – Longitud de la sección reducida, mínima	225	57	32
B - longitud de la sección de agarre, mínima (Nota 9)	75	50	30
C – Ancho de la sección de agarre, aproximado (Nota 4 y Nota 9)	50	20	10

Nota 1: Para la probeta de 40 mm de ancho, las marcas para medir la elongación se harán en la parte plana o en el borde de la probeta y dentro de la sección reducida de la probeta.

Nota 2: Al no requerir mediciones de elongación en probetas de 40 mm de ancho, se puede utilizar una dimensión A de 75 mm.

Nota 3: Para todas las probetas, los extremos de la sección reducida no deben diferir en anchura en más de 0.10, 0.05 o 0.02 mm, respectivamente.

Nota 4: Para todas las probetas, se pueden usar dimensiones W y C más reducidas cuando sea necesario.

Nota 5: El espesor mínimo de las probetas de 40 mm de ancho será de 5 mm. El espesor máximo de las probetas de 12.5 y 6 mm de ancho será de 19 y 6 mm, respectivamente.

Nota 6: Para la probeta de 40 mm de ancho, se permite un radio mínimo de 13 mm en los extremos de la sección reducida para las probetas con una resistencia a la tracción inferior a 690 MPa cuando se utiliza un cortador de perfiles para mecanizar la sección reducida.

Nota 7: La dimensión indicada se sugiere como mínima. Las mordazas no se deben extender hasta la sección de transición entre las dimensiones A y B, véase la Nota 9.

Nota 8: Para probetas de 6 mm de ancho, la longitud total debe ser hasta 200 mm.

Nota 9: La longitud de la sección de agarre debe ser lo suficientemente grande para que la probeta se extienda dentro de las mordazas una distancia igual a dos tercios o más de la longitud de las mordazas. Si el espesor de las probetas de 12.5 mm de ancho es superior a 10 mm, pueden ser necesarias mordazas más largas para evitar fallos en la sección de agarre.

- **Probeta para ensayo de láminas:** Esta probeta se utiliza para ensayar materiales metálicos en forma de lámina, alambre plano, tira, banda, aro, rectángulos y formas cuyo espesor nominal oscila entre 0.13 y 19 mm. Se puede utilizar la probeta con extremos de pin para evitar el pandeo en ensayos de materiales delgados y de alta resistencia, puede ser necesario utilizar placas de refuerzo en los extremos de agarre (ver Fig. 1.21) [17].

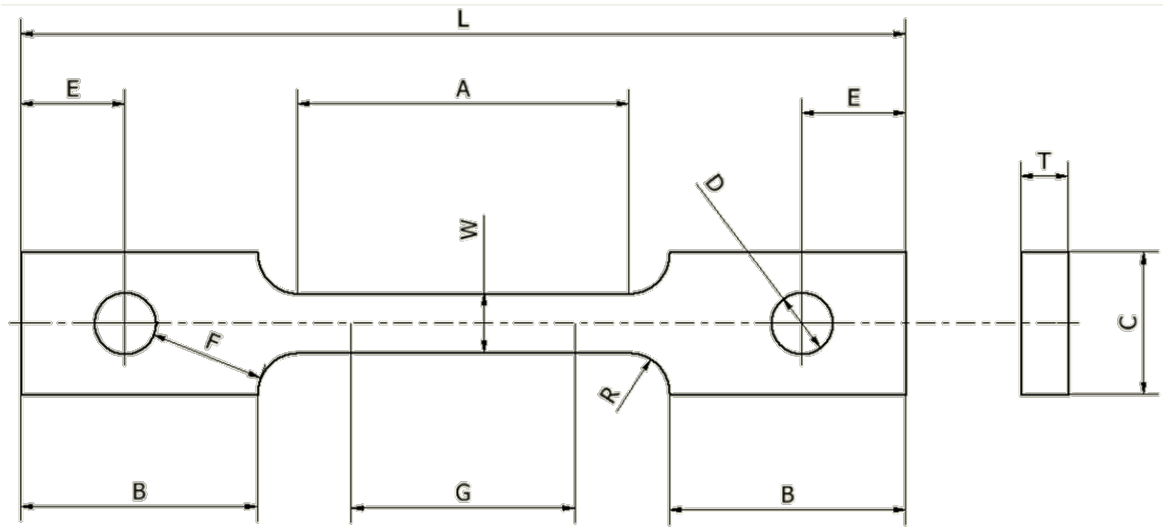


Fig. 1.21. Probeta rectangular con agujeros para pines [17].

Las dimensiones de la probeta rectangular con agujeros para pines, según la norma y notas importantes para ella se especifican en la Tabla 1.8.

La norma recomienda que, para el ensayo de láminas, alambres planos y placas, se utilice un tipo de probeta adecuado al espesor nominal del material, tal como se describe a continuación [17]:

- Para materiales con un espesor nominal de 0.13 a 5 mm, se utilice la probeta tipo lámina.
- Para material con un espesor nominal de 5 a 12.5 mm, se utilice la probeta tipo lámina o la probeta tipo placa.
- Para materiales con un espesor nominal de 12.5 a 19 mm, se utilice la probeta tipo lámina o la probeta tipo placa.
- Para materiales con un espesor nominal de 19 mm o superior, se utilice la probeta tipo placa.

Si las especificaciones del producto lo permiten, el material de un espesor de 19 mm, o mayor, se puede ensayar utilizando una probeta tipo lámina modificada que se ajuste a la configuración mostrada en la Fig. 1.20. El espesor de esta probeta modificada debe ser igual al de la probeta tipo lámina. El espesor de esta probeta modificada se debe mecanizar a 10 ± 0.5 mm, y debe ser uniforme dentro de 0.1 mm en toda la sección reducida.

Tabla 1.8. Dimensiones de probeta rectangular con agujeros para pines [17].

	Dimensiones, mm	
G	Longitud calibrada	50.0 ± 0.1
W	Ancho (Nota 1)	12.5 ± 0.2
T	Espesor, máximo (Nota 2)	16
R	Radio de filete, mínimo (Nota 3)	13
L	Longitud total, mínima	200
A	Longitud de la sección reducida, mínima	57
B	Longitud de la sección de agarre, mínima	50
C	Ancho de la sección de agarre, aproximado	50
D	Diámetro del orificio para el pin, mínimo (Nota 4)	13
E	Distancia del borde al pin, aproximada	40
F	Distancia desde el orificio hasta el filete. Mínima	13

Nota 1: Los extremos de la sección reducida no deben diferir en anchura más de 0.1 mm. Puede haber una disminución gradual de la anchura desde los extremos hacia el centro, aunque la anchura en cada extremo no será superior en más de un 1 % a la anchura en el centro.

Nota 2: La dimensión T es el espesor de la probeta de ensayo, tal como se indica en las especificaciones aplicables al producto.

Nota 3: Para algunos materiales, puede ser necesario un radio de redondeo R mayor de 13 mm.

Nota 4: Los agujeros deben estar en la línea central de la sección reducida dentro de más menos 0.05 mm.

- **Probetas para barras rectangulares:** En el ensayo de barras rectangulares, según la norma, se puede utilizar uno de los tipos de probetas siguientes [17]:
- **Sección transversal completa:** Se permite reducir la anchura de la probeta a lo largo de toda la sección de ensayo con tela o papel abrasivo, o mecanizando lo suficiente para facilitar la fractura dentro de la longitud calibrada, aunque en ningún caso la anchura reducida será inferior al 90 % de la original. Los bordes de la longitud media de la sección reducida de no menos de 20 mm de longitud serán paralelos entre sí y al eje longitudinal de la probeta dentro de un margen de 0.05 mm. En los extremos de las secciones reducidas se utilizarán filetes, preferentemente con un radio de 10 mm, pero no inferior a 3 mm.
 - **Barra rectangular de espesor suficientemente pequeño** para que se ajuste a las mordazas de la máquina de ensayo, aunque de anchura demasiado grande, se podrá reducir en anchura para que se ajuste a las mordazas, después de lo cual las superficies cortadas se mecanizarán o se cortarán y alisarán para asegurar el fallo dentro de la sección deseada. La anchura reducida no será inferior al espesor original de la barra. También se puede utilizar probetas tipo placa o tipo lámina. En los ensayos de perfiles distintos de los contemplados en los apartados anteriores, se pueden utilizar probetas tipo placa o tipo lámina [17].

- Factores que afectan a las probetas: La norma destacan aspectos a considerar en las probetas para que los resultados de las pruebas de tracción sean precisos. A continuación, se presentan los más importantes [17].
- Algunos materiales son muy sensibles a la calidad del acabado superficial de la probeta de ensayo. Se debe prestar especial atención a la uniformidad y calidad del acabado superficial de las probetas de materiales de alta resistencia y muy baja ductilidad. Las probetas se deben esmerilar hasta obtener un acabado fino, o pulido para obtener resultados correctos.
 - Los resultados de los ensayos de probetas con superficies de fundición, laminadas, forjadas o no mecanizadas se pueden ver afectados por la naturaleza de la superficie. Superficies rugosas debidas al proceso de fabricación, como laminado en caliente, revestimiento metálico, etc., pueden dar lugar a imprecisiones en el cálculo.
 - Las probetas de ensayo consideradas de apéndices de la pieza o componentes, como prolongaciones o bandas, o de piezas fundidas producidas por separado pueden producir resultados de ensayo que no sean representativos de la pieza o componente.
 - Las dimensiones de las probetas pueden influir en los resultados de los ensayos. En el caso de probetas rectangulares, la modificación del tamaño de la probeta suele tener un efecto insignificante sobre el límite elástico y la resistencia a la tracción, aunque puede influir en el límite elástico superior, si lo hay, y en los valores de alargamiento y reducción de área.
 - Los materiales frágiles requieren una preparación cuidadosa de la probeta: acabados superficiales de alta calidad, filetes grandes en los extremos de la longitud calibrada y no se pueden tolerar marcas de punzón o rayado como indicadores de la longitud calibrada.
 - La medición de las dimensiones de las probetas fundidas, laminadas, forjadas y otras probetas con superficies no mecanizadas puede ser imprecisa debido a la irregularidad de la planitud de la superficie.
 - La medición de las dimensiones de la probeta es crítica en los ensayos de tracción, y se vuelve más crítica a medida que disminuye el tamaño de la probeta, ya que

un error absoluto dado se convierte en un error relativo mayor. Los dispositivos y procedimientos de medición se deben seleccionar cuidadosamente para minimizar el error de medición y proporcionar una buena repetibilidad y reproducibilidad.

- Por lo general, los revestimientos pesados se deben eliminar de al menos un extremo de agarre de las probetas planas tomadas de productos revestidos para permitir una medición precisa del espesor del metal base, suponiendo que:
 - a) Las propiedades del metal base sean las deseadas.
 - b) El revestimiento no contribuya significativamente a la resistencia del producto.
 - c) La eliminación del revestimiento se pueda realizar fácilmente (algunos revestimientos se pueden eliminar fácilmente mediante decapado químico).

En caso contrario, puede ser aconsejable dejar el revestimiento intacto y determinar el espesor del metal base mediante un método alternativo.

1.8.3. ACERO SAE 1045

Se trata de un acero de medio carbono de grado ingeniería que destaca por su nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad, siendo de un bajo costo si se compara con los aceros de baja aleación. La soldabilidad de este tipo de acero se puede realizar por los métodos comunes, mientras que la conformabilidad se consigue de forma caliente a temperaturas entre 980 y 1,230 °C. Por otra parte, se tiene que la maquinabilidad del acero consigue un buen acabado superficial y ofrece una larga vida útil para la herramienta de corte.

Responde fácilmente a endurecimiento por temple y revenido convencional, sea total o superficial (inducción o flama). Como acabado de laminado en caliente, sus propiedades mecánicas y dureza, están por debajo de las anteriormente señaladas y puede presentar defectos inherentes de laminación tales como, grietas, traslapes, descarburización, ovalamiento, picaduras, oxidación, etc.; mismas que de no eliminarse, pueden afectar el uso final del producto.

Como acabado de estirado en frío, puede presentar los mismos defectos que como laminado en caliente, salvo en una menor profundidad. El estirado en frío confiere un

nivel de endurecimiento superficial, además de mejorar ligeramente su maquinabilidad [18].

Las propiedades del acero SAE 1045 pueden variar dependiendo de si es rolado en frío o laminado en caliente. Los valores en la Tabla 1.9 se pueden utilizar como referencia [19].

Tabla 1.9. Propiedades del acero SAE 1045 [19].

Propiedades	Valores	
Densidad, kg/m ³	0.00785	
Punto de fusión, °C	1,495	
Módulo de elasticidad, Pa	2×10^{11}	
Conductividad térmica, W/(m·°C)	52	
Calor específico, J/(kg·K)	460	
Coefficiente de Poisson	0.3	
Resistividad eléctrica, $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	0 °C	16.2
	100 °C	22.3
Coefficiente de dilatación térmica, °C ⁻¹	Entre 20 y 100 °C	12.3×10^{-6}
	Entre 20 y 200 °C	12.7×10^{-6}
	Entre 20 y 400 °C	13.7×10^{-6}
Composición química, % en peso	0.43 -0.50 C 0.60 – 0.90 Mn 0.040 máx P 0.050 máx S	
Resistencia a la tracción, MPa	630	
Límite elástico, MPa	530	
Elongación en 2 pulg, %	12	
Reducción de área, %	35	
Dureza Brinell	170 - 210	

Este tipo de acero está considerado en diversas normativas mundiales. En la Tabla 1.10 se presentan algunas designaciones para este acero según cada norma [20].

Tabla 1.10. Designaciones para el acero SAE 1045 en diversas normativas [20].

Norma	Designación
UNE	F114 / F1140
DIN	CK45
SAE	1045
AFNOR	XC45
ASTM	1045
UNI	C45
EN	C45E

1.9. SISTEMA DE MOVIMIENTO

El sistema de transporte o movimiento se encarga de controlar la trayectoria y velocidad del hilo de alambre durante el proceso de corte. Este sistema debe considerar las dimensiones del tanque de trabajo, debido a que se considera que estos serán los límites máximos que condicionan la libertad de movimiento en los ejes X y Y. Para un sistema de transporte o movimiento, es necesario visualizar máquinas herramientas como son tornos paralelos o fresadoras que lo hacen por medio de tornillos de potencia, y una variable a destacar es la velocidad con la que estos se moverán como límite máximo. A continuación, se explica el funcionamiento de componentes de vital importancia para conformar los sistemas de movimiento.

1.9.1. VELOCIDAD DE CORTE

La velocidad de la bancada es un parámetro muy importante. Con relación a máquinas herramientas como lo son los tornos y fresadoras, tienen una velocidad de bancada en los ejes X y Y bastante baja, para obtener una superficie a espejo (el término espejo se refiere a que el corte sea limpio sin ningún tipo de grada o rebaba).

En general, la velocidad de corte se da en términos del área de la sección transversal cortada por unidad de tiempo, donde la mayoría de los modelos de máquinas electroerosionadoras por hilo tienen una velocidad de corte de 200 a 450 mm²/min. La velocidad de corte lineal se calcula mediante la Ec. 1.22:

$$\text{Velocidad de corte lineal} = \frac{\text{Velocidad de remoción de material}}{\text{Espesor de herramienta de corte}} \quad (1.22)$$

1.9.2. TORNILLOS DE POTENCIA (ROSCA ACME)

Los tornillos de potencia se diseñan para convertir movimiento rotatorio en movimiento lineal, y para ejercer la fuerza necesaria para mover un elemento de máquina a lo largo de una trayectoria deseada. Los tornillos de potencia trabajan con el principio clásico del tornillo con rosca y su tuerca correspondiente. Si el tornillo se soporta con cojinetes y gira mientras que la tuerca se mantiene sin girar, la tuerca se trasladará a lo largo del tornillo. Si la tuerca es la parte integral de una máquina, por ejemplo, se pueden dar casos en que el tornillo sea el que se traslade mientras la tuerca se queda estacionaria, y viceversa (ver Fig. 1.22) [21].

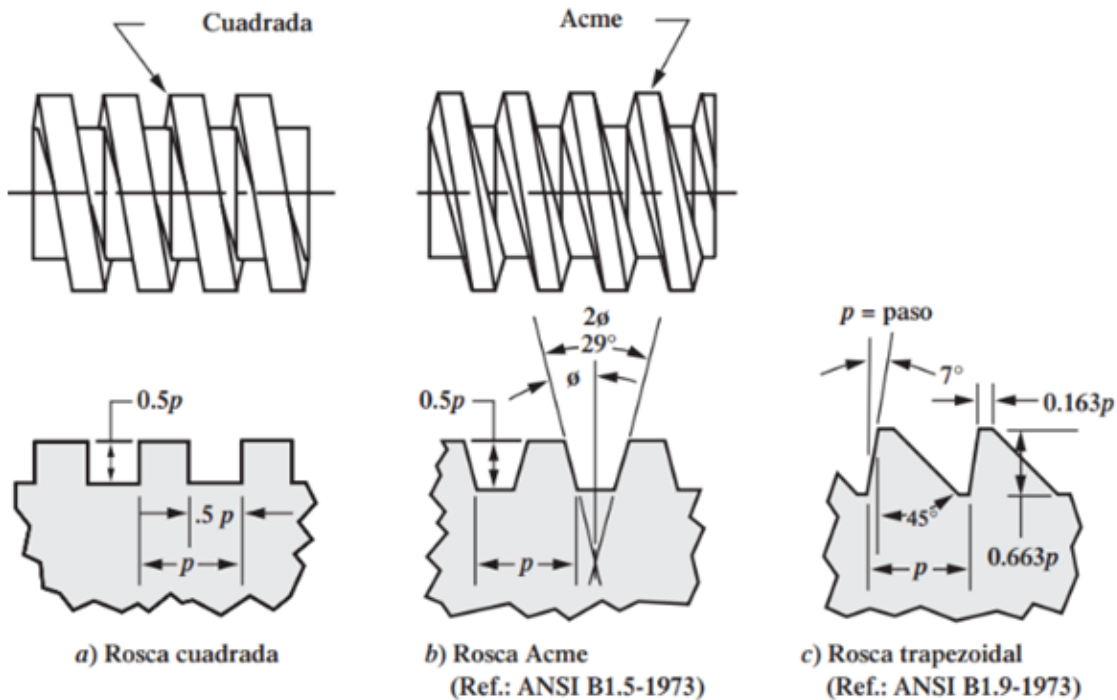


Fig. 1.22. Formas y geometría de roscas de tornillos de potencia [21].

De estas, las formas de rosca cuadrada y la trapezoidal son las más eficientes. Esto es, porque requieren menor par torsional para mover determinada carga a lo largo del tornillo. Sin embargo, la rosca ACME no es mucho menos eficiente y es más fácil de maquinar.

En el análisis de esfuerzos sobre el tornillo, el método más seguro es calcular el área que corresponde al diámetro menor, para esfuerzos de tensión o de compresión.

Los tornillos de potencia normales de rosca ACME sencilla tienen una eficiencia de 30% o menos, lo cual puede ser una gran desventaja. Sin embargo, se puede mejorar con mayores avances y filetes múltiples [21].

- Diseño de Tornillos de Potencia ACME: Los tornillos de potencia, se pueden comenzar a diseñar proponiendo un diámetro mayor/externo (d_e) y un paso (p). Como punto siguiente, se deben conocer los números de entradas (N_w), se debe tener en consideración que a mayor número de entradas es más propenso a que exista irreversibilidad en el tornillo y también que en el mercado es muy difícil hallar tornillos con más de cuatro entradas (siempre son números enteros), por lo tanto, se puede iterar con 1, 2, 3 y 4. Se calcula el avance (L) que se interpreta como si una tuerca al girar una vuelta avanza el paso, aunque se debe tener en consideración el número de entradas (Ec. 1.23) [22]:

$$L = N_w p \quad (1.23)$$

donde: L es el avance en pulg,

N_w es el número de entradas/hélices, y

p es el paso axial del tornillo en pulg.

Considerar que el diámetro crítico con el que se trabajan las ecuaciones corresponde al diámetro de paso o medio (d_m), el cual se relaciona con el diámetro nominal y el paso, este se define como la Ec. 1.24 [22]:

$$d_m = d - 2 \left(\frac{p}{4} \right) \quad (1.24)$$

donde: d_m es el diámetro de paso o medio del tornillo en pulg,

d es el diámetro externo o nominal del tornillo en pulg, y

p es el paso axial del tornillo en pulg.

También, es importante notar que los tornillos de potencia en ciertas aplicaciones necesitan de un collarín o cojinete de empuje, que es un elemento que se puede mover libremente. Sin embargo, en un cierto instante se puede quedar

estático, aunque le da libertad al tornillo de moverse o rotar. En el caso de su uso en la instalación, se debe tomar en consideración el diámetro crítico (d_c), donde interviene el diámetro externo (D_e) y el diámetro interno (D_i) que se expresa en la Ec. 1.25 [22]:

$$d_c = \frac{D_e - D_i}{2} \quad (1.25)$$

donde: d_c es el diámetro de paso o medio del collarín en pulg,

D_e es el diámetro externo o nominal del collarín en pulg, y

D_i es el diámetro interno del collarín en pulg.

Un factor importante en el análisis del par torsional es el ángulo de inclinación del plano. En una rosca de tornillo, al ángulo de inclinación se le llama ángulo de avance (λ), el cual se expresa en grados ($^\circ$). Es el ángulo que forma la tangente a la hélice de la rosca y el plano transversal al eje del tornillo. Se expresa como la Ec. 1.26 [22]:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{L}{\pi d_m} \quad (1.26)$$

donde: λ es el ángulo de avance del tornillo en $^\circ$,

L es el avance en pulg, y

d_m es el diámetro de paso o medio del tornillo en pulg.

Se debe conocer el coeficiente de fricción entre la tuerca y el tornillo. El elemento llamado tuerca puede ser estático y el tornillo girar y se desplaza simultáneamente, o se puede dar un caso contrario. Este coeficiente se puede encontrar en libros especializados de diseño de elementos de máquinas, así como el coeficiente de fricción entre el tornillo y el collarín.

Ahora es muy importante encontrar el par de torsión para subir la carga (T_s), ya que este es necesario para la potencia del tornillo. También se debe tener en

consideración el par de torsión para bajar la carga, porque de aquí se define el fenómeno de irreversibilidad cuanto este es nulo. Estas ecuaciones pueden o no considerar el par de torsión debido a la adición de un collarín de empuje, eso depende del tipo de aplicación. Se obtiene mediante la Ec. 1.27 [22]:

$$T_s = \frac{d_m W}{2} \left[\frac{f + \cos(\alpha) \tan(\lambda)}{\cos(\alpha) - f \tan(\lambda)} \right] + \frac{f_c d_c W}{2} \quad (1.27)$$

donde: T_s es el par torsional para elevar la carga en lb·pulg,

W es la carga a elevar/transportar en lb,

f es el coeficiente de fricción entre tornillo y tuerca,

f_c es el coeficiente de fricción entre tornillo y collarín,

α es el ángulo normal de la hélice del tornillo en °,

λ es el ángulo de avance del tornillo en °,

d_m es el diámetro de paso o medio del tornillo en pulg, y

d_c es el diámetro de paso o medio del collarín en pulg.

El ángulo alfa (α), es el que existe entre los perfiles de cada diente del tornillo dividido por la mitad. Como se presenta en la Fig. 1.22, se tiene un ángulo de 29°, por lo que alfa sería 14.5°. La fuerza que actúa a lo largo del tornillo se denomina W . Posteriormente, se tiene el torque de bajada (Ec. 1.28) [22]:

$$T_b = \frac{d_m W}{2} \left[\frac{f - \cos(\alpha) \tan(\lambda)}{\cos(\alpha) + f \tan(\lambda)} \right] + \frac{f_c d_c W}{2} \quad (1.28)$$

donde: T_b es el par torsional para bajar la carga en lb·pulg,

W es la carga a elevar/transportar en lb,

f es el coeficiente de fricción entre tornillo y tuerca,

f_c es el coeficiente de fricción entre tornillo y collarín.

α es el ángulo normal de la hélice del tornillo en °,

λ es el ángulo de avance del tornillo en °,

d_m es el diámetro de paso o medio del tornillo en pulg, y
 d_c es el diámetro de paso o medio del collarín en pulg.

Se debe obtener la velocidad de giro (n) en el caso de que no sea proporcionada directamente, por lo que si se tiene la velocidad de avance del tornillo (V_{tornillo}), la lógica para obtener los rpm es que, si la tuerca se hace girar una vuelta, avanza el paso donde se multiplica por el número de entradas y si esto ocurre en un minuto (Ec. 1.29) [22]:

$$V_{\text{tornillo}} = nL \quad (1.29)$$

donde: V_{tornillo} es la velocidad de avance del tornillo en pulg/min.

n es la velocidad de giro del tornillo en rpm, y

L es el avance en pulg.

Un paso importante es el cálculo de la potencia del tornillo, que se desarrolla sobre la base de la fuerza que se ejerce en el tornillo, por lo que se calcula mediante la Ec. 1.30 [22]:

$$P_{\text{tornillo}} = \frac{T_s n}{63,025} \quad (1.30)$$

donde: P_{tornillo} es la potencia del tornillo en HP,

n es la velocidad de giro del tornillo en rpm, y

T_s es el par torsional para elevar la carga en lb·pulg.

El cálculo de la eficiencia global del tornillo es uno de los parámetros más importantes, y se utiliza la Ec. 1.31 [22]:

$$e = \frac{WL}{2\pi T_s} \quad (1.31)$$

Una forma de explicar el porqué de está formula, es que la eficiencia de un tornillo puede ser definida como la relación del par necesario para levantar una carga W sin considerar la fricción al par necesario para levantar la fricción considerando la fricción. Aplicando esta definición se obtiene mediante la Ec. 1.32 [23]:

$$e = \frac{d_m \tan(\lambda)}{d_m \left[\frac{f + \cos(\alpha) \tan(\lambda)}{\cos(\alpha) - f \tan(\lambda)} \right] + f_c d_c} \quad (1.32)$$

donde: e es la eficiencia global del tornillo,

f es el coeficiente de fricción entre tornillo y tuerca,

f_c es el coeficiente de fricción entre tornillo y collarín,

α es el ángulo normal de la hélice del tornillo en grados,

λ es el ángulo de avance del tornillo en grados,

d_m es el diámetro de paso o medio del tornillo en pulg, y

d_c es el diámetro de paso o medio del collarín en pulg.

Ahora si se desprecia la fricción del collarín de empuje, queda como se presenta en la Ec. 1.33:

$$e = \frac{\cos(\alpha) - f \operatorname{tg}(\lambda)}{\cos(\alpha) + f \operatorname{cot}(\lambda)} \quad (1.33)$$

Se debe obtener el esfuerzo a flexión en la cuerda del tornillo, tomando en consideración que es una rosca ACME. El esfuerzo de flexión en la rosca se obtiene considerando como si se tuviera una viga corta cantiléver con una carga en el extremo en el diámetro raíz o interno del tornillo. Se expresa como la Ec. 1.34 [23]:

$$\sigma = \frac{W \cos(\alpha) \left(\frac{p}{4} \right) \left(\frac{0.629}{2} \right) p}{(0.629p)^3 \left(\frac{1}{12} \right) \pi d_m} \quad (1.34)$$

donde: σ es el esfuerzo de flexión en el tornillo en psi,
 W es la carga a elevar/transportar en lb,
 α es el ángulo normal de la hélice del tornillo en $^\circ$, y
 d_m es el diámetro de paso o medio del tornillo en pulg.

Se debe obtener el esfuerzo de corte en la cuerda del tornillo, tomando en consideración que es una rosca ACME. Tanto las roscas en el tornillo como en la tuerca están sujetas a corte por corte transversal debido a la flexión, donde se expresa como la Ec. 1.35 [23]:

$$\tau = \frac{W \cos(\alpha)}{0.629 \pi d_m p} \quad (1.35)$$

donde: τ es el esfuerzo de corte en el tornillo en psi,
 W es la carga a elevar/transportar en lb,
 α es el ángulo normal de la hélice del tornillo en grados, y
 d_m es el diámetro de paso o medio del tornillo en pulg.

Se obtendrá el esfuerzo combinado por cortante máximo, donde los esfuerzos normales en la dirección X y Y ($\sigma_y = 0$) se resumen al esfuerzo de flexión anteriormente citado, y el esfuerzo por corte perpendicular a la dirección X y paralelo a la dirección Y es igual al esfuerzo de corte anteriormente citado, por lo tanto (Ec. 1.36):

$$\tau_{\text{máx}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (1.36)$$

donde: σ_y es el esfuerzo de fluencia (en este caso $\sigma_y = 0$),
 $\tau_{\text{máx}}$ es el esfuerzo cortante máximo en el tornillo en psi,
 $\sigma_x = \sigma$ es el esfuerzo de flexión en el tornillo en psi, y
 $\tau_{xy} = \tau$ es el esfuerzo de corte en el tornillo en psi.

Ahora el termino de resistencia a la fluencia se obtiene por medio del criterio más conservador de las teorías de fallas, el cual es el Criterio de Tresca o Guest, también llamada de Esfuerzo por Cortante Máximo. Se puede asumir un factor de seguridad de 1.0 para una situación crítica (Ec. 1.37).

$$\eta = \frac{0.5 S_y}{\tau_{\text{máx}}} \quad (1.37)$$

donde: η es el factor de seguridad del tornillo,

S_y es el esfuerzo de fluencia del material del tornillo en psi. y

$\tau_{\text{máx}}$ es el esfuerzo cortante máximo en el tornillo en psi.

Para encontrar un material adecuado, el esfuerzo de fluencia calculado se compara con las propiedades mecánicas de los materiales disponibles.

1.9.3. ACOPLAMIENTOS

El término acoplamiento se refiere a un dispositivo para conectar entre sí dos ejes en sus extremos, con objeto de transmitir potencia. Existen dos clases generales de acoplamientos: rígidos y flexibles. Se dan más detalles de estos a continuación:

- Acoplamientos rígidos: Se diseñan para unir firmemente dos ejes entre sí, para que no pueda haber movimiento relativo entre ellos. Este diseño es conveniente para ciertos tipos de equipos, donde se necesita y se pueda dar un alineamiento preciso de dos ejes (ver Fig. 1.23).

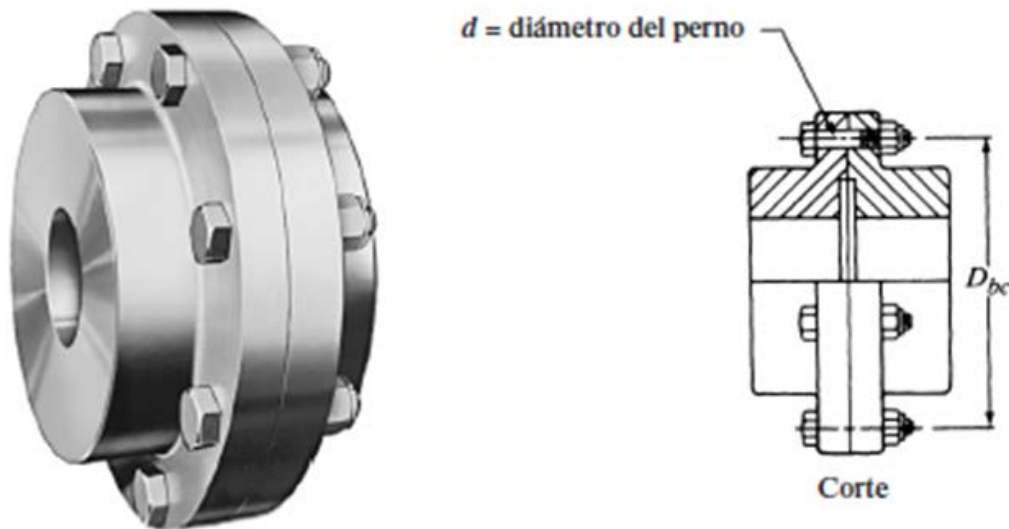


Fig. 1.23. Acoplamiento rígido de brida.

- **Acoplamientos flexibles:** Se diseñan para transmitir par torsional uniformemente, y al mismo tiempo permitir cierto desalineamiento axial, radial y angular. La flexibilidad es tal que cuando se produce el desalineamiento, piezas del acoplamiento se mueven con poca o ninguna resistencia. En consecuencia, no se desarrollan esfuerzos axiales o flexionantes apreciables en el eje.

Existen diferentes tipos de acoples flexibles en el mercado como los acoplamientos de cadena, acoplamiento WRAP-FLEX, acoplamiento Ever-Flex, acoplamiento Grid-Flex, acoplamiento de engranes, acoplamiento de fuelle, acoplamiento PARA-FLEX y acoplamientos Dynaflex. Cada uno de estos acoples se diseña para transmitir un par torsional límite dado. En el catálogo del fabricante aparecen listas de datos de diseño, de donde se puede escoger un acoplamiento adecuado.

El par torsional es igual a la potencia dividida entre la velocidad de giro, por lo que, para determinado tamaño de acoplamiento, al aumentar la velocidad de rotación, también aumenta la cantidad de potencia que puede transmitir el acoplamiento, aunque no siempre en proporción directa. Los efectos centrífugos determinan el límite máximo de velocidad.

Entre los acoplamientos flexibles destacan los WRAP-FLEX ya que son muy eficientes en cuanto a transmisión de potencia hasta con acoplamientos directos de motor y ciclón de alta eficiencia. Para seleccionar este tipo de acoplamientos se seguirán los pasos siguientes [24].

Primero se debe determinar el factor de servicio (F_s) sobre la base de la demanda de torque de la máquina en operación y de las aplicaciones típicas del motor eléctrico.

Es importante recalcar, que se debe conocer la velocidad de giro (n_{motor} o $n_{\text{elemento de máquina}}$) y la potencia del motor (P_{motor} o $P_{\text{elemento de máquina}}$) o si aún no se selecciona el motor eléctrico, se debe encontrar estos datos con el elemento mecánico que estará en operación. Se debe obtener una potencia equivalente, de la forma siguiente (Ec. 1.38):

$$\text{Pot}_{\text{eq}} = PF_s \quad (1.38)$$

donde: Pot_{eq} es la potencia equivalente calculada en HP,

P es la potencia del motor o elemento de máquina en HP, y

F_s es el factor de servicio según condiciones de operación.

La potencia equivalente, según la potencia real del elemento de máquina y su factor de servicio, se puede obtener del fabricante.

Posteriormente, para determinar el tamaño del acoplamiento, se debe conocer la velocidad de giro del motor o del elemento de máquina (n_{motor} o $n_{\text{elemento de máquina}}$) y usar los datos proporcionados por el fabricante.

El tamaño del acople seleccionado se debe corroborar con la medida del eje del motor eléctrico y la medida del eje del elemento de máquina. Si en el dado caso, algunos de esos ejes superen el diámetro máximo que permiten las masas del acople flexible, se debe buscar un acople de mayor tamaño.

1.9.4. RODAMIENTOS DE ELEMENTOS RODANTES

En los rodamientos existen dos grandes familias: los rodamientos de bolas y de rodillos. Se tiene una gran variedad por factores como los tipos de carga a las que estará sometido el rodamiento mismo [25].

Las cargas radiales actúan hacia el centro del cojinete, a lo largo de un radio. Esas cargas son comunes a las que causan los elementos de transmisión de potencia, como los engranes rectos, las poleas para bandas “V” y las transmisiones por cadena, en los ejes. Las cargas de empuje son aquellas que actúan paralelas a la línea central del eje. Los componentes axiales de las fuerzas sobre engranes helicoidales, sinfines y coronas y engranes cónicos, son cargas de empuje. También, los rodamientos que sostienen ejes verticales están sujetos a cargas de empuje, causadas por el peso del eje y por los elementos en el eje, así como a fuerzas axiales de operación.

El desalineamiento se refiere a la desviación angular de la línea central del eje en el rodamiento respecto al eje real del mismo rodamiento. Una evaluación del desalineamiento se presenta en la Tabla 1.11.

Tabla 1.11. Comparación de los tipos de rodamientos [25].

Tipo de rodamiento	Capacidad de carga radial	Capacidad de carga de empuje	Capacidad de desalineamiento
Una hilera de bolas con ranura profunda	Buena	Regular	Regular
Doble hilera de bolas, ranura profunda	Excelente	Buena	Regular
Contacto angular	Buena	Excelente	Mala
Rodillos cilíndricos	Excelente	Mala	Regular
Agujas	Excelente	Mala	Mala
Rodillos esféricos	Excelente	Regular a buena	Excelente
Rodillos cónicos	Excelente	Excelente	Mala

Los rodamientos de rodillos cónicos son excelentes para carga de empuje y carga radial. Con frecuencia se usan en rodamientos de rueda de vehículos y equipos móviles, y en maquinaria pesada con grandes inherentes de empuje. El rodamiento cónico se compone de una copa, rodillo y un cono (ver Fig. 1.24).

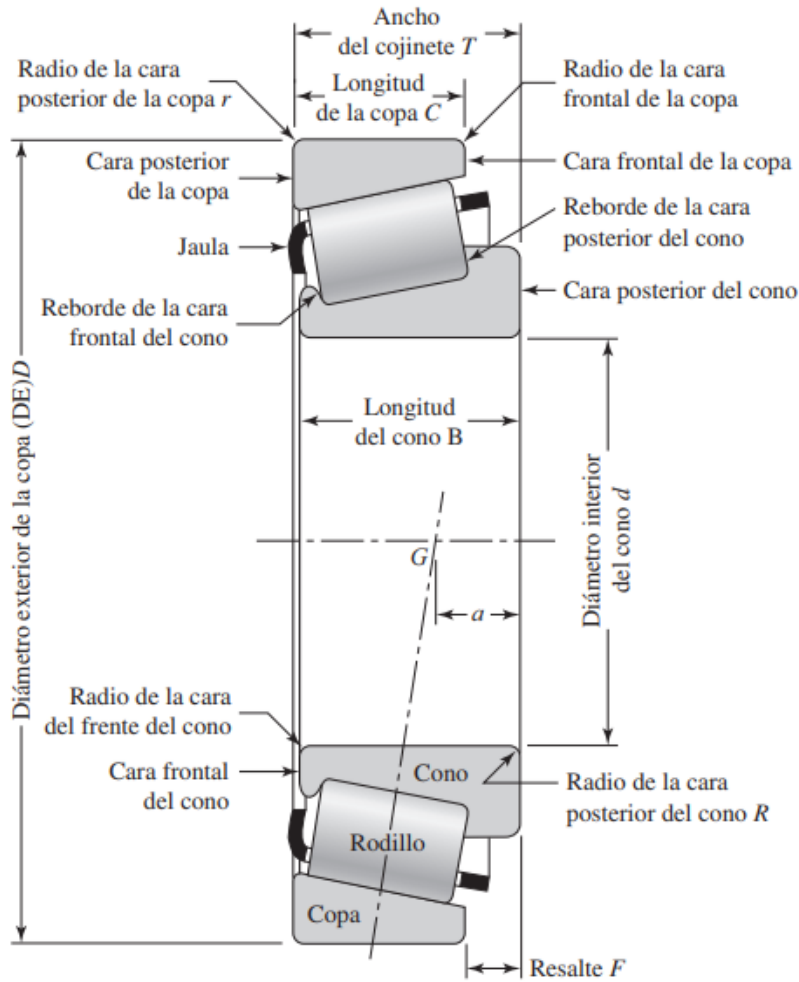


Fig. 1.24. Nomenclatura de un cojinete de rodillos cónicos [25].

Para realizar una correcta selección de rodamientos, se deben determinar dos variables: La carga equivalente F_e y la carga dinámica C . La carga equivalente para cada cojinete se calcula por medio de la Ec. 1.39:

$$F_e = V F_R \quad (1.39)$$

Donde V es el factor de rotación, el cual puede ser 1 en caso de que la pista interna del cojinete gire, o 1.2 si es la pista externa la que gira. La variable F_R es la fuerza de reacción en el lugar donde estará ubicado el cojinete. Posteriormente se calcula la carga dinámica mediante la Ec. 1.40:

$$C = F_e \left(\frac{L_d}{10^6} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1.40)$$

El exponente k se debe al tipo de cojinete, siendo 3 para los de bola, y 10/3 para los de rodillo cónico. La variable L_d es la vida útil de diseño, la cual se selecciona según la aplicación del rodamiento de la Tabla 1.12.

Tabla 1.12. Duración recomendada para rodamientos.

Aplicación	Duración de diseño L_d , h
Electrodomésticos	1000 - 2000
Motores de aviación	1000 - 4000
Automotores	1500 - 5000
Equipo agrícola	3000 - 6000
Elevadores, ventiladores industriales, transmisores de usos múltiples	8000 - 15000
Motores eléctricos, sopladores industriales, máquinas industriales en general	20000 - 30000
Bombas y compresores	40000 - 60000
Equipo crítico en funcionamiento durante 24 h	100000 - 200000

Se debe tomar en consideración que este valor de horas se debe traducir a revoluciones o vueltas, por lo que es necesario saber los rpm del rodamiento.

1.10. SISTEMA DE CONTROL

Se define a un sistema de control como aquel conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de obtener los resultados deseados. En este tipo de sistema se puede identificar 4 partes: medición, acción, control, y referencia. Todo sistema de control mide y hace algo, el proceso lo realiza el controlador que utiliza programas y referencias. Las referencias o parámetros son la parte ajustable del software y necesitan un soporte físico para memorizarse; y las mediciones, accionamientos y controladores son el hardware que se pueden ver y tocar.

En el control automático, el controlador es un dispositivo artificial que puede ser mecánico, electrónico, químico, etc., programado para realizar una tarea según referencias, recibiendo mediciones y actuando sobre los accionadores.

Existen dos clases comunes de sistemas de control: sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado. En los sistemas de control de lazo abierto la salida no interviene en la acción de control; mientras que en los de lazo cerrado o con realimentación se requiere conocer la salida para ejercer el control del sistema [26].

Durante la fase de investigación para encontrar un sistema de control adecuado para el diseño de la máquina de corte por electroerosión, se encontró que la plataforma electrónica Arduino es la favorita de los diseñadores de maquinaria casera debido a su facilidad de utilización y de aprendizaje, así como la baja inversión económica que se realiza al adquirir una placa Arduino y otros componentes complementarios para su funcionamiento.

Por lo tanto, para el presente Trabajo de Graduación se utilizará Arduino como sistema de control y a continuación se estudiará en que consiste esta plataforma, sus complementos y aplicaciones.

1.10.1. PLATAFORMA ELECTRÓNICA ARDUINO

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software de fácil manejo que se utiliza para la construcción de proyectos electrónicos. Está formado por una tarjeta o placa física de circuito programable normalmente denominada microcontrolador, y un software o IDE que se instala en el computador, y que se utiliza para cargar código del computador a la tarjeta física [27].

Las placas de Arduino se caracterizan por leer entradas (la luz de un sensor, la pulsación de un botón, un mensaje de texto, etc.) para convertirla en una salida (activación de un motor, encendido de un LED, etc.). En resumen, permite indicar a la placa qué hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador de la placa.

La placa Arduino se conecta a un computador a través de un USB, donde se conecta con el entorno de desarrollo Arduino (IDE). El usuario escribe el código de

Arduino en el IDE, y luego lo sube al microcontrolador que ejecuta el código, interactuando con las entradas y salidas como sensores, motores y luces.

Sus posibilidades proporcionan controlar variables físicas como velocidad, aceleración, temperatura, fuerza, presión entre otras. Estas se convierten en electricidad para ser medidas y utilizadas en todo tipo de diseños. Entre sus utilidades más frecuentes en el ámbito empresarial destacan proyectos realizados en Robótica, Internet de las Cosas, y Domótica.

1.10.2. HARDWARE ARDUINO

Existe una infinidad de placas basadas en Arduino. La diferencia entre los distintos Arduino está, por un lado, en la tensión utilizada en las placas. Generalmente las microcontroladoras con CortexM3 tienen un voltaje de 3.3 voltios, mientras que la mayor parte de las placas con AVR utilizan una tensión de 5 voltios.

La placa de Arduino tiene una familia de microprocesadores bastante extensa compuesta de diferentes modelos y variaciones. A continuación, se describen las partes de Arduino UNO, que no difiere mucho de los otros modelos, para hacer una idea de la estructura del Hardware (ver Fig. 1.25) [27].

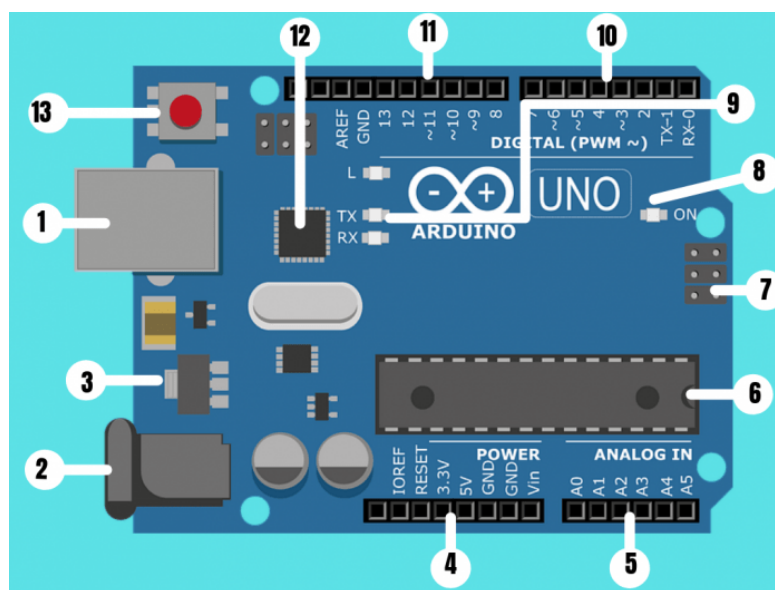


Fig. 1.25. Partes de la placa Arduino UNO [27].

- (1 y 2) Alimentación USB/5 V DC: El Arduino UNO puede ser alimentado desde un cable USB de tipo B o mini procedente del computador o desde una fuente de alimentación entre 6 V y 18 V. En la Fig. 1.25, la conexión USB está etiquetada (1) y el conector de la fuente de alimentación (2). Además, la conexión USB sirve para cargar código en la placa de Arduino desde donde se pueden enviar datos de la programación e instrucciones a la placa.
- (3) Regulador de voltaje: Controla la cantidad de voltaje que se deja entrar en la placa de Arduino, por lo que no dejará pasar un voltaje superior al establecido que podría dañar el circuito.
- (4) Conexiones: Los pines o conexiones de Arduino se utilizan para conectar los cables que se van a necesitar para construir un circuito. Este tipo de conexiones tiene varios pines, cada uno de los cuales está impreso en la placa y se utilizan para diferentes funciones:
 - Reset: Permite el reseteo del microcontrolador.
 - 5 V y 3.3 V: la clavija de 5 V suministra 5 voltios de energía, y la clavija de 3.3 V suministra 3.3 voltios de energía. La mayoría de los componentes simples usados con el Arduino funcionan bien con 5 o 3.3 voltios.
 - GND: Existen varios pines GND en Arduino, se usan para conectar a tierra el circuito.
 - VIN: Se usa para conectar la alimentación de la placa con una fuente externa de entre 6 y 12 V DC.
- (5) Puertos de entrada Analógicos: El área de pines bajo la etiqueta 'Analog In' (A0 a A5 en la tarjeta Arduino UNO) son los pines de entrada analógica. Estos pines pueden leer la señal de un sensor analógico y convertirla en un valor digital que el usuario puede leer e interpretar.
- (6) Microcontrolador Atmega 328: Esta zona de la placa es el circuito integrado que actúa como cerebro/procesador de la placa de Arduino sobre el que se implementará la programación.
- (7) Entrada ICSP: Esta entrada realiza la función de acceso directo para grabar, desde el PC al circuito, cualquier programa sin necesidad de utilizar el puerto USB.

- (8) Indicador LED de alimentación: LED de encendido de la placa de Arduino que indica si el microprocesador esta activo.
- (9) LED TX RX: TX es la abreviatura de transmisión de datos y RX es la abreviatura de recepción de datos. Estas marcas comunes aparecen con regularidad en la electrónica para indicar los pines responsables de la comunicación serie. Así mismo, Estos LED se activan visualmente cuando la placa está recibiendo o transmitiendo datos.
- (10) Puertos Digitales: Estos pines se pueden utilizar tanto para la entrada digital (como para indicar si se pulsa un botón) como para la salida digital (como para alimentar un LED).
- (11) Puerto de conexiones:
 - 5 entradas o salidas auxiliares (de la 8 a la 12).
 - 3 salidas: 9, 10 y 11 que permiten la modulación por ancho o de pulso.
 - Salida 13 que sirve para conectar un led directamente a tierra.
 - Salida a tierra GND.
 - Pin AREF (Analog Reference o Referencia Analógica) que se utiliza para fijar una tensión de referencia externa (entre 0 y 5 voltios) como límite superior de las clavijas de entrada analógica.
- (12) Chip de Arduino: Permite identificar un dispositivo USB por el computador, es como su tarjeta de identificación.
- (13) Botón de RESET: Al presionarse, conectará temporalmente el pin de Reset a tierra y reiniciará cualquier código que esté cargado en el microcontrolador de Arduino.

1.10.3. ESCUDOS O SHIELDS

Gracias a los escudos o mochilas (Shields) se puede contar con infinidad de funciones, como GPS, relojes en tiempo real, conectividad por radio, pantallas táctiles LCD, placas de desarrollo, entre otras [28].

Los Shields son placas de circuitos modulares que se montan unas encima de otras para dar funcionalidad extra a un Arduino. Los Shields son apilables y se pueden comunicar con el Arduino bien por algunos de los pines digitales o analógicos o bien por algún bus como el SPI, I2C o puerto serie, así como usar algunos pines como interrupción. Además, estos Shields se alimentan generalmente a través del Arduino mediante los pines de 5 V y GND. En muchos casos los Shields vienen sin soldar las patillas o sin algunos componentes soldados (ver Fig. 1.26).



Fig. 1.26. Montaje de Shield sobre placa Arduino [28].

Cada Shield de Arduino debe tener el mismo factor de forma que el standard de Arduino con un espaciado de pines concreto para que solo haya una forma posible de encajarlo. Se debe tener en consideración que cuando se instale un Shield, habrá que leer su documentación para saber si inhabilita algunas de las entradas/salidas o si usa un bus, y que requisitos tiene para su utilización. Algunos de los Shields más importantes de Arduino son:

- Arduino Motor Shield: Permite manejar dos motores DC, controlando su dirección y velocidad. Está basado en un chip de doble puente H ST L298. Este Shield usa dos canales y cada canal usa 4 pines, en total ocupa 8 pines del Arduino (ver Fig. 1.27).

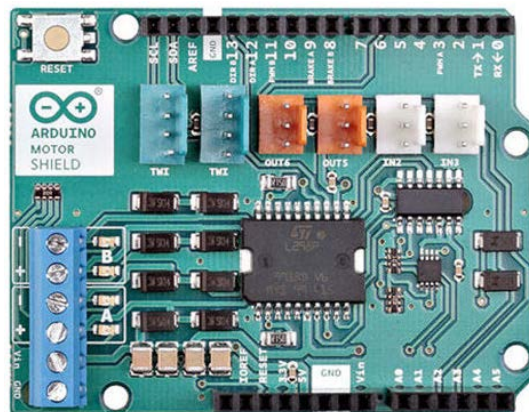


Fig. 1.27. Placa Arduino Motor Shield [28].

- EmonTx Shield: Un Shield para medir corriente eléctrica bajo el proyecto open energy monitor. Posee 4 entradas para conectar 4 toroidales abiertos y una entrada para conectar el sensor de voltaje mediante un transformador AC-AC, también tiene la posibilidad de montar un transmisor RF (ver Fig. 1.28).

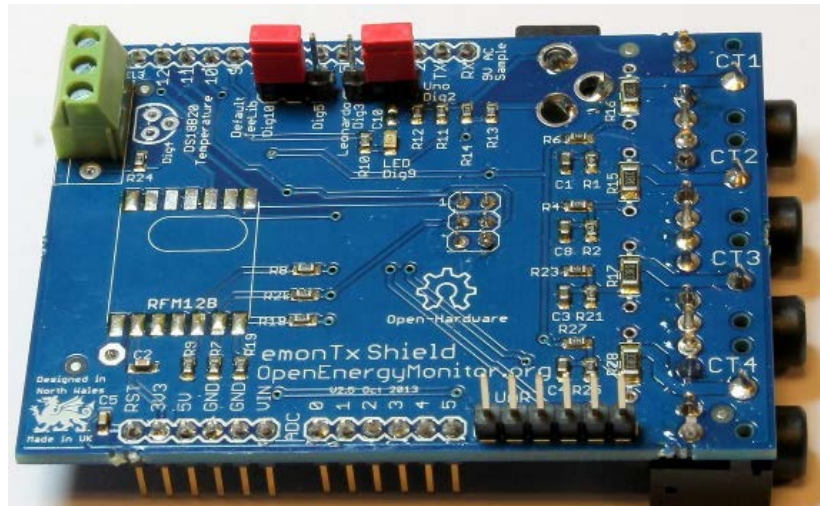


Fig. 1.28. Placa EmonTx Shield [28].

- Relay Shield: Este Shield proporciona 4 relés para manejar dispositivos que no se pueden controlar directamente con las I/O de Arduino. Dispone de unos indicadores de uso de los relés. En este caso se usan 4 pines digitales para usar cada uno de los relés (ver Fig. 1.29).

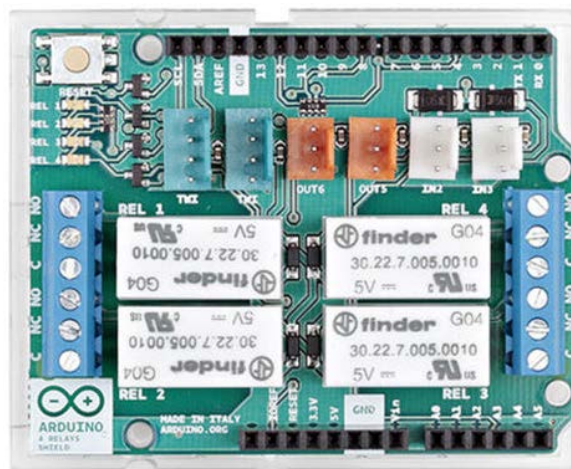


Fig. 1.29. Placa Relay Shield [28].

- TFT Shield: Pantalla táctil resistiva con un slot para micro SD integrado. Comunicación a Arduino a través de bus SPI (ver Fig. 1.30).



Fig. 1.30. Placa TFT Shield [28].

- Terminal Shield: Shield con borneros y placa de prototipado que permite conectar fácilmente cualquier sensor o actuador a un Arduino (ver Fig. 1.31).

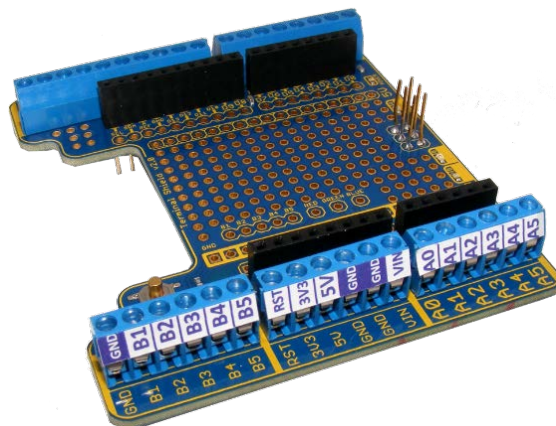


Fig. 1.31. Placa Terminal Shield [28].

1.10.4. SISTEMA OPERATIVO LINUXCNC

LinuxCNC (“Enhanced Machine Control” o Control de Máquina Mejorado) es un sistema de software para control de máquinas herramientas como fresadoras y tornos, robots y otras máquinas controladas por computadora, de hasta 9 ejes (ver Fig. 1.32).

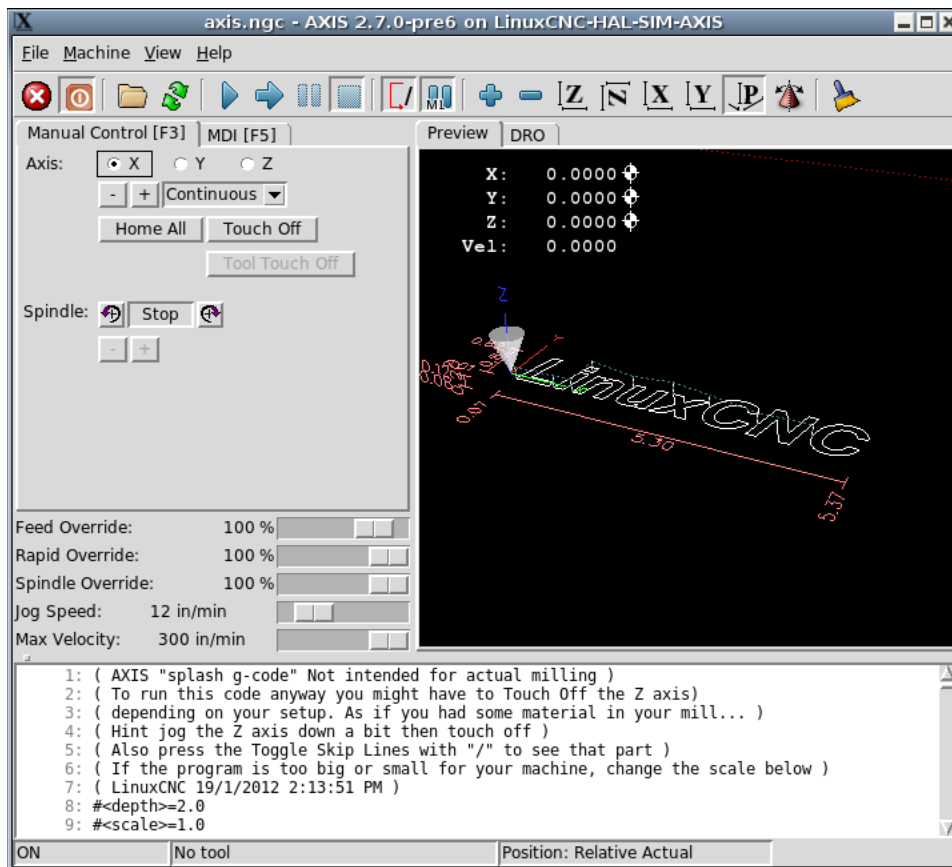


Fig. 1.32. Interfaz de LinuxCNC.

LinuxCNC es un software gratuito con código fuente abierto y proporciona las características siguientes:

- Varias interfaces gráficas de usuario;
- Intérprete para código G;
- Sistema de planificación de movimiento en tiempo real con análisis de instrucción siguiente;
- Operación de la electrónica de bajo nivel de la máquina, como sensores y motores;
- Una capa que actúa como breadboard, fácil de usar, para crear rápidamente una configuración única para la máquina conectada;
- Un PLC en software, programable, con diagramas de escalera;
- No proporciona herramientas de dibujo ni funciones de generación de código G a partir de dibujos;
- Puede mover simultáneamente hasta 9 ejes y admite una variedad de interfaces;

- El control puede operar servos (analógicos o PWM) con retroalimentación de bucle cerrado por el software LinuxCNC en la computadora, o bucle abierto, con servomotores o motores paso a paso;
- Las características de control de movimiento incluyen: compensación del radio de corte y longitud de herramienta, desviación de trayectoria limitada a una tolerancia especificada, roscado en torno, movimientos de eje sincronizados, avance adaptativo, control de ajuste de avance por el operador y control de velocidad constante;
- Soporte para sistemas de movimiento no cartesianos, a través de módulos cinemáticos personalizados. Las arquitecturas disponibles incluyen hexápodos (plataformas Stewart y conceptos similares) y sistemas con articulaciones rotativas para proporcionar movimiento como robots PUMA o SCARA; y
- LinuxCNC se ejecuta en Linux usando extensiones en tiempo real.

1.11. SERVOMOTORES

Un servomotor (también llamado servo) es un dispositivo de accionamiento de bucle cerrado para el control de precisión de velocidad, par motor y posición. La señal de control, que puede ser analógica o digital, representa el comando de posición final para el eje. Constituyen un mejor desempeño y precisión frente a accionamientos mediante convertidores de frecuencia, ya que éstos no proporcionan control de posición y resultan poco efectivos en bajas velocidades.

Contiene en su interior un encoder, conocido como decodificador, que convierte el movimiento mecánico (giros del eje) en pulsos digitales interpretados por un controlador de movimiento. También utilizan un driver, que en conjunto forman un circuito para comandar posición, torque y velocidad.

Los servomotores se manejan enviando un pulso eléctrico de ancho variable, también conocido como modulación de ancho de pulso (Pulse Wide Modulation, PWM), a través del cable de control. Este pulso puede variar en duración, con un pulso mínimo,

un pulso máximo y una frecuencia de repetición. En términos generales, un servomotor sólo puede girar 90° en cualquier dirección, lo que da un movimiento total de 180°.

El PWM que se envía al motor determina la posición del eje, y se basa en la duración del pulso enviado a través del cable de control. Así, el rotor girará a la posición deseada. El servomotor funciona normalmente con ciclos de 50 Hz, por lo que espera un pulso cada 20 milisegundos (ms). La longitud de este pulso determinará hasta dónde gira el motor. Por ejemplo, un pulso de 1.5ms hará que el motor gire a la posición de 90°. Si el tiempo del pulso es inferior a 1,5 ms, el servo se moverá en sentido contrario a las agujas del reloj hacia la posición de 0°, y si el tiempo del pulso es superior a 1,5 ms, el servo girará en sentido de las agujas del reloj hacia la posición de 180° (ver Fig. 1.33) [29].

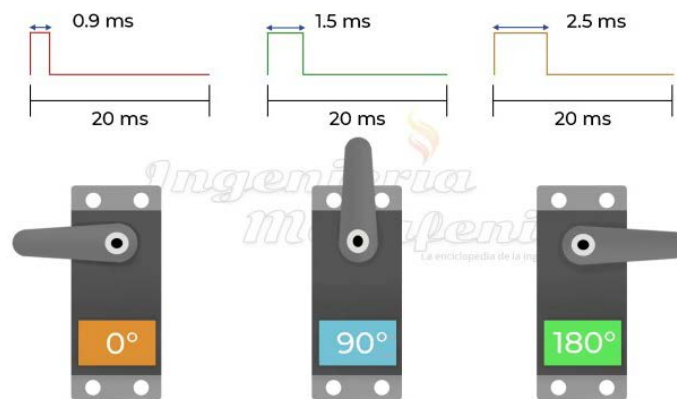


Fig. 1.33. Posiciones del servomotor según la duración del pulso [29].

El control de los pulsos y su tiempo siempre se debe revisar en las tablas del fabricante del servomotor, así en la Tabla 1.13 se presentan algunos ejemplos.

Tabla 1.13. Posiciones para las diferentes marcas de servomotores [29].

Fabricante	Duración de pulsos, ms			Frec., Hz	Color de los cables		
	Mín, 0°	Neutral, 90°	Máx, 180°		Positivo	Negativo	Control
Futaba	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Blanco
Hitech	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Amarillo
Graupner	0.8	1.5	2.2	50	Rojo	Marrón	Naranja
Multiplex	1.05	1.6	2.15	40	Rojo	Negro	Amarillo
Robbe	0.65	1.3	1.95	50	Rojo	Negro	Blanco
Simprop	1.2	1.7	2.2	50	Rojo	Azul	Negro

Cuando se les da la orden de moverse, los servos se moverán a la posición y mantendrán esa posición. Si una fuerza externa empuja contra el servo mientras mantiene una posición, el servo se resistirá a salir de esa posición.

La cantidad máxima de fuerza que puede ejercer el servo se denomina par de torsión del servo. Sin embargo, los servos no mantendrán su posición indefinidamente, el pulso de posición se debe repetir para indicar al servo que se mantenga en posición.

Todos los servos tienen tres cables, uno de voltaje (4.8v a 6v), uno para tierra (Gnd) y el tercero que se utiliza para recibir la señal modulada que se utiliza para controlar el giro.

1.11.1. PARTES DE UN SERVOMOTOR

Las partes generales que componen la estructura de un servomotor se describen a continuación (ver Fig. 1.34) [29]:

- Motor eléctrico: Encargado de generar el movimiento a través de su eje.
- Sistema de control: Permite controlar el movimiento del motor mediante el envío de pulsos eléctricos.
- Sistema de regulación: Formado por engranajes por los cuales puede aumentar la velocidad y el par o disminuirlas.
- Potenciómetro: Conectado al eje central y permite en todo instante saber el ángulo en el que se encuentra el eje del motor.

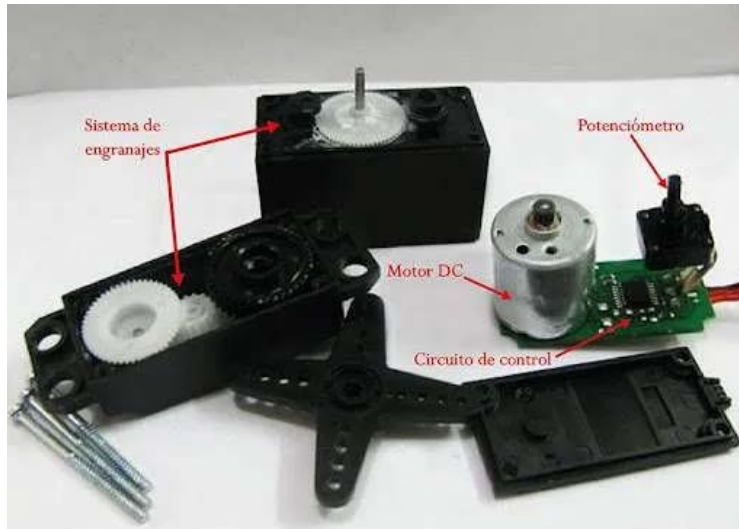


Fig. 1.34. Partes de un servomotor [29].

1.11.2. TIPOS DE SERVOMOTOR

Los servomotores se clasifican según el tipo de motor con el que funcionan y según el movimiento que realizan. A continuación, se profundiza en esta clasificación [29]:

a) Según el tipo de motor

- Servomotor DC (corriente continua). Funcionan con un pequeño motor de corriente continua. Convierte la energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético. La energía proviene de un variador para poder funcionar, el cual modula la electricidad que recibe el motor, ya que las fuentes de alimentación tienen un flujo continuo de corriente y no se autorregulan. Sin el variador no se podría hacer que el motor empiece poco a poco, gane velocidad, frene o baje la velocidad.
- Servomotor AC (corriente alterna). También suelen tener un variador. Este servomotor aporta una corriente más alta y por lo tanto se usan en aplicaciones industriales donde se requieren altas repeticiones de alta precisión. Por ejemplo, se pueden utilizar en robots o fabricación en línea.

- Servomotor de imanes permanentes o Brushless. Es un motor eléctrico sin escobillas. La escobilla es el elemento que ejerce conexión eléctrica entre la parte fija y la giratoria dentro del motor eléctrico.

La fuente de alimentación es la diferencia clave entre los servomotores de AC y DC. Existen 4 tipos de fuente de alimentación:

- AC/AC recibe corriente alterna y la convierte en alterna,
- AC/DC: recibe corriente alterna y la convierte en corriente continua,
- DC/AC: recibe corriente continua y la convierte en alterna, y
- DC/DC: recibe corriente continua y la convierte en continua.

A cada tipo de motor se le debe dar la fuente de alimentación que necesita. Por lo tanto, un servo DC solo puede funcionar con una fuente de alimentación DC/DC o AC/DC. Y un servo AC solo puede funcionar con una fuente DC/AC o AC/AC.

Los variadores (también llamados transformadores) “limpian” la energía “sucia” de su procedencia, ya que se deben suavizar los picos de tensión, irregularidades de la red, bajadas de tensión, etc., para proteger el motor.

b) Según el tipo de movimiento que realizan

- Servo de rotación posicional. Es el tipo más común de servomotor y su eje de salida gira aproximadamente 180 grados. Tiene topes físicos colocados en el mecanismo de engranaje para evitar que gire más allá de estos límites, protegiendo así el sensor de rotación.
- Servo de rotación continua. Es muy similar al servomotor de rotación posicional común, excepto que puede girar en cualquier dirección indefinidamente. La señal de control, en lugar de ajustar la posición estática del servo, se interpreta como la dirección y la velocidad de rotación. Dependiendo de la señal de comando, este servo puede girar en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario a las agujas del reloj a una velocidad variable.
- Servo lineal es similar al servomotor de rotación posicional, aunque con engranajes adicionales (normalmente un mecanismo de cremallera y piñón) para cambiar la salida de circular a vaivén (ver Fig. 1.35).



Fig. 1.35. Tipos de servomotores según su movimiento [29].

1.11.3. VENTAJAS DEL SERVOMOTOR SOBRE EL MOTOR PASO A PASO

Utilizar un servomotor significa para algunos un sobrecoste para el proyecto innecesario, ya que existe la opción de los motores paso a paso, opción más económica y que proporciona una precisión cercana a la del servomotor. El motor paso a paso es un motor eléctrico, aunque no gira, sino que como su nombre lo indica avanza paso a paso. Es decir, no giran de manera continua sino por un número determinado de grados.

1.11.4. FACTORES CLAVE PARA SELECCIONAR UN SERVOMOTOR

Existen varias consideraciones que se deben tener presentes en el instante de elegir el servomotor ideal para nuevas aplicaciones industriales. Un servomotor es parte de un mecanismo total que proporciona movimiento a una carga: el par, la fuerza y la velocidad necesarios para realizar una función determinada. Esto es especialmente importante porque determina qué tan grande debe ser el motor y su densidad de fuerza relativa.

Para calcular estos factores, es necesario establecer el peso de la carga útil, la distancia y velocidad del ciclo, y el descanso/enfriamiento entre movimientos; esto también se conoce como ciclo de trabajo.

Una vez que se especifica la aplicación, identificar el par máximo, el par continuo y la velocidad requeridos del motor ayudaran a seleccionar el motor correcto. Par y velocidad van de la mano al seleccionar un servomotor. Las curvas de par son una herramienta que se utiliza para representar esta relación, mostrando cuándo el par y la velocidad relativos se pueden mantener simultáneamente, tanto de forma continua como intermitente.

Otros dos términos útiles para conocer el par en los servomotores y la curva de par son par nominal y velocidad nominal. El par nominal es el par máximo que un motor puede producir continuamente, en la línea que divide las zonas continua e intermitente, y la velocidad nominal es la velocidad máxima en la que está disponible el par nominal.

- Torque continuo. La torsión continua, también conocida como torsión cuadrática media (RMS), es una media ponderada en el tiempo de la torsión durante un ciclo completo; esto debe caer en la región continua de la curva de par para poder mantener la velocidad requerida.
- Par máximo. El par máximo es el par máximo requerido en cualquier punto del ciclo. Idealmente, el par máximo se encuentra en la región intermitente de la curva de par porque no es tan sostenible. Si el par máximo requerido por la aplicación cae en la región continua del motor, es probable que esté sobredimensionado.
- Velocidad. Tan importante como el peso de la carga al elegir un servomotor es conocer la velocidad, generalmente en RPM, que se requerirá. En términos generales, a mayor velocidad a la que gira un motor dado, menor es el par posible. El número de polos también influye: un número bajo de polos da como resultado alta velocidad y bajo par.

Cuanto más se acerque el ciclo a las limitaciones del motor, más caliente se pondrá. Se debe elegir un motor de servo que no se sobrecaliente, aunque que tampoco sea demasiado grande para no ser rentable. Una vez determinadas estas relaciones, se pueden establecer otros factores importantes, aunque menos críticos para la misión.

Otros factores clave para elegir el servomotor adecuado para nuevas instalaciones industriales

- Relación de transmisión. No todos los servomotores tienen engranajes, aunque muchos sí. Con la llegada de los motores de transmisión directa, los motores con

engranajes se consideran más primitivos, aunque se pueden usar para amplificar las capacidades de par de un motor de menor cantidad de polos. En un sistema de engranajes, el servomotor hace girar un engranaje conductor que gira otro engranaje que está más estrechamente conectado a la carga útil. (Puede haber más de un par de engranajes en un servomotor). Las relaciones del número de dientes entre los pares de engranajes formulan la relación de engranajes.

- Inercia. Cuando se trata de rotación, la forma y la masa de la carga útil generan inercia cuando el motor y la carga aceleran o cambian de dirección. El motor tiene su propia inercia en el rotor, que a menudo es insignificante en comparación con la carga útil, al igual que la carga, que se incrementa por cualquier fricción en el movimiento.
- Precisión. Un motor de accionamiento directo no está limitado mecánicamente en su precisión, lo que significa que el motor funcionará con la misma precisión que la retroalimentación que utiliza. Dicho esto, el codificador generalmente se selecciona más en función de lo que se ajuste a la estructura mecánica general en lugar de un resultado del rendimiento del motor.
- Factores ambientales. Los factores ambientales afectan la selección general porque si el ambiente es diferente a la temperatura ambiente estándar, el rendimiento del motor cambia. Por ejemplo, cuanto mayor es la temperatura ambiente, menor es el par continuo posible. En un entorno donde se tiene una temperatura ambiente alta y/o requisitos de par continuo, la refrigeración líquida es una buena opción, aunque se debe evitar el contacto directo con la mecánica y la conexión del motor. Otros factores ambientales incluyen la contaminación y la vibración.
- Eficiencia. La eficiencia de un servomotor es simplemente cuánta corriente se necesita para lograr un valor de par constante. Esto se conoce como constante de par (K_t) y se puede encontrar en las hojas de datos de un motor.
- Devanados. Se refieren a las diferentes formas en que las bobinas están conectadas entre sí (en serie o en paralelo) y las diferentes opciones de devanado dan las compensaciones siguientes: los devanados con mayor eficiencia de corriente tienen capacidades de velocidad más bajas, mientras que los devanados con capacidades de velocidad más altas tienen capacidades de velocidad más bajas. Cuando se

conoce la velocidad requerida, el devanado se basará en cuál es la opción más eficiente y, al mismo tiempo, se alcanzará la velocidad requerida.

1.12. GENERADOR DE PULSOS ELÉCTRICOS

El generador de pulsos de electroerosión es el núcleo de la máquina de corte por electroerosión. La tensión de iniciación de la chispa, aproximadamente entre 100 - 400 V, se aplica a través del gap a una frecuencia de repetición que oscila entre varios kHz y unos pocos MHz. Si el voltaje se aplica durante una duración superior a unos 10 μ s, la chispa se puede convertir en un arco sostenido, por lo tanto, es necesario un voltaje pulsado con un tiempo de encendido finito (t_{ON}) y un tiempo de apagado finito (t_{OFF}) para la propia funcionalidad del proceso. Cuando el gap es mínimo, la corriente de chispa aumenta y la tensión a través del gap disminuye. La corriente de chispa se controla para obtener el rendimiento de mecanizado requerido [30].

El chispeo provoca el calentamiento localizado y la fusión de la pieza y, como resultado, aumenta la longitud del gap. El control de movimiento de CNC hace avanzar el hilo en función de la disminución de la tensión en el gap para que se inicie de nuevo la chispa. El mecanismo de alimentación del hilo controla la velocidad y la tensión del hilo, mientras que el sistema de bombeo controla el caudal del fluido dieléctrico. Un diagrama de bloques del sistema WEDM completo se presenta en la Fig. 1.36.

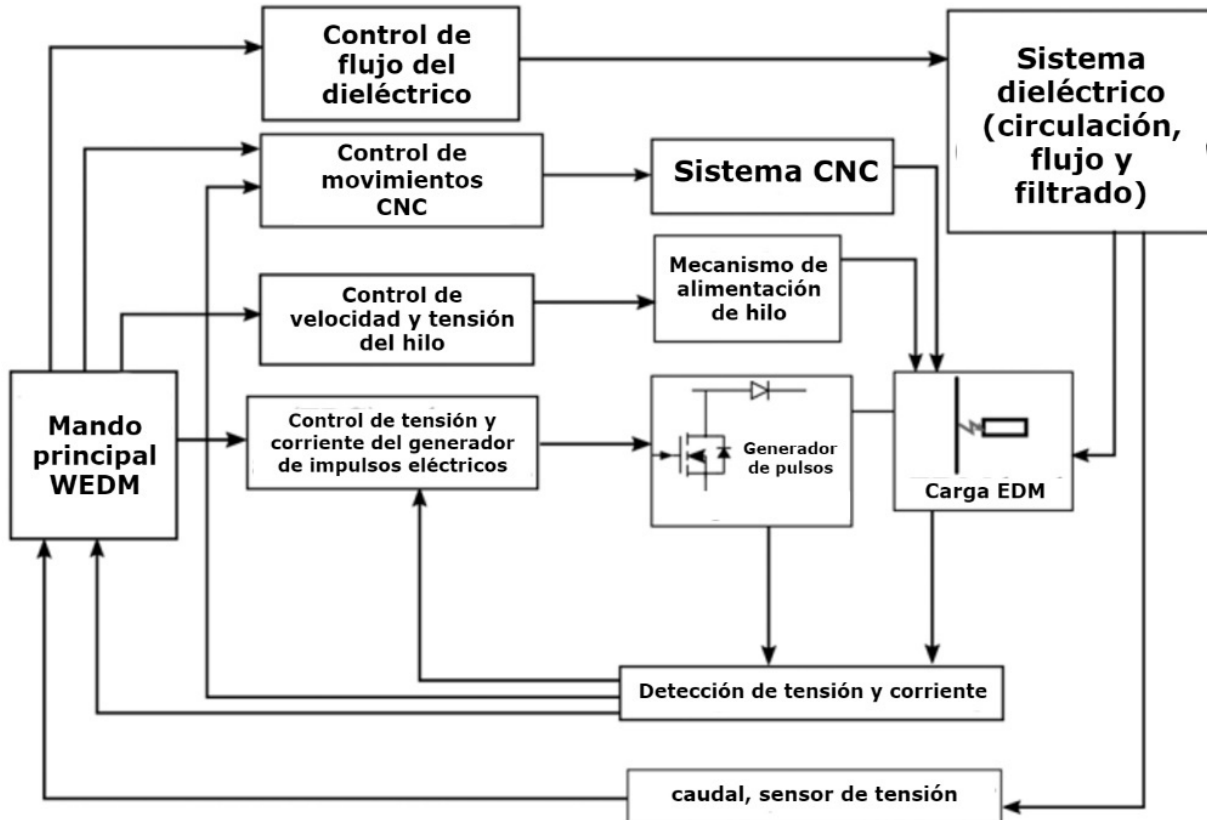


Fig. 1.36. Estructura completa del sistema WEDM [30].

El proceso de electroerosión por hilo se presenta en la Fig. 1.37, donde WP es la pieza de trabajo.

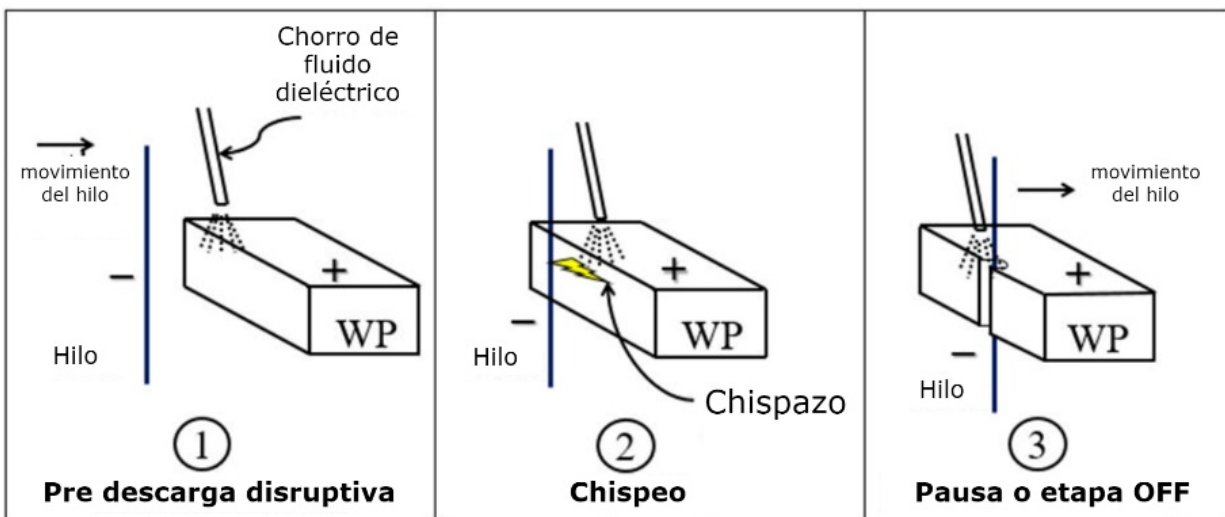


Fig. 1.37. Etapas del proceso WEDM [30].

Las formas de onda de tensión y corriente durante el proceso de electroerosión correspondientes se presentan en la Fig. 1.38.

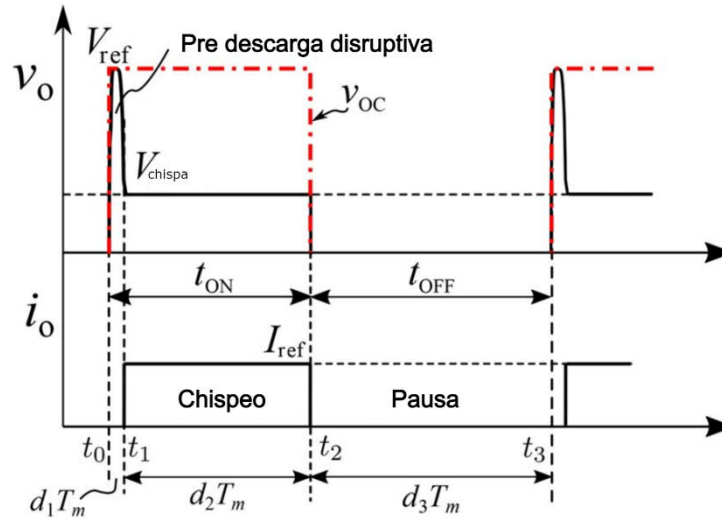


Fig. 1.38. Formas de onda de tensión y corriente [30].

Existen tres etapas de funcionamiento durante el proceso de corte por electroerosión mediante hilo, y esas son:

- Pre descarga disruptiva: Esta etapa representa el retraso en tiempo entre la aplicación de la tensión V_{ref} y la descarga disruptiva (Corriente eléctrica en un dieléctrico cuando el campo eléctrico en éste supera su rigidez dieléctrica) del gap, por lo que también se denomina tiempo de retardo de ignición. V_{ref} tiene que ser mayor que V_b , que es la tensión disruptiva del gap. El retraso es de naturaleza aleatoria y suele oscilar entre unos 10 y 100 ns.
- Chispeo: Esta etapa comienza cuando el hilo se acerca a la pieza y empieza a fluir una corriente finita. La tensión a través del gap se reduce a V_{chispa} : la tensión de chispeo. Tanto V_b como V_{chispa} se rigen por condiciones físicas, es decir, el material del hilo y la pieza, la temperatura, el dieléctrico, el área de los electrodos, etc. Por lo tanto, durante esta etapa, la tensión v_o no se puede controlar, sin embargo, la corriente de chispa sí. Cuanto mayor sea la magnitud de la corriente, mayor será la tasa de eliminación de material (MRR).
- Pausa: Esta etapa es necesaria para evitar que la chispa se convierta en un arco sostenido y, finalmente, en un cortocircuito. Por lo tanto, no se aplica tensión y se deja

que la chispa implosione. La implosión ayuda a la expulsión de partículas de residuos solidificados de la pieza de trabajo, de modo que el gap recupere su rigidez dieléctrica. Algunas tecnologías están diseñadas para aplicar deliberadamente una tensión cero o negativa en la carga de electroerosión (Carga EDM) para acelerar la extinción de la corriente de chispa.

Por lo tanto, el generador de pulsos de electroerosión debe proporcionar una tensión pulsada de magnitud V_{ref} con una frecuencia de repetición f_m . El subíndice "m" se refiere a mecanizado. El periodo correspondiente se denomina T_m y la relación de trabajo D_m se denomina trabajo de mecanizado. Obsérvese que (Ecs. 1.41 y 1.42):

$$t_{ON} = D_m T_m = (d_1 + d_2) T_m \quad (1.41)$$

$$t_{OFF} = d_3 T_m \quad (1.42)$$

1.12.1. NATURALEZA FÍSICA DE LA ELIMINACIÓN DE MATERIAL

Para garantizar un funcionamiento adecuado del proceso de electroerosión mediante hilo, es esencial entender su principio físico. Como ya se ha citado, es el de la formación de una descarga entre dos electrodos (hilo y pieza de trabajo), en este caso, en un fluido dieléctrico. En este sentido, la aplicación de medios dieléctricos fluidos es mucho más ventajosa ya que satisface las necesidades de corte de precisión y alto rendimiento [31].

La forma y el tamaño de las partículas metálicas erosionadas del material que se corta, así como el tamaño y la forma del cráter resultante dependen no sólo de la polaridad de los electrodos, sino también del correcto ajuste de parámetros. Por defecto, se eliminan 10^{-3} a 10^{-5} mm³ de material durante un único ciclo de descarga por electroerosión. Su tamaño se puede determinar empíricamente mediante la Ec. 1.43:

$$V_i = K \cdot W_i \quad (1.43)$$

donde: V_i es el volumen de material erosionado en mm^3 ,

K es el factor de proporcionalidad para cátodo y ánodo en $\text{mm}^3 \text{J}^{-1}$, y

W_i es la energía de descarga en J.

El volumen total V_T de material tomado de ambos electrodos (hilo y pieza) durante el proceso de electroerosión, depende directamente de la magnitud de la energía transmitida W_e . Esto a su vez, da lugar a una serie de descargas eléctricas que se repiten cíclicamente entre los electrodos a lo largo de un tiempo t . La energía de descarga total W_e transmitida durante una serie de ciclos de descarga se puede determinar empíricamente mediante la Ec. 1.44:

$$W_e = \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt \quad (1.44)$$

donde: W_e es la energía total de descarga en J,

$U(t)$ es el voltaje de descarga del electrodo en el tiempo t en V,

$I(t)$ es la corriente máxima de descarga en el tiempo t en A, y

T es la duración de un periodo de descarga eléctrica en μs .

Derivando la Ec. 1.44, se puede determinar empíricamente la cantidad de energía transmitida durante un ciclo de descarga (Ec. 1.45):

$$W_e = I_e \cdot U_e \cdot t_{on} \quad (1.45)$$

donde: I_e es la corriente promedio de descarga en A,

U_e es el voltaje promedio de descarga en los electrodos en V, y

t_{on} es la duración de la descarga durante un ciclo de descarga en μs .

Para completar todos los parámetros del proceso de electroerosión relacionados con un ciclo de descarga, también es necesario determinar empíricamente la magnitud de la corriente promedio de descarga I_e y el voltaje promedio de descarga U_e entre los

electrodos. Estos valores se pueden determinar a partir de la Ec. 1.46 para I_e y la Ec. 1.47 para U_e :

$$I_e = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} I(t) dt \quad (1.46)$$

$$U_e = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} U(t) dt \quad (1.47)$$

donde: $I(t)$ es la corriente máxima de descarga en A, y t_e es el tiempo de descarga de corriente en μs .

A partir de estos y otros parámetros del proceso de electroerosión, la cantidad total de material extraído por unidad de tiempo t se puede determinar empíricamente mediante la Ec. 1.48:

$$Q_T = k \cdot r \cdot f \cdot \mu \cdot W_e = k \cdot r \cdot f \cdot \mu \cdot \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt \quad (1.48)$$

donde: Q_T es la cantidad de material extraído en $mm^3 \cdot s^{-1}$,
 k es el factor de proporcionalidad para cátodo y ánodo,
 r es la eficiencia de la descarga eléctrica,
 f es la frecuencia de las descargas eléctricas en Hz, y
 μ es la eficiencia del generador de descarga.

Otro parámetro no menos importante es el periodo de descarga t_d . Éste caracteriza la eficiencia global de un ciclo de descarga entre los electrodos. Se determina empíricamente como una proporción de la duración de la descarga eléctrica durante un ciclo de descarga, es decir, el tiempo entre el encendido y el apagado del generador y el

periodo de tiempo T, es decir, el intervalo de tiempo entre dos arranques consecutivos del generador. Su valor se puede determinar mediante la Ec. 1.49:

$$t_d = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (1.49)$$

donde: t_d es el período de descarga,

t_{on} es la duración de la descarga durante un ciclo de descarga en μs ,

t_{off} : Tiempo de pausa entre dos descargas consecutivas en μs , y

T es el periodo de tiempo de la descarga eléctrica en μs .

El efecto del periodo de descarga t_d sobre la calidad de la superficie cortada en términos de los parámetros de rugosidad Ra y Rz se presenta en la Fig. 1.39.

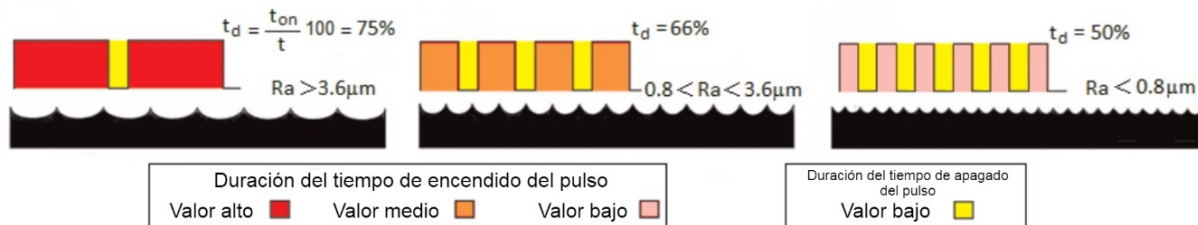


Fig. 1.39. Efecto del periodo de descarga sobre la superficie cortada [31].

Además, utilizando el periodo de descarga t_d , se puede expresar empíricamente la eficiencia global de un ciclo de descarga entre los electrodos durante la electroerosión.

El control preciso de los parámetros individuales de descarga eléctrica entre los dos electrodos durante un único ciclo de descarga tiene un impacto significativo en la calidad de la superficie cortada, así como en la eficiencia global del proceso de electroerosión.

1.12.2. REPRESENTACIÓN DE LA CARGA DE ELECTROEROSIÓN

Antes de entrar en detalles, se debe recordar el concepto de carga. En electricidad, se denomina carga a cualquier componente de un circuito (resistencia, motor, equipo

electrónico, etc.) que ofrece una mayor o menor resistencia al paso de la corriente, por lo que al conectarse a una fuente de fuerza electromotriz se considera como una "carga" o consumidor de energía eléctrica. Junto a las fuentes de alimentación, y el cableado forman los tres elementos básicos de todo circuito eléctrico [32].

Algunos investigadores han intentado simular el comportamiento de la chispa con un modelo de circuito formado por la resistencia de la chispa R_{sp} , la inductancia L_{sp} y la capacitancia C_{sp} . En estos modelos, la resistencia de chispa R_{sp} es una función no lineal de la corriente de chispa, el tiempo, el dieléctrico, los materiales de los electrodos, la geometría, etc. En consecuencia, la tensión de la chispa se rige por ecuaciones diferenciales no lineales. Por lo que respecta a las chispas en electroerosión, no existe bibliografía concluyente en este campo.

Los investigadores en electrónica de potencia han utilizado principalmente una resistencia y un interruptor para representar la Carga de electroerosión (ver Fig. 1.40).

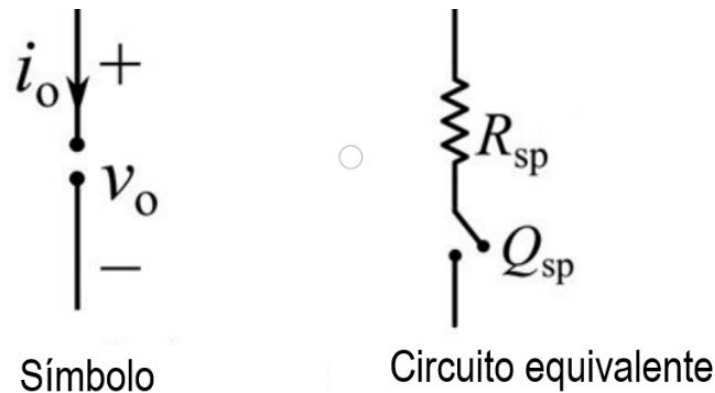


Fig. 1.40. Carga EDM: símbolo y circuito equivalente [32].

1.12.3. EFECTO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

El rendimiento del corte por electroerosión mediante hilo se mide por tres parámetros importantes:

- La tasa de arranque de material (MRR),
- La relación de desgaste del electrodo (TEWR), y
- La rugosidad superficial (SR).

Los parámetros ideales para un buen mecanizado son una alta MRR, una baja TEWR y una baja SR. Los parámetros de control del generador de pulsos de electroerosión, es decir, V_{ref} , I_{ref} , D_m y T_m afectan al rendimiento del mecanizado.

V_{ref} se debe seleccionar adecuadamente de forma que sea mayor que la tensión disruptiva V_b , que viene determinada por la geometría y el material de los electrodos, el dieléctrico y la temperatura y presión. Si la aplicación requiere una tensión disruptiva elevada, es necesario prever una tensión elevada. El efecto de I_{ref} y t_{ON} en MRR, TEWR y SR se presenta en la Tabla 1.14.

Tabla 1.14. Efecto de la corriente y del tiempo ON en el rendimiento del corte [32].

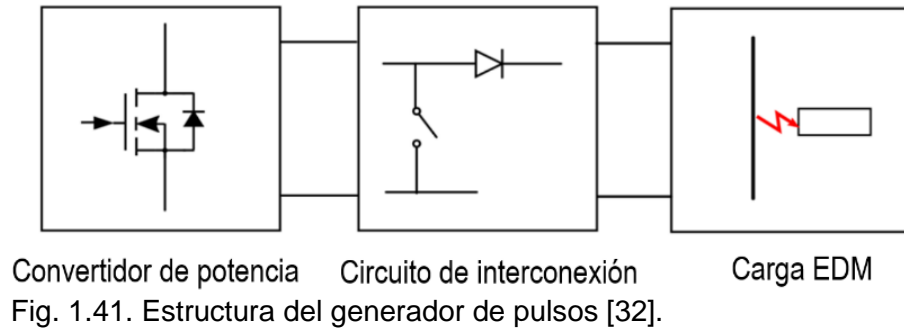
Corriente (I_{ref}), A	Tiempo de encendido (t_{ON}), μs	MRR	TEWR	SR	Conveniencia
Baja de 2 a 10	Largo de 100 a 400	Pobre	Baja	Baja	Acabado
Media de 10 a 50	Medio de 20 a 50	Alta	Baja	Alta	Desbaste
Alta de 70 a 120	Corto de 1 a 10	Alta	Alta	Baja	WEDM

Está claro que sólo dos de estos tres parámetros de rendimiento de mecanizado se pueden mejorar a la vez. Dependiendo de los dos parámetros que se mejoren, el mecanizado se clasifica como desbaste, acabado o WEDM, tal y como se indica en la Tabla 1.14.

Las otras combinaciones posibles como corriente alta y duración de descarga larga o duración de descarga corta con corriente bajan no se utilizan ya que no son útiles para el mecanizado. Se debe tener en consideración que para WEDM se requiere una descarga de corta duración, por lo que si se diseña un generador de pulsos de electroerosión para WEDM se pueden utilizar dispositivos de banda ancha de conmutación rápida.

1.12.4. ESTRUCTURA DEL GENERADOR DE PULSOS

La estructura genérica del generador de pulsos de electroerosión consta de las partes presentadas en la Fig. 1.41.



- Unidad convertidora de potencia, que consiste en convertidor(es) CC-CC, normalmente modificados para adaptarse a la carga de electroerosión
- Circuito de interconexión, que facilita el tiempo de pausa conectando o desconectando la unidad convertidora con la carga de electroerosión.

Uno de los rasgos característicos del generador de pulsos de electroerosión es que existen dos frecuencias de conmutación en el circuito: los interruptores electrónicos de potencia del circuito de interconexión se conmutan a la frecuencia f_m , correspondiente al tiempo T_m en la Fig. 1.38, mientras que la frecuencia de conmutación de los interruptores de la electrónica de potencia en la unidad de convertidor de potencia es f_{sw} , de modo que $f_{sw} \gg f_m$. Además, por lo general, la relación de trabajo de los interruptores electrónicos de potencia en el circuito de interconexión la decide el operador y no existe un bucle de realimentación explícito para el mismo. Sin embargo, la relación de trabajo de los interruptores electrónicos de potencia en la etapa del convertidor de potencia se decide mediante el bloque de control de tensión y corriente del generador de pulsos de electroerosión, como se presenta en la Fig. 1.36.

1.12.5. CLASIFICACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

En la bibliografía clásica sobre electroerosión, sólo se citan dos tipos de generador de pulsos de electroerosión: los generadores de pulsos RC y los generadores de pulsos transistorizados, ya que se analizan desde la perspectiva de la ingeniería de producción. Sin embargo, desde la perspectiva de la electrónica de potencia, las topologías de los generadores de pulsos se pueden clasificar en tres tipos:

- Basados en un único convertidor: En este tipo, existe un único convertidor que actúa como fuente de tensión (V_s) durante la etapa de pre descarga disruptiva y como fuente de corriente (C_s) durante la etapa de chispeo. Como sólo existe un convertidor, la tensión de inicio del chispeo la decide la propia tensión de entrada o se puede controlar mediante elementos resistivos. En este convertidor no se tiene ningún bucle de control de tensión independiente.
- Basado en convertidor doble: En esta topología, se conectan dos convertidores a través de la carga de electroerosión, por lo que se denominan aplicaciones basadas en convertidor doble. Un convertidor actúa como V_s para proporcionar la tensión de inicio de chispa y el otro convertidor actúa como C_s para proporcionar la corriente de chispeo necesaria. Debido a la presencia de dos convertidores separados, tanto v_o como i_o se pueden controlar con una única topología.
- Basada en convertidor resonante: Estas topologías utilizan el convertidor resonante como unidad básica. La tensión de salida y, por lo tanto, la corriente se decide por la frecuencia de funcionamiento del convertidor.

1.12.6. ELIMINACIÓN DE LA VIBRACIÓN DEL HILO

Durante la duración de las descargas eléctricas individuales, debido al guiado preciso del hilo, es necesario tensarlo adecuadamente con una fuerza F_w , que normalmente se selecciona en el intervalo de 5 - 25 N. Además, es necesario cargar el hilo con pulsos eléctricos, sumergirlo en un fluido dieléctrico y, debido a su desgaste, renovarlo constantemente. El sistema de tensado y guiado del hilo en el equipo de electroerosión CNC consta de una parte de alimentación que agarra, sujeta, alimenta y controla el alambre. Además de la parte que guía el hilo a través de la zona de trabajo, donde es bañado con fluido dieléctrico, alimentado con corriente eléctrica y posteriormente erosionado. El sistema de guiado del hilo finaliza en una salida que retrae el hilo, lo vuelve a controlar y lo envuelve en una bobina con el hilo utilizado.

Como ya se ha citado, además de la imprecisión en el cableado del hilo, su desviación de una posición recta provoca fuerzas que surgen debido a la acción cíclica

de las descargas eléctricas entre los dos electrodos. Se aplica la regla de que cuanto mayor es el espesor del material a cortar, mayor es la deflexión. La compensación parcial de este fenómeno adverso se lleva a cabo mediante la inclusión de una fuerza contraria junto con un sistema que garantice una tensión óptima del hilo. Sin embargo, ninguna de estas medidas tiene un efecto suficiente. Además del espesor del material que se corta, la elección de la fuerza de tensión óptima también se adapta a la intensidad de la descarga eléctrica, al tipo de material de la pieza, al tipo de material del hilo y a su diámetro, a las propiedades del fluido dieléctrico y a otros factores similares. En particular, la compensación de la tensión del hilo sirve para minimizar su pandeo en el centro debido a la acción cíclica de descargas eléctricas de intensidad variable.

Una deflexión extrema del hilo durante el proceso de electroerosión es consecuencia de la selección inadecuada de la magnitud de la fuerza de compensación en su tensado (ver Fig. 1.42).

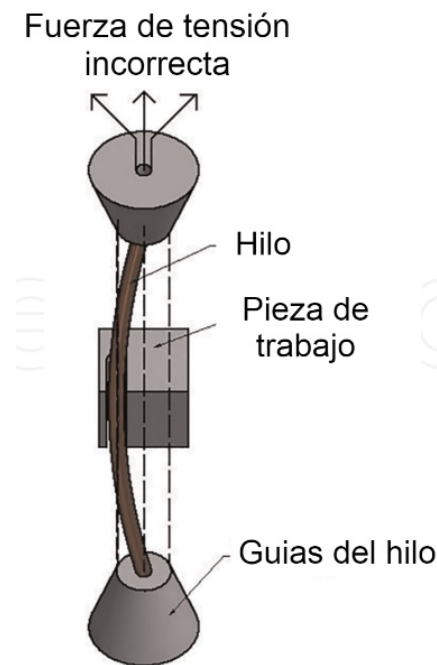


Fig. 1.42. Desviación del hilo [32].

Por regla general, cuanto mayor sea el valor de la fuerza de compensación del hilo al tensarlo, menor será la amplitud de la vibración. Esto también conduce a una reducción del gap, consiguiendo así una mayor precisión de la superficie cortada. Idealmente, el

valor de la fuerza de compensación del hilo se debe elegir de forma que se aproxime al límite de resistencia a la tracción de este. Sin embargo, el valor límite no se debe superar durante el proceso de electroerosión, de lo contrario, el hilo se romperá. Los hilos con una fuerza en el intervalo de 400 – 2,000 N·mm² se utilizan como estándar. Los hilos con una resistencia de hasta 490 N·mm² se denominan blandos, los hilos con una resistencia de entre 490 y 900 N·mm² se denominan semiduros y los hilos con una resistencia superior a 900 N·mm² se denominan duros.

Al aumentar el espesor del material a cortar, es necesario aumentar el valor de la fuerza de tensión F_w del hilo para eliminar las vibraciones. Para esto, según sea el caso, se necesita una mayor magnitud de la fuerza de tracción del material del hilo utilizado o su aumento de diámetro. Sin embargo, valores demasiado altos de la fuerza de tracción del hilo tienen un efecto adverso sobre el rendimiento y la productividad del proceso de electroerosión. Esto se puede observar en la gráfica de la Fig. 1.43.

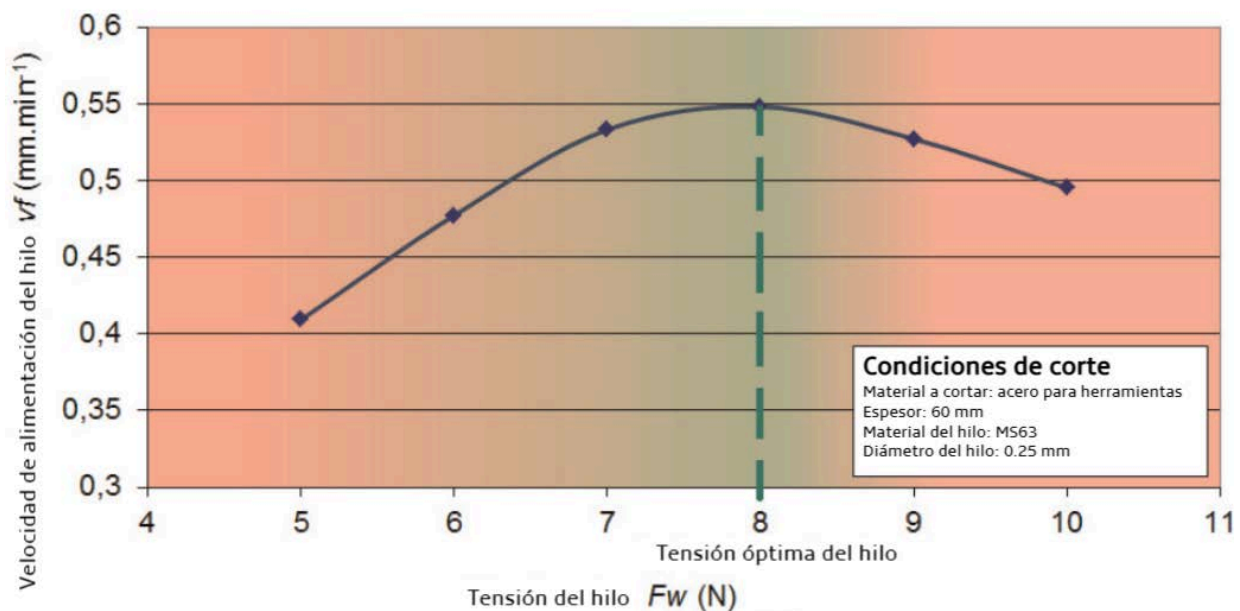


Fig. 1.43. Tensión óptima del hilo [32].

De esta gráfica se desprende que el aumento de la magnitud de la fuerza de compensación F_w al tensar el hilo, en términos de productividad, sólo tiene sentido hasta cierto punto. Cuando se supera, se produce un descenso significativo de la productividad del proceso de electroerosión.

Por lo tanto, de lo anterior se concluye que al aplicar un valor superior a la fuerza de tensión óptima F_w cuando se está tensando el hilo, la productividad del proceso de electroerosión será aún menor. Por otro lado, a medida que aumenta el valor, la amplitud de vibración del hilo se reduce sustancialmente, lo que resulta en una mayor precisión geométrica de la superficie cortada.

En conclusión, es necesario prestar atención a otras posibilidades de aumentar la precisión geométrica de la superficie cortada. Una de las opciones aceptables es aplicar un sistema de control inteligente de los pulsos eléctricos generados durante el proceso de electroerosión.

1.12.7. CONSTRUCCIÓN DE GENERADORES DE PULSOS ELÉCTRICOS

En el pasado, los generadores dependientes se utilizaban a menudo como generadores de pulsos. Su funcionamiento consiste en recargar y descargar repetidamente un condensador. Con este sistema de control, la descarga del condensador se alimenta normalmente de una fuente de voltaje DC que está conectada en paralelo al circuito. La descarga del condensador se produce cuando el voltaje alcanza un valor de ruptura. El valor del voltaje de ruptura depende principalmente de la contaminación del dieléctrico y de la distancia entre electrodos. En consecuencia, el sistema de control ordena al servomotor que mantenga el tamaño necesario del gap basándose en la evaluación de las condiciones de tensión en el punto de descarga. Al cambiar las relaciones de tiempo dentro de cada descarga también cambia su frecuencia y la energía total de descarga. De aquí viene el término "generadores de pulsos dependientes".

Se requiere conectar la pieza de trabajo como ánodo y el hilo como cátodo, este tipo de conexión se utiliza debido a la necesidad de una menor pérdida de material del hilo durante el proceso de electroerosión. Al utilizar una fuente de corriente continua, los iones sólo se mueven en una dirección. Esto proporciona una condición previa adecuada para la formación de corrosión de las partículas erosionadas, que se considera un fenómeno indeseable. Además, una desventaja significativa es el control limitado de la

forma y frecuencia de las descargas, la baja productividad del corte, aunque también un desgaste relativamente alto del hilo. Por lo tanto, estos tipos de generadores de pulsos eléctricos ya no se utilizan en los equipos electroerosivos modernos.

Los generadores controlados por microordenadores son actualmente el tipo de generador de pulsos eléctricos independiente (porque permite variaciones en las amplitudes de los pulsos de descarga eléctrica, su polaridad, frecuencia, etc., independientemente de la situación de la corriente en el gap) más utilizado en las máquinas de electroerosión de última generación. Su principal ventaja es la aplicación de un voltaje eléctrico alterno a la descarga, lo que se traduce en una reducción del gap y la consiguiente reducción del volumen de material extraído. Permiten ajustar una amplia gama de parámetros de descarga eléctrica, variando la gama de frecuencias de las descargas eléctricas de 0.5 a 50 kHz. La principal ventaja de la aplicación práctica de este tipo de generador de pulsos eléctricos es la comprobada reducción de la zona afectada térmicamente del área erosionada. Al mismo tiempo, su aplicación puede reducir significativamente el alcance de los efectos corrosivos que se producen durante el proceso de electroerosión debido a que predomina la conductividad iónica, en la que la pieza se emplea normalmente como cátodo y el hilo como ánodo. Un diagrama del generador de pulsos eléctricos de un equipo de electroerosión controlado por un microordenador se presenta en la Fig. 1.44.

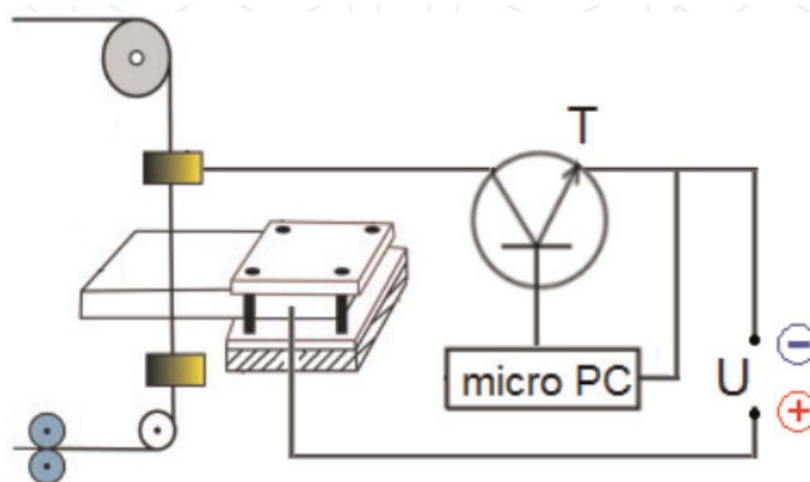


Fig. 1.44. Generador de pulsos controlado por microordenador [32].

1.13. DISEÑO DE PIEZAS EN PROGRAMA CAD/CAM

Las electroerosionadoras por hilo requieren un programa de código G para la geometría a conformar. Este formato es idéntico al del fresado, las diferencias se encuentran en los comandos del código M, ya que la electroerosión por hilo tiene muchos códigos M especiales que son específicos de las operaciones de electroerosión por hilo [33].

El código M es el lenguaje de control de la máquina que controla el programa general denominado código G. Mientras que los comandos G describen posiciones, el código M dirige las acciones de la máquina. Tanto los códigos G como los M tienen usos especializados en la programación de una máquina CNC. Sin los códigos M, se pueden dirigir las herramientas a un punto y ordenarles que se muevan en una línea o arco, aunque no se tendrá ningún éxito dando órdenes más directas, como detener programas, cambiar herramientas, inundar el sistema con refrigerante u otras acciones más allá de los tres movimientos principales que controlan los códigos G. Por eso, los códigos M dirigen operaciones que no son de corte [34].

El método más eficaz para la programación de una electroerosionadora por hilo es utilizar un software específico diseñado para operaciones de electroerosión por hilo, ya que proporcionará muchas herramientas de procesamiento útiles y que ahorran tiempo para el proceso de corte que no se pueden realizar utilizando software diseñado para el fresado.

Durante el proceso de investigación para encontrar un software CAM adecuado para la generación del código G para las piezas a cortar en la electroerosionadora, se encontró el programa llamado CAMWorks. El motivo por el cual se eligió este software es debido a que puede trabajar integrado dentro de la interfaz del software CAD SolidWorks, programa que los integrantes del grupo de Trabajo de Graduación pueden utilizar para la creación de piezas.

A continuación, se hará un resumen para conocer más acerca del software CAMWorks y todo lo que ofrece para el diseño CAM.

1.13.1. CAMWORKS

CAMWorks es un Software CAM para el Maquinado CNC. Integrado en SOLIDWORKS, elimina el tiempo consumido por modificaciones del diseño. Los cambios en el diseño se actualizan automáticamente en las operaciones de fabricación. Elimina horas de programación por interpretación del diseño de piezas mediante el Reconocimiento Automático de Rasgos. Entre los módulos de CAMWORKS se tienen [35]:

- Fresadora 2.5 ejes: El Software para Fresadora CNC 2.5 ejes de CAMWorks, facilita la programación en código G, por lo que está disponible en distintas configuraciones. Incluye ciclos automáticos de desbaste, acabado, fresado de roscas, fresado de caras y ciclos fijos (taladrado, mandrinado, escariado, roscado) en los rasgos prismáticos de la máquina.
- Fresadora 3 ejes: El Software para Fresadora CNC en 3 ejes de CAMWorks se ha desarrollado para conseguir una mayor velocidad, precisión y uso eficaz de la memoria. Las piezas, sencillas o complejas, se pueden mecanizar de forma rápida y precisa con una trayectoria de herramienta de gran calidad. Incluye desbaste automático, acabado, roscado y ciclos de operaciones simples (taladrado, perforado, rimado, conicidades).
- Torno: El Software para Torno CNC de CAMWorks se integra completamente en SolidWorks e incorpora la inteligencia de mecanizado para la automatización, un conjunto de herramientas que automatizan el reconocimiento de rasgos y la generación de trayectorias de herramienta basándose en una base de datos de tecnología definida por el usuario. El reconocimiento de rasgos automático (AFR) analiza la forma de la pieza e intenta definir los rasgos mecanizables más comunes, como el diámetro externo e interno de la pieza, el refrentado y las ranuras.
- Fresa – torno: El Software mecanizado multifuncional de Fresa - Torno en CNC de CAMWorks incluye funciones de fresado y torneado para centros de mecanizado multitarea y permite el mecanizado simultáneo en 5 ejes y el mecanizado en los ejes C, Y y B en ángulos compuestos.

- Mecanizado multiejes: El Software para Mecanizado CNC multiejes de CAMWorks contiene todas las estrategias de 2D y 3D apoyando al maquinado 3 + 2, girando la parte o la cabeza de la herramienta de la máquina a través de una combinación de 4 movimientos del eje.
- Camworks wire edm machining: El Software de Electroerosión por hilo en CNC de CAMWorks se ha diseñado y desarrollado de forma específica para programar máquinas CNC de electroerosión por hilo de 2 a 4 ejes, a diferencia de la mayoría de sistemas CAM, que emplean comandos de fresado modificados en sus módulos de programación de máquinas de electroerosión. Se integra completamente en SolidWorks y ofrece un método más intuitivo, automático y eficaz en la generación de trayectorias de herramienta de mecanizado de electroerosión y de código de máquinas.
 - Las operaciones de corte en 2,5 ejes y 4 ejes automatizan la creación de cortes de desbaste, de repaso y de pestañas.
 - Las opciones se proporcionan para ordenar los cortes al mecanizar piezas con áreas de varias cavidades (matrices).
 - Las distintas opciones de orden de procesamiento permiten al usuario cambiar automáticamente el orden con un único comando.
 - Capacidad para producir únicamente cortes de desbaste, de pestañas o ambos.
 - La salida de código de máquina se puede modificar para otra máquina; para ello sólo es necesario seleccionar una marca y modelo de máquina distintos.
 - Las condiciones de corte de la nueva máquina se cambian de forma automática cuando resulta necesario.
 - Opción de código G para salida de trayectoria de herramienta offset.
 - Soporte de funciones API para scripts de Visual Basic (VBScript).
 - Capacidad para definir variables personalizadas para operaciones y ajustes de máquina de electroerosión que se pueden utilizar en el programa NC.

A continuación, se presenta la interfaz de CAMWorks mientras se simula la trayectoria del hilo durante el corte de una pieza en una electroerosionadora mediante hilo (ver Fig. 1.45).

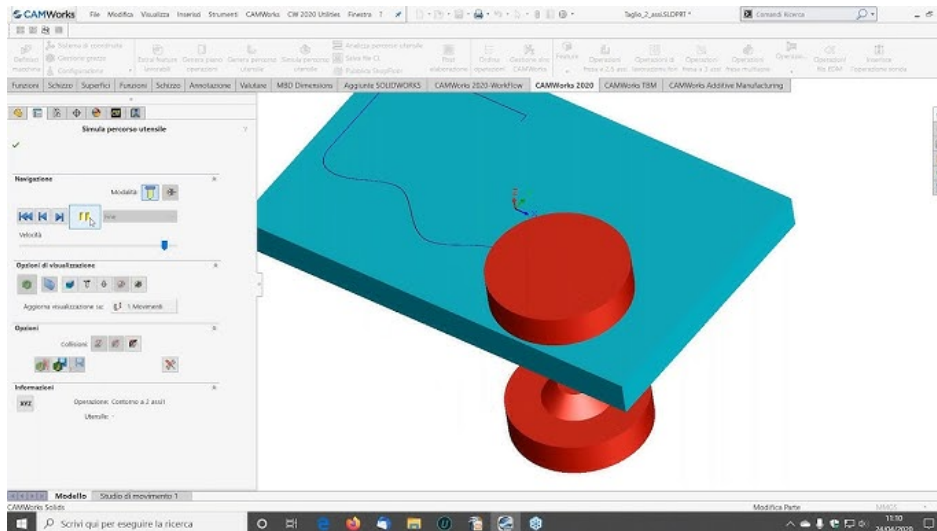


Fig. 1.45. Simulación de WEDM en CAMWorks [35].

1.13.2. GENERACIÓN DE CÓDIGO NC

En el contexto CNC, el término “código NC” se refiere al “Código Numérico” (Numerical Control en inglés), también conocido como código G, que es un lenguaje de programación utilizado para controlar máquinas herramienta, como fresadoras, tornos y centros de mecanizado, mediante instrucciones precisas y secuenciales.

Existen diferentes variantes de códigos NC, como el código G (para movimientos geométricos), el código M (para funciones auxiliares y control de la máquina) y otros códigos específicos para operaciones especiales. Los programas escritos en código NC pueden ser creados manualmente o generados automáticamente mediante software CAM (Computer-Aided Manufacturing) a partir de modelos 3D o dibujos técnicos, lo que facilita la producción de piezas complejas y precisas.

Para generar el código NC de la pieza a cortar en la máquina de corte por electroerosión, primero se debe crear la pieza a cortar en el programa de diseño CAD SolidWorks. Posterior a esto se utiliza el complemento CAMWorks para la generación del código. Destacar que este código únicamente proporciona las coordenadas en los ejes X,Y que la máquina debe seguir, no de la velocidad del movimiento. Este parámetro lo determina el generador de pulsos sobre la base de otros parámetros en tiempo real del proceso de corte.

Los pasos a seguir dentro del programa SolidWorks y el complemento CAMWorks son los siguientes:

- PASO 1: Modelar pieza en SolidWorks o Importar pieza. Se debe abrir el archivo de la pieza que se desea obtener el código NC. En la pantalla, el gestor de diseño del FeatureManager enumera las operaciones, croquis, planos y ejes de la pieza. Las pestañas de la parte inferior o superior sirven para moverse entre los árboles SolidWorks y los árboles CAMWorks. Si las pestañas CAMWorks no están visibles, se puede ampliar el tamaño del árbol. Se debe situar el cursor en la línea que divide el árbol de la zona de gráficos. Cuando el cursor se convierta en una barra, arrastrar a la derecha hasta que aparezcan las pestañas (ver Fig. 1.46).

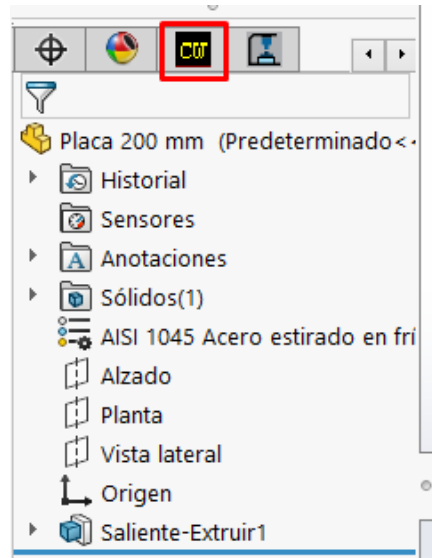


Fig. 1.46. Pestaña CAMWorks.

- PASO 2: Cambio al árbol de rasgos de CAMWorks. Dar clic en la pestaña árbol de rasgos de CAMWorks y este aparecerá. Los árboles de CAMWorks proporcionan una vista esquemática de la información de mecanizado del modelo. Inicialmente, el árbol de operaciones de CAMWorks presenta los elementos Gestor CAMWorks NC, gestor tocho, máquina y papelera. A medida que se siguen los pasos para generar un programa NC, este árbol se expande para incluir configuraciones de pieza y elementos mecanizables. Las pestañas permiten moverse entre los árboles SolidWorks y CAMWorks (ver Fig. 1.47).

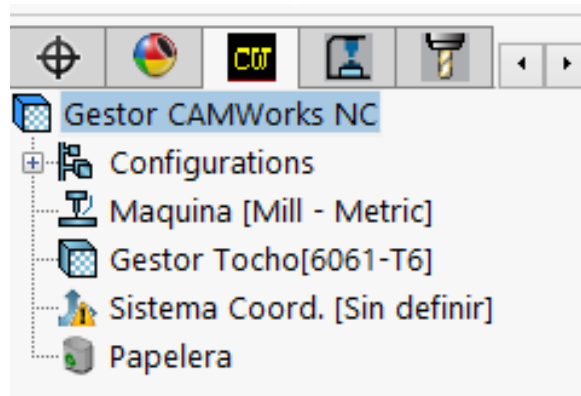


Fig. 1.47. Árbol de rasgos de CAMWorks.

- Gestor tocho: El tocho o materia prima es el material a partir del cual se mecanizará la pieza. Se puede definir el material como un cuadro delimitador rectangular o como un croquis extruido. También se puede especificar el tipo de material.
 - Máquina: Define el tipo de máquina donde se realizará la pieza (fresadora, torno, fresadora-torno o WEDM).
 - Papelera: La papelera de reciclaje del gestor de operaciones de CAMWorks se utiliza para almacenar operaciones mecanizables que no se desean mecanizar.
- PASO 3: Definir la Máquina. El elemento máquina en el árbol identifica el tipo de máquina: fresadora (mill), torno (turn) o EDM de hilo (wire EDM). El tipo de máquina define el conjunto de características mecanizables que pueden ser reconocidas automáticamente y definidas de manera interactiva. Una máquina alternativa puede ser seleccionada en cualquier instante para generar programas de código G diferentes para herramientas de máquina alternativas. Si el tipo de máquina cambia, entonces todas las características y operaciones serán eliminadas. Definir la máquina de la manera siguiente:
- Hacer clic derecho en el elemento “máquina” en el árbol de rasgos de CAMWorks. Se presentará un menú desplegable. Los menús desplegables que aparecen al hacer clic derecho presentan comandos apropiados para el elemento que está resaltado en el árbol.

- Seleccionar "Editar definición" en el menú desplegable. La ventana de diálogo de "Máquina" aparece. El fresado es el tipo de mecanizado predeterminado que se establece cuando CAMWorks se instala por primera vez.
 - En la lista de "máquinas disponibles", seleccionar una de las máquinas disponibles y hacer clic en el botón "Seleccionar".
 - Hacer clic en "Aceptar".
 - Hacer clic derecho en la máquina seleccionada y elegir "editar configuraciones" en el menú desplegable. La ventana de diálogo "configuraciones EDM" se presenta. En la pestaña "Conf. máquina", se identifica la ruta a la Base de Datos de CTC. La base de datos de condiciones de corte establece parámetros específicos de la máquina, como configuraciones de potencia, etc.
 - Hacer clic en la pestaña "Pl. trabajo EDM". Esta pestaña permite configurar el diámetro del hilo, el ángulo de inclinación máximo, etc.
 - Al finalizar de configurar, dar clic en "Aceptar".
- PASO 4: Definir la materia prima. La materia prima es el material a partir del cual se mecanizará la pieza. La materia prima por defecto es el cuadro delimitador más pequeño en el que cabe la pieza. Se puede cambiar la definición de la pieza desplazando el cuadro delimitador o definiendo la pieza a partir de un croquis y una profundidad.
- a) Hacer doble clic en "Gestor tocho". Aparecerá el cuadro de diálogo "Stock Manager".
 - b) Hacer clic en el botón Material.
 - c) En el cuadro de diálogo Selección de material, hacer clic en la flecha hacia abajo para ver los materiales.
 - d) Hacer clic en Aceptar para cerrar el cuadro de diálogo Selección de material.
 - e) Hacer clic en el check para cerrar el cuadro de diálogo "Stock Manager".
- PASO 5: Definir elementos mecanizables. En CAMWorks, el mecanizado sólo se puede realizar en elementos mecanizables. Existen dos métodos para definir los elementos mecanizables:

- Reconocimiento automático de rasgos (AFR). El reconocimiento automático de rasgos analiza la forma de la pieza e intenta definir rasgos mecanizables de matriz (cajera) y de perfil abierto para electroerosión por hilo.
- Elementos creados interactivamente. Si el AFR no reconoce un elemento que se desea mecanizar, se deberá definir el elemento mediante los comandos Insertar elemento EDM de 2,5 ejes e Insertar elemento EDM de 4 ejes. Utilizando el método interactivo, se pueden definir los elementos mecanizables Matrices (Pocket), Punzones (Boss) y Perfiles abiertos. La idea de AFR es analizar la pieza en busca de características que puedan mecanizarse. Este proceso es muy similar a lo que se haría si se tuviera que mecanizar una pieza: examinar, tomar medidas y decidir cómo definir las áreas o características a mecanizar y qué procesos de mecanizado se necesitarían.

CAMWorks no mecaniza directamente las operaciones de SolidWorks. En su lugar, crea una lista independiente de operaciones mecanizables. Esto se debe a que las operaciones de diseño no suelen ser las mismas que las operaciones de fabricación.

Para usar el reconocimiento automático de rasgos (AFR), se deben definir automáticamente los rasgos mecanizables haciendo clic en el botón “Extraer rasgos mecanizables” de la barra de herramientas de CAMWorks o hacer clic con el botón derecho del ratón en NC Manager en el árbol y seleccionar “Extraer rasgos mecanizables” en el menú contextual (ver Fig. 1.48).

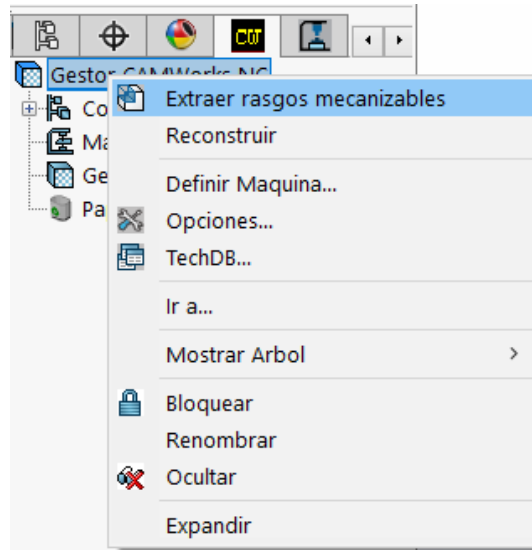


Fig. 1.48. Botón "Extraer rasgos mecanizables".

CAMWorks genera la configuración de la pieza y los elementos mecanizables. Los elementos se presentan en el gestor de elementos de CAMWorks. La Configuración de pieza es el plano de 2 ejes en el que se basará el movimiento de la herramienta. Tiene una posición de origen y vectores de dirección X, Y. La configuración de pieza se crea automáticamente; sin embargo, se puede mover el origen y cambiar la dirección y los ángulos de los ejes X e Y (ver Fig. 1.49).

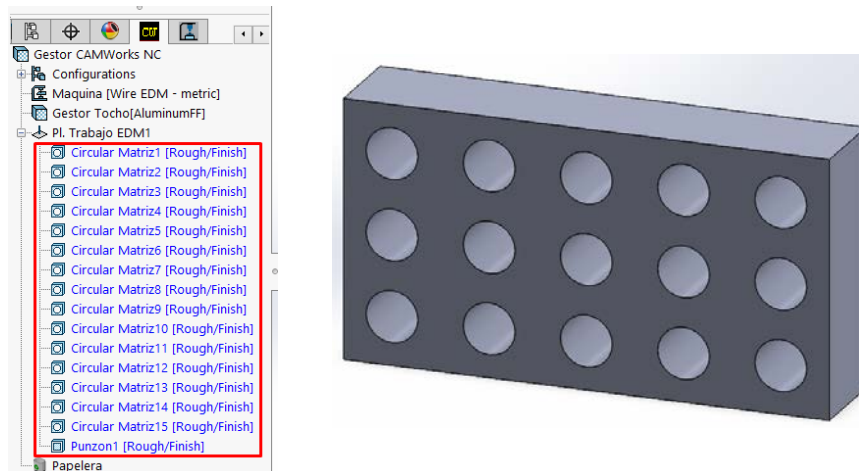


Fig. 1.49. Elementos mecanizables.

Los elementos mecanizables se enumeran en el orden en el que se han reconocido. El Árbol de elementos permite:

- Renombrar, suprimir y eliminar elementos mecanizables.
- Cambiar los parámetros de los elementos mecanizables.
- Establecer el orden por defecto de mecanizado de los elementos.
- Insertar elementos adicionales de EDM de 2,5 y 4 ejes.
- Buscar un elemento por su nombre.
- Ocultar o presentar la visualización de características en la zona de gráficos.
- Generar un plan de operaciones y encontrar la primera operación de un elemento.

➤ PASO 6: Generar Plan de Operación y Ajustar Parámetros de Mecanizado. Un Plan de Operación contiene información sobre cómo se va a mecanizar cada elemento mecanizable y cómo se generará el código NC. Cuando se ejecuta Generar plan de operación, las operaciones para cada elemento mecanizable se crean automáticamente. En algunas situaciones, las operaciones definidas para un elemento pueden no ser suficientes y pueden ser necesarias operaciones adicionales. Se pueden insertar operaciones manualmente utilizando el comando Insertar operación. Este comando se explica en la Ayuda en línea de CAMWorks.

Hacer clic en el botón “Generar plan de operaciones” de la barra de herramientas de CAMWorks o hacer clic con el botón derecho del ratón en Gestor CAMWorks NC. CAMWorks genera el plan de operación para todas las operaciones mecanizables y las operaciones se enumeran en el árbol de operaciones de CAMWorks, que se visualiza automáticamente (ver Fig. 1.50).

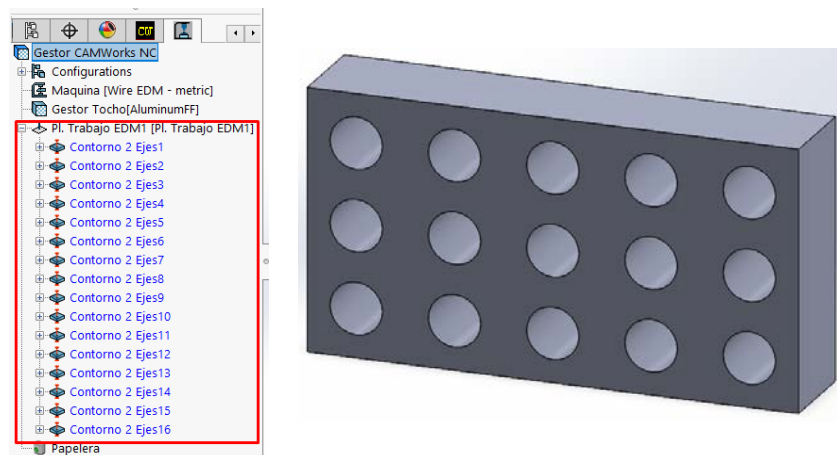


Fig. 1.50. Plan de operaciones para pieza.

El árbol de operaciones de CAMWorks proporciona una vista esquemática de las operaciones para los elementos mecanizables. Inicialmente, las operaciones se enumeran en la Configuración de pieza en el mismo orden que los elementos mecanizables. En la parte superior del árbol se encuentra el Gestor CAMWorks NC, Gestor Tocho y Máquina, al igual que en el árbol de rasgos de CAMWorks. El árbol de operaciones de CAMWorks permite:

- Insertar, renombrar, suprimir y borrar operaciones,
- Arrastrar y soltar operaciones de copia y funciones,
- Cambiar parámetros de operación,
- Cambiar el orden de mecanizado,
- Generar trayectorias de herramienta,
- Simular camino hta.s de herramienta,
- Postprocesar las trayectorias de herramienta, y
- Ocultar o presentar la visualización de las trayectorias de herramienta.

Generar un plan de operaciones para crea una operación de corte por elemento maquinable. Cada operación contiene parámetros de mecanizado que afectan a la creación de la trayectoria de la herramienta y parámetros específicos que se enviarán al programa NC. Estos parámetros se pueden editar antes de postprocesar la pieza.

Para editar los parámetros de la operación utilizando el comando “Editar definición” del menú contextual, hacer clic con el botón derecho del ratón en una operación en el árbol de operaciones y seleccionar “Editar definición” en el menú contextual (ver Fig. 1.51).

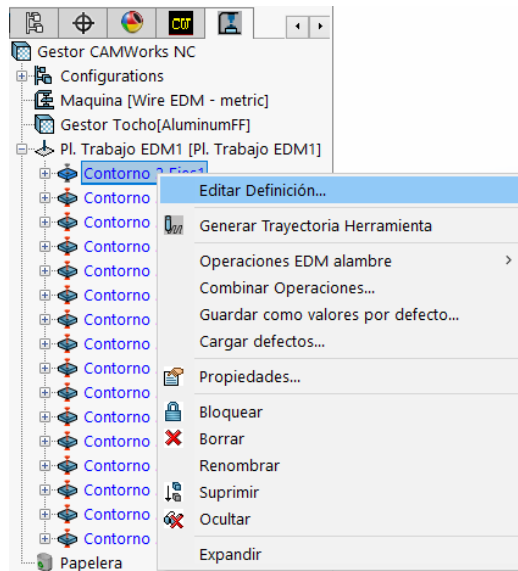


Fig. 1.51. Botón “Editar definición”.

Aparecerá la ventana de diálogo de la operación. Este cuadro de diálogo da acceso a todos los parámetros utilizados para crear la trayectoria de la herramienta (ver Fig. 1.52).

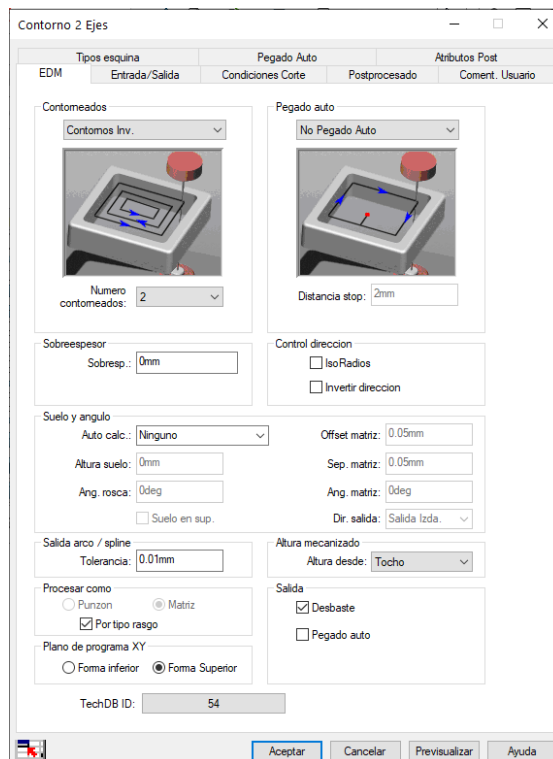


Fig. 1.52. Cuadro de diálogo para configurar operación.

- PASO 7: Generar trayectoria de herramienta. CAMWorks calcula las trayectorias de herramienta utilizando los parámetros de operación y el tamaño y la forma del elemento. Hacer clic en el botón “Generar trayectoria de herramienta” de la barra de herramientas de CAMWorks o hacer clic con el botón derecho del ratón en las operaciones o en Gestor CAMWorks NC del árbol Operación y seleccionar “Generar trayectoria de herramienta” en el menú contextual (ver Fig. 1.53).

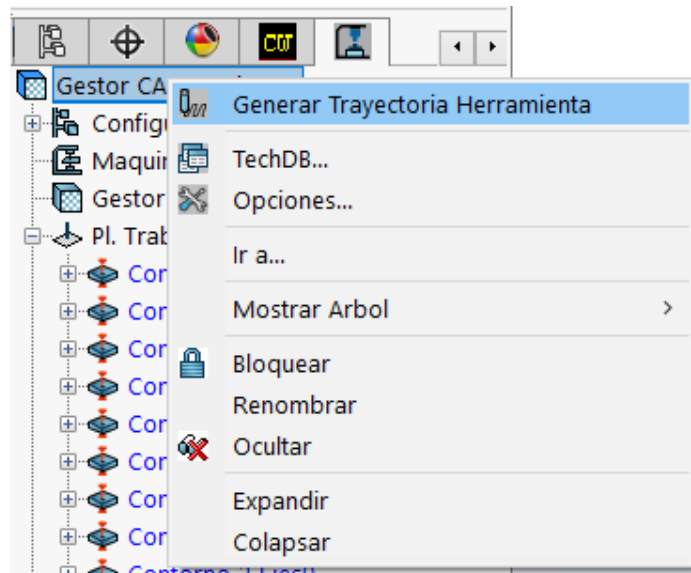


Fig. 1.53. Botón “Generar trayectoria de herramienta”.

CAMWorks calcula las trayectorias de herramienta para cada operación en la Configuración de pieza. También puede generar trayectorias de herramienta para cada operación individualmente haciendo clic con el botón derecho del ratón en una operación y haciendo clic en “Generar trayectoria de herramienta” en el menú contextual. Hacer clic en cualquiera de las operaciones del árbol, las trayectorias de herramienta para esa operación se presentan en la pieza (ver Fig. 1.54).

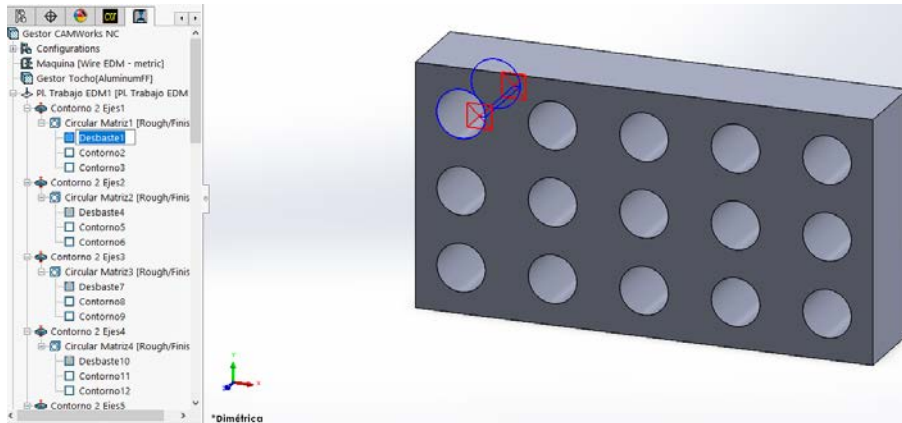


Fig. 1.54. Trayectorias de herramienta.

CAMWorks proporciona la capacidad de simular la trayectoria de la herramienta mostrando el movimiento de la herramienta y la forma resultante de la pieza. Hacer clic en el botón “Simular camino hta.” de la barra de herramientas de CAMWorks o hacer clic con el botón derecho del ratón en el Gestor CAMWorks NC y seleccionar “Simular camino hta” (ver Fig. 1.55).

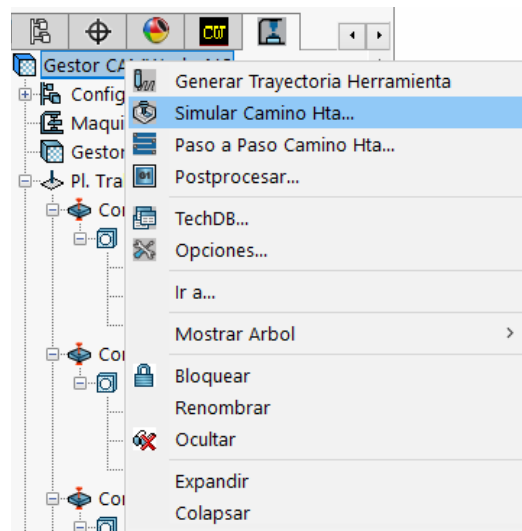


Fig. 1.55. Botón “Simular camino hta.”.

Aparecerá la barra de herramientas “Simular camino hta.”. Los controles de la barra de herramientas permiten:

- Personalizar la visualización del material, la herramienta y el portaherramientas (estructura metálica, translúcido, sombreado o sin visualización).
- Ejecutar la simulación para todas las operaciones o para las seleccionadas.

- Cuando se simula una operación, la simulación puede ser para la operación actual o para todas las operaciones anteriores hasta la operación seleccionada.
- Pausar la simulación y cambiar dinámicamente la orientación de la pieza mediante zoom, panorámica, rotación, etc.
- Controlar la velocidad de simulación arrastrando el control deslizante Control de velocidad de simulación hacia arriba o hacia abajo.

Si se desea simular sólo las trayectorias de herramienta de una operación determinada, hacer clic con el botón derecho en esa operación y, a continuación, seleccionar “Simular camino hta” (ver Fig. 1.56).

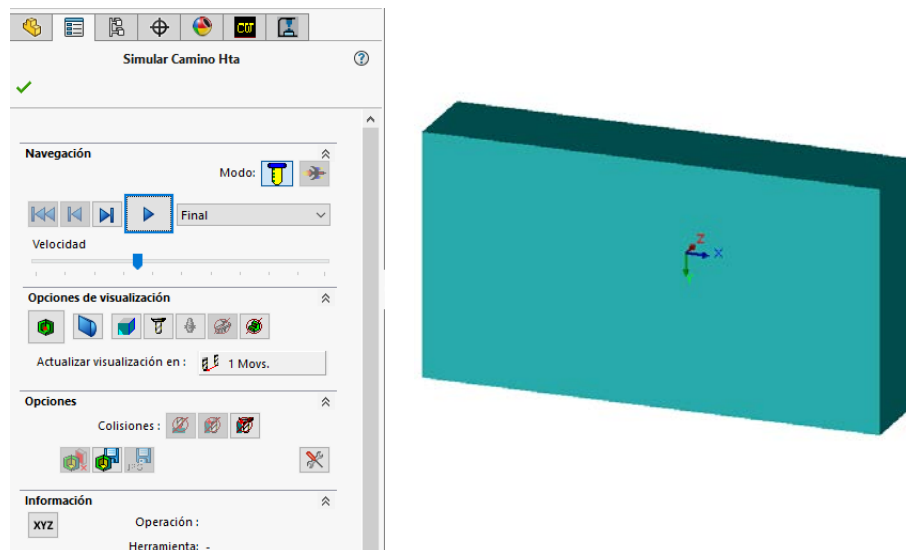


Fig. 1.56. Barra de herramientas “Simular camino hta.”.

Dar clic en el botón “Ejecutar” y la simulación se ejecutará. Hacer clic en el botón check para cerrar la simulación y volver a la pantalla de SolidWorks. CAMWorks también ofrece la posibilidad de recorrer la trayectoria de herramienta mediante el comando Recorrer trayectoria de herramienta.

- PASO 8: Postprocesar las trayectorias de herramienta. El postprocesado es el paso final en la generación del archivo de programa NC. Este paso traduce la información generalizada de la trayectoria de la herramienta y de la operación en código NC para un controlador de máquina herramienta específico. CAMWorks crea código NC para cada trayectoria de herramienta en el orden en que aparece la operación en el árbol

de operaciones y en el orden de proceso especificado en la pestaña postprocesamiento del cuadro de diálogo Configuración de EDM. Cuando se postprocesa una pieza, CAMWorks crea el archivo de programa NC. Se trata de un archivo de texto que se puede leer, editar e imprimir utilizando un procesador de texto o un editor de texto.

Hacer clic en el botón “Postprocesar” de la barra de herramientas de CAMWorks o hacer clic con el botón derecho del ratón en el Gestor CAMWorks NC en el árbol de operaciones y hacer clic en “Postprocesar” en el menú contextual (ver Fig. 1.57).

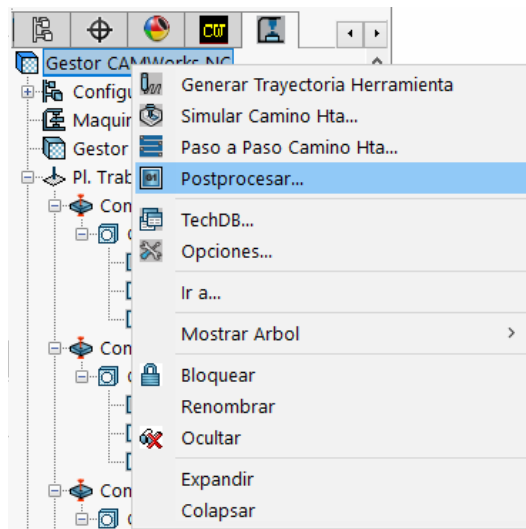


Fig. 1.57. Botón “Postprocesar”.

Aparecerá el cuadro de diálogo Post Output File para que se le pueda asignar un nombre al archivo de programa NC. La carpeta predeterminada es la última carpeta en la que guardó un archivo de código G. Si se desea el archivo en otra ubicación, se puede cambiar la carpeta. Hacer clic en Guardar. La forma más habitual de guardar piezas y programas NC es asignar al archivo de salida posterior el mismo nombre que al archivo de pieza. Ambos archivos pueden tener el mismo nombre porque tienen extensiones diferentes. Aparece el cuadro de diálogo “Postprocesar” (ver Fig. 1.58).

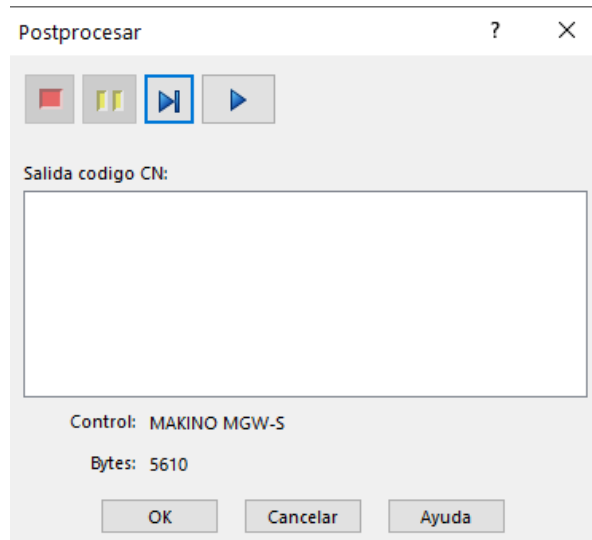


Fig. 1.58. Cuadro de diálogo “Postprocesar”.

Hacer clic en el botón “Ejecutar” de la barra de control de la parte superior. CAMWorks comienza a generar el programa NC y la primera línea de código NC se presenta en el cuadro de vista de salida de código NC. El modo de postprocesado está configurado para postprocesar una línea de código cada vez (modo Paso). Cuando finalice el postprocesado, visualizar el código utilizando la barra de desplazamiento vertical. Hacer clic en Aceptar para cerrar el cuadro de diálogo (ver Fig. 1.59).

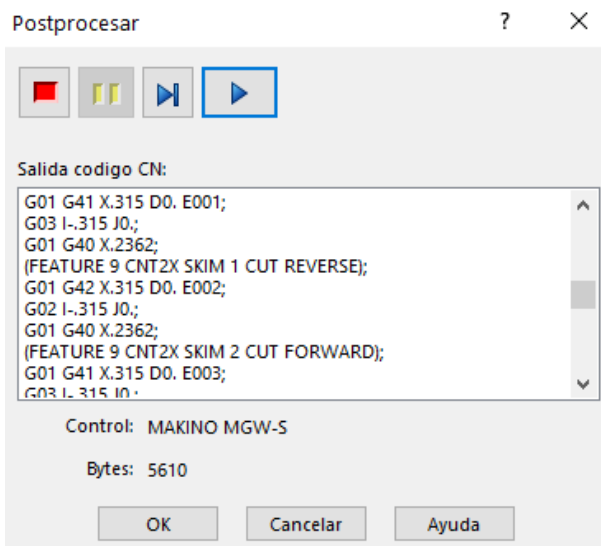


Fig. 1.59. Código NC generado.

1.14. SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES

Como parte del proceso constructivo de la máquina de electroerosión mediante hilo se prevé utilizar métodos de unión mediante pernos de sujeción y también por medio de soldadura eléctrica, en este caso por los materiales con los que se espera conforme la estructura y demás partes estructurales de la máquina. Se considera la soldadura en acero inoxidable y todos los aspectos generales que engloban esta parte del proceso [36].

Los aceros inoxidables se definen como aleaciones a base de hierro que contienen al menos 10.5% de cromo. La fina y densa película de óxido de cromo que se forma en la superficie de un acero inoxidable proporciona resistencia a la corrosión y evita una mayor oxidación. A continuación, se presentan los elementos de aleación y sus efectos en los aceros inoxidables (ver Tabla 1.15).

Tabla 1.15. Efecto de los elementos aleantes en el acero inoxidable [36].

Elemento	Efecto en el acero inoxidable
Cromo	Ofrece resistencia a la corrosión
Níquel	Genera resistencia a la corrosión, aumenta la ductilidad y tenacidad a altas y bajas temperaturas
Molibdeno	Resistencia a carga máxima a altas temperaturas
Silicio	Desoxidante
Titanio, niobio y nitrógeno	Estabilizadores de fase

1.14.1. SOLDABILIDAD Y CLASIFICACIÓN

Se considera que la mayoría de los aceros inoxidables tienen buena soldabilidad y se pueden soldar mediante varios procesos de soldadura, incluidos los procesos de soldadura por arco, soldadura por resistencia, soldadura por haz de electrones y láser, soldadura por fricción y soldadura fuerte (ver Tabla 1.16).

Tabla 1.16. Soldabilidad de aceros inoxidables [36].

Acero Inoxidable	Soldabilidad
Austenítico	Alta
Ferrítico	Media
Martensítico	Baja

A continuación, se describen las características de los tres principales tipos de aceros inoxidables que existen:

- **Aceros Inoxidable Ferríticos:** Contienen entre un 10.5 y un 30% de Cr, hasta un 0.20% de C y en ocasiones promotores de ferrita como: Al, Nb, Ti y Mo. Son ferríticos a todas las temperaturas, no se transforman en austenita y, por lo tanto, no se pueden endurecer por tratamiento térmico. Este grupo incluye los tipos más comunes 405, 409, 430, 442 y 446.

En los aceros ferríticos con un contenido alto de cromo, existe el peligro de la formación de la fase sigma (dura y frágil) cuando se les mantiene durante mucho tiempo a temperaturas cercanas a 470 °C. Por otro lado, los aceros ferríticos son muy propensos al crecimiento del grano (850 - 900 °C), inconveniente para la soldadura.

Si las piezas a soldar son de dimensiones considerables, se recomienda post calentar las piezas entre 700 a 850 °C, seguido de un enfriamiento rápido.

Como los aceros ferríticos se pueden deformar fácilmente en frío, se utilizan mucho para estampados profundos de piezas, como recipientes para industrias químicas y alimenticias, y para adornos arquitectónicos o automotrices.

- **Aceros inoxidable martensíticos:** Contienen de un 11 a un 18% de Cr, hasta un 1.20% de C y pequeñas cantidades de Mn y Ni y, a veces de Mo. En este grupo se incluye los tipos 403, 410, 414, 416, 420, 422, 431 y 440.

Siempre que sea posible se deben emplear como metal de aporte aleaciones austeníticas (ejemplo: E309-E310-E312) con el fin de absorber las tensiones en las zonas cercanas al cordón y así evitar grietas. Cuando se usan electrodos inoxidable martensíticos, es conveniente precalentar entre 300 y 350 °C las piezas que van a ser soldadas. Después de la soldadura y una vez enfriadas las piezas, se recomienda un revenido entre 600 y 700 °C. La resistencia óptima a la corrosión de estos aceros se obtiene efectuando tratamientos térmicos de temple y revenido a las temperaturas

requeridas; sin embargo, esta resistencia a la corrosión no es tan buena como los aceros austeníticos o ferríticos.

Su campo de acción está en piezas que están sometidas a corrosión y que requieren de cierta resistencia mecánica. Se utilizan generalmente en aletas para turbinas, rodets de turbinas hidráulicas, fundiciones resistentes a la corrosión, cuchillería, piezas de válvula, etc.

- Aceros inoxidables austeníticos: Contienen 16-26% Cr, 8-24% Ni + Mn, hasta 0.40% C y pequeñas cantidades de algunos otros elementos como Mo, Ti y Nb (Cb). Estas aleaciones se caracterizan por una buena resistencia y alta tenacidad en un amplio intervalo de temperatura y resistencia a la oxidación por encima de 538 °C (1000 °F). Este grupo incluye los tipos 302, 304, 310, 316, 321 y 347. Su resistencia a la corrosión suele ser mejor que la de los aceros martensíticos o ferríticos.

Debido a que el acero inoxidable se expande un 50% más que el acero al carbono y su conducción de calor es muy inferior, éste tiende a combar o torcer al ser soldado. Para evitar tal inconveniente se debe emplear la corriente de soldadura más baja posible o soldar a mayor velocidad. El uso de un respaldo de cobre ayudará mucho a disipar el calor y evitar las distorsiones.

1.14.2. GASES DE PROTECCIÓN

La función principal del gas de protección es desplazar el aire de la zona de soldadura para evitar la contaminación del baño de fusión. Esta contaminación del baño es originada principalmente por el nitrógeno, oxígeno y agua presentes en la atmósfera. Otras funciones, no menos importantes, del gas de protección y que se deben tener en consideración, siempre que se consideren la calidad de la unión soldada o un cálculo de costos, son las siguientes:

- Influencia en el voltaje y en la energía térmica liberada por el arco a la soldadura.
- Producir reacciones químicas con los elementos del metal base y el metal de aportación.
- Influir en el tipo, tamaño de cordón y penetración.

- Determinar la forma en que pasará el material de aportación a través del arco.

A continuación, se citan y describen los gases a utilizar según el proceso de soldadura que se realizará:

- Gases de protección para soldadura GMAW: El mejor gas protector para soldar acero inoxidable depende con frecuencia de la forma, el color y la química deseados del cordón, y del tipo de transferencia de metal utilizado. Las mezclas de dos partes, argón / oxígeno o argón / dióxido de carbono, proporcionan un buen rendimiento y reducen los costos del gas protector. Las mezclas de tres partes que contienen helio, aunque son más caras, brindan ahorros de costos a través de una mayor productividad (velocidades más altas) y características óptimas del cordón.
- Gases de protección para el proceso GTAW: El argón proporciona un buen inicio y estabilidad del arco, así como un excelente control del charco y una penetración controlada.

1.14.3. RECOMENDACIONES

A continuación, se realiza un resumen de las recomendaciones más importantes a tener en consideración durante el proceso de soldadura de aceros inoxidables y así obtener los mejores resultados, tanto en limpieza como en características mecánicas.

- Asegurar limpieza de metales: La contaminación de la superficie puede crear problemas al soldar aceros inoxidables. Los materiales base deben estar limpios y desengrasados para eliminar cualquier contaminación. Suciedad, grasa, polvo de lijado, pintura, marcadores, lubricantes para el doblado y la humedad contienen compuestos que se disocian por el calor del arco. El carbono y el hidrógeno se pueden liberar de esta manera y ser absorbidos por el charco.

Los cepillos de alambre deben tener cerdas de acero inoxidable, y solo se deben usar ruedas de esmerilado y corte u otros abrasivos reservados para acero inoxidable en cualquier soldadura o metal base. Utilizar un solvente adecuado para eliminar la grasa y el aceite del metal base y limpiarse con un trapo limpio hasta que no queden rastros de suciedad.

- Minimizar la entrega de calor: Al soldar acero inoxidable, es fundamental controlar la entrada de calor. Los altos aportes de calor pueden causar grietas, distorsión, pérdida de fuerza y pérdida de resistencia a la corrosión. Debido al alto contenido de aleación del acero inoxidable, la conductividad térmica del material es aproximadamente un 20-30% menor que la de los aceros al carbono y la tasa de expansión cuando se calienta es de tres a cuatro veces mayor que la del acero al carbón.
- Usar metal de aportación adecuado: Los aportes se seleccionan en función de la química de los materiales a unir, los medios corrosivos a los que estarán expuestos y la microestructura requerida en el depósito final. Para los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos, los consumibles seleccionados generalmente tienen una composición casi idéntica a la del material base. La selección de aleaciones austeníticas no es tan sencilla, ya que la microestructura de este varía según las aleaciones involucradas. Para asegurar un metal de soldadura fuerte y resistente, se debe mantener un equilibrio entre el material austenítico predominante y el componente microestructural ferrítico
- Llenar el cráter al finalizar la soldadura: Una buena práctica de soldadura es pasar una fracción de segundo adicional en el cráter de soldadura para asegurarse de que se llene correctamente. Las tensiones de contracción que ocurren cuando el metal de soldadura se solidifica pueden producir tensiones lo suficientemente grandes como para separar el metal en el cráter mientras se enfría. Estas grietas a veces no son visibles a simple vista. El llenado del cráter proporciona suficiente metal para resistir estas tensiones, mientras que el aumento de calor también ayuda a reducir la velocidad de enfriamiento de la soldadura para reducir cualquier tensión producida.
- Evitar el sobrecalentamiento del material base: La sensibilización es la formación de carburos de cromo en la ZAT, el área directamente adyacente a la soldadura. La ZAT se ha calentado justo por debajo de su temperatura de fusión seguida de un enfriamiento rápido.

Los átomos de carbono ocupan los pequeños espacios entre los átomos metálicos llamados espacios intersticiales. En el intervalo de temperatura de 427 - 815 °C, los átomos de carbono se mueven realmente a través de la matriz metálica y se combinan con los átomos de cromo para formar carburo de cromo (Cr_{23}C_6). Cuando

ocurre la precipitación de carburo, algo de cromo se retiene como carburos (bajando el nivel a <10.5%) y se reduce la resistencia a la corrosión del material. Esta pérdida de resistencia a la corrosión ocurre típicamente en la ZAT. Cuando se pone en servicio una soldadura sensibilizada, la corrosión ocurrirá justo al lado de la ZAT de la soldadura y, a menudo, penetra a través del metal base.

Las soldaduras de acero inoxidable sensibilizadas se denominan a veces “metal de soldadura con salpicado” ya que el precipitado es de color oscuro y está muy oxidado. Los tres métodos más comunes disponibles para evitar la sensibilización son:

Utilizar un tratamiento térmico posterior a la soldadura: Implica calentar toda la soldadura a aproximadamente 1,038 °C, lo que permite que los carburos vuelvan a disolverse en la matriz. A continuación, la soldadura se enfría muy rápidamente para permitir por muy poco tiempo que se produzca otra reacción de precipitación. Esta técnica tiene problemas porque a 1,038 °C, los aceros inoxidables se oxidan rápidamente y, por lo tanto, se deben calentar en una atmósfera inerte para evitar la formación de óxidos. Otro problema es que a veces es muy difícil enfriar una pieza soldada grande muy rápidamente para evitar la precipitación de carburo. Debido a estos problemas, esta técnica no se usa con mucha frecuencia.

Utilizar materiales con bajo contenido de carbono: Al reducir el nivel de carbono en el material, se produce un material bajo en carbono o de grado “L”. Los ejemplos típicos son 304L, 308 ELC y 316L. Si el carbono disponible es limitado, el problema de sensibilización es limitado.

Utilizar grados estabilizados de materiales y aportes: Los grados estabilizados de aceros inoxidables contienen titanio y niobio (columbio). Estos elementos tienen una mayor afinidad por el carbono que el cromo. Esto significa que, si se produce precipitación, el carbono se combinará preferentemente con estos elementos para que el cromo libre en la matriz no se reduzca.

1.14.4. SELECCIÓN DE PROCESO

La información a continuación permite una revisión rápida de las principales características de los procedimientos de soldadura de aceros inoxidable más empleados (ver Tabla 1.17).

Considerando esta información, en el capítulo dos del presente Trabajo de Graduación se analizará y tomará la decisión de cual proceso de soldadura aplicar, así como cual material de aporte utilizar y todas las consideraciones necesarias sobre la base de los requerimientos de diseño, material a utilizar para la conformación de la estructura de la máquina, etc. También será importante analizar la soldadura desde la perspectiva del análisis de esfuerzo, es decir, se deberá analizar y calcular la profundidad de la garganta de la soldadura; sea de filete, de cordón u otro tipo.

Tabla 1.17. Características de procesos de soldadura [36].

Proceso de Soldadura	Características
Electrodo Revestido (SMAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso más adecuado para soldar en el exterior, cuando no se tiene limpieza alguna en el metal o en reparaciones. Con electrodos básicos, se pueden obtener soldaduras de calidad, con buenas propiedades mecánicas y bajo nivel de poros. • La limpieza de escorias y el bajo tiempo de arco, hace que el costo sea elevado.
TIG (GTAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario un buen adiestramiento del soldador para obtener la calidad que puede dar el proceso. Permite obtener la calidad más elevada, con buena penetración, bajo nivel de poros y con muy bajo trabajo de terminado. • Proceso más empleado en la soldadura de calidad de tubería. Con TIG pulsado, se mejora el control de aporte de calor para espesores delgados, obteniéndose menos deformaciones. Se pueden conseguir incrementos de velocidad en la soldadura de aceros austeníticos empleando mezclas de Ar-H₂.
Soldadura Plasma (PAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando un proceso TIG se automatiza, en un número elevado de casos se convierte a soldadura plasma. La penetración del arco es más estrecha y profunda, mientras que para el arco TIG es más ancha y de menos profundidad. • Las uniones para soldadura plasma deben ser de mayor calidad, con tolerancias más estrechas que con proceso TIG. El procedimiento plasma permite la posibilidad de soldar a velocidades más elevadas que con el procedimiento TIG. Además, se evitaría la obtención de inclusiones como en el baño del electrodo de tungsteno.
MIG/ Metalcored (GMAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil aprendizaje. Elevadas velocidades de soldadura y de posición, aunque inferiores al arco sumergido. Aunque con peor calidad que con TIG, permite unir espesores delgados con transferencia de arco pulsado. • Es posible obtener soldaduras con bajo contenido en escorias, con el gas de protección adecuado. • En la soldadura del acero inoxidable, se deben evitar las salpicaduras por ser puntos potenciales de corrosión, para ello se debe emplear el arco pulsado preferiblemente o el arco spray en espesores gruesos.
Flux Cored (FCAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil aprendizaje. Se logra una mayor velocidad de deposición con alambre tubular que con alambre sólido, por lo tanto, se puede obtener una mayor productividad. • En el costo se tiene que tener en consideración el tiempo para la eliminación de la escoria y la inferior eficiencia del alambre tubular en comparación a la de los alambres sólidos. • La manipulación y el almacenamiento (humedad) de un alambre tubular siempre es más crítico que el de uno sólido. Además, se genera un mayor volumen de humos cuando se compara con el proceso GMAW.

2. DISEÑO MECÁNICO E HIDRÁULICO DE ELECTROEROSIONADORA

Después de analizar la teoría involucrada en los diversos sistemas que conforman a la máquina de corte por electroerosión mediante hilo, en el presente capítulo se presentará el proceso de diseño y selección de las piezas y mecanismos que en conjunto formarán el sistema mecánico e hidráulico de la máquina. El diseño del sistema eléctrico se presentará en el Capítulo 3. Se presenta el diseño propuesto para la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo en la Fig. 2.1.

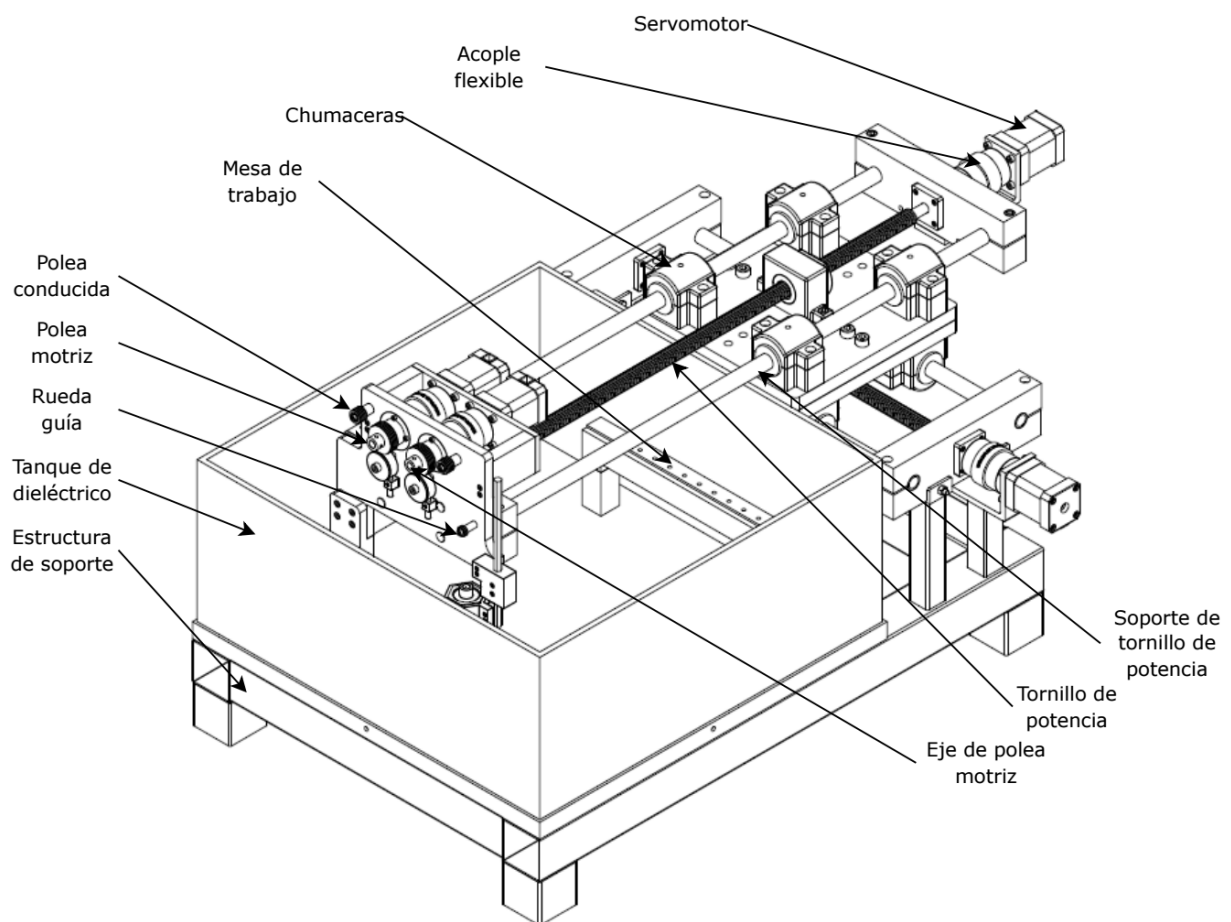


Fig. 2.1. Máquina electroerosionadora propuesta.

2.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE HILADO

El sistema de hilado de la máquina de corte por electroerosión, es uno de los principales a diseñar por su gran importancia, ya que el hilo es el encargado de transmitir la energía eléctrica para poder cortar la pieza metálica. A continuación, se explica a detalle el proceso de diseño.

2.1.1. SELECCIÓN DEL TIPO DE HILO

En base a los criterios expuestos en el Capítulo 1.4 acerca de los hilos para electroerosión, el material seleccionado para el hilo que realizará el corte del acero SAE 1045 es el latón, debido a que este es ampliamente utilizado debido a su disponibilidad y a su buena conductividad eléctrica y térmica. Es totalmente efectivo para maquinar una amplia gama de materiales, incluido el anteriormente citado. Sin embargo, el hilo de latón se puede desgastar más rápidamente en comparación con otros tipos de hilos, especialmente al cortar materiales duros, aunque debido a su precio competitivo se vuelve la opción más viable.

Es importante determinar las especificaciones del hilo, como el diámetro y la resistencia. El diámetro se elige en función del espesor de las piezas a cortar y las tolerancias requeridas. La resistencia del hilo debe ser suficiente para tolerar el proceso de corte y la tensión aplicada sin fallar. Las especificaciones del hilo de latón, según el fabricante, se presentan en la Tabla 2.1 [37].

Tabla 2.1. Especificaciones del hilo de latón [37].

Características	Hilo latón 900 N	Hilo latón 500 N
Alma	CuZn37	CuZn37
Resistencia a la tracción	900 MPa	500 MPa
Estiramiento	1.5%	20%
Conductividad	22% IACS	25 IACS

Un punto muy importante es el diámetro del hilo, para lo cual el fabricante ofrece de 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 y 0.30 mm. Así, se selecciona un diámetro de 0.25 mm ya que comúnmente el diámetro del hilo para cortes de desbaste es ~0.30 mm y para cortes de acabado es ~0.20 mm, además tomando en consideración que el espesor del material que se espera maquinar es de 6.35 mm. Como último punto, la resistencia del hilo se selecciona de 900 MPa según el fabricante [38].

Sobre la base de las anteriores condiciones se continúa el proceso de diseño y selección. En la Tabla 2.2 se presenta un resumen de los datos citados.

Tabla 2.2. Resumen de los datos resultantes de la selección del hilo.

Diámetro del hilo, mm	0.25
Resistencia a la tracción, MPa	900
Espesor de material, mm	6.35
Material del hilo	Latón

2.1.2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL HILO

A continuación, se explicará el diseño de las partes más importantes que componen al sistema de alimentación de hilo de la máquina de corte por electroerosión:

a) Polea motriz y conducida

Sobre la base de los criterios a considerar para el diseño de las poleas motriz y conductora citados en el Capítulo 1.4.3. “Sistema de alimentación del hilo”, se tiene un diseño acorde al hilo seleccionado de diámetro 0.25 mm para obtener un buen ajuste, así también una profundidad de 0.30 mm para que el hilo no se pueda salir o deslizar, y aproveche la fricción de todo el canal, con un material de acero SAE 1045 CD para aprovechar sus propiedades físicas. Así, ambas poleas se han diseñado con cinco canales. En la Fig. 2.2 se presenta la polea motriz, mientras la polea conducida se presenta en la Fig. 2.3.



Fig. 2.2. Polea motriz.



Fig. 2.3. Polea conducida.

b) Ruedas guías

En el cabezal del sistema de hilo se necesitan ruedas guías para el hilo, cuya función será darle continuidad, tensión y guía al hilo. Estas ruedas guías son rodamientos rígidos de bolas con la adición de un canal en el centro. El rodamiento seleccionado tiene una designación 623, un diámetro interno de 3 mm, diámetro externo de 10 mm, un espesor de 4 mm, una capacidad de carga dinámica y estática de 488 N y 170 N, respectivamente; así también una masa de 0.0015 kg. La rueda guía se presenta en la Fig. 2.4 [39].

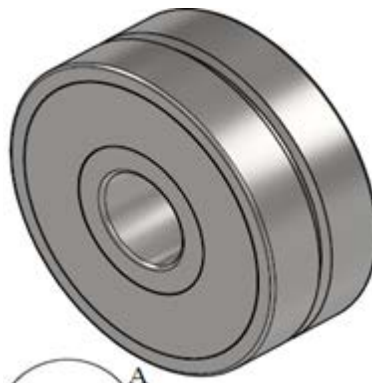


Fig. 2.4. Rueda guía.

El diámetro externo se ha considerado de esta forma debido a que la función principal de las ruedas guías es el tensado y guía del hilo, por lo que no se requiere un diseño robusto para la aplicación. Además, el rodamiento debe tener el ancho suficiente para poder construir el canal, así como la pista externa debe tener el espesor más grande que la profundidad del canal. Además, se debe tener en consideración que la empresa

SKF con respecto a los rodamientos, indica que generalmente la dureza de los elementos rodantes y de los aros está comprendida entre 58 y 65 HRC, así como una temperatura de trabajo de más de 125 °C.

c) Sistema de tensión del hilo

Para mantener la tensión adecuada en el hilo, se requiere un sistema para tal fin. La tensión del hilo debe ser suficiente para evitar el estiramiento excesivo o la rotura del hilo durante el corte. El sistema de tensión de hilo se compone de poleas acanaladas, ruedas guías y distancias entre éstas, lo suficiente para generar una tensión aceptable. Siendo el sistema diseñado de la forma de distribución de las poleas y las ruedas guías tal como se presenta en la Fig. 2.5.

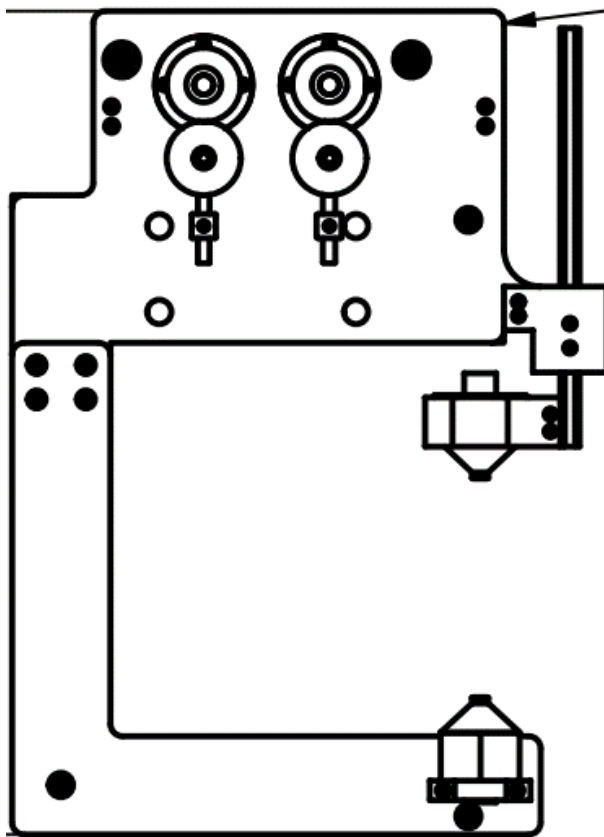


Fig. 2.5. Sistema de tensión de hilo.

d) Tasa de arranque de material

Según las dimensiones de las probetas planas para ensayos de tracción dadas por la norma ASTM E8, y tomando en consideración que el material de la pieza de trabajo

es un acero SAE 1045. La pieza en bruto debe ser rectangular de 240 mm de largo, 60 mm de ancho y 6.35 mm de espesor, con el propósito de que se pueda sujetar en la mesa de trabajo, por lo que ésta inicialmente tiene una masa de 0.718 kg. Así, la pieza finalizada tendrá una masa de 0.164 kg. Con respecto al tiempo de maquinado se asumirá 1 h de trabajo y la densidad de la pieza es igual a 7850 kg/m³. Sustituyendo estos datos en la Ec. 1.4, queda:

$$\text{MRR} = \frac{0.718 \text{ kg} - 0.164 \text{ kg}}{(3600 \text{ s}) \left(7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} = 1.96 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

e) Velocidad del hilo

El diámetro del hilo a utilizar es de 0.25 mm, siendo el radio de 0.125 mm. El espesor del material es de 6.35 mm. La distancia entre el hilo y la pieza de trabajo suele oscilar entre 0.025 a 0.075 mm, por lo que se considera un valor promedio de 0.05 mm. Sustituyendo estos valores en la Ec. 1.5 [40], se obtiene:

$$V = \frac{\left(1.96 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \left(\frac{1 \text{ mm}^3}{1^{-9} \text{ m}^3}\right)}{2(0.125 \text{ mm} + 0.05 \text{ mm})(6.35 \text{ mm})} = 8.82 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

La velocidad del hilo resulta de 8.82 mm/s, lo cual es equivalente a 0.53 m/min. Este es un valor que está en el intervalo citado en algunas bibliografías.

f) Potencia de trabajo en poleas motrices

Como primer punto de partida, se obtiene la fuerza del lado de mayor tensión del hilo, aunque cabe destacar que esta fuerza depende del efecto de tracción que tiene sobre la superficie transversal del hilo. Sustituyendo en la Ec. 1.6, se obtiene:

$$F_{\text{tracción}} = \left(900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right) \left(\frac{\pi}{4}\right) (0.25 \text{ mm})^2 = F_1 = 44.2 \text{ N}$$

La fuerza de tracción o la fuerza en el lado tenso del hilo, es de 44.2 N (9.94 lb).
Calculando la fuerza centrífuga F_c , mediante la Ec. 1.8:

$$F_c = (0.561) \left[\frac{\left(9 \frac{\text{m}}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ pie}}{0.3048 \text{ m}}\right)}{1000} \right]^2 = 0.01656 \text{ lb}$$

A continuación, se calcula la fuerza en el lado flojo del hilo de corte por medio de la Ec. 1.7:

$$\frac{(9.94 \text{ lb}) - (0.01656 \text{ lb})}{F_2 - (0.01656 \text{ lb})} = e^{0.5123(\pi)}$$

$$F_2 = 2.51 \text{ lb}$$

Y la potencia mecánica nominal que tiene la polea acanalada que guiará al hilo se calcula mediante la Ec. 1.9:

$$\text{Potencia}_{\text{nom}} = \frac{[(9.94 \text{ lb}) - (2.51 \text{ lb})] \left(9 \frac{\text{m}}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ pie}}{0.3048 \text{ m}}\right)}{33000} = 6.65 \times 10^{-3} \text{ hp}$$

La potencia resulta de 6.65×10^{-3} hp (5 W). Ahora se calculará la velocidad de giro de la polea motriz, tomando en consideración que la velocidad del hilo es de 9 m/min y un diámetro de polea de 30 mm, por lo que al sustituir estos datos en la Ec. 1.10:

$$\left(9 \frac{\text{m}}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ pie}}{0.3048 \text{ m}}\right) = \frac{\pi(30 \text{ mm}) \left(\frac{1 \text{ pulg}}{25.4 \text{ mm}}\right) n}{12}$$

$$n = 95.5 \text{ rpm}$$

Ahora se procede a calcular el par de torsión generado en la polea motriz, mediante la Ec. 1.11:

$$T = \frac{(63000)(6.65 \times 10^{-3} \text{ hp})}{(95.5 \text{ rpm})} = 4.39 \text{ lb}\cdot\text{pulg}$$

El par de torsión en la polea motriz resulta de 0.496 N·m (4.39 lb·pulg). Este dato será muy importante para poder seleccionar el servomotor adecuado.

g) Selección de servomotores

La selección de los servomotores se realiza con tres variables imprescindibles: potencia nominal, par de torsión y velocidad de giro, siendo estos 5 W, 0.496 N·m y 95.5 rpm, respectivamente. La marca KOLLMORGEN ofrece diversidad de estos elementos, en su catálogo se presenta el modelo AKM2 2C. Sus características se presentan en la Tabla 2.3 [41]:

Tabla 2.3. Características de servomotor KOLLMORGEN AKM2 2C [41].

Motor modelo	AKM2 2C
Potencia nominal de salida, W	90
Par nominal, N·m	0.84
Par máximo, N·m	2.39
Corriente nominal, A	1.39
Corriente pico, A	5.6
Velocidad nominal, rpm	1000
Inercia, kg·cm ²	0.161
Peso, kg	1.1

En el catálogo también se presenta la geometría, haciendo énfasis en el diámetro del eje de 8 mm y el cuñero de 3x3 mm, debido a que son parámetros que influyen en la selección de un acople flexible.

h) Selección de acople flexible

Para la selección de acople flexible se considera como base a los acoples tipos WRAPFLEX, de la empresa REXNORD. El servomotor tiene aproximadamente 90 W o 0.12 hp y una velocidad de giro nominal de 1,000 rpm. Sin embargo, el primer paso que

es la obtención del factor de servicio se imposibilita debido a que no existe uno específico para un sistema de hilo de una máquina de corte por electroerosión, por lo que se debe calcular [42].

El primer punto para destacar son los diámetros de los ejes, donde el diámetro del eje de la polea motriz es de 8 mm, y con el servomotor, se visualiza que tiene un diámetro de 8 mm y un cuñero de 3x3 mm, es decir, se debe considerar en consideración los 9.5 mm más la mitad de la medida de la cuña para considerar el máximo agujero a perforar en las masas del acople. Por lo que, los acoples WRAPFLEX tipo R10, teniendo en consideración el 2R, 3R y 4R, tienen un torque de 100, 300 y 500 lb-pulg, respectivamente. Además, adicionando que el máximo agujero a perforar para cada uno es de 0.875, 1.125 y 1.375 pulg. Se calcula el torque de la aplicación:

$$\text{Torque de aplicación} = \frac{(0.12 \text{ hp})(63,000)}{1,000 \text{ rpm}} = 7.6 \text{ lb-pulg}$$

A continuación, el factor de servicio del acople flexible se calculará por medio de la Ec. 2.1:

$$F_s = \frac{\text{Torque de acople}}{\text{Torque de aplicación}} \quad (2.1)$$

Por lo tanto, para el acople 2R, 3R y 4R, resulta un factor de servicio de 13.15, 39.47 y 65.79, respectivamente. Se considerará un factor de servicio de 13.15. Ahora se calculará la potencia equivalente mediante la Ec. 1.38:

$$\text{Pot}_{eq} = (0.12 \text{ hp})(13.15) = 1.578 \text{ hp}$$

En la tabla 3 del catálogo “FALK Wrapflex Coupling Quick Selection Chart”, se busca la velocidad nominal del servomotor, calculada previamente y resultando en 1000 rpm, y se presenta que el acople 2R cumple, aunque queda muy justo, debido a que tiene una potencia equivalente de 1.59 hp, por lo que se selecciona el acople flexible inmediato superior, el cual es el acople 3R, el cual tiene una potencia equivalente de 4.76 hp, un

par de torsión de 300 lb·pulg, un máximo agujero a perforar de 1.125 pulg y una velocidad máxima de aplicación de 4500 rpm [42].

i) Diseño de eje de polea motriz

Dado a que no se requiere dimensionar un eje de grandes proporciones, se asume un eje de diámetro de 8 mm y 56 mm de largo. Por lo que, se busca que tenga un factor de seguridad mayor que la unidad, proponiendo materiales de construcción como los aceros SAE 1020 CD y SAE 1045 CD. Por lo tanto, se calculan las fuerzas o cargas generadas por las poleas motrices. Como primer punto de partida, se presenta la forma en que está instalado el eje incluyendo los rodamientos en la Fig. 2.6.

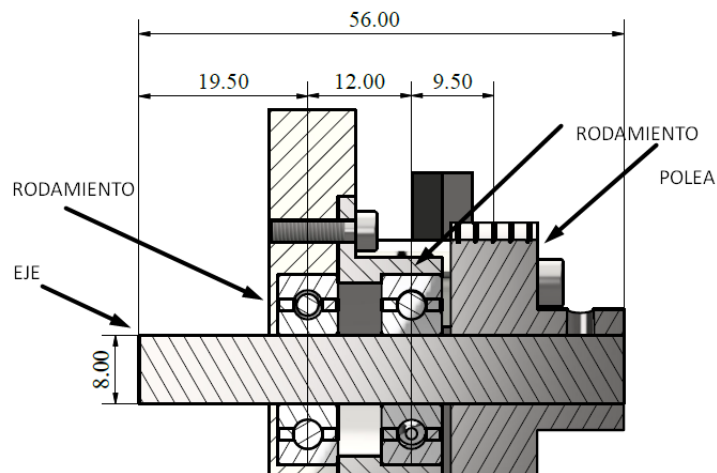


Fig. 2.6. Geometría del eje de la polea motriz. Cotas en mm.

A continuación, se presenta una forma simplificada de la situación durante la operación (ver Fig. 2.7).

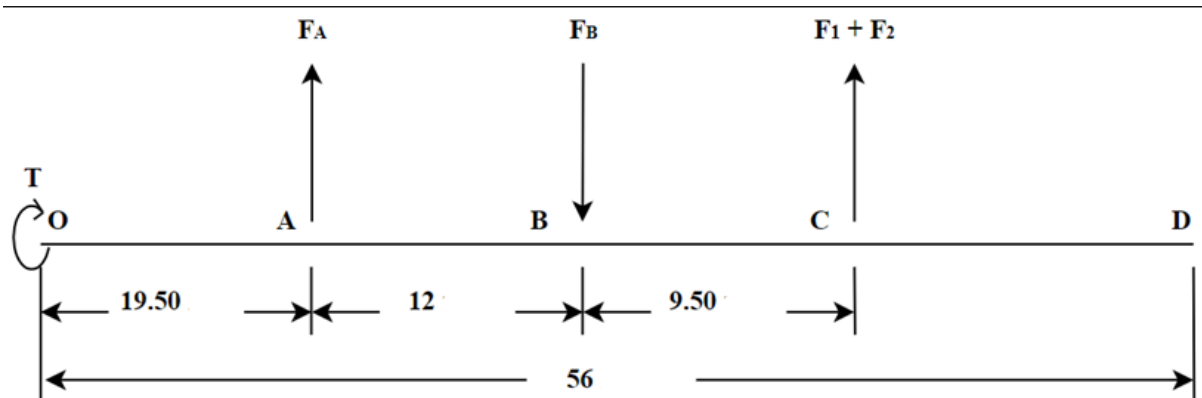


Fig. 2.7. Reacciones y cargas del eje de la polea motriz. Cotas en mm.

Se calculan las fuerzas en el punto A y el punto B, como primer paso, se hace sumatoria de momentos en el punto A para encontrar la fuerza F_B :

$$\sum M_A = 0$$

$$(F_1 + F_2)(12 \text{ mm} + 9.50 \text{ mm}) - F_B(12 \text{ mm}) = 0$$

$$F_B = \frac{[(9.94 \text{ lb}) + (2.51 \text{ lb})](12 \text{ mm} + 9.50 \text{ mm})}{(12 \text{ mm})}$$

$$F_B = 22.30 \text{ lb}$$

Luego se calcula la fuerza en el punto A, por medio de sumatoria de fuerzas. Por lo tanto:

$$\sum F_y = 0$$

$$(F_1 + F_2) - F_B + F_A = 0$$

$$[(9.94 \text{ lb}) + (2.51 \text{ lb})] - (22.30 \text{ lb}) + F_A = 0$$

$$F_A = 9.85 \text{ lb}$$

Con las reacciones calculadas, se procede a dibujar el diagrama de fuerza cortante que se presenta en la Fig. 2.8, el diagrama de momento flector se presenta en la Fig. 2.9, y el diagrama de torsión en la Fig. 2.10.

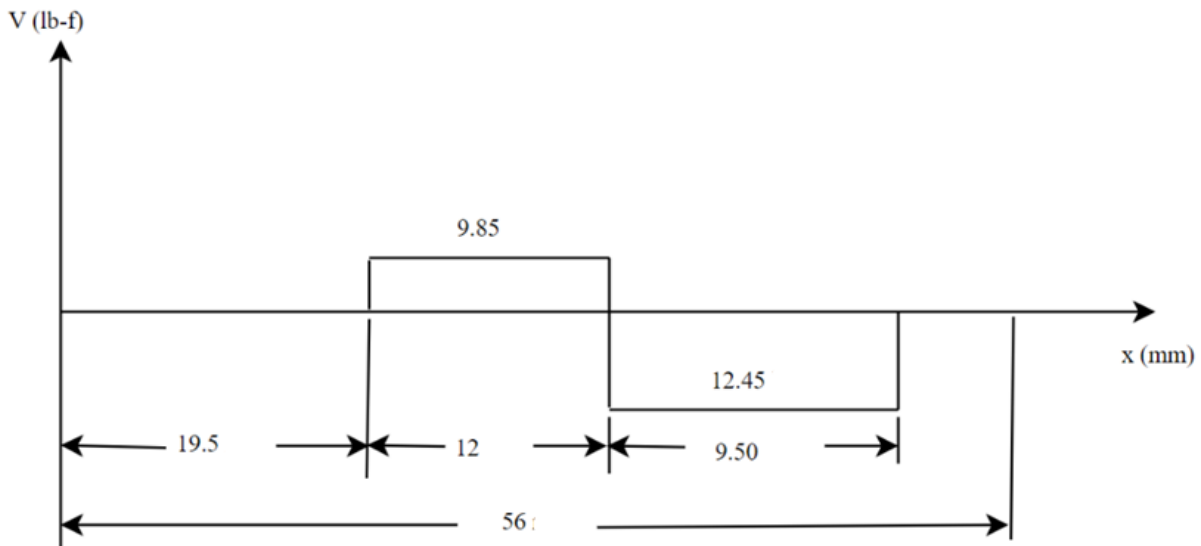


Fig. 2.8. Diagrama de fuerza cortante en eje de polea motriz. Cotas en mm.

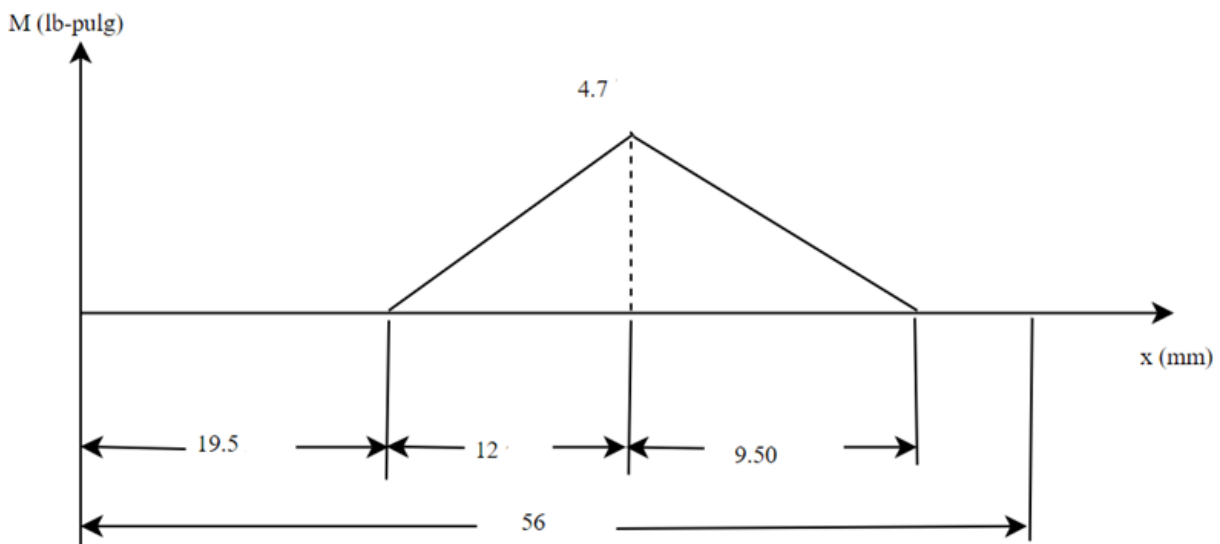


Fig. 2.9. Diagrama de momento flector en eje de polea motriz. Cotas en mm.

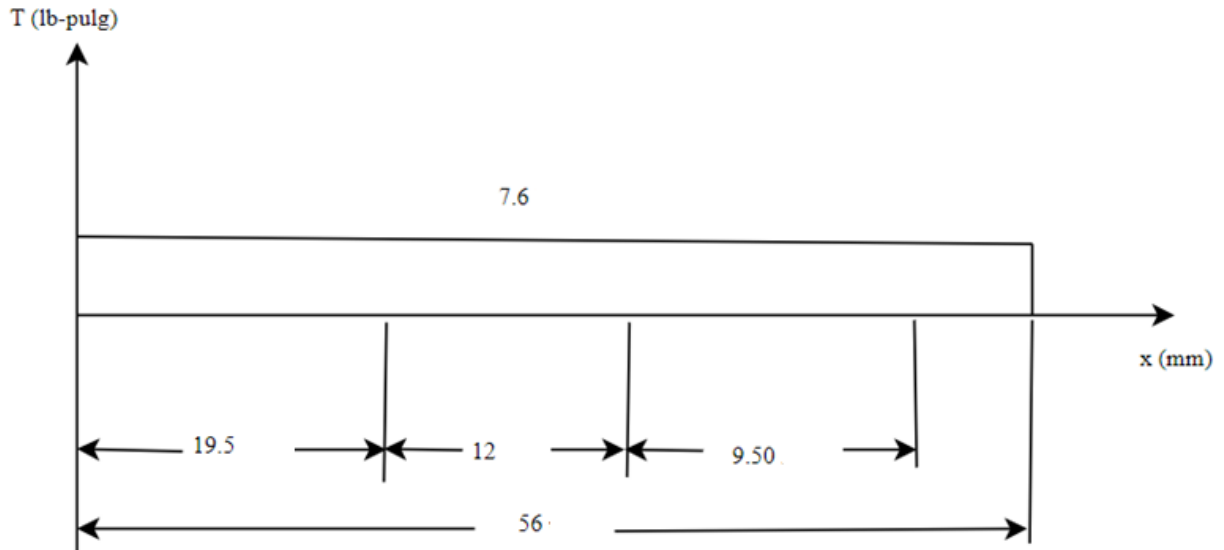


Fig. 2.10. Diagrama de par de torsión en eje de pulea motriz. Cotas en mm.

El motor transmite un par de torsión constante debido al acople directo, por lo que para conocer si el eje de 8 mm de diámetro tiene un factor de seguridad mayor que la unidad, y se hará por medio del criterio de falla por fatiga de Goodman modificada.

Calculando los esfuerzos alternantes y medios por medio de las Ecs. 1.15, 1.16, 1.17 y 1.18:

$$\sigma_a = 32 \left\{ \frac{(4.7 \text{ lb} \cdot \text{pulg})}{\pi \left[(8 \text{ mm}) \left(\frac{1 \text{ pulg}}{25.4 \text{ mm}} \right) \right]^3} \right\} = 1532.25 \text{ psi}$$

$$\tau_a = 0 \text{ psi}$$

$$\sigma_m = 0 \text{ psi}$$

$$\tau_m = 16 \frac{(7.6 \text{ lb} \cdot \text{pulg})}{\pi \left[(8 \text{ mm}) \left(\frac{1 \text{ pulg}}{25.4 \text{ mm}} \right) \right]^3} = 1238.84 \text{ psi}$$

Se debe aclarar que el esfuerzo alternante por torsión y el esfuerzo medio por flexión son nulos, debido a que, para un eje giratorio con flexión y torsión constante,

genera un esfuerzo flexionante completamente reversible y un par de torsión constante, por lo que $M_m = 0$ y $T_a = 0$. Por lo tanto, el esfuerzo alternante equivalente es igual a 1532.25 psi, mientras el esfuerzo medio equivalente es igual a 2145.73 psi.

Para seguir con los cálculos es necesario proponer un material, por lo que se usará acero SAE 1045 CD, con una resistencia a carga máxima (S_{ut}) de 91 ksi y resistencia a la fluencia S_y de 77 ksi. Para calcular el límite de resistencia a la fatiga del material S_e , se calcularán los factores necesarios.

Para determinar el factor de condición superficial k_a , de la Tabla 1.1 se seleccionará un acabado superficial maquinado o laminado en frío para la pieza, por lo que se utilizará la Ec. 1.20 para su cálculo:

$$k_a = (2.70 \text{ ksi})(91 \text{ ksi})^{-0.265} = 0.82$$

Para determinar el factor de tamaño k_b , de la Tabla 1.2 se seleccionará la ecuación para un intervalo de diámetro de pieza $2.79 \leq d \leq 51$ mm, por lo tanto:

$$k_b = 1.24(8 \text{ mm})^{-0.107} = 0.993$$

Para determinar el factor de carga k_c , se analizan las cargas a la que la pieza se someterá. El eje experimentará torsión y flexión, por lo que se establece que el factor por carga será igual a la unidad.

$$k_c = 1$$

Para determinar el factor de temperatura k_d , se establece la temperatura de operación. La pieza operará a temperatura ambiente, que se asume de 30 °C, por lo que de la Tabla 1.4, al interpolar entre 20 y 50 °C, se obtiene un valor de 1.003, el cual se aproximará a la unidad.

$$k_d = 1$$

Para determinar el factor de confiabilidad k_e , se asume que la pieza tendrá una confiabilidad de 90%, por lo que se busca en la Tabla 1.5 el valor del factor.

$$k_e = 0.897$$

Para determinar el límite de resistencia a la fatiga S_e' , se busca el valor en la Tabla 1.6 sobre la base de la resistencia a carga máxima del acero SAE 1045 CD de 91 ksi, por lo que:

$$S_e' = 0.5(91 \text{ ksi}) = 45.5 \text{ ksi}$$

Con todos los datos determinados, se calcula el límite de resistencia a la fatiga del material S_e mediante la Ec. 1.19:

$$S_e = (0.82)(0.993)(1)(1)(0.897)(45.5 \text{ ksi}) = 33.23 \text{ ksi}$$

Finalmente, se calcula el factor de seguridad de la pieza mediante la Ecuación de Goodman modificada (Ec. 1.12):

$$\frac{1}{n} = \frac{(1532.25 \text{ psi})}{(33230 \text{ psi})} + \frac{(2145.73 \text{ psi})}{(91000 \text{ psi})}$$

$$n = 14.34$$

Por lo tanto, para un eje de 8 mm de diámetro con un largo de 56 mm y fabricado de acero SAE 1045 CD, el factor de seguridad para una vida infinita es de 14.34. Con este valor se asegura que la pieza no fallará por fatiga.

j) Selección de rodamientos en poleas motrices.

Para las poleas motrices se seleccionarán rodamientos que les den la capacidad de girar sobre su mismo eje. Debido a la naturaleza de la carga o fuerza en las poleas,

se tienen cargas de tipo radial, y los rodamientos adecuados para este tipo de cargas son los rodamientos rígidos de bolas. Las variables a considerar son las reacciones en los rodamientos en los puntos A y B, siendo de 9.85 y 22.30 lb, y la velocidad de giro de 95.5 rpm.

Se calculará la fuerza de reacción en los cojinetes A y B con el propósito de determinar la mayor magnitud de las dos:

$$F_{e,A} = (1)(9.85 \text{ lb}) = 9.85 \text{ lb}$$

$$F_{e,B} = (1)(22.30 \text{ lb}) = 22.30 \text{ lb}$$

Debido a que la mayor carga está presente en el cojinete B, se seleccionará para este punto y se replicará para el otro, siendo una ventaja de selección ante los cojinetes cónicos que pueden ser diferentes en cada punto. Ahora, se determinará la carga dinámica, aunque antes se debe seleccionar la vida útil de diseño del rodamiento de la Tabla 1.12. Se selecciona para máquinas industriales en general, teniendo un valor de 20,000 h. Convirtiendo este dato de horas a revoluciones:

$$L_d = 60(20,000 \text{ h})(95.5 \text{ rpm}) = 114.6 \times 10^6 \text{ rev}$$

Así, ya que el rodamiento a utilizar es de bolas, el exponente k de la ecuación de carga dinámica será 3. Calculando la carga dinámica mediante la Ec. 1.40 queda:

$$C = (22.30 \text{ lb}) \left(\frac{114.6 \times 10^6 \text{ rev}}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 108.32 \text{ lb}$$

Por lo tanto, los cuatro rodamientos que se instalarán en cada uno de los ejes de las poleas motrices se seleccionarán del catálogo general de SKF, como rodamientos rígidos de bolas con placas de protección o de obturación con diámetros de 3 a 15 mm. Anteriormente, se había calculado el eje para un diámetro de 8 mm, por lo que sobre la base del espacio disponible en el cabezal del sistema de hilo y el mismo eje, se evalúa

el rodamiento 608-2Z, donde este tiene una capacidad de carga dinámica de 730.62 lb, lo cual es una buena elección, y tiene un diámetro interno de 8 mm, diámetro externo de 22 mm, un ancho de 7 mm y una masa de 0.012 kg.

k) Estructura de carrete de hilo nuevo

El carrete de hilo debe disponer de una estructura tal que le permita girar sobre su mismo eje con total libertad, por lo que se ha considerado una estructura tal como se presenta en la Fig. 2.11.

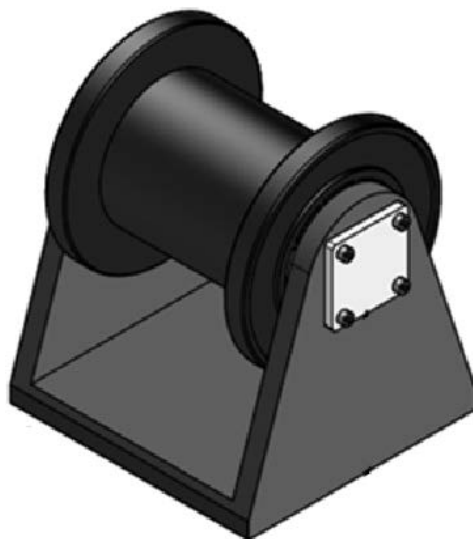


Fig. 2.11. Estructura de montaje de carrete de hilo.

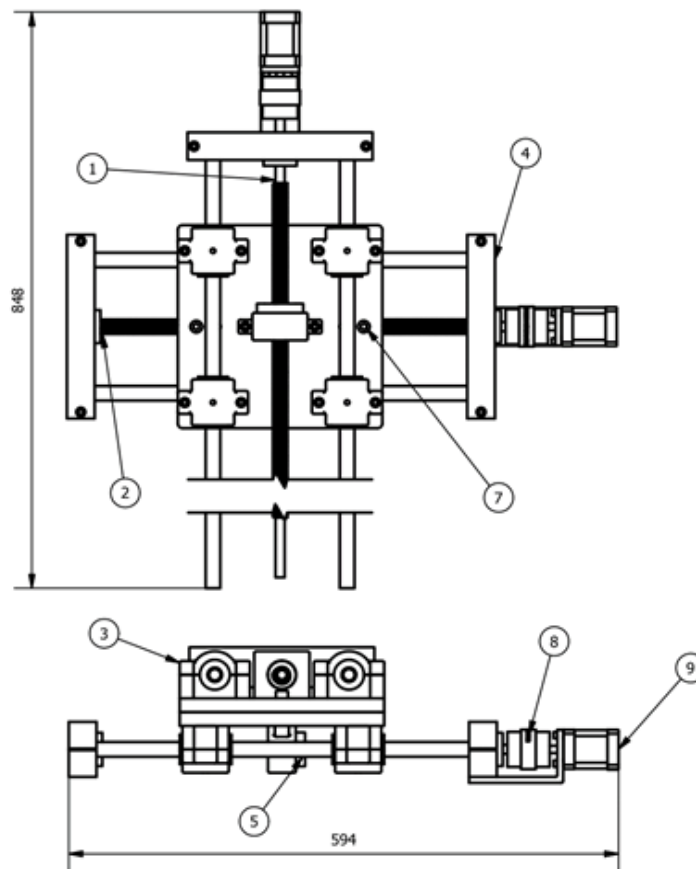
La estructura tiene una base o soporte, que tiene la función de mantener o soportar el carrete de hilo, la cual brindará estabilidad y soporte. En el mismo cuerpo se encuentra el eje, el cual permitirá que el carrete gire sobre su mismo eje, para que el hilo se pueda desenrollar y alimentar el sistema. También, se apoyan de dos rodamientos que combinados con el eje desempeñan la función anteriormente citada. Para que los rodamientos no se salgan de la cuna, se incorpora una placa o guarda con pernos de sujeción. Este sistema debe estar fijado a la estructura de la máquina, para que el servomotor de la polea motriz se pueda alimentar adecuadamente del hilo.

Los rodamientos se han seleccionado sobre la base del tamaño de la cuna ubicada en la base o soporte, por lo que se escogió el rodamiento de bola de una hilera 6002 ZZ,

con un diámetro interno de 15 mm, diámetro externo de 32 mm y un espesor de 9 mm, carga dinámica de 5,590 N, este elemento desempeñará su función sin ningún problema.

2.2. DISEÑO DE SISTEMA DE MOVIMIENTO

En los próximos capítulos se presenta el proceso de cálculo de las variables y componentes a diseñar para que en conjunto puedan proporcionar el correcto movimiento a la máquina de corte por electroerosión. Se presenta el diseño propuesto para el sistema de movimiento en la Fig. 2.12.



9	Servomotor	2	Hierro fundido	
8	Acople wrapflex	2		
7	Bancada de sistema de movimiento	2	Acero SAE 1008	Detalle 2.7
6	Tuerca de tornillo de potencia	2	Hierro fundido	Detalle 2.6
5	Soporte para tuerca de tornillo de potencia superior	2	Acero SAE 1008	Detalle 2.5
4	Soporte para tornillo de potencia inferior	3	Acero SAE 1008	Detalle 2.4
3	Chumacera de soporte guía	8	Acero SAE 1008	Detalle 2.3
2	Tornillo de potencia inferior	1	Acero SAE 1045	Detalle 2.2
1	Tornillo de potencia superior	1	Acero SAE 1045	Detalle 2.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

Fig. 2.12. Sistema de movimiento propuesto.

2.2.1. VELOCIDAD DE CORTE

Teniendo un hilo o herramienta de corte de diámetro de 0.25 mm y suponiendo una velocidad de remoción de material de 200 mm²/min, se calcula la velocidad de corte lineal con la Ec. 1.22:

$$\text{Velocidad de corte lineal} = \frac{\left(200 \frac{\text{mm}^2}{\text{min}}\right)}{(0.25 \text{ mm})} = 800 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

La velocidad de corte lineal resulta de 800 mm/min o 0.8 m/min, donde si se compara con el catálogo de máquinas de corte por electroerosión GAMA AV, se tiene una máxima velocidad de ejes de 2,000 mm/min, es decir, la velocidad obtenida está dentro del intervalo de trabajo.

2.2.2. TORNILLO DE POTENCIA

El diseño del sistema de transporte o movimiento se basará en tornillos de potencia, uno que realice el movimiento en eje X y el otro en el eje Y, recibiendo movimiento por un servomotor con acople directo para cada uno. Sin embargo, para obtener las cargas que están actuando en el tornillo se debe encontrar la masa, y en este caso, la que más influye en el movimiento es la del cabezal del sistema de hilo. Se utilizó el programa Autodesk Inventor 2023 para obtener la masa, dando como resultado 7.356 kg. La carga o fuerza debido a la gravedad es igual a:

$$W_g = (7.356 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 72.16 \text{ N}$$

Sin embargo, los tornillos tienen una disposición horizontal, por lo que la reacción o carga en el diente de la rosca ACME, tal como se presenta en la Fig. 2.10.

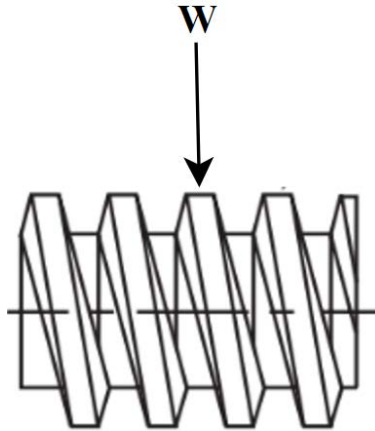


Fig. 2.13. Reacciones/cargas en el diente de tornillo de potencia rosca ACME.

Por lo tanto, se interpretará como una carga en una superficie que se tiene que trasladar de un punto A hacia un punto B, es decir, el concepto de la fuerza de fricción. Se debe conocer el coeficiente de fricción entre la tuerca y el tornillo. Algunas recomendaciones para estas variables se encuentran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Coeficientes de fricción f de pares roscados.

Material del tornillo	Material de la tuerca			
	Acero	Bronce	Latón	Hierro fundido
Acero, seco	0.15 – 0.25	0.15 – 0.23	0.15 – 0.19	0.15 – 0.25
Acero, aceite para máquina	0.11 – 0.17	0.10 – 0.16	0.10 – 0.15	0.11 – 0.17
Bronce	0.08 – 0.12	0.04 – 0.06	---	0.06 – 0.09

Se considerará un coeficiente de fricción para un tornillo de acero con aceite para máquina y una tuerca de acero de 0.17. Por lo que, la fuerza debido a la fricción se calcula mediante la Ec. 2.2:

$$W_f = \mu W_g \quad (2.2)$$

donde: W_f es la fuerza debida a la fricción,

μ es el coeficiente de fricción de la superficie, y

W_g es el peso del objeto.

Sustituyendo:

$$W_f = (0.17)(72.16 \text{ N}) = 12.27 \text{ N}$$

La fuerza inercial se debe de considerar debido a la traslación del cabezal del sistema de hilo, donde el tiempo de aceleración del servomotor se puede considerar de 0.1 s, y teniendo una velocidad de corte de 0.8 m/min, por lo que la fuerza inercial se determina mediante la Ec. 2.3:

$$W_{\text{inercial}} = (m_{\text{cabezal}})(a) \quad (2.3)$$

donde: W_{inercial} es la fuerza inercial,

m_{cabezal} es la masa del cabezal, y

a es la aceleración del cabezal.

Sustituyendo:

$$W_{\text{inercial}} = (7.356 \text{ kg}) \left[\frac{\left(0.8 \frac{\text{m}}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)}{0.10 \text{ s}} \right] = 0.9808 \text{ N}$$

Por lo que, la suma de las cargas en un tornillo de potencia es:

$$F = 72.16 \text{ N} + 12.27 \text{ N} + 0.9808 \text{ N} = 85.41 \text{ N}$$

Como paso siguiente, se seleccionará un diámetro típico de 5/8 pulg, un paso de 1/8 pulg y el tornillo será de 1 hilo o entrada. Recordar que la velocidad de bancada es de 0.8 m/min o 31.5 pulg/min. Calculando el avance del tornillo mediante la Ec. 1.23:

$$L = (1 \text{ hilo}) \left(\frac{1 \text{ pulg}}{8 \text{ hilo}} \right) = \frac{1}{8} \text{ pulg}$$

Calculando el diámetro medio del tornillo de potencia mediante la Ec. 1.24:

$$d_m = \left(\frac{5}{8} \text{ pulg}\right) - 2 \left[\frac{\left(\frac{1}{8} \text{ pulg}\right)}{4} \right] = 0.5625 \text{ pulg}$$

Para la aplicación no se utilizará collarín, debido a que la fricción que generaría es casi nula, ya que se considera que los rodamientos en los extremos actúan como collarines. Calculando el ángulo de la hélice mediante la Ec. 1.26:

$$\tan \lambda = \frac{(0.125 \text{ pulg})}{\pi(0.5625 \text{ pulg})} = 4.05^\circ$$

Con los datos encontrados anteriormente, se puede calcular el par de torsión para subir la carga mediante la Ec. 1.27, así:

$$T_s = \frac{(0.5625 \text{ pulg})(85.41 \text{ N}) \left(\frac{0.2248 \text{ lbf}}{1 \text{ N}}\right)}{2} \left[\frac{0.17 + \cos(14.5^\circ) \tan(4.05^\circ)}{\cos(14.5^\circ) - (0.17) \tan(4.05^\circ)} \right]$$

$$T_s = 1.33 \text{ lb} \cdot \text{pulg}$$

Para obtener el torque total que deberá transmitir el servomotor, se requiere conocer el valor del par de torsión generado debido a la rotación del tornillo de potencia, este se calcula mediante la Ec. 2.4:

$$I = \frac{\gamma \pi R^4 L}{2g} \quad (2.4)$$

donde: γ es el peso específico del material

R es el radio del tornillo de potencia,

L es la longitud del tornillo de potencia, y

g es la aceleración debida a la gravedad.

Sustituyendo:

$$I = \frac{\left(7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (\pi) \left[\frac{\left(\frac{5}{8} \text{ pulg}\right) \left(\frac{25.4 \text{ mm}}{1 \text{ pulg}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right)}{2} \right]^4 (0.735 \text{ m})}{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 3.67 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

El valor de la inercia indica que el par de torsión ($T_i = I\alpha$) resultará muy pequeño, por lo que no afectará en nada al par de torsión anteriormente calculado. Por lo tanto, el par de torsión resulta de 0.15 N·m (1.33 lb·pulg). Calculando la velocidad de giro del tornillo de potencia mediante la Ec. 1.29:

$$31.5 \frac{\text{pulg}}{\text{min}} = n \left(\frac{1}{8} \text{ pulg}\right)$$

$$n = 252 \text{ rpm}$$

Con el resultado obtenido, se puede calcular la potencia del tornillo de potencia mediante la Ec. 1.30:

$$P_{\text{tornillo}} = \frac{(1.33 \text{ lb} \cdot \text{pulg})(252 \text{ rpm})}{63000} = 5.32 \times 10^{-3} \text{ hp}$$

La potencia en el tornillo resulta de 0.00532 HP o 4 W. Ahora se calcula la eficiencia del tornillo por medio de la Ec. 1.31:

$$e = \frac{(85.41 \text{ N}) \left(\frac{0.2248 \text{ lb}}{1 \text{ N}}\right) (0.125 \text{ pulg})}{2\pi(1.33 \text{ lb} \cdot \text{pulg})} = 28.72\%$$

Se calcula el esfuerzo a flexión en la cuerda del tornillo, tomando en consideración que es una rosca ACME, por medio de la Ec. 1.34:

$$\sigma = \frac{(85.41 \text{ N}) \left(\frac{0.2248 \text{ lb}}{1 \text{ N}}\right) \cos(14.5^\circ) \left(\frac{0.125 \text{ pulg}}{4}\right) \left(\frac{0.629}{2}\right) (0.125 \text{ pulg})}{[(0.629)(0.125 \text{ pulg})]^3 \left(\frac{1}{12}\right) (\pi)(0.5625 \text{ pulg})} = 317.47 \text{ psi}$$

Se calcula el esfuerzo de corte en la cuerda del tornillo, tomando en consideración que es una rosca ACME, por medio de la Ec. 1.35:

$$\tau = \frac{(85.41 \text{ N}) \left(\frac{0.2248 \text{ lb}}{1 \text{ N}}\right) \cos(14.5^\circ)}{0.629\pi(0.5625 \text{ pulg})(0.125 \text{ pulg})} = 133.79 \text{ psi}$$

Con los resultados obtenidos anteriormente, se puede calcular el esfuerzo combinado por cortante máximo por medio de la Ec. 1.36:

$$\tau_{\text{máx}} = \sqrt{\left(\frac{317.47 \text{ psi}}{2}\right)^2 + (133.79 \text{ psi})^2} = 207.60 \text{ psi}$$

Se calculará la resistencia a la fluencia por medio de la teoría de falla de Tresca o Guest, donde se asumirá el factor de seguridad n igual a la unidad, usando la Ec. 1.37:

$$S_y = 2(1.0)(207.6 \text{ psi}) = 415.2 \text{ psi}$$

Sobre la base de los resultados obtenidos, se decide utilizar como material de fabricación de los tornillos de potencia acero al carbono SAE 1020 CD, que posee una resistencia a la fluencia de 57,000 psi.

Para el análisis del tornillo de potencia por teoría de fallas, se debe tener en consideración el par de torsión del tornillo de potencia de 0.15 N·m (1.33 lb·pulg) y la carga debida al peso de este, el cual se obtiene en AutoDesk Inventor 2023, donde el diámetro es de 5/8 pulg y un largo de 0.735 m (ver Fig. 2.14).

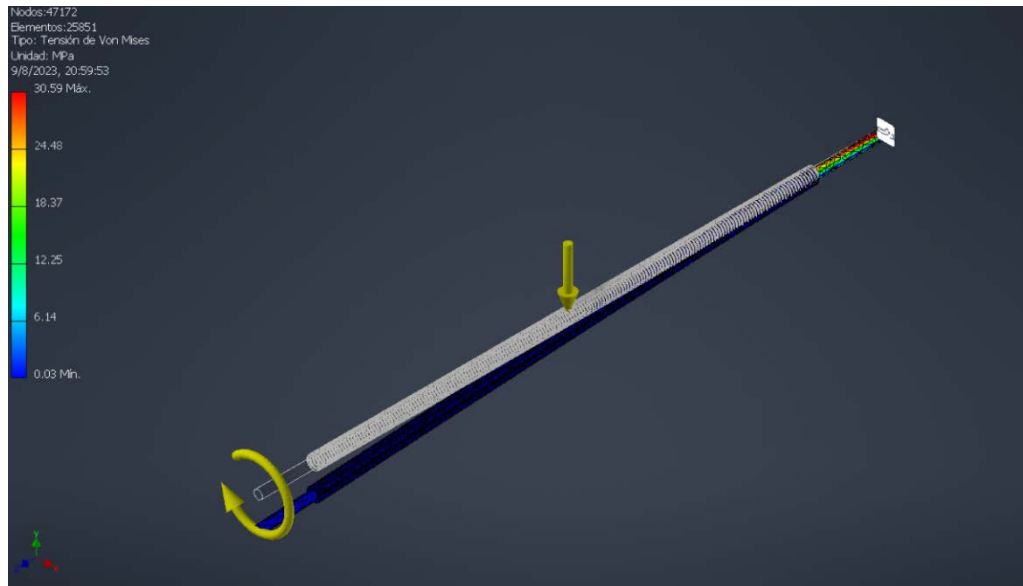


Fig. 2.14. Análisis de esfuerzos por Von Mises en AutoDesk Inventor.

Se visualiza que a lo largo del tornillo de potencia cómo se comporta el esfuerzo, y sobre la base de los cálculos realizados se tiene un esfuerzo de 207.60 psi o 1.43 MPa, confirmándose esos valores en el análisis, debido a que el comportamiento por paleta de colores indica que el cuerpo experimenta de 0.03 a 6.14 MPa.

Recordando que el material del tornillo de potencia seleccionado es el acero SAE 1045 CD, resultando un factor de seguridad bastante alto para la aplicación, por lo que la paleta de colores confirma los cálculos realizados en los pasos anteriores (ver Fig. 2.15).

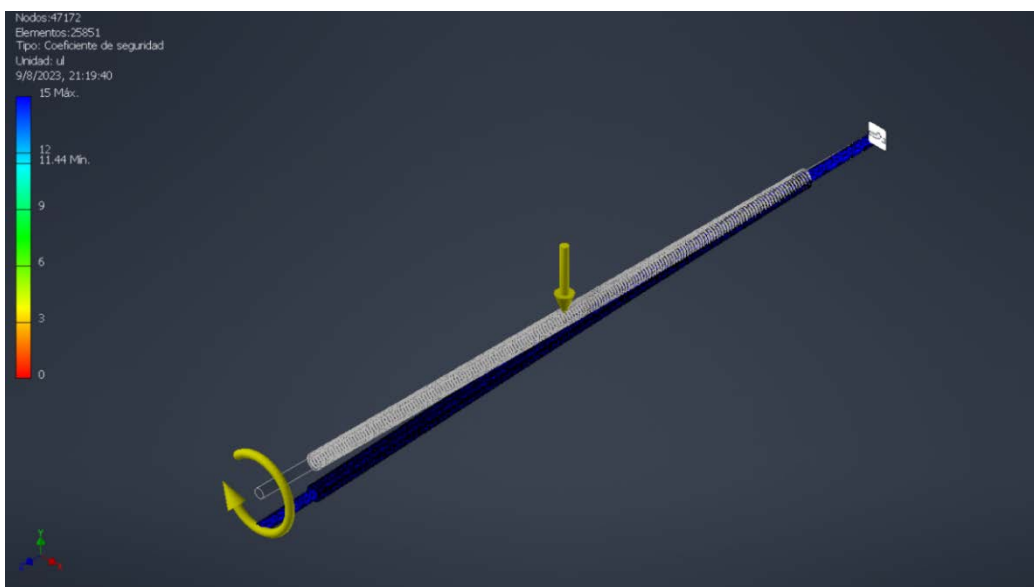


Fig. 2.15. Análisis de factor de seguridad por Von Mises en AutoDesk Inventor.

2.2.3. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS PARA TORNILLO DE POTENCIA

El tornillo de potencia tiene cargas que afectan al mismo, como lo son el cabezal del sistema de hilo que mueve 0.718 kg masa y un peso de 0.836 kg. Se hace un esquema con las cargas que afectan al tornillo para analizar a profundidad la situación (ver Fig. 2.16).

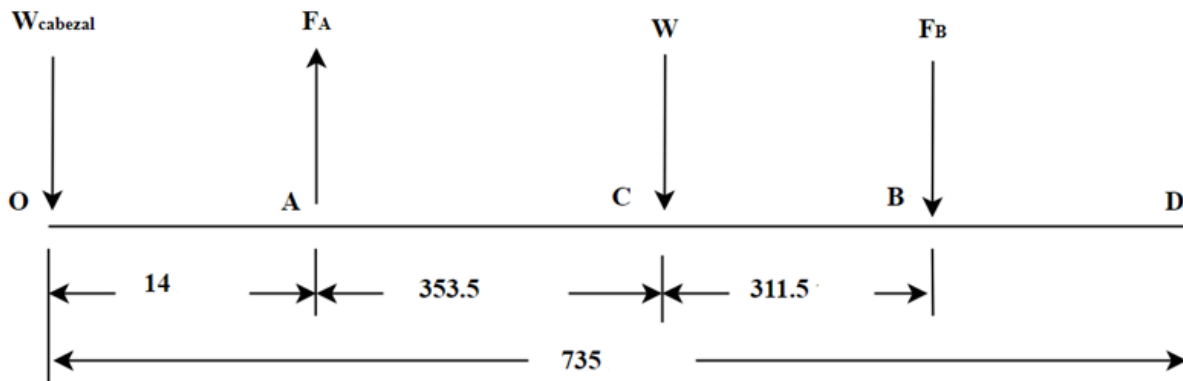


Fig. 2.16. Reacciones y cargas del tornillo de potencia. Cotas en mm.

Se procede a encontrar las fuerzas en el punto A y el punto B. Se hace sumatoria de momentos en el punto A para encontrar la fuerza F_B :

$$\sum M_A = 0$$

$$(W_{\text{cabezal}})(14 \text{ mm}) - (W)(353.5 \text{ mm}) - F_B(353.5 \text{ mm} + 311.5 \text{ mm}) = 0$$

$$F_B = \frac{(0.718 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (14 \text{ mm}) - (0.836 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (353.5 \text{ mm})}{(353.5 \text{ mm} + 311.5 \text{ mm})} = -4.21 \text{ N}$$

Ahora, se procederá a encontrar la fuerza en el punto A, por medio de sumatoria de fuerzas:

$$\sum F_y = 0$$

$$W_{\text{cabezal}} - F_A + W + F_B = 0$$

$$(0.718 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) - F_A + (0.836 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) + (-4.21 \text{ N}) = 0$$

$$F_A = 11.03 \text{ N}$$

Debido a la naturaleza de la carga o fuerza en el tornillo, existen cargas de tipo radial, y los rodamientos adecuados para ese tipo de cargas son los rodamientos rígidos de bolas. Las variables para considerar son las reacciones en los rodamientos en los puntos A y B, siendo de 11.03 y 4.21 N, y la velocidad de giro de 252 rpm.

Ahora, se determinará la carga equivalente para cada cojinete. En la ecuación, V es el factor de rotación, el cual puede ser 1 en caso de que la pista interna del cojinete gire, o 1.2 si es la pista externa la que gira. En este caso, la pista interna del cojinete gira, Por lo tanto, V es igual a 1. La variable F_R es la fuerza de reacción. Usando la Ec. 1.39:

Cojinete A:

$$F_{e,A} = (1)(11.03 \text{ N}) = 11.03 \text{ N}$$

Cojinete B:

$$F_{e,B} = (1)(4.21 \text{ N}) = 4.21 \text{ N}$$

Debido a que la mayor carga está presente en el cojinete B, se seleccionará para este punto y se replicará para el otro. Ahora, se determinará la carga dinámica, aunque antes se debe seleccionar la vida útil de diseño del rodamiento de la Tabla 1.12. Se selecciona para máquinas industriales en general, teniendo un valor de 20,000 h. Convirtiendo este dato de horas a revoluciones:

$$L_d = 60(20,000 \text{ h})(252 \text{ rpm}) = 302.4 \times 10^6 \text{ rev}$$

Y ya que el rodamiento a utilizar es de bolas, el exponente k de la ecuación de carga dinámica será 3. Calculando la carga dinámica mediante la Ec. 1.40:

$$C = (11.03 \text{ N}) \left(\frac{302.4 \times 10^6 \text{ rev}}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 74.03 \text{ N}$$

Los rodamientos para considerar son de una hilera de bolas y con placas de protección o de obturación, los cuales se seleccionan del catálogo general de SKF. La carga dinámica resulta de 74.03 N, y según las dimensiones del eje con diámetro de 10 mm, por lo que se selecciona un rodamiento con nomenclatura 6000-2Z, con diámetro interno de 10 mm, un diámetro externo de 26 mm, un ancho de 8 mm y una carga dinámica de 4,620 N.

2.2.4. SELECCIÓN DE SERVOMOTOR PARA TORNILLO DE POTENCIA

La selección de los servomotores se hará sobre la base de tres variables imprescindibles que son la potencia nominal, par de torsión y la velocidad de giro, siendo estos 4 W, 0.15 N·m y 252 rpm respectivamente. La marca KOLLMORGEN ofrece diversidad de estos elementos, donde en su catálogo el modelo AKM1 1B tiene las características resumidas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Características de servomotor KOLLMORGEN.

Motor modelo	AKM1 1B
Potencia nominal de salida, W	80
Par nominal, N·m	0.18
Par máximo, N·m	0.61
Corriente nominal, A	1.16
Corriente pico, A	4.65
Velocidad nominal, rpm	4000
Inercia, kg·cm ²	0.017
Peso, kg	0.35

También se presenta la geometría de este servomotor, donde se destaca el diámetro del eje de 8 mm y el cuñero de 3x3 mm, debido a que son parámetros que influyen en la selección de un acople flexible.

2.2.5. ACOPLER FLEXIBLE PARA TORNILLO DE POTENCIA

El servomotor seleccionado tiene aproximadamente 80 W o 0.11 HP y una velocidad de giro nominal de 4000 rpm. Para tornillos de potencia, el factor de servicio es de 1.5. Para la selección de un acople flexible se considerará un factor de servicio de 1.5. Calculando la potencia equivalente mediante la Ec. 1.38:

$$Pot_{eq} = (0.11 \text{ hp})(1.5) = 0.165 \text{ HP}$$

Con este valor, se busca en el catálogo "FALK, Wrapflex Coupling Quick Selection Chart" la velocidad nominal del servomotor de 4000 rpm. El acople 2R cumple debido a que tiene una potencia equivalente de 1.59 HP, un par de torsión de 100 lb-pulg, un máximo agujero a perforar de 0.875 pulg y una velocidad máxima de aplicación de 4500 rpm.

Sobre la base del diseño del tornillo de potencia superior y a los componentes seleccionados, se asume lo mismo, aunque con diferente largo para el tornillo inferior, debido a que el tornillo superior realiza los movimientos hacia atrás y adelante, y el inferior de izquierda a derecha o viceversa.

2.2.6. SOPORTES GUÍAS DE TORNILLO DE POTENCIA

Las guías del tornillo de potencia se componen de dos tubos lisos de acero galvanizado que actúan de soporte y transporte, donde interactúan con dos chumaceras que en su interior guardan un buje de desgaste, similar a los que llevan los colgantes de los tornillos transportadores. Se elaborarán de un eje hueco con un diámetro exterior de

15.88 mm y un espesor de 1.8 mm y un largo de 717 mm, para los soportes guías del tornillo superior, y para el inferior solo varía el largo. Se presenta un esquema en la Fig. 2.17:

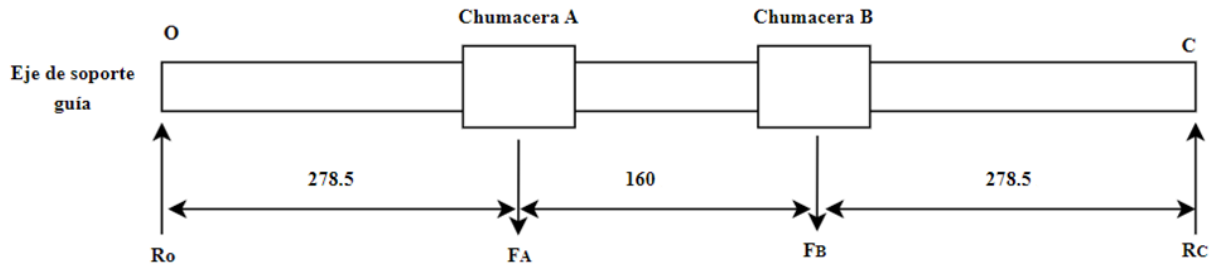


Fig. 2.17. Reacciones y cargas en soportes guías. Cotas en mm.

Las fuerzas F_A y F_B se deben al peso del cabezal dividido entre las cuatro chumaceras que se ensamblan con los dos ejes de soporte guía, por lo que:

$$W_{sg} = F_A = F_B = \frac{72.16 \text{ N}}{4} = 18.04 \text{ N}$$

Se calculará la reacción en el punto C. Como primer paso, se hará sumatoria de momentos en el punto O para encontrar la fuerza R_C :

$$\sum M_o = 0$$

$$F_A(278.5 \text{ mm}) + F_B(278.5 \text{ mm} + 160 \text{ mm}) - R_C(278.5 \text{ mm} + 160 \text{ mm} + 278.5 \text{ mm}) = 0$$

$$R_C = \frac{(18.04 \text{ N})(278.5 \text{ mm}) + (18.04 \text{ N})(278.5 \text{ mm} + 160 \text{ mm})}{(278.5 \text{ mm} + 160 \text{ mm} + 278.5 \text{ mm})} = 18.04 \text{ N}$$

Con todas las fuerzas determinadas, se pueden construir los diagramas de fuerza cortante y de momento flector que se presentan en las Figs. 2.18 y 2.19, respectivamente.

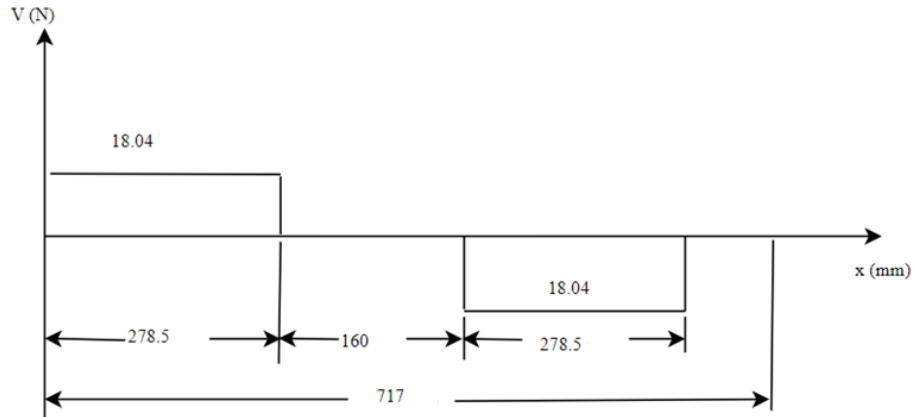


Fig. 2.18. Diagrama de fuerza cortante en soportes guías. Cotas en mm.

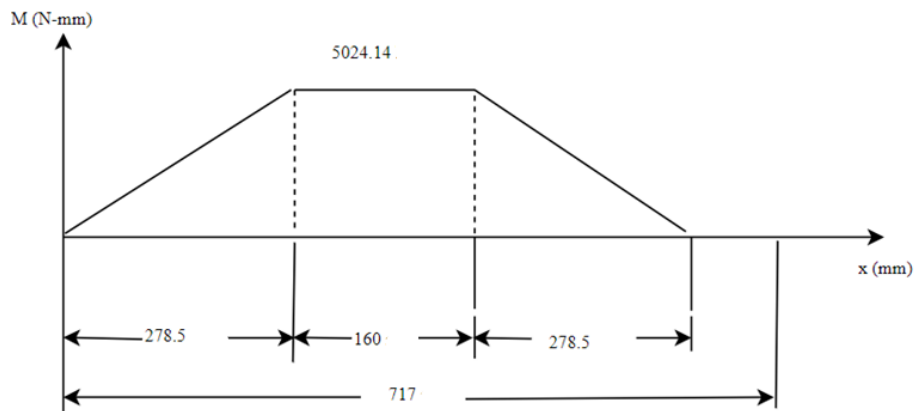


Fig. 2.19. Diagrama de momento flector en soportes guías. Cotas en mm.

Se calculará el esfuerzo en los soportes guías del tornillo de potencia utilizando la Ec. 2.5.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{32Md_1}{\pi(d_1^4 - d_2^4)} \quad (2.5)$$

donde: M es el momento flector,
 d_1 es el diámetro externo, y
 d_2 es el diámetro interno.

Sin embargo, se debe considerar que el eje es hueco (espesor de 1.8 mm). Por lo tanto, utilizando la Ec. 2.5:

$$\sigma = \frac{32(5024.14 \text{ N} - \text{mm})(15.875 \text{ mm})}{\pi[(15.875 \text{ mm})^4 - (12.275 \text{ mm})^4]} = 19.90 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Debido a que estos soportes guías son una analogía de la barra para cilindrar en un torno paralelo, se considera a bien utilizar acero de alta calidad como material de fabricación como el acero SAE 304, el cual incluye en su composición química el Cromo (Cr) de 18 a 20%, favorece en gran medida al bajo coeficiente de fricción y juega un papel crucial en la formación de una capa pasiva en la superficie del acero. Esta capa pasiva de óxido de Cromo es extremadamente delgada y auto regenerativa en presencia de oxígeno que confiere resistencia a la corrosión y al desgaste, así como su bajo coeficiente de fricción. El acero SAE 304 cuenta con una resistencia a la fluencia de 235 MPa.

El soporte se analizará sobre la base del criterio de falla por fatiga de Tresca o Guest, por lo que se calculará el esfuerzo combinado por cortante máximo mediante la Ec. 1.36:

$$\tau_{\text{máx}} = \sqrt{\left(\frac{19.90 \text{ MPa}}{2}\right)^2 + (0 \text{ MPa})^2} = 9.95 \text{ MPa}$$

A continuación, se obtendrá la resistencia a la fluencia por medio de la teoría de falla de Tresca o Guest, donde se asumirá el factor de seguridad n igual a la unidad, usando la Ec. 1.37:

$$n = \frac{0.5(235 \text{ MPa})}{9.95 \text{ MPa}} = 11.8$$

Con el factor de seguridad de 11.8 para un diámetro de 15.875 mm, si se evalúa para un factor de seguridad igual a la unidad, se obtiene un diámetro mínimo de 6.0 mm. Por lo que, el acero SAE 304 es un buen material, ayuda en el aspecto de fricción, así como el comportamiento del esfuerzo flexionante, así como el factor de seguridad.

Teniendo en consideración que estos soportes guías se apoyan en chumaceras con un buje de desgaste fabricado de teflón, esto es así debido a que posee el coeficiente de fricción más bajo conocido entre todos los materiales sólidos. Se puede ubicar entre 0.04 y 0.15. Se presenta el ensamble de la chumacera en la Fig. 2.20.

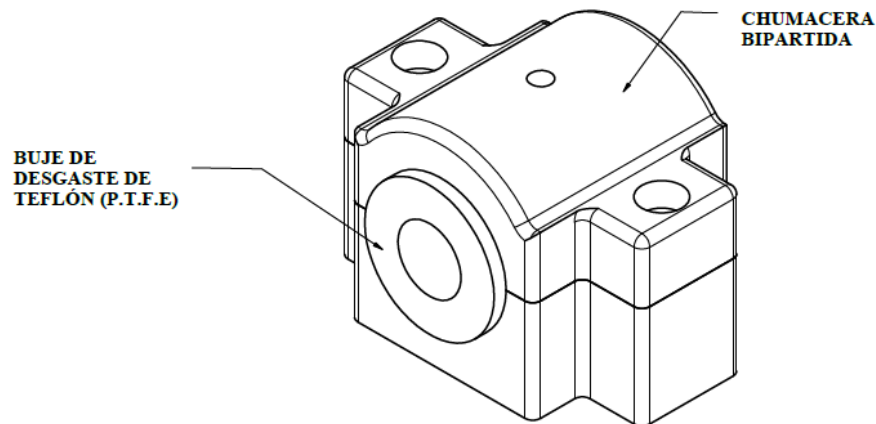


Fig. 2.20. Chumacera con buje de desgaste de teflón para ejes de soporte guía.

2.2.7. ANÁLISIS DE SOPORTES GUÍAS DE TORNILLO DE POTENCIA

Para el análisis de fallas, se debe tener en consideración la fuerza que se genera debido al peso que se carga dividido entre las cuatro chumaceras de 18.04 N, y considerando dos por soporte y el mismo peso del soporte. Con unas dimensiones de diámetro de 15.9 mm, largo de 717 mm y un espesor de 1.8 mm (ver Fig. 2.21).

Se visualiza el comportamiento del esfuerzo a lo largo del eje soporte guía, el esfuerzo según cálculo es 19.9 MPa y se indica en la simulación con un mallado más definido que va desde 0 a 39.22 MPa. Confirmando que los puntos de empotramiento son los que sufren mayor esfuerzo según la paleta de colores. Para el análisis del factor de seguridad, se presenta la Fig. 2.22.

Para el material del eje de soporte guía se seleccionó el acero SAE 304, con lo que se obtiene un factor de seguridad de 11.8, por lo que la paleta de colores confirma los cálculos realizados en los pasos anteriores.

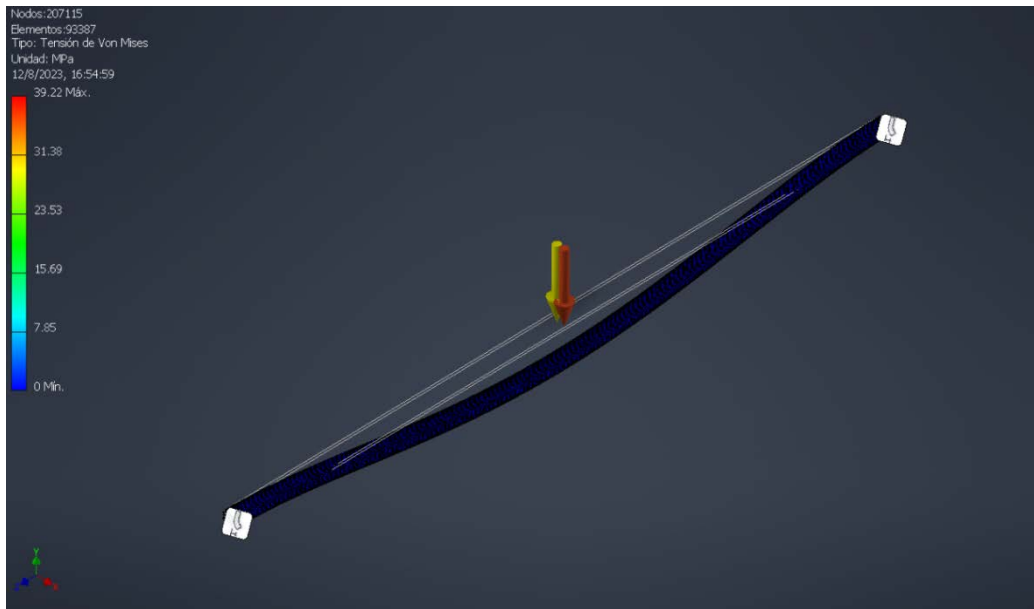


Fig. 2.21. Comportamiento de esfuerzos en ejes de soporte guía.

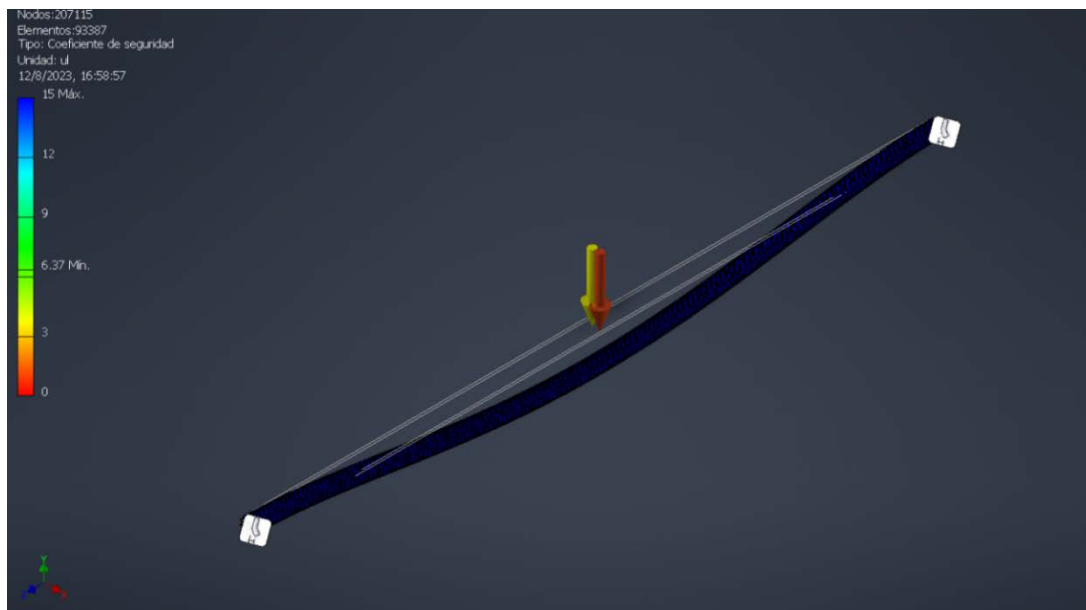


Fig. 2.22. Comportamiento de factor de seguridad en ejes de soporte guía.

2.3. DISEÑO DE TANQUE DE TRABAJO

El tanque de trabajo es el recipiente que contendrá el agua desionizada que utilizará el proceso de electroerosión, donde se ha considerado su fabricación de acero inoxidable SAE 304 que tiene un esfuerzo a la tracción desde 460 y 110 MPa. Un aspecto

importante para el material del tanque de trabajo es que el acero inoxidable 304 es resistente a la corrosión, es durable, así como compatible con una amplia gama de líquidos dieléctricos y ofrecen buena resistencia térmica. Otros materiales buenos son el aluminio, PVC o polietileno de alta densidad (HDPE), Polipropileno y el acrílico (PMMA), sin embargo, este es menos común debido a su susceptibilidad al calor y la interacción química con algunos líquidos dieléctricos (ver Fig. 2.23) [43].

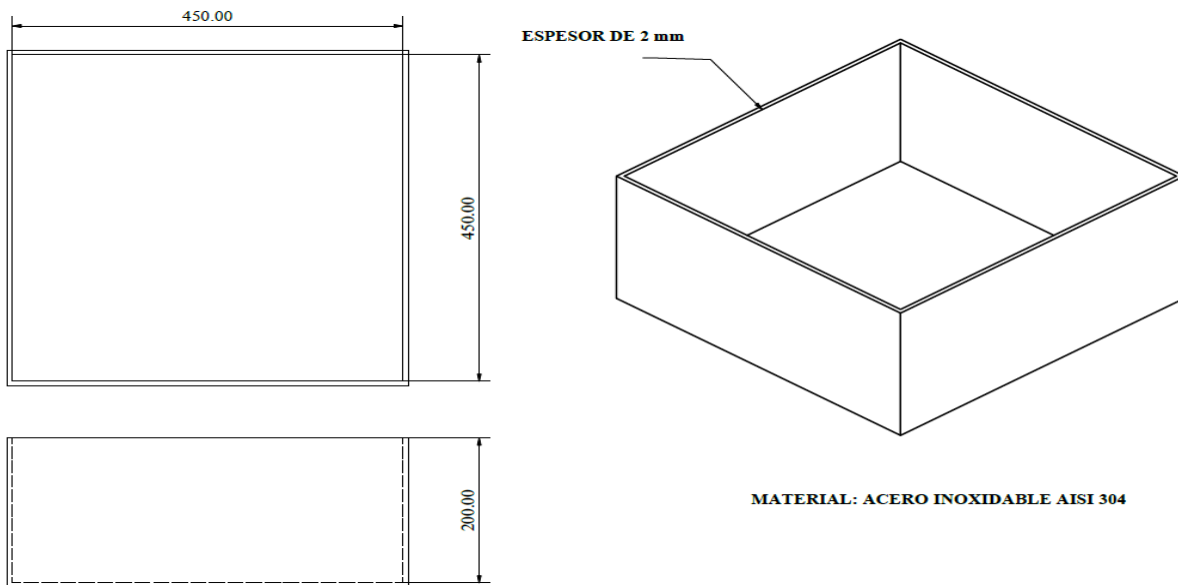


Fig. 2.23. Dimensiones del tanque de trabajo. Cotas en mm.

Sobre la base de la geometría en bruto de la pieza de trabajo, se ha establecido dimensiones del recipiente de 450 mm de largo y ancho, y 200 mm de altura. Se propone un espesor de ¼ pulg, y se utilizará el proceso que establece la norma API 650. El espesor del tanque de trabajo se define mediante la Ec. 2.6 [44]:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{0.036\alpha HG}{S}} + C. A. \quad (2.6)$$

donde: t es el espesor del tanque de trabajo en pulg,
 L es el largo del tanque de trabajo en pulg,
 H es la altura del tanque de trabajo en pulg,

G es la gravedad específica del líquido (agua desionizada),

S es el esfuerzo del material en psi,

α es el factor que depende de la relación H/L, y

C.A. es el factor de corrección por corrosión.

Se tiene que el largo del tanque es de 450 mm o 17.7 pulg, la altura es de 200 mm o 7.9 pulg, la gravedad específica es de 1, el esfuerzo es de 460 MPa o 66,717.4 psi, un factor de corrección por corrosión de 1/16 pulg (considerado a criterio) y por último el factor alfa, que según la relación de altura y longitud es de 0.0045. Se calcula el espesor mínimo para la lámina de acero inoxidable SAE 304 mediante la Ec. 2.6:

$$t = 2.45(17.7165 \text{ pulg}) \sqrt{\frac{0.036(0.0045)(7.87402)(1.0)}{(66,717.4 \text{ psi})}} + \left(\frac{1}{16} \text{ pulg}\right)$$

$$t = 0.07 \text{ pulg}$$

Por lo tanto, el espesor mínimo para la lámina de acero SAE 304 es de 0.07 pulg o 1.8 mm. Se propuso un espesor de ¼ pulg o 6.35 mm, sin embargo, es un valor que esta sobrado, aunque sea bueno, incrementa los costos, por lo que se escogerá un espesor de 2 mm.

Con las dimensiones y material del tanque ya definidos, se puede analizar el comportamiento que tienen el fondo y las paredes del tanque expuestos a la presión de la columna del fluido dieléctrico. Se deben calcular las presiones en las paredes, así como la del fondo. Para esto se utilizará la ley de la presión hidrostática, que se representa mediante la Ec. 2.7:

$$P = P_{\text{atm}} + \rho gh \quad (2.7)$$

donde: P es la presión total en un punto dentro del líquido,

P_{atm} es la presión atmosférica en la superficie del líquido,

ρ es la densidad del líquido,

g es la aceleración debida a la gravedad, y

h es la altura del líquido medida desde la superficie.

Se asumirá que el fluido está al nivel del tanque de trabajo, y tomando en consideración, que está expuesto a la atmosfera con una presión de 1012 mbar o 101,200 Pa a una temperatura de 24 °C y 470 m sobre el nivel del mar para Metapán, Santa Ana, El Salvador. Usando la Ec. 2.7 para las paredes de 450×200 mm:

$$P_1 = (101,200 \text{ Pa}) + \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(\frac{0.2 \text{ m}}{2}\right) = 102.2 \text{ kPa}$$

Ahora se procede a calcular la presión total en el fondo del tanque de dieléctrico de 450×450 mm, utilizando la Ec. 2.7:

$$P_2 = (101,200 \text{ Pa}) + \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.2 \text{ m}) = 103.2 \text{ kPa}$$

Por medio del Software Autodesk Inventor se puede visualizar el comportamiento de las paredes y el fondo del tanque de trabajo al ser sometidos a estas presiones (ver Fig. 2.24).

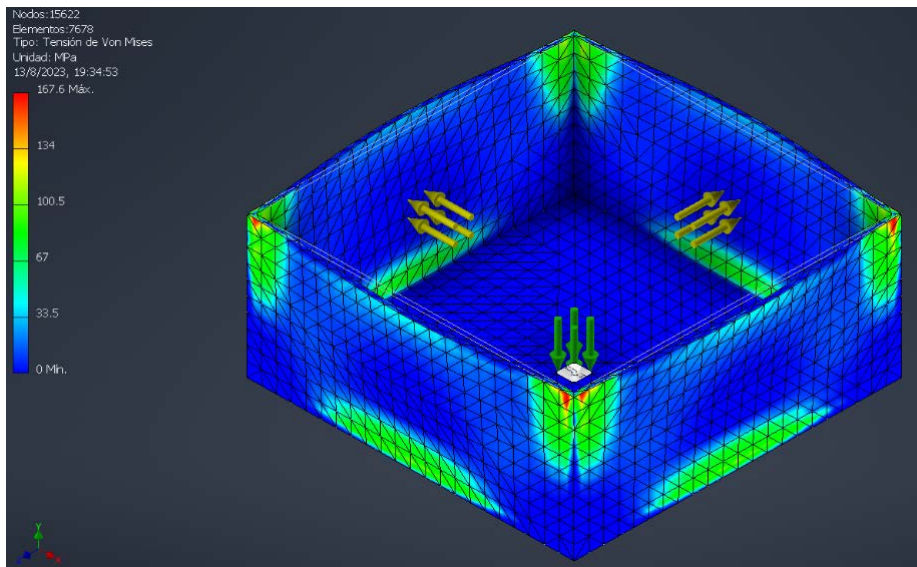


Fig. 2.24. Análisis de tanque de trabajo con cargas por presión de fluido.

Se visualiza el comportamiento del esfuerzo en las paredes y el fondo del recipiente, siendo evidente que las esquinas son los puntos más críticos, esto es así porque son puntos donde se tiene una intersección de dos paredes, y la presión intenta separarlas, y esto sobre la base del material y el espesor puede suceder, sin embargo, el acero SAE 304 y un espesor de 2 mm presentan un buen comportamiento ante esas presiones.

2.4. DISEÑO DE LA MESA DE TRABAJO

La mesa de trabajo es uno de los puntos más importantes de la máquina, debido a que sus dimensiones, el material y la forma deben ser acordes a los límites de movimiento del sistema de transporte, así como el cabezal del sistema de hilo. El material designado es el acero SAE 304, debido a que debe estar en contacto con el fluido dieléctrico, debido a su resistencia a la corrosión, lo que lo hace adecuado a la aplicación, y recordando que el fluido dieléctrico se utiliza para enfriar y aislar eléctricamente la pieza de trabajo y el hilo. La geometría de la mesa de trabajo se presenta en la Fig. 2.25.

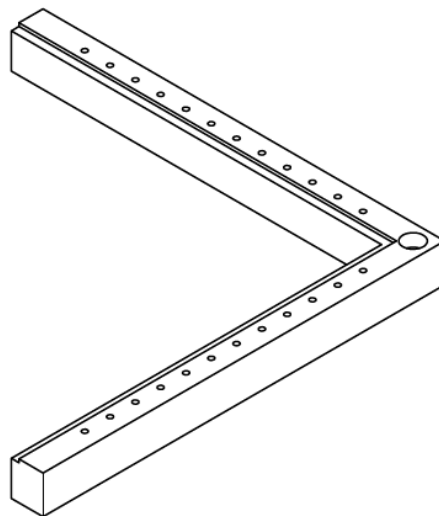


Fig. 2.25. Mesa de trabajo.

Se analizan las cargas que afectan a la mesa de trabajo, las cuales son debido al peso de la pieza de trabajo en bruto, peso de la mesa y la fuerza que ejerce la columna

de fluido dieléctrico sobre la superficie de la mesa de trabajo. Debido a que la mesa tiene forma de L, considerando como referencia algunos modelos de maquinaria de este tipo, se considerará una parte de ésta y se presentarán los puntos de apoyo o sujeción de ésta al tanque de trabajo. El esquema de las cargas que la afectan se presenta en la Fig. 2.26.

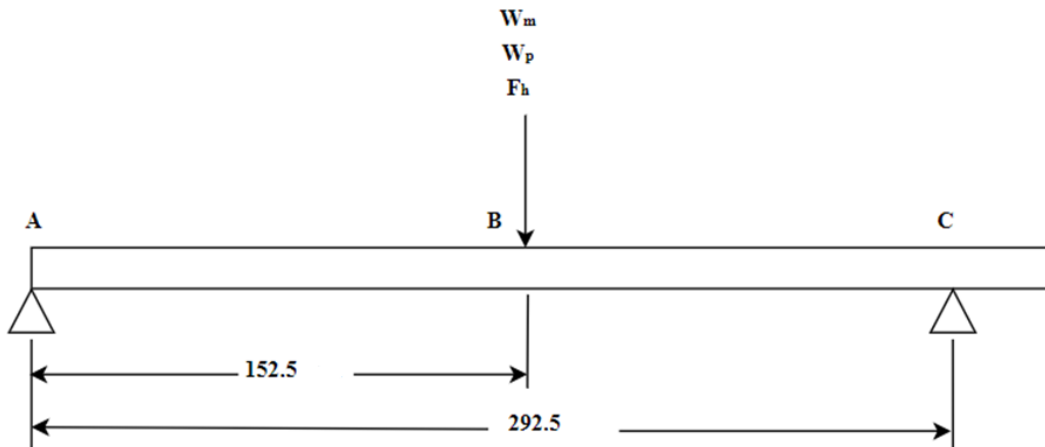


Fig. 2.26. Diagrama de cargas o fuerzas en la Mesa de Trabajo. Cotas en mm.

La carga W_m es el peso de la mesa de trabajo de 3.6 kg, W_p es el peso de la pieza de trabajo en bruto de 0.7 kg y F_h es la fuerza hidrostática debido a la columna de agua. La fuerza hidrostática se calcula mediante la Ec. 2.8:

$$F_h = (P_{atm} + \rho g x)(a)(b) \quad (2.8)$$

donde: F_h es la fuerza hidrostática,

P_{atm} es la presión atmosférica,

a es el largo de la mesa de trabajo, y

b es el ancho de la mesa de trabajo.

Sustituyendo:

$$F_h = [(101,200 \text{ Pa}) + \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.109 \text{ m})](0.31750 \text{ m})(0.025 \text{ m}) = 811.8 \text{ N}$$

Para calcular la carga total del conjunto mesa de trabajo, pieza de trabajo y fuerza hidrostática, se hará una sumatoria de todas estas cargas:

$$W_T = 811.8 \text{ N} + (3.644 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) + (0.718 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 854.6 \text{ N}$$

Con el resultado obtenido, se pueden calcular las reacciones en los puntos de apoyo A y C se presentan en la Fig. 2.23. Debido a que la carga es simétrica, se divide a la mitad en cada apoyo, por lo tanto:

$$R_A = R_C = \frac{W_T}{2} = \frac{854.6 \text{ N}}{2} = 412.3 \text{ N}$$

A continuación, en las Figs. 2.27 y 2.28 se presentan los diagramas de fuerza cortante y momento flector, respectivamente.

Se procederá a calcular la inercia debido a la geometría transversal de la mesa de trabajo por medio de centroides, los cuales se presentan en la Fig. 2.29.

Los centroides de las figuras compuestas, así como los momentos de área se presentan en la Tabla 2.6.

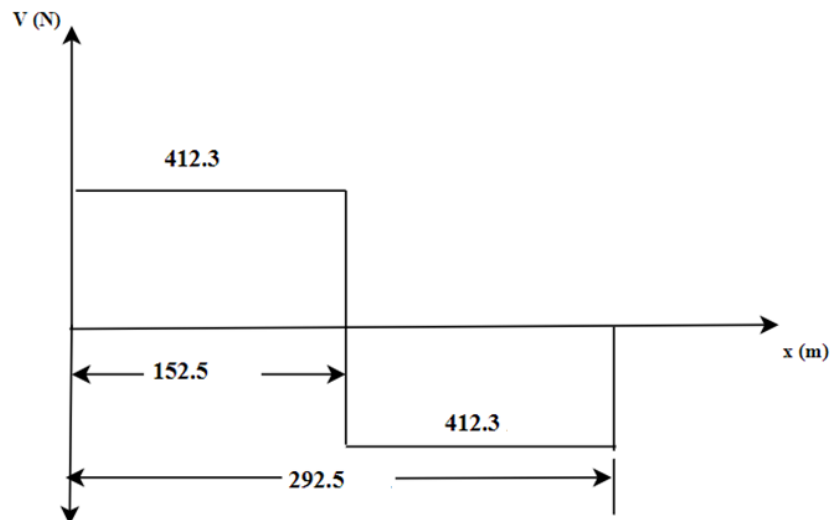


Fig. 2.27. Diagrama de fuerza cortante en la mesa de trabajo. Cotas en mm.

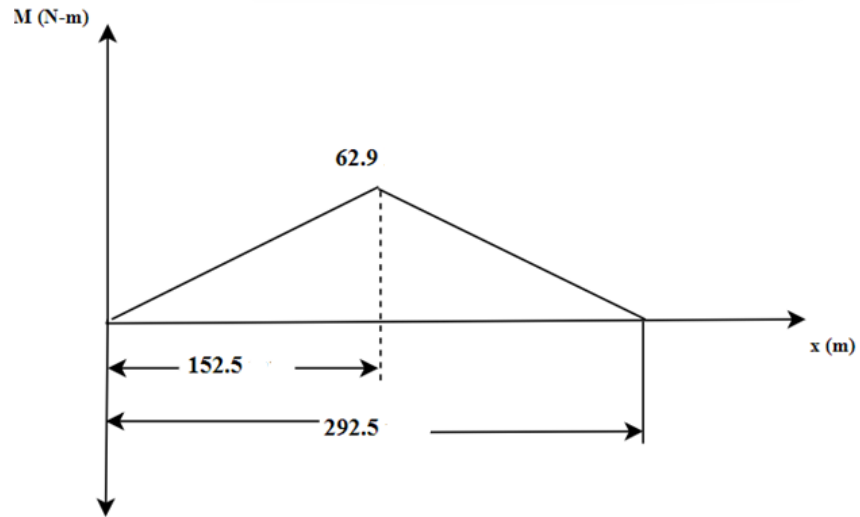


Fig. 2.28. Diagrama de momento flector en la mesa de trabajo. Cotas en mm.

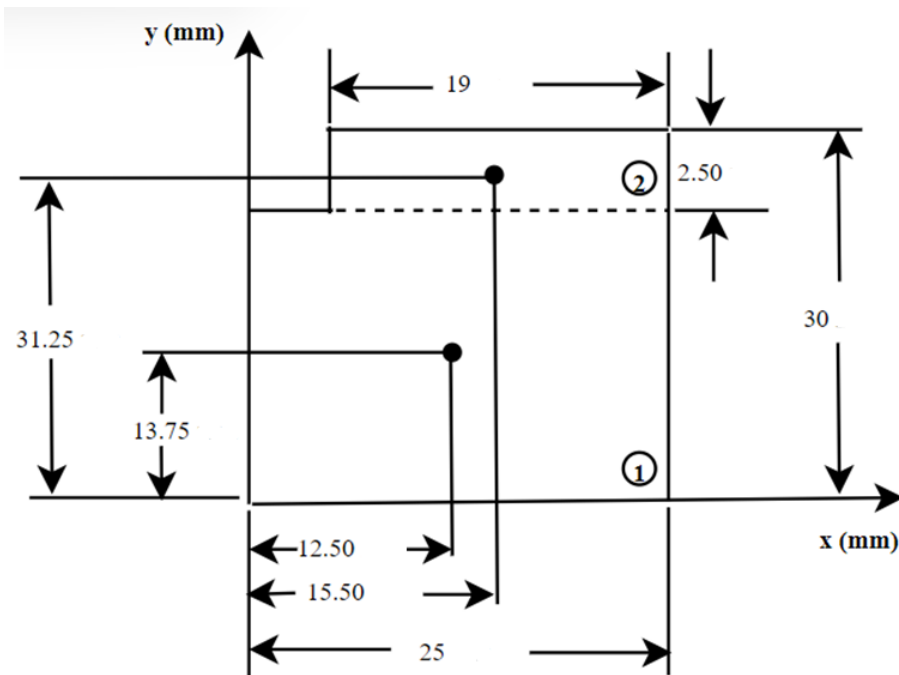


Fig. 2.29. Geometría de la sección transversal de mesa de trabajo. Cotas en mm.

Tabla 2.6. Resultados de la sección transversal de la mesa de trabajo.

Componentes	A, mm ²	\bar{X} , mm	\bar{Y} , mm	$\bar{X}A$, mm ³	$\bar{Y}A$, mm ³
Rectángulo 1	25 x 27.5 = 687.5	12.5	13.75	+8,593.75	+9,453.125
Rectángulo 2	19 x 2.5 = 47.5	15.5	31.25	+736.25	+1,484.375
Σ	735			+9,330	+10,937.5

Los primeros momentos de inercia tanto para X como para Y son $9,330 \text{ mm}^3$ y $10,937.5 \text{ mm}^3$, respectivamente. A continuación, se calculan los centroides de la figura compuesta:

Centroide con respecto a Y:

$$\bar{Y} = \frac{\sum \bar{Y}A}{\sum A} = \frac{10,937.5 \text{ mm}^3}{735 \text{ mm}^2} = 14.9 \text{ mm}$$

Centroide con respecto a X:

$$\bar{X} = \frac{\sum \bar{X}A}{\sum A} = \frac{9,330 \text{ mm}^3}{735 \text{ mm}^2} = \frac{9,330 \text{ mm}^3}{735 \text{ mm}^2} = 12.7 \text{ mm}$$

La ubicación de los centroides de la sección transversal de la mesa de trabajo se presenta en la Fig. 2.30.

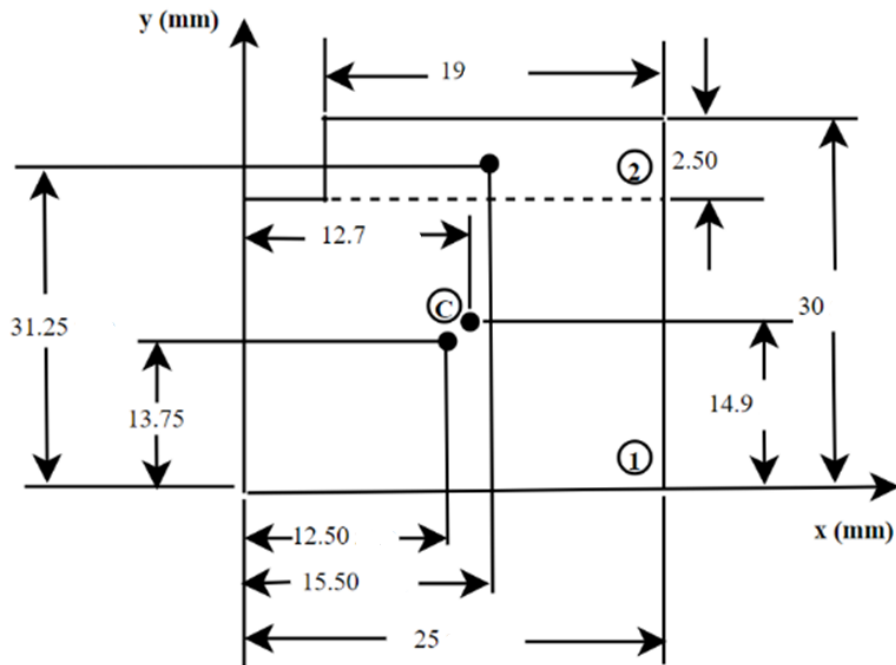


Fig. 2.30. Centroides, sección transversal, mesa de trabajo. Cotas en mm.

Ahora se encontrará la inercia con respecto al centroide en X, para esto se imaginará un eje que pasa por éste y se utilizará el teorema de ejes paralelos para encontrar el valor necesario. En primer lugar, se encontrarán las inercias con respecto al centroide X de cada sección de la Fig. 2.27 mediante la Ec. 2.9:

$$I_x = \bar{I}_x + Ad^2 \quad (2.9)$$

donde: \bar{I}_x es el momento de inercia relativa al centroide,

A es el área de la región plana, y

d es la distancia del nuevo eje al centroide de la región plana

Para la sección 1:

$$I_{x_1} = \frac{(25 \text{ mm})(2.5 \text{ mm})^3}{12} + (25 \text{ mm})(2.5 \text{ mm})[(14.9 - 13.75)\text{mm}]^2 = 44,236.04 \text{ mm}^4$$

Para la sección 2:

$$I_{x_2} = \frac{(19 \text{ mm})(27.5 \text{ mm})^3}{12} + (19 \text{ mm})(27.5 \text{ mm})[(31.25 - 14.9)\text{mm}]^2 = 12,722.56 \text{ mm}^4$$

Determinando el momento de inercia total:

$$I_x = I_{x_1} + I_{x_2} = 44,236.04 \text{ mm}^4 + 12,722.56 \text{ mm}^4 = 56,958.6 \text{ mm}^4$$

Se calculará el esfuerzo flexionante en la sección transversal de la mesa de trabajo mediante la Ec. 2.10:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.10)$$

donde: M es el momento flexionante máximo,

c es la distancia desde el centroide hasta la parte externa de la mesa, y

I es el momento de inercia en el centroide.

Sustituyendo:

$$\sigma = \frac{(62.9 \text{ N} - \text{m})[(30 - 14.9)\text{mm}] \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right)}{(56,958.6 \text{ mm}^4) \left[\left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right)\right]^4} = 16.7 \text{ MPa}$$

Si se toma en consideración que se utilizará el criterio de falla por fatiga de Tresca o Guest, se debe obtener el esfuerzo combinado por cortante máximo usando la Ec. 1.36:

$$\tau_{\text{máx}} = \sqrt{\left(\frac{16.7 \text{ MPa}}{2}\right)^2 + (0 \text{ MPa})^2} = 8.35 \text{ MPa}$$

Ahora se obtendrá la resistencia a la fluencia por medio de la teoría de falla de Tresca o Guest, donde se asumirá el factor de seguridad n igual a la unidad y la resistencia a la tracción de 460 MPa, debido a que la mesa de trabajo se elaborará de acero SAE 304. Utilizando la Ec. 1.37:

$$n = \frac{0.5(460 \text{ MPa})}{8.35 \text{ MPa}} = 27.5$$

Por medio del programa Autodesk Inventor se puede simular como las diversas cargas a las que se somete la mesa de trabajo influyen en esta. En la Fig. 2.31 se presenta el resultado obtenido.

Se visualiza por la paleta de colores que el comportamiento de los esfuerzos concuerda con los cálculos hechos y la simulación, debido a que el esfuerzo flexionante en la sección transversal de la mesa de trabajo resulta en 16.7 MPa, y en la simulación se presenta que los esfuerzos presentes van desde 0 hasta 21.5 MPa, es decir, dentro del intervalo. Por lo tanto, el diseño es el adecuado.

La mesa de trabajo tiene como función principal el proporcionar un soporte estable y preciso para la pieza de trabajo que se va a cortar y permitir movimientos en el plano XY. Para esto, se necesita una forma de sujetarla, por lo que se ha diseñado la mesa de trabajo con agujeros roscados de 4 mm para poder instalar pernos de esa medida. También se dispone de sujetadores para la pieza, lo cual se considera de ejemplo de

otras máquinas herramientas como la fresadora. Se presenta el ensamble final en la Fig. 2.32:

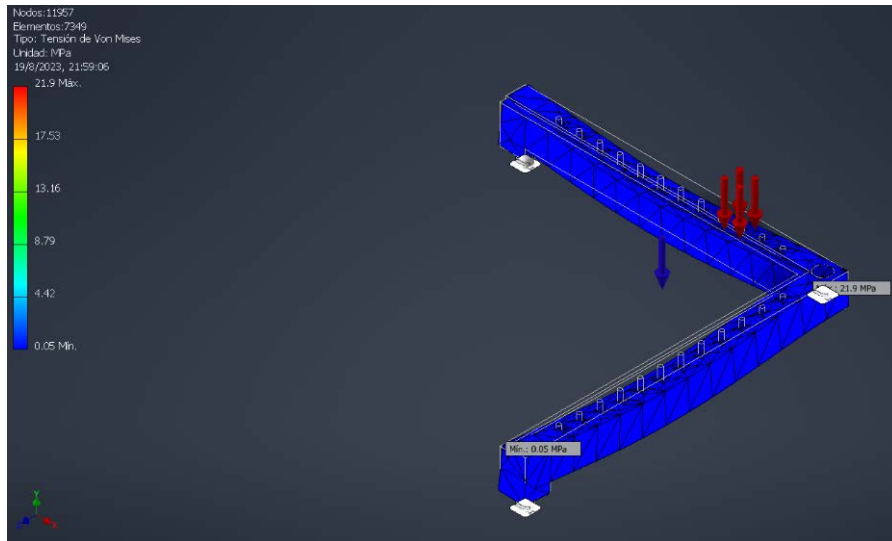


Fig. 2.31. Análisis de mesa de trabajo afectada por diferentes cargas.

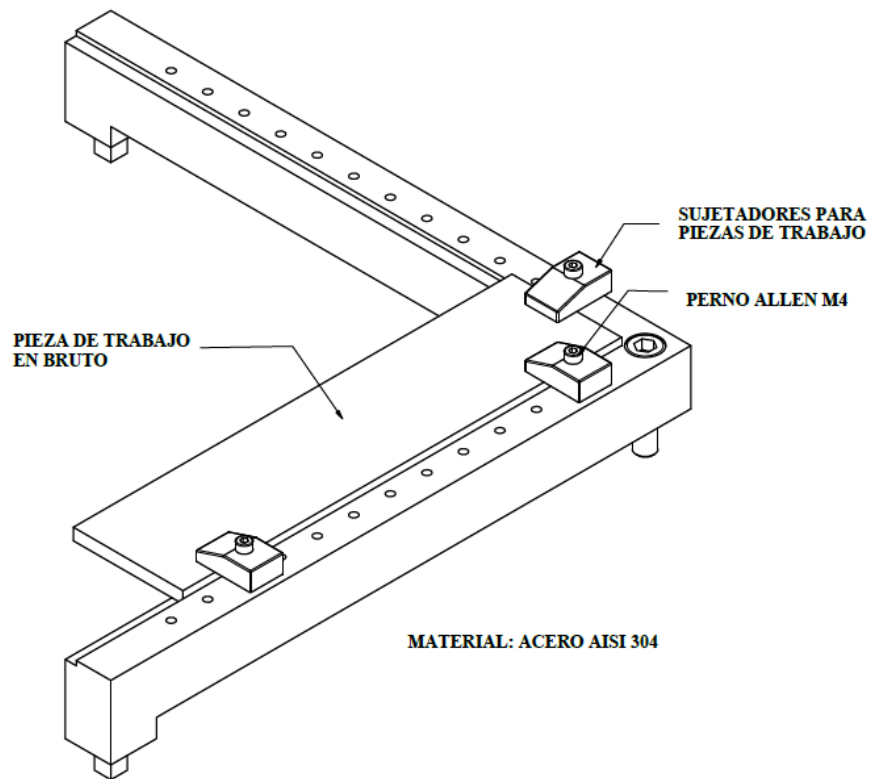


Fig. 2.32. Ensamble final de Mesa de trabajo con la pieza de trabajo montada.

La mesa de trabajo presenta una forma rápida y sencilla de sujetar la pieza sin tener el riesgo que se caiga o experimente algún tipo de movimiento durante el corte, que pueda provocar una deflexión y posterior rompimiento del hilo u obtener una superficie de corte irregular. La mesa de trabajo se podrá desmontar fácilmente del tanque de trabajo por medio de pernos ALLEN, los cuales hacen la función de restringir el movimiento de la mesa.

2.5. DISEÑO Y ANÁLISIS DE ESTRUCTURA DE SOPORTE

La estructura de soporte en una máquina de corte por electroerosión por hilo desempeña un papel crucial en el funcionamiento de la máquina. Su función principal es proporcionar una base sólida y estable para todos los componentes claves de la máquina, incluyendo la mesa de trabajo, el cabezal de corte y otros componentes mecánicos y eléctricos, donde se tiene una masa de estos componentes de 57.9 kg. La estructura se ha diseñado con tubo cuadrado de 2 pulg chapa 14 (1.8 mm) de hierro negro, donde las dimensiones se presentan en la Fig. 2.33.

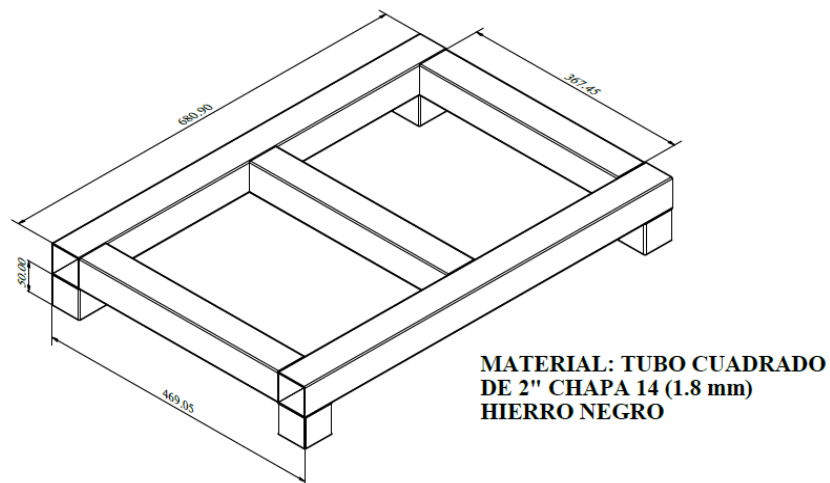


Fig. 2.33. Estructura de soporte de WEDM. Cotas en mm.

Las patas de la estructura de soporte están fijas y se someten a las cargas debido a su mismo peso y el de la máquina, de 6.7 kg y 57.9 kg, respectivamente. Se presenta

el comportamiento de la estructura al ser sometida a los esfuerzos por las cargas en la Fig. 2.34.

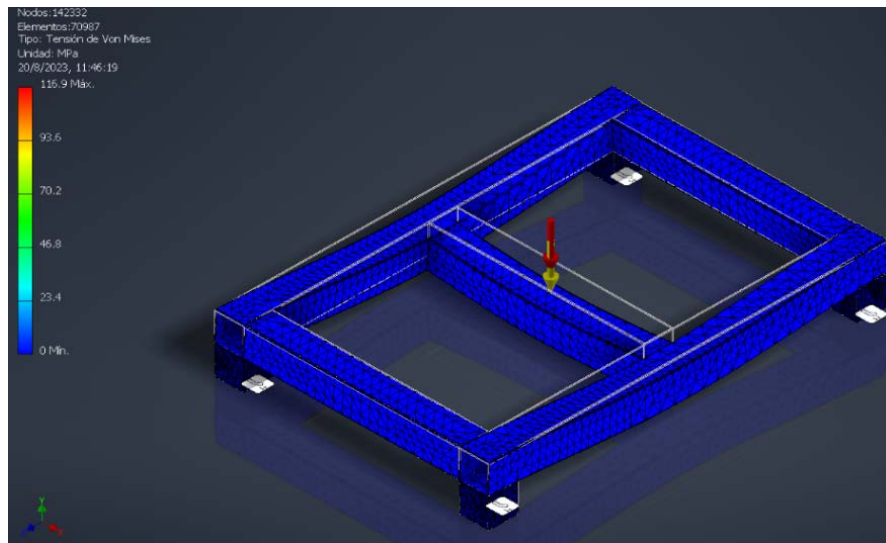


Fig. 2.34. Análisis de esfuerzos de Estructura de soporte de WEDM.

El material ha sido seleccionado sobre la base de términos económicos, debido a que el tubo cuadrado se vende mayormente en galvanizado o hierro negro, y dependiendo de la chapa. Sin embargo, al compararlos, el hierro negro es el más económico. Se visualiza en la paleta de colores que la estructura se comporta de una forma adecuada bajo las cargas, siendo el máximo esfuerzo en las uniones de los tubos de 116.9 MPa.

2.6. DISEÑO DE SISTEMA DE BOMBEO Y FILTRADO

El sistema de bombeo forma parte fundamental de los sistemas auxiliares que complementan a la máquina de corte por electroerosión mediante hilo. En el presente capítulo se describen los componentes seleccionados para conformar este sistema para lograr que el fluido dieléctrico sea bombeado y limpiado (ver Fig. 2.35).

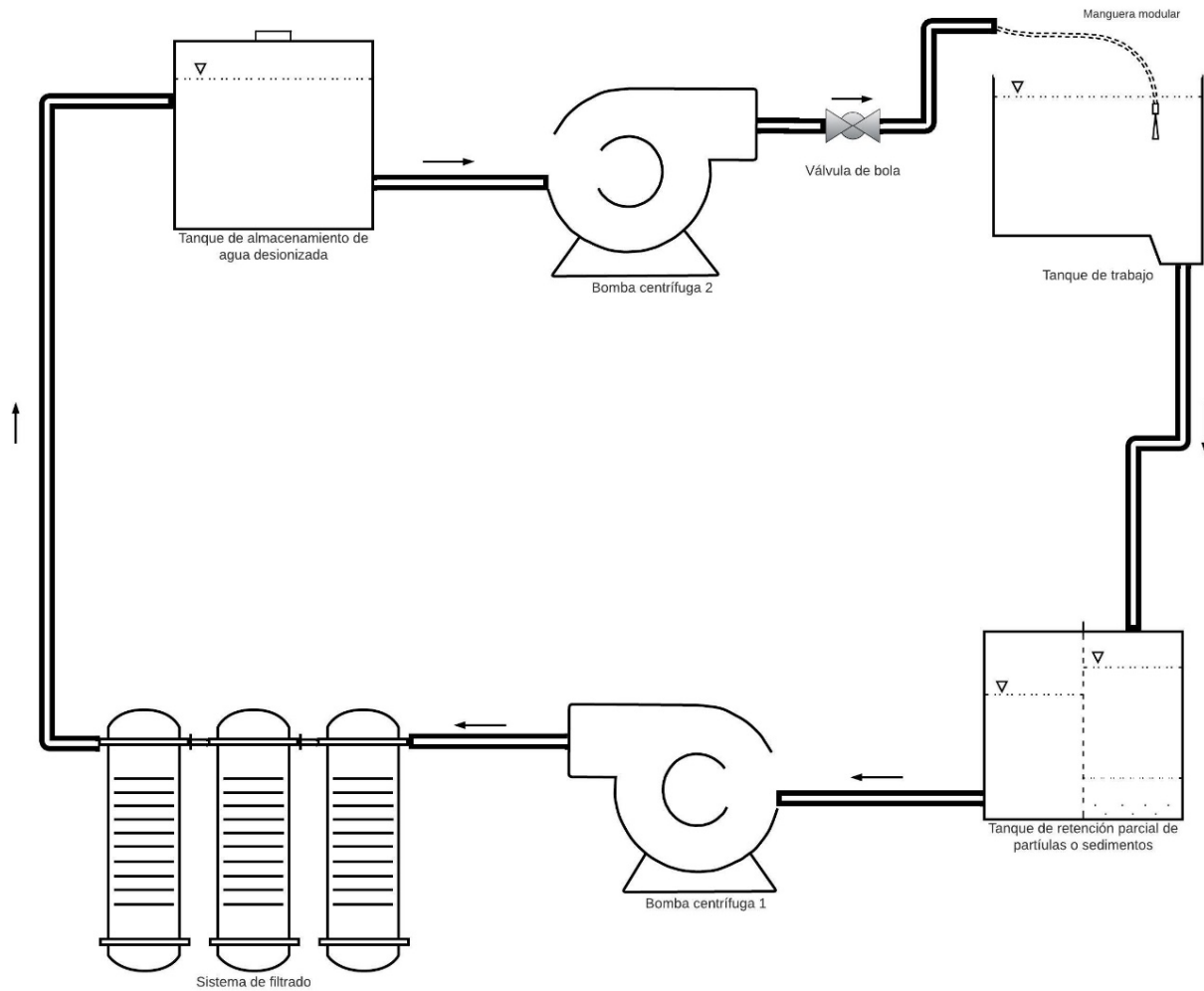


Fig. 2.35. Sistema de bombeo y filtrado propuesto.

2.6.1. AGUA DESIONIZADA COMO FLUIDO DIELECTRICO

Debido a las condiciones y parámetros de conductividad, temperatura de trabajo, tiempo de corte, entre otros, se podría diseñar un sistema de desionización de agua para ser utilizado como proveedor del fluido dieléctrico que se necesita durante el proceso. El diseño e implementación de un sistema de desionización de agua requiere una comprensión detallada de las características del agua que se va a tratar y de los objetivos del proceso de desionización. A continuación, se presentan algunos datos claves que se necesitan recopilar para diseñar dicho sistema, así [45]:

- Composición del agua de alimentación: Se debe conocer la concentración y tipos de iones presentes en el agua, como sodio, cloruro, calcio, magnesio, sulfato, carbonato,

etc. Esto ayudará a determinar el nivel de desionización necesario y las tecnologías adecuadas.

- Flujo y caudal: Se debe conocer la cantidad de agua que se procesará en un período de tiempo específico. Esto influirá en el tamaño y capacidad del sistema que se necesita diseñar.
- Niveles de pureza requeridos: Definir los estándares de pureza que se desean o requieren lograr en el agua tratada. Puede ser necesario eliminar todos los iones, o simplemente reducir su concentración por debajo de ciertos límites.
- Tecnologías de desionización: Existen varias tecnologías disponibles para la desionización, como intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, etc.
- Diseño del sistema: Determinar cómo se organizarán las unidades de desionización en el sistema. Esto incluye la disposición de los diferentes equipos y cómo se conectarán para lograr el proceso deseado.
- Mantenimiento y regeneración: Si se está utilizando tecnologías como intercambio iónico, es importante tener en consideración cómo se regenerarán los medios de intercambio una vez que estén saturados con iones. Esto implica considerar los productos químicos y el proceso necesario para regenerar los medios.
- Futura expansión: Si se tiene posibilidad de que la demanda de agua desionizada aumente en el futuro, es recomendable dejar un margen para la expansión del sistema.
- Control y monitoreo: Diseñar un sistema de control y monitoreo para supervisar el proceso de desionización, la calidad del agua tratada y para considerar medidas correctivas si es necesario.
- Costos: Calcular los costos asociados con la adquisición, instalación, operación y mantenimiento del sistema de desionización.
- Consideraciones medioambientales: Evaluar el impacto ambiental del proceso de desionización y asegurarse de cumplir con las regulaciones y normativas locales.

Conociendo de manera general los requisitos que implicaría diseñar e implementar un sistema de desmineralización de agua, se concluye que el diseño se robustecería demasiado, implicando agregar más variables que controlar y registrar. Por tal motivo, también se considera adquirir únicamente el agua desmineralizada, con lo que se evitaría

incrementar así la cantidad de componentes en el diseño de la máquina, y por ende, el incremento en los gastos de fabricación de ésta misma. Para poder determinar si es factible adquirir únicamente el agua desmineralizada o diseñar un sistema como tal, se tomarán en consideración diferentes variables, las cuales se deben de abordar a fin de establecer la factibilidad técnica y económica de esta consideración.

Para poder determinar la factibilidad de la compra del agua desmineralizada, se han hecho algunas consideraciones como utilizar un volumen aproximado de 28 galones de fluido dieléctrico. También se ha considerado el tiempo en el cual el agua desmineralizada pierde sus propiedades dieléctricas debido a las condiciones presentes en el proceso, mantenimiento que conllevaría el sistema de desionización, mantenimiento de las resinas, tiempo de la desmineralización del agua (tiempo sin proceso de electroerosión) y accesibilidad de este fluido cerca del área de operación de la máquina de corte por electroerosión.

Como se mencionó anteriormente, una de las variables más importantes para elegir si es más conveniente comprar el agua desmineralizada o diseñar el sistema de desmineralización es la del tiempo de uso del fluido dieléctrico, es decir, conocer cuánto tiempo de uso se puede dar al fluido dieléctrico antes de que este incremente su conductividad eléctrica a valores fuera del intervalo adecuado (en este caso, entre 15 y 25 microSiemens).

El tiempo en el cual el agua desmineralizada incrementa su conductividad depende de varios factores y de cómo estos varíen según las configuraciones que se hagan previamente o durante el proceso de electroerosión. Los factores más influyentes son el material del hilo metálico y de la pieza de trabajo, los valores de voltaje y corriente, así también de la temperatura del dieléctrico.

Considerando que el material de la pieza de trabajo es un acero SAE 1045 y el material del hilo metálico es latón, se estima que el proceso de corte tarde alrededor de 1 hora en ejecutarse, y por ser un proyecto de uso didáctico, se ha considerado que se utilizaría alrededor de 36 h en el mes; por lo tanto, se debería procesar agua para desmineralizarla al menos dos veces en el mes y esto debido a que según referencias consultadas, un fluido dieléctrico puede llegar mantener sus condiciones dieléctricas un

máximo de 20 h por las condiciones a las que es sometido durante el proceso de electroerosión.

Por lo tanto, se considera que es más viable la compra del agua desmineralizada que tener un equipo para desmineralizar el agua, ya que el tiempo de utilización sería mínimo para lo que costaría e implicaría su diseño y mantenimiento. Agregado a esto, en la Universidad de El Salvador, específicamente en la Facultad de Química y Farmacia, se cuenta con un equipo de desmineralizado de agua, el cual abastece a sus laboratorios. Por lo que, para los fines didácticos de este proyecto, y por la naturaleza de la tecnología a utilizar, resulta una excelente solución para la adquisición del agua desmineralizada [46].

2.6.2. SELECCIÓN DE BOMBAS HIDRÁULICAS

Sobre la base de la investigación realizada para determinar el tipo de bombas hidráulicas más adecuadas para la máquina de corte por electroerosión propuesta, se considera la decisión de elegir dos bombas electrohidráulicas centrifugas de baja potencia: una para la circulación del fluido dieléctrico a través del sistema de filtrado y otra para la entrega del fluido en el tanque de trabajo. Cada una de esta cuenta con características de funcionamiento suficientes para que se ejecute el proceso de bombeo del fluido dieléctrico.

La bomba seleccionada para hacer fluir el líquido dieléctrico a través del sistema de filtrado es una bomba centrifuga rotodinámica de carcasa circular y flujo radial de un solo paso, mientras la bomba seleccionada para suministrar el dieléctrico desde el tanque reservorio hasta el tanque de trabajo es una bomba centrifuga rotodinámica de carcasa circular y flujo radial de dos pasos (multietapa). En ambas bombas, la succión y descarga están a 90° y su aspiración es simple, de rodete cerrado con difusor tipo turbina, montada con eje horizontal. Se selecciona este tipo de bombas debido a que son ideales para el transporte de fluidos poco viscosos y con sólidos en suspensión, además de ser de bajo mantenimiento y de elevado rendimiento para un intervalo bajo de caudal [47].

La bomba seleccionada para el sistema de filtrado es una bomba centrífuga Versa Jet, la cual es adecuada para presurización de redes cerradas y distribución de agua entre 20 a 50 psi y soporte de temperatura de un poco más de 50 °C (ver Fig. 2.36) [48].



Fig. 2.36. Bomba de chorro Franklin Electric serie Versa Jet FVJ05CI [48].

Las características técnicas de esta bomba que se utilizará para hacer fluir el fluido dieléctrico a través de los filtros se presentan a continuación:

- Tapón de drenaje integrado para mantenimiento,
- Voltaje: 1 fase, 115/230 V,
- Motor de 1/2 HP, y
- Suministro 20-40 o 30-50 psi.

Para la máquina de corte por electroerosión propuesta, no se requiere de un alto caudal ni de alta potencia, y además al no existir la necesidad de elevar el fluido dieléctrico a más de 1 metro, se considerarán las condiciones de operación mínimas para la bomba modelo FVJ05CI.

BAXEDM recomienda para la circulación del fluido dieléctrico a través del sistema de filtrado una bomba de 43.5 psi de presión. Se buscan los parámetros más adecuados en la Tabla 2.7.

De la Tabla 2.7, para una bomba modelo FVJ05CI con una presión de descarga de 50 psi, se obtienen los datos siguientes:

- Rosca hembra NPT en lado de descarga de 1 pulg
- Rosca hembra NPT en lado de succión de 1.25 pulg
- Boquilla "B" (estándar, baja presión)

- Elevación de succión de 1.5 m
- Caudal de 5.3 GPM

Tabla 2.7. Selección de boquilla de bomba FVJ05CI [48].

Versa Jet Descarga 1 pulg Succión 1.25 pulg FNPT			Presión de Descarga, psi						Presión a válvula cerrada, psi
Modelo	Boquilla	Elevación Total de Succión, pies	10	20	30	40	50	60	
FVJ05CI	B (Estándar)	5	10.9	10.5	10.1	9.5	5.3	2.3	71
		10	9.5	9.1	8.8	8.3	4.5	1.8	
		15	8.1	7.8	7.4	7.0	3.7	1.3	
		20	6.3	6	5.8	5.5	3.0	0.7	
		25	4.4	4.3	4.2	4.0	2.2	-	

Para la selección de la bomba que bombeará el dieléctrico del tanque reservorio de dieléctrico limpio, se ha considerado el fin didáctico que se le dará a la máquina, y que debido a ello no se cortarían materiales con espesores considerables, por lo que no es indispensable que la presión de la bomba sea mayor a 8 bares [49].

Esta bomba está diseñada para el transporte de agua y otros fluidos de propiedades químicas similares. Es útil para aumentar la presión de suministro de agua, como equipo de apoyo y más aplicaciones. Adecuada para transporte a tanques elevados o simplemente de un depósito a otros sin diferencia de alturas considerables (ver Fig. 2.37).



Fig. 2.37. Bomba centrífuga multietapa LEO modelo 2ACm300H [49].

Las características técnicas de esta bomba centrífuga se presentan a continuación:

- Cuerpo de hierro fundido y soporte con tratamiento especial antióxido.
- Eje de acero inoxidable SAE 304
- Temperatura del líquido de trabajo: > 40 °C
- Protector térmico incorporado para motor monofásico
- Amperaje de consumo: 8.2 A
- Potencia: 3 KW / 4 HP
- Succión máxima: 8 m
- Altura máxima de elevación: 70 m (7 bar)
- Conexión Aspiración: 1 ½ pulg
- Conexión Impulsión: 1 1/4 pulg
- Caudal máximo entregado: 220 L/min (12,000 L/h – 12 m³/h)

BAXEDM recomienda que para esta bomba se tenga al menos una presión de suministro de 8 bar, sin embargo, ya que la máquina será para fines didácticos, se decidió una presión entre 6 y 7 bar, ya que el chorro de fluido también estará sumergido en el tanque de trabajo, y por lo tanto existirá una pérdida de carga asociada a tal efecto.

Para determinar si la bomba seleccionada llevará a cabo el desalojo de las partículas metálicas presentes en el gap durante el proceso de corte, se consulta la información proporcionada por el fabricante, en este caso, la curva de rendimiento hidráulico mostrada en la Fig. 2.38.

Se observa que para la curva de rendimiento hidráulico del modelo 2ACm300H, se tiene un máximo valor de carga dinámica de aproximadamente 65 m, lo que equivale a un caudal de 40 l/min, lo cual se considera suficiente.

Es importante destacar que la mayoría de referencias consultadas en el apartado del sistema de bombeo no citan un valor de caudal fijo a mantener para el proceso de electroerosión, debido a que este dato dependerá de factores como la velocidad de corte, velocidad de transmisión del hilo, material de la pieza de trabajo y espesor de esta. Para determinar el caudal adecuado, es necesario realizar pruebas, las cuales no se pueden realizar por no disponer del equipo necesario, y sumado a que los caudales obtenidos durante el proceso de investigación son para aplicaciones industrial, muy diferente al fin

didáctico que se busca para este proyecto. Por tales motivos, se considera que la propuesta de diseño del sistema de bombeo y filtrado cumplirán con los requisitos necesarios para garantizar el correcto desarrollo del proceso de electroerosión y que además los componentes seleccionados proporcionarán un margen de configuración, de tal forma que se puedan modificar los parámetros hasta llegar a las condiciones ideales de trabajo.

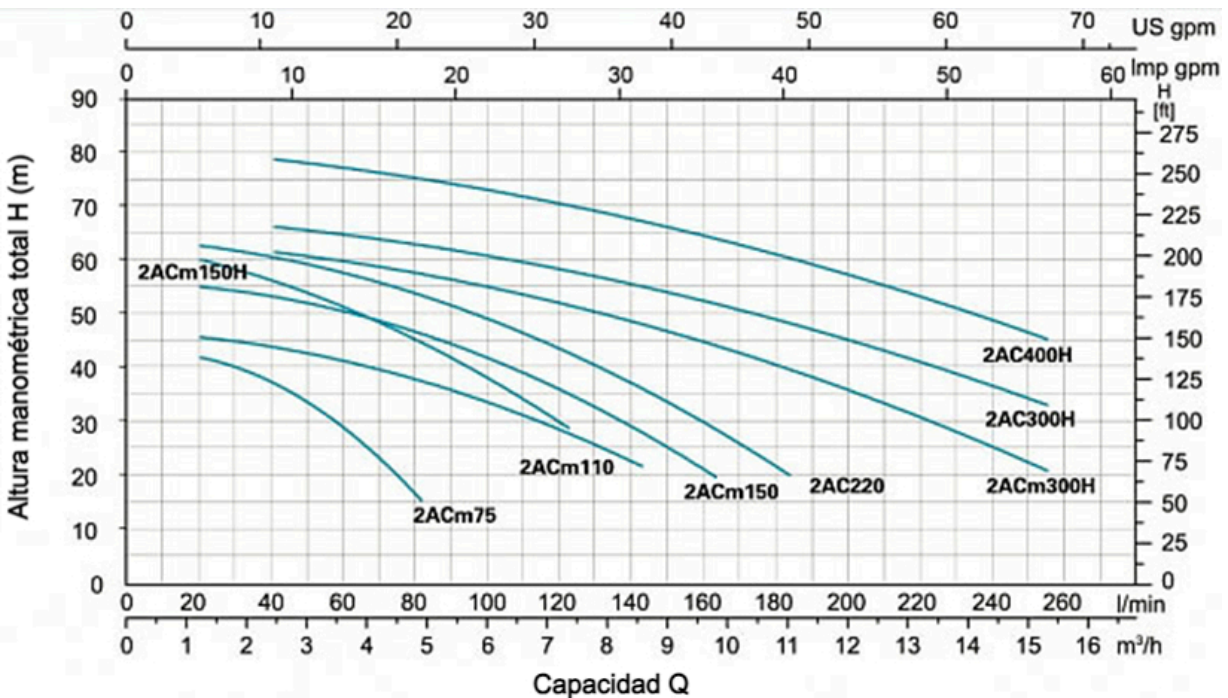


Fig. 2.38. Curvas de rendimiento hidráulico Bombas LEO [49].

2.6.3. SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO DIELECTRICO

Como parte del diseño del sistema de bombeo y filtrado del fluido dieléctrico, es necesario agregar accesorios complementarios como tuberías de PVC, mangueras tipo industrial reforzadas, uniones y válvulas reguladoras de flujo.

Para el transporte del fluido dieléctrico se considera el uso de mangueras tipo industrial plástica transparente de 3 capas reforzadas con trenzado de polyester, la cual presenta alta resistencia y durabilidad (ver Fig. 2.39).



Fig. 2.39. Manguera industrial Tramaflex [49].

Las especificaciones técnicas de la manguera a utilizar para el transporte del fluido dieléctrico se presentan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Especificaciones técnicas de manguera Tramaflex [49].

Propiedad	Valor especificado
Temperaturas de operación, °C	10 a 50
Presión de trabajo a 25 °C, psi/bar	65 / 5
Espesor de pared, mm	2.10 a 2.20
Diámetros, pulg	De 1/4 a 1½

Se selecciona tubería de PVC (Policloruro de vinilo) para los tramos donde sea necesario conectar componentes del sistema (ver Fig. 2.40).



Fig. 2.40. Tubería PVC [49].

Las especificaciones técnicas de la tubería PVC para la conexión entre componentes se presentan en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Especificaciones técnicas tubería PVC [49].

Propiedad	Valor especificado
Temperaturas de operación, °C	-20 a 50
Presión de trabajo a 25 °C, psi/bar	315 / 21.7
Espesor de pared, mm	2.0 a 2.1
Diámetros, pulg	De 1/2 a 1½

La válvula de bola de alta presión controlará el flujo de dieléctrico que se suministrará (ver Fig. 2.41).



Fig. 2.41. Válvula de bola 1 pulg [49].

Las características técnicas de la válvula de bola para el control del flujo de fluido dieléctrico se presentan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Especificaciones técnicas Válvula de bola inoxidable [49].

Propiedad	Valor especificado
Temperaturas de operación, °C	-25 a 180
Presión de trabajo a 25 °C, bar	61.8
Diámetro, pulg	1

Para el suministro del fluido dieléctrico a la pieza de trabajo durante el proceso de corte se utilizará manguera modular de refrigeración Loc-Line (ver Fig. 2.42).

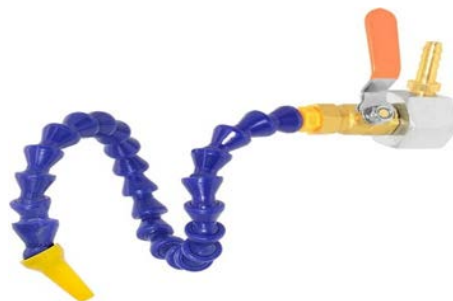


Fig. 2.42. Manguera Loc-Line [50].

La manguera modular de refrigeración Loc-Line permite la personalización y adaptabilidad de la refrigeración en diferentes entornos y aplicaciones. Está compuesta por una serie de módulos que se pueden ensamblar de manera fácil y rápida para crear

soluciones de refrigeración personalizadas. Cada módulo se conecta mediante una junta flexible, lo que permite una amplia gama de posibilidades de configuración (ver Fig. 2.43) [50].



Fig. 2.43. Componente de manguera Loc-Line ¼ pulg [50].

Se decide utilizar este tipo de manguera debido a que puede personalizarse, de tal forma que pueda satisfacer las necesidades de suministro de fluido dieléctrico. También se selecciona un juego de boquillas con diferentes formas y de diferentes diámetros con el propósito de dar mayor grado de configuración del chorro de fluido dieléctrico.

Es importante destacar que la presión y la velocidad con la que se suministre el fluido dieléctrico a la pieza de trabajo durante el proceso de corte tiene influencia en el proceso de corte. Una rápida evacuación de las partículas metálicas, tanto del hilo como de la pieza de trabajo, es crítico para obtener mejores acabados superficiales y beneficiando también a la refrigeración del proceso.

2.6.4. TANQUES DEL SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE DIELECTRICO

Se consideran tres tanques en el sistema de circulación del fluido dieléctrico. El primero es el tanque de trabajo en el cual se sumergirán la pieza de trabajo y parte del cabezal que contiene al sistema de alimentación de hilo. El segundo tanque es de

sedimentación, el cual está diseñado de tal manera que esté formado por dos compartimentos: uno donde se depositará el fluido dieléctrico proveniente del tanque de trabajo el cual presentará partículas metálicas en suspensión y cualquier residuo resultante del proceso que se retendrán parcialmente en una esponja ubicada al fondo de este y un segundo compartimento donde se depositará parte del agua que se vierta a través de un rebosadero ubicado en la parte divisoria de dicho tanque de retención. Un tercer tanque de almacenamiento del fluido dieléctrico filtrado el cual servirá como tanque de abastecimiento para todo el sistema. El tanque de trabajo por ser el que estará expuesto directamente al proceso de electroerosión se diseñó y definió anteriormente con mejores propiedades mecánicas.

En el tanque de sedimentación se retendrán parcialmente partículas metálicas que sedimentarán al fondo de este. Contendrá en uno de sus compartimentos una esponja en la cual quedarán algunas partículas metálicas y residuos del proceso. La esponja se podrá reutilizar y/o reemplazar. En este caso se utilizarán tres (ver Fig. 2.44).



Fig. 2.44. Esponja absorbente [50].

El tanque de sedimentación tendrá 30 cm de ancho, 45 cm de largo y 20 cm de altura. Las dimensiones del rebosadero son 15 cm de largo y 5 cm de altura, y las dimensiones de cada esponja absorbente son 15 cm de ancho, 45 cm de largo y 5 cm de altura.

El tanque de abastecimiento se encargará de almacenar el fluido dieléctrico cuando ya haya pasado por el sistema de filtrado. A partir de este tanque se abastecerá

al depósito de trabajo. Sus dimensiones son 30 cm de ancho, 40 cm de largo y 20 cm de altura.

El tanque de sedimentación y el de abastecimiento contarán cada uno con su respectiva tapa. Algunas referencias consultadas sostienen que, para diseños de este tipo de máquinas de corte por electroerosión mediante hilo para fines didácticos, se puede usar volúmenes de fluido dieléctrico desde 20 hasta 40 litros [51].

Para la presente propuesta de diseño, al estar el sistema de circulación compuesto por tres tanques, un sistema de filtrado, y considerando las dimensiones y características de funcionamiento del sistema de bombeo en general, se ha decidido utilizar 60 litros de fluido dieléctrico en el sistema.

2.6.5. SISTEMA DE FILTRADO

Para una máquina de carácter didáctico se recomienda realizar un filtrado de partículas de tamaño reducido, es decir, que el tamaño de partícula se encuentre en el orden de los micrometros (μm) [52].

Es por esto que es importante tener claridad del tamaño de las partículas resultantes del proceso, tanto de la pieza de trabajo como del hilo metálico, ya que parte de estas son evaporadas por la alta temperatura a la que se expone y su enfriamiento brusco, aunque las restantes quedan en suspensión en el fluido dieléctrico.

Se ha investigado sobre el tamaño de las partículas resultantes del proceso de corte, tanto de la pieza de trabajo como del hilo metálico. Cabe aclarar que los tamaños de partículas dependerán de diversos factores como las composiciones químicas de los materiales de la pieza de trabajo y del hilo metálico, el amperaje, el voltaje, el tiempo de los pulsos eléctricos, etc.

En las referencias consultadas se emplearon diferentes análisis y técnicas con las cuales se obtuvieron diferentes resultados. Todas afirman que mientras mayor sea la concentración de partículas en el gap, mayores serán los tamaños de partículas tanto de la pieza de trabajo como del hilo metálico. Las fuentes consultadas citan que se puede considerar un valor promedio de 10 μm . Con la aplicación de otros métodos científicos

complejos, se determina que las partículas de hierro tienen un tamaño entre 1 a 20 μm y el tamaño de las partículas de una aleación de Cu-Zn proveniente del hilo metálico están entre 5 hasta 35 μm . Por lo tanto, para el presente trabajo de graduación, se estima que los tamaños de partícula rondarán entre 1 a 20 μm para la pieza de trabajo y el hilo metálico.

Existen filtros destinados a los procesos de corte por electroerosión mediante hilo y que utilizan agua desmineralizada como fluido de trabajo, aunque para este proyecto se ha considerado componentes accesibles para ser adquiridos, siempre eficientes.

Para el presente trabajo de graduación, se selecciona el filtro triple de ultrafiltración AguaPlusRO, un conjunto de tres filtros para agua colocados en serie con una capacidad de filtración diferente con el propósito de retener la mayor cantidad de partículas suspendidas en el fluido de trabajo. El conjunto cuenta con un filtro principal o de entrada de 1 a 20 μm , un filtro intermedio de 1 a 5 μm y un tercer filtro de salida de capacidad de hasta 0.1 μm , con la cual se garantizará el correcto filtrado de partículas suspendidas y cualquier residuo presente en el fluido dieléctrico (ver Fig. 2.45).



Fig. 2.45. Filtro triple de ultrafiltración AguaPlusRO [52].

Las características del sistema de filtrado encargado de mantener limpio el fluido dieléctrico se presentan en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Características del filtro triple AguaPlusRO [52].

Material de filtros	Polipropileno, carbón activado y compuestos poliméricos
Material cartuchos	Plásticos
Dimensiones	28 x 36 x 12 cm
Temperatura de operación	10 a 45 °C
Max. Presión de operación	120 psi
Vida útil	3 a 6 meses

Tomando en consideración los grados de filtración y considerando la investigación del tamaño de partículas presentes en el gap, se concluye que el sistema de filtrado seleccionado se encuentra dentro de los intervalos de tamaño de partículas presentes y estará en la capacidad de ofrecer una buena filtración del fluido dieléctrico. Algunas referencias consultadas de fabricantes de filtros estiman que las pérdidas de carga generados por los filtros rondan los 0.3 bares, lo que es admisible para el proyecto, ya que la selección de bombas se realizó teniendo esto en consideración [53].

3. DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control para una máquina de corte por electroerosión consisten en un conjunto de elementos eléctricos que monitorean varios parámetros durante todo el proceso de corte, y con los datos obtenidos, realizan cálculos para regular variables importantes durante el proceso y obtener los mejores resultados.

Se han dividido en dos los sistemas de control de la máquina de corte por electroerosión, sobre la base de su complejidad: el sistema de control de movimientos (el más complejo) y el sistema de control de bombeo y filtrado del líquido dieléctrico (el menos complejo).

3.1. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE MOVIMIENTOS

Diseñar el sistema de control de movimientos se vuelve una tarea muy compleja debido a que los movimientos en los ejes X y Y están en función de las condiciones de corte, lo que lo convierte en un proceso variable que requiere mucho tiempo de diseño y pruebas, además de conocimientos avanzados en electricidad y electrónica. Es por ello que en el presente trabajo de graduación se ha decidido seleccionar los componentes electrónicos que conformarán el sistema de control de movimientos para la máquina de corte por electroerosión propuesta.

La arquitectura del sistema de control de movimientos ha sido seleccionada del proveedor de equipos para la construcción casera de máquinas electroerosionadoras por hilo, BAXEDM. Este proyecto con sede en Países Bajos está a cargo de un ingeniero eléctrico, y en sus palabras “BAXEDM es una empresa emergente especializada en la introducción en el mercado de productos que permiten a los usuarios construir y diseñar sus propias máquinas de electroerosión personalizadas” [54].

El sistema de control de movimientos seleccionado para implementarse en la máquina de corte por electroerosión se presenta en la Fig. 3.1.

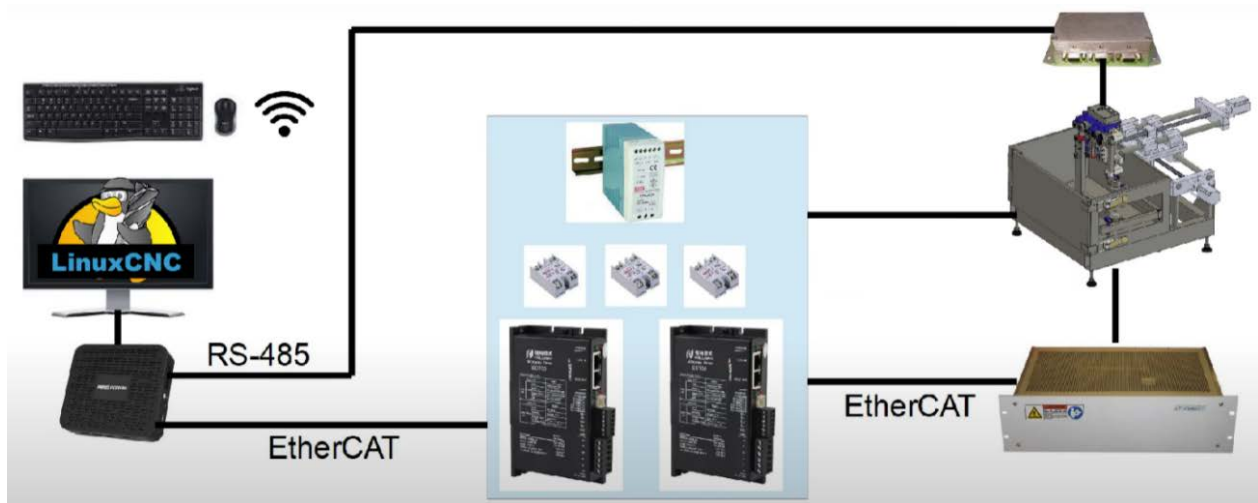


Fig. 3.1. Sistema de control seleccionado [54].

Los componentes clave son cuatro: el generador de pulsos BX18 de BAXEDM, una computadora (con teclado y ratón inalámbricos), el controlador C-Arc y los controladores para los servomotores.

Así también destacar que esta arquitectura utiliza el sistema operativo Linux CNC para el control en tiempo real y EtherCAT, que es un protocolo de comunicación en tiempo real a través de Ethernet. Esto requiere que, en lugar de utilizar controladores para servomotores estándar, se utilicen unidades habilitadas para EtherCAT (ver Fig. 3.2).

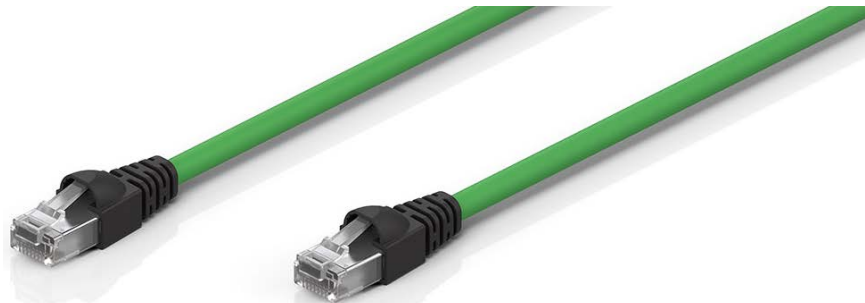


Fig. 3.2. Cable EtherCat/Ethernet [54].

Se utiliza el generador de pulsos BX18 de BAXEDM, equipado con EtherCAT. El controlador C-Arc se conecta a la computadora a través de un cable FTDI RS485, que es un bus de comunicación serial robusto con compatibilidad electromagnética (ver Fig. 3.3).



Fig. 3.3. Cable Adaptador USB a RS485 FTDI [54].

El generador de pulsos BX18 funciona con voltajes de 110 a 230 voltios. En la parte trasera tiene salidas de energía EDM de alto voltaje necesarias para soportar corrientes de salida elevadas de 30 A: una se conecta a la pieza de trabajo y la otra se conecta al hilo. La polaridad no se especifica en el generador de pulsos porque la salida se puede cambiar entre electrodo positivo o electrodo negativo (ver Fig. 3.4).



Fig. 3.4. Salidas de corriente de BX18 [54].

a) Generador de pulsos BX18

El generador de pulsos BX18 EDM está equipado con EtherCAT y viene con componentes de software para LinuxCNC que permite la realización de máquinas de electroerosión personalizadas con una arquitectura eléctrica muy sencilla (ver Fig. 3.5) [55].



Fig. 3.5. Generador de pulsos BAXEDM BX18 [55].

Las características más relevantes de este generador de pulsos se presentan a continuación:

- Fuente de corriente conmutada de alta eficiencia,
- Intervalo de tensión de entrada de red 100 – 240 V 50/60 Hz,
- Interfaz EtherCAT,
- Polaridad de salida por control de software,
- Integración con LinuxCNC,
- Control de la configuración del generador de pulsos desde el código G,
- Parámetros de arco totalmente configurables,
- Corriente de arco de hasta 30 A,
- Frecuencia de corte hasta 200 kHz,
- Modo de frecuencia ISO,
- Modo ISO-Pulse (misma cantidad de energía en cada golpe de arco),
- Entrada de detección diferencial para mediciones de la tensión del arco,
- Todas las interfaces de E/S están aisladas galvánicamente,
- Modo de búsqueda del borde de la pieza,
- Salida de 12 V conmutada para alta tensión / luz de advertencia de EDM activa, y
- Actualizaciones de firmware a través de interfaz USB.

Las especificaciones técnicas del generador de pulsos BAXEDM BX18 se presentan en la Tabla 3.1.

Los objetos de datos de proceso son variables de datos que puede leer el ETHERCAT maestro. El generador de pulsos comprueba la validez de los objetos de datos de proceso de salida para el tiempo de encendido, el tiempo de apagado y la corriente. Si alguno de estos o una combinación conduce a un ajuste no válido del

generador de pulsos, la salida EDM se desconecta y se activa el bit #0 en la entrada de estado.

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del generador de pulsos BX18 [55].

Característica	Especificación
Voltaje de entrada	110-240 V AC
Corriente de salida	2-30 A, ajustable en 0.1 A
Voltaje máximo de salida	150 V
Modos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • ISO-Frecuencia • ISO-Pulso • Búsqueda de bordes
Tiempo de encendido (descarga)	1-100 μ s, en pasos de 1us
Tiempo de apagado	1-100 μ s, en pasos de 1us
Temperatura de funcionamiento	0 a 35 °C
Temperatura de almacenamiento	-10 a 40 °C
Humedad relativa	20 a 80%, sin condensación
Intervalo de presión del aire	950 a 1050 hPa

La combinación de tiempo de encendido, tiempo de apagado y corriente sólo es válida si:

- La corriente debe estar entre 2 y 30 A,
- El tiempo de encendido debe estar entre 1 y 100 μ s,
- El tiempo de apagado debe estar entre 1 y 100 μ s,
- La frecuencia debe ser menor o igual que 200 kHz, y
- El ciclo de trabajo debe ser menor al 50%. El ciclo de trabajo se define como tiempo de encendido / (tiempo de encendido + tiempo de apagado).

La corriente debe estar por debajo de la línea especificada en el gráfico de la Fig. 3.6.

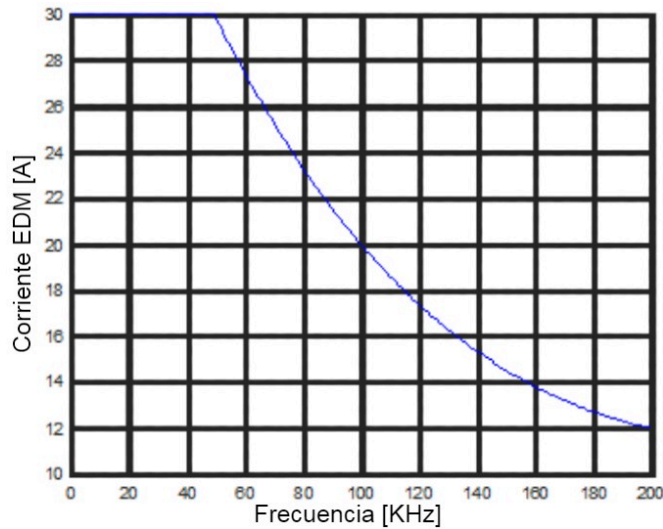


Fig. 3.6. Límites operacionales del generador de pulsos BX18 [55].

b) Controlador C-Arc

El controlador C-Arc es una solución de control digital para controlar la tensión y la velocidad del hilo de electroerosión en una máquina de electroerosión por hilo personalizada (ver Fig. 3.7) [56].



Fig. 3.7. Controlador C-Arc de BAXEDM [56].

El controlador funciona mediante la lectura de una celda de carga que detecta la tensión en el alambre y emite los valores de consigna para los servos de tensión y velocidad del alambre en el arco en C. Sus características se listan a continuación:

- Control digital;
- Interfaz industrial RS-485 aislada ópticamente, con terminación configurable;

- Amplificador de célula de carga de gran ancho de banda integrado, con gran robustez frente a la radiación EMC de EDM;
- Controlador PID+ totalmente configurable para el control de la fuerza de tensión;
- Calibración de la tensión del hilo;
- Calibración de la velocidad del hilo;
- Admite varios tipos de servo (consulte el manual para obtener más información);
- Interfaz gráfica de usuario para PC de fácil comprensión;
- También se puede utilizar con un simple terminal serie y comandos ASCII legibles por el usuario:
- Entrada digital aislada para habilitar/deshabilitar el control del hilo;
- Detección automática de rotura de cable y señalización mediante una salida digital aislada ópticamente;
- Memoria para el parpadeo de los ajustes predeterminados;
- Ajuste de la compensación de la celda de carga;
- Actualización del firmware mediante un cable USB estándar; y
- Carcasa metálica totalmente blindada.

Las especificaciones técnicas del controlador de tensión y velocidad del hilo, BAXEDM C-Arc, se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas C-Arc [56].

Características	Especificaciones
Voltaje de entrada	5 V DC, +/- 5%
Corriente de entrada	Menos que 100 mA
Corriente máxima de salida aislada	20 mA
Voltaje de salida	5 V +/- 5%
Condiciones de temperatura de servicio	0 – 30 °C
Condiciones de temperatura de almacenamiento	0 – 40 °C
Condiciones de humedad relativa	20 – 80% sin condensación
Intervalo de presión del aire	950 – 1050 hPa

c) Controlador ECT60

El controlador de la serie EC de Reiter es un controlador de servomotor controlado por bus de alto rendimiento con capacidad para integrar controladores de movimiento inteligentes (ver Fig. 3.8) [57].



Fig. 3.8. Controlador ECT60 [57].

Los variadores EtherCAT de la serie EC pueden funcionar como esclavos EtherCAT estándar. El controlador ECT60 es de control en bucle cerrado. Sus características son:

- Tensión de funcionamiento DC: 24 a 80 V;
- Período mínimo de sincronización 500 μ s;
- Conector RJ45 de doble terminal para comunicaciones EtherCAT;
- Salida de corriente de fase máxima 6A/fase (pico sinusoidal);
- Métodos de control: control en lazo cerrado;
- Puerto de E/S digital;
- Aislamiento fotoeléctrico de 6 vías de entrada de señal digital: IN1, IN2 para entrada diferencial de 5 V, también se puede conectar a entrada de un solo extremo de 5 V, IN3 a IN6 para entrada de un solo extremo de 24 V;
- Aislamiento fotoeléctrico de 2 vías de la salida de señal digital;
- Voltaje de resistencia máxima de 30 V;
- Corriente de inyección o extracción máxima de 100 mA;

- Método de acoplamiento de cátodo común.

Las características eléctricas del controlador de servomotor se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Especificaciones eléctricas controlador ECT60 [57].

Corriente de salida	0.5 a 6 A
Voltaje de alimentación	24 a 80 VDC
Interfaz de codificador	Codificador ortogonal incremental, 4x
Resolución del codificador	1000 to 65535 pulsos/revolución
Entrada de aislamiento fotoeléctrica	Entrada de 24 V de 4 vías de ánodo común
Interfaz de comunicación	RJ45

d) Computadora Minis Forum GK41

La mini computadora Minis Forum GK41 tiene la potencia suficiente para utilizarla para el control de la máquina electroerosionadora debido a sus 8 GB de RAM DDR4. Su consumo es mínimo, ya que su procesador tiene una potencia de diseño térmico de solo 10 W. Su tamaño de tan solo 12.5 x 11.3 x 3 cm permite situarlo en cualquier lugar, incluso detrás de un monitor gracias al soporte que trae incluido (ver Fig. 3.9) [58].



Fig. 3.9. Computadora Minis Forum GK41 [58].

Incluye un procesador Intel Celeron J4125 Quad Core capaz de llegar a los 2.7 GHz en el que se encuentra una GPU Intel HD Graphics 600 con soporte para video

h.265 y VP9 hasta 4K. La memoria RAM es de 8 GB LPDDR4 soldada en placa e incluye una memoria de almacenamiento SSD M.2 2280 de 256 GB de capacidad y un lector de tarjetas micro SD.

Para conectividad inalámbrica incluye Wifi de doble banda y Bluetooth 4.2. En cuanto a conectores, posee 4 puertos USB 3.0, 2 entradas de audio de 3.5 mm, lector de tarjetas micro SD, 2 puertos de Ethernet Gigabit, salida de vídeo HDMI 2.0 y un conector mini DisplayPort, ambos con soporte para salida de vídeo hasta en resoluciones 4K@60fps. Cuenta para refrigerarse con un ventilador interior e incluye en el chasis anclaje Kensington y es compatible con soportes de montaje tipo VESA.

3.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE BOMBEO Y FILTRADO

El sistema de bombeo y filtrado consiste en un tanque de dieléctrico limpio que sirve como reservorio, donde habrá un sensor de conductividad que controlará que el dieléctrico en este tanque mantenga una conductividad entre 15 y 25 microSiemens. A continuación, se tiene una bomba que bombeará el dieléctrico al tanque donde se realizará el proceso de corte. Luego, por medio de un drenaje en el tanque, el dieléctrico será llevado a un tanque de sedimentación donde las partículas más pesadas resultantes del proceso de electroerosión se depositarán en el fondo. Este tanque tendrá un sensor de nivel que detectará que el nivel del dieléctrico no supere una altura máxima de 190 mm medidos desde el fondo del tanque. A la salida de este tanque habrá una bomba que bombeará el dieléctrico hacia tres filtros para atrapar las partículas restantes y asegurar un dieléctrico limpio. Después que el dieléctrico pase por los filtros, regresará al tanque de dieléctrico limpio. Cuando el sensor de conductividad detecte que el dieléctrico tiene una conductividad fuera de intervalo, se activará una alarma sonora.

Controlar este sistema no es tan complejo como controlar el sistema de movimientos, por lo que se ha decidido diseñar este sistema de control. Para controlar el sistema de bombeo y filtrado del líquido dieléctrico se ha decidido utilizar una placa Arduino Mega 2560.

La razón para utilizar una placa Arduino es debido a que es una alternativa económica y fácil de aprender debido a la cantidad de material en internet como libros, videos y simuladores existentes. Además de la facilidad de generar un código por medio de la inteligencia artificial y posteriormente simularlo, ya sea por medio de un programa o una página de internet. En cuanto a la selección del modelo de placa, se ha elegido la Mega 2560 porque tiene suficientes pines de entrada/salida, memoria y capacidad de procesamiento para manejar múltiples sensores, actuadores y una pantalla donde se muestre información relevante del proceso de bombeo y filtrado.

a) Placa Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es una placa microcontroladora basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie por hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un cabezal ICSP y un botón de reinicio (ver Fig. 3.10) [59].

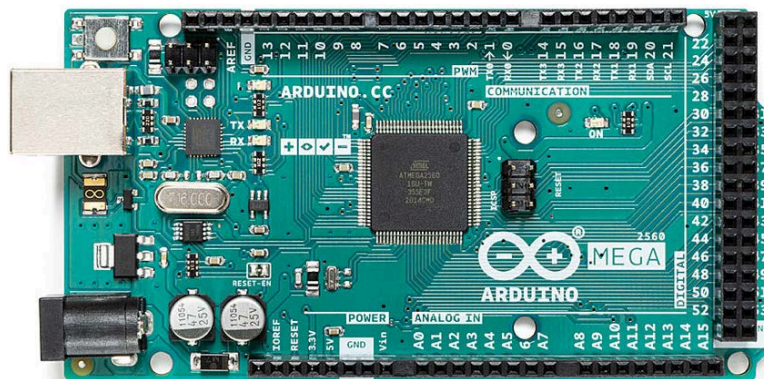


Fig. 3.10. Placa Arduino Mega 2560 [59].

Sólo se debe conectar a una computadora con un cable USB o alimentar con un adaptador de CA a CC o una batería. La placa Mega 2560 es compatible con la mayoría de los shields diseñados para el Arduino Uno. La Mega 2560 es una actualización de la placa Arduino Mega, a la que sustituye. Sus especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Especificaciones técnicas placa Arduino Mega 2560 [59].

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines de E/S digitales	54 (de las cuales 15 proporcionan salida de modulación de anchura de impulsos)
Pines de entrada analógica	16
Corriente DC por pin de E/S	20 mA
Corriente DC para pin de 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	256 kB de los cuales 8 kB se utilizan para el gestor de arranque
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Velocidad del reloj	16 MHz
Longitud	101.52 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	37 g

b) Sensor de conductividad

Para la constante medición de la conductividad del líquido dieléctrico se ha decidido utilizar el sensor analógico de conductividad eléctrica, de la compañía DFRobot Gravity. Este sensor es adecuado para medir la conductividad del dieléctrico en microSiemens y es fácil de integrar con Arduino (ver Fig. 3.11) [60].



Fig. 3.11. Sensor analógico de conductividad eléctrica [60].

Este sensor se utiliza especialmente para medir la conductividad eléctrica de soluciones acuosas. Soporta una amplia entrada de voltaje de 3 – 5 V, y es compatible con la placa de control principal de 5 y 3.3 V. La señal de salida se filtra por hardware. La fuente de excitación adopta una señal de CA, que reduce eficazmente el efecto de polarización, mejora la precisión y prolonga la vida útil de la sonda. La biblioteca de software utiliza un método de calibración de dos puntos, y puede identificar automáticamente la solución tampón estándar, proporcionando al usuario un sensor sencillo y cómodo. Un diagrama de conexión se presenta en la Fig. 3.12.

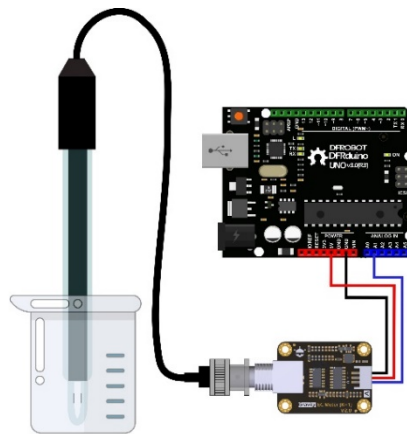


Fig. 3.12. Diagrama de conexión de sensor de conductividad [60].

Con este producto, una placa de control principal (como Arduino) y la biblioteca de software, se puede construir rápidamente un medidor de conductividad eléctrica y comenzar inmediatamente, sin soldaduras. Las especificaciones técnicas de la tarjeta de señal y de la sonda se especifican en la Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente.

Tabla 3.5. Especificaciones técnicas tarjeta de conversión de señal [60].

Tensión de alimentación	3.0 – 5.0 V
Voltaje de salida	0 - 3.4 V
Conector de sonda	BNC
Conector de señal	PH 2.0 - 3Pin
Precisión de medición	± 5%
Tamaño de la placa	42 x 32 mm

Tabla 3.6. Especificaciones técnicas sonda de conductividad eléctrica [60].

Tipo de sonda	Grado Laboratorio
Constante de célula	1.0
Intervalo de detección de apoyo	0 - 20 ms/cm
Intervalo de detección recomendado	1 - 15 ms/cm
Intervalo de temperatura	0 – 40 °C
Longitud del cable	100 cm

c) Sensor de nivel

Para controlar el nivel de dieléctrico en el tanque de sedimentación se utilizará un sensor ultrasónico HC-SR04. Este sensor es de bajo costo y utiliza ultrasonido para determinar la distancia de un objeto en un intervalo de 2 a 450 cm. Destaca por su pequeño tamaño, bajo consumo energético, buena precisión y excelente precio (ver Fig. 3.13) [61].

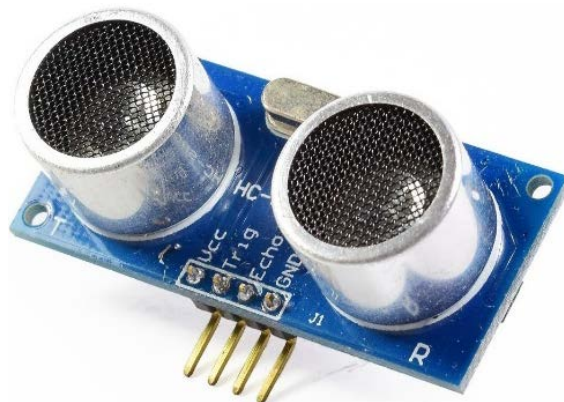


Fig. 3.13. Sensor ultrasónico HC-SR04 [61].

El sensor HC-SR04 posee dos transductores: un emisor y un receptor piezoeléctricos, además de la electrónica necesaria para su operación. El funcionamiento del sensor es el siguiente: el emisor piezoeléctrico emite 8 pulsos de ultrasonido (40 kHz) luego de recibir la orden en el pin TRIG, las ondas de sonido viajan en el aire y rebotan al encontrar un objeto, el sonido de rebote es detectado por el receptor piezoeléctrico, luego el pin ECHO cambia a Alto (5 V) por un tiempo igual al que demoró la onda desde que fue emitida hasta que fue detectada, el tiempo del pulso ECO es medido por el microcontrolador y así se puede calcular la distancia al objeto. El funcionamiento del

sensor no afecta por la luz solar o material de color negro. Sus especificaciones técnicas son las siguientes:

- Voltaje de operación: 5 V DC;
- Corriente de reposo: < 2 mA;
- Corriente de trabajo: 15 mA;
- Intervalo de medición: 2 a 450 cm;
- Precisión: ± 3 mm;
- Ángulo de apertura: 15°;
- Frecuencia de ultrasonido: 40 kHz;
- Duración mínima del pulso de disparo TRIG (nivel TTL): 10 μ s;
- Duración del pulso ECO de salida (nivel TTL): 100 - 25000 μ s;
- Dimensiones: 45 x 20 x 15 mm;
- Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otro 20 ms (recomendable 50 ms).

d) Zumbador

Se empleará un zumbador para la alarma sonora cuando la conductividad del dieléctrico esté fuera del intervalo deseado (ver Fig. 3.14) [62].



Fig. 3.14. Zumbador [62].

Este módulo permitirá generar de forma fácil, rápida y precisa sonidos. Posee un sensor vibrador que oscila a una frecuencia determinada. Este módulo es compatible con Arduino o con cualquier Microcontrolador que posea un pin de 5 Volts. Este módulo contiene un zumbador activo, el cual posee su propia frecuencia de oscilación que

permite generar un tono o pitido cuando es alimentado (cuando el pin de señal S se pone en alto), el zumbador se activa emitiendo un pitido

Constante, y cuando está en bajo, no genera sonido alguno. Sus especificaciones técnicas son las siguientes:

- Voltaje de funcionamiento: 3.3 V ~ 5 V;
- Corriente de operación: < 25 mA;
- Frecuencia emitida: 2300 ± 500 Hz;
- Dimensiones: 1.9 x 1.5 x 1.2 cm.

e) Pantalla LCD

Para presentar información relevante del proceso se utilizará una pantalla LCD 20x4 alfanumérica monocromática de cristal líquido. Es una pantalla visual electrónica que utiliza las propiedades de modulación de la luz de los cristales líquidos, los cuales no emiten luz directamente. Es un dispositivo que permite la presentación de caracteres alfanuméricos y otros símbolos en un formato de 20 caracteres por línea, en 4 líneas (ver Fig. 3.15) [63].



Fig. 3.15. Pantalla LCD 20x4 [63].

Donde, 20x4 significa que se pueden presentar 20 caracteres en cada una de las 4 filas del display LCD, por lo que se puede presentar un total de 80 caracteres en cualquier instante. Este display es muy útil para proyectos con microcontroladores PIC, AVR y Arduino ya que es una excelente manera de presentar textos y datos de los sensores en forma visual. Sus características y especificaciones son las siguientes:

- Interfaz de entrada: 4-Bits / 8-Bits;

- Retroiluminación: LED blanco;
- Modo de presentación: Fondo azul / Caracteres blancos;
- Caracteres: 5 x 8 puntos;
- Tamaño de cada punto: 0.55 x 0.55 mm;
- Separación entre puntos: 0.60 x 0.60 mm;
- Medidas del módulo: 98.0 (ancho) x 60.0 (alto) x 12 (espesor) mm;
- Medidas del display (Área de presentación): 76.0 (ancho) x 27.0 (alto) mm;
- Temperatura de funcionamiento: -10 a +60 °C;
- Temperatura de almacenamiento: -20 a +70 °C;
- Voltaje de funcionamiento: 5 V;
- Consumo de corriente del LCD: aproximadamente 2 mA;
- Consumo de la luz de fondo (retroiluminación): 40 mA.

f) Código para placa Arduino

Antes de presentar el código a cargar en la placa Arduino Mega 2560, se explicará el funcionamiento del sistema de bombeo y filtrado, ya que sobre la base de este se diseñará el código.

El sistema tiene un tanque que sirve como reservorio del dieléctrico limpio, donde se tiene un sensor de conductividad que controla que el dieléctrico en este tanque mantenga una conductividad entre 15 y 25 microSiemens. A continuación, se tiene una bomba hidráulica que llevará el dieléctrico al tanque donde se realiza el proceso de corte por electroerosión.

Luego, por medio de un drenó, el dieléctrico es llevado a un tanque de sedimentación donde las partículas más pesadas resultantes del proceso de electroerosión se depositarán en el fondo. Este tanque tiene un sensor de nivel que detectará que el nivel de dieléctrico no provoque que el tanque rebalse.

A la salida de este tanque se tiene una bomba hidráulica que bombeará el dieléctrico hacia tres filtros para atrapar las partículas restantes y asegurar un dieléctrico limpio. Después de filtrarse el dieléctrico, volverá al tanque reservorio.

Para crear el código adecuado a las necesidades del sistema, se deben tener en consideración las situaciones siguientes:

- El nivel del dieléctrico en el tanque de sedimentación no debe superar un nivel máximo de 190 mm, medidos desde el fondo del tanque. Si esto sucede, las bombas se deben apagar y una alarma sonora se activará y se desactivará hasta que el nivel del dieléctrico sea menor al máximo.
- Cuando el sensor de conductividad detecte que el dieléctrico tiene una conductividad fuera de intervalo, se activará una alarma sonora que sonará hasta que el dieléctrico tenga una conductividad dentro del intervalo indicado.
- Cuando el sensor de conductividad detecte que el dieléctrico tiene una conductividad fuera de intervalo, las dos bombas hidráulicas deberán apagarse.
- El sistema se podrá encender y apagar por medio de un interruptor.

En una pantalla LCD se presentarán los datos siguientes, sobre la base de las condiciones anteriormente descritas:

- Estado de cada bomba hidráulica (encendida o apagada).
- Mensaje de alerta cuando el nivel del dieléctrico en el tanque de sedimentación haya superado un nivel máximo de 190 mm medidos desde el fondo del tanque.
- Mensaje de alerta cuando la conductividad del dieléctrico del reservorio esté fuera del intervalo.

Con toda la descripción del sistema, con ayuda de la página web ChatGPT, y realizando varias correcciones, se ha llegado al código siguiente [64]:

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// Definición de pines para las bombas
const int bombaTanqueMachinePin = 2;
const int bombaFiltrosPin = 3;
// Definición de pines para el sensor de conductividad y nivel de agua
const int sensorConductividadPin = A0;
const int echoPin = 7; // Pin Echo del sensor ultrasónico HC-SR04
const int trigPin = 8; // Pin Trig del sensor ultrasónico HC-SR04
// Intervalos de conductividad
const int conductividadMinima = 15;
const int conductividadMaxima = 25;
```

```

// Umbral de nivel máximo en mm desde el fondo del tanque de sedimentación
const int nivelMaximoSedimentacion = 190;
// Pines para el interruptor de encendido/apagado del sistema y el zumbador
const int interruptorEncendidoPin = 10;
const int zumbadorPin = 9;
// Dirección I2C de la pantalla LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // Dirección, columnas, filas
bool alarmaActiva = false;
bool sistemaEncendido = false;
void setup() {
  // Configuración de pines para las bombas
  pinMode(bombaTanqueMachinePin, OUTPUT);
  pinMode(bombaFiltrosPin, OUTPUT);
  // Configuración de pines para el sensor de conductividad y nivel de agua
  pinMode(sensorConductividadPin, INPUT);
  // Configuración de pines para el sensor ultrasónico HC-SR04
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  // Configuración de pines para el interruptor de encendido/apagado del sistema y el
  zumbador
  pinMode(interruptorEncendidoPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(zumbadorPin, OUTPUT);
  // Inicialización de la pantalla LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Sistema de Filtrado");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Inicializando...");
  delay(2000);
}

```

```

void loop() {
  // Verificar el estado del sistema (encendido/apagado)
  if (digitalRead(interruptorEncendidoPin) == LOW) {
    sistemaEncendido = !sistemaEncendido;
    delay(500); // Debounce
  }
  if (!sistemaEncendido) {
    apagarBombas();
    desactivarAlarma();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Sistema Apagado");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Bomba Reserv: OFF");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Bomba Filtro: OFF");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("CONDUCT: OFF");
    lcd.setCursor(0, 4);
    lcd.print("TANQUE 2: OFF");
    return;
  }
  // Lectura de distancia utilizando el sensor ultrasónico HC-SR04
  long distancia;
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  distancia = pulseIn(echoPin, HIGH) / 58; // Dividir por 58 para obtener la distancia en cm
}

```

```

// Lecturas de los sensores
int conductividad = analogRead(sensorConductividadPin);
// Convierte la lectura de conductividad a microSiemens
float conductividadMicroSiemens = map(conductividad, 0, 1023, 0, 50);
// Verifica si el nivel del agua en el tanque de sedimentación supera el máximo
if (distancia > nivelMaximoSedimentacion) {
  apagarBombas();
  activarAlarma();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Bomba Reserv: OFF");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Bomba Filtro: OFF");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("CONDUCT: OFF");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("TANQUE 2: > MAX");
} else {
  // Desactiva la alarma y presenta los estados de las bombas y la conductividad
  if (alarmaActiva) {
    desactivarAlarma();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Bomba Reserv: OFF");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Bomba Filtro: OFF");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("CONDUCT: ");
    lcd.print(conductividadMicroSiemens >= conductividadMinima &&
conductividadMicroSiemens <= conductividadMaxima ? "NORMAL" : "OUT RANGE");
    lcd.setCursor(0, 3);

```



```

    lcd.print("TANQUE 2: ");
    lcd.print(distancia <= nivelMaximoSedimentacion ? "NORMAL" : "> MAX");
}
}
// Verifica la conductividad del agua
if (conductividadMicroSiemens < conductividadMinima || conductividadMicroSiemens >
conductividadMaxima) {
    apagarBombas();
    activarAlarma();
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("CONDUCT: OUT RANGE");
} else {
    // Desactiva la alarma y presenta el estado de la conductividad
    if (alarmaActiva) {
        desactivarAlarma();
        lcd.setCursor(0, 2);
        lcd.print("CONDUCT: NORMAL");
    }
}
// Retraso para actualizar la pantalla cada cierto tiempo (por ejemplo, cada 2 segundos)
delay(2000);
}
void apagarBombas() {
    digitalWrite(bombaTanqueMachinePin, LOW);
    digitalWrite(bombaFiltrosPin, LOW);
}
void activarAlarma() {
    digitalWrite(zumbadorPin, HIGH);
    alarmaActiva = true;
}
void desactivarAlarma() {

```

```

digitalWrite(zumbadorPin, LOW);
alarmaActiva = false;
}

```

Con el código generado, se procede a simularse en la página de internet Wokwi, que ofrece el servicio de construcción y simulación de circuitos de forma gratuita. El espacio de trabajo de dicha página se presenta en la Fig. 3.16 [65].

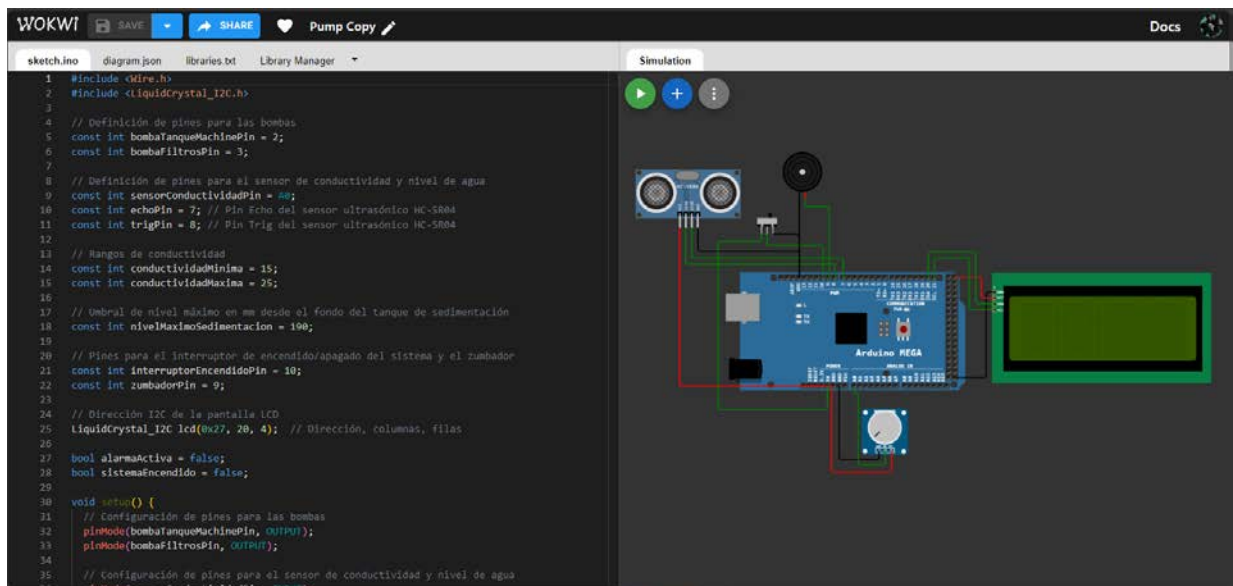


Fig. 3.16. Espacio de trabajo en simulador Wokwi.

Es en esta página donde se construye el circuito diseñado, así como el código a introducir en la placa Arduino a utilizar. El circuito que controlará al sistema de bombeo y filtrado se presenta en la Fig. 3.17.

Debido a las limitantes del simulador, el sensor de conductividad ha sido sustituido por una resistencia variable (potenciómetro) para poder realizar la simulación del circuito. El resto de componentes son los adecuados.

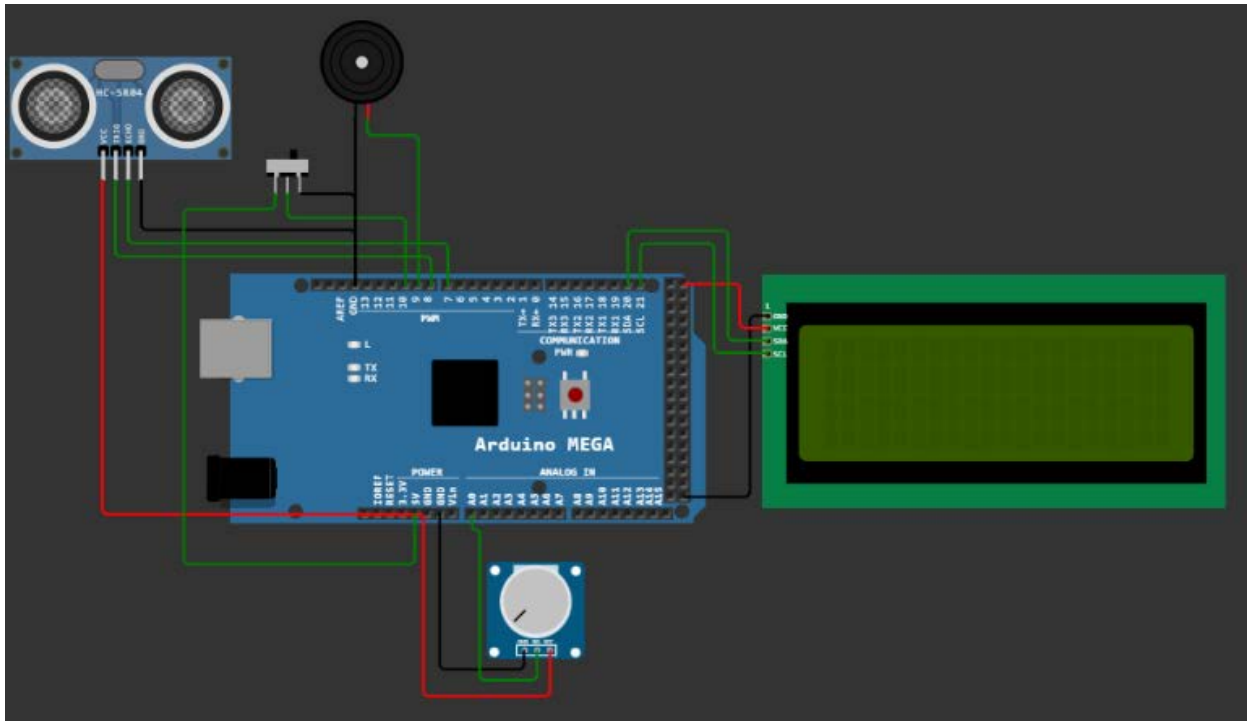


Fig. 3.17. Circuito de control de sistema de bombeo y filtrado.

4. FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

En este capítulo se realiza una descripción técnica de los componentes críticos de la máquina electroerosionadora propuesta con el fin de determinar si es factible su elaboración con los recursos y la tecnología disponibles, esto desde un punto de vista técnico. También se determinarán los costos de materiales, mano de obra y costos indirectos involucrados en la elaboración de la máquina. Para este análisis se han cotizado los precios de todos los elementos a utilizar.

4.1. FACTIBILIDAD TÉCNICA

A continuación, se realiza el estudio técnico de los diversos sistemas que componen a la máquina diseñada en el presente Trabajo de Graduación. Se considera la información técnica de aquellos componentes que son vitales para el funcionamiento de la máquina, todo esto para determinar si es factible elaborar, montar y hacer funcionar la máquina.

4.1.1. SISTEMAS DE HILADO, MOVIMIENTO Y ESTRUCTURA

A continuación, se realiza un análisis técnico tanto de los elementos críticos que componen los sistemas de hilado, de movimiento en los ejes X y Y , como también de la estructura de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo propuesta:

a) Cabezal superior e inferior de hilo

Los cabezales son los encargados de sostener toda la transmisión o sistema de hilo, donde se instalan las poleas conductora y conducida, ruedas tensoras de hilo, ruedas guías y el hilo mismo, su diseño se fundamenta en el espacio disponible, distribución y guía del hilo, así como el espacio suficiente entre boquillas para cortar la pieza correctamente. El espesor de 10 mm obedece a la resistencia de la carga a soportar

y a las condiciones a las que estará sometida. El material de construcción debe ser de acero inoxidable, el cual es resistente a la corrosión y desgaste, dado a que una parte del cabezal estará sumergida. Su construcción será por medio de una fresadora universal, taladro, broca de titanio para metal de 3, 4, 8 y 10 mm de diámetro, y diversas fresas verticales.

b) Poleas acanaladas

Las poleas acanaladas son elementos importantes en la transmisión y guía del hilo, ya que regulan parámetros como su velocidad, tensión, y guía para éste. Los canales que éstas llevan son para tener una mayor área de contacto que beneficie a la transmisión de potencia, para que el hilo se mueva a la misma velocidad que la polea, sin que exista deslizamiento. Para el diseño se consideró que estos elementos tuvieran el menor diámetro posible y así no consumir tanto espacio en el cabezal superior del hilo.

Las poleas no llevan cuñero debido a que no estarán sometidas a cargas de gran magnitud, por lo que se consideró que el aprete o seguro contra el eje se haría con tornillos prisioneros de 1/8 pulg. El material para su fabricación es acero SAE 1045 CD, debido a sus propiedades como resistencia al desgaste, esto es importante debido a que, como las poleas para bandas en V, su funcionamiento es contacto superficial puro, por lo que, la resistencia al desgaste es un factor importante, así como la durabilidad, donde es bueno para soportar fatiga. Se necesitará acero SAE 1045 CD en estado bruto de barra cilíndrica de 1 ¼ pulg, dado a que una de las poleas tiene un diámetro de 30 mm, así como una broca de titanio para metal de 8 mm para el agujero donde entrará el eje y una broca de titanio para metal de 1/8 pulg para los agujeros de los tornillos prisioneros. Para el cilindrado y refrentado se necesitará un torno paralelo con un buril de tungsteno o cobalto, y para los canales, un buril con un filo de punta de 0.25 mm y un ángulo de 19°.

c) Tornillo de potencia

Los tornillos de potencia son utilizados en las transmisiones de potencia como medio para transmitir potencia o fuerza en términos de elevación o descenso, así como

otras aplicaciones. El diseño fue pensando para cumplir los requisitos de avances mínimos y máximos dependiendo de las dimensiones del tanque y de la mesa de trabajo.

Con respecto al material se utilizará una barra cilíndrica de ½ pulg de acero SAE 1045 CD, el cual se analizó bajo el criterio de falla de Tresca o Guest, superando ampliamente los requisitos mínimos de aceptación (Ver capítulo 2.2.2), además de su fácil adquisición en el mercado nacional. La fabricación se debe hacer en un torno paralelo, con buriles de tungsteno o cobalto, tales que sean para cilindrado y refrentado, y un buril para rosca ACME de 5/8 pulg y un paso de 1/8 pulg, tal como se visualiza en la Fig. 4.1.

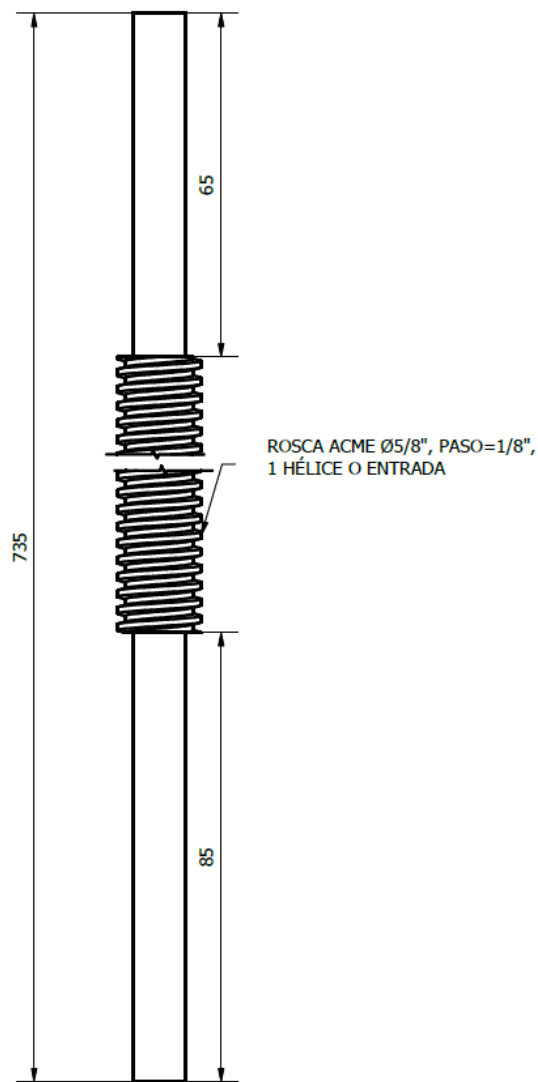


Fig. 4.1. Tornillo de potencia. Cotas en mm.

d) Mesa de trabajo

La mesa de trabajo tiene la función de sujetar y soportar a la pieza de trabajo. Debe ser fabricada en acero inoxidable debido a su alta resistencia a la corrosión, ya que estará sumergida en fluido dieléctrico. El diseño se basa en las mesas de trabajo de algunas máquinas de electroerosión de corte por hilo, como la ONA PRIMA E 250, así también debido al análisis estructural donde se considera el peso de la pieza de trabajo y la columna de fluido dieléctrico contenida en el tanque (Ver capítulo 2.5). Su fabricación será por medio de una fresadora universal, así como un torno paralelo, brocas de titanio para metal de 4 mm y de 10 mm.

e) Tanque de dieléctrico

El tanque de trabajo es el encargado de contener el fluido dieléctrico para el proceso de electroerosión, teniendo la geometría adecuada, así como el espesor y el material de este. Con un material de fabricación de acero inoxidable, en primer lugar, porque estructuralmente tiene que soportar la presión generada en las paredes y el fondo por el fluido. Inicialmente se pensó en fabricarlo de acrílico, pero los análisis realizados resultaron en que el tanque no resistiría.

Su diseño busca la simplicidad para contener el fluido dieléctrico y poder manipular la mesa de trabajo contenida en él. Se fabricará de lámina 2 x 1 m de acero inoxidable de 6 mm de espesor, así como 1 lb de electrodo SMAW E312-16 de 3/32 o 1/8 pulg, 2 discos de polifan de 4 ½ x 7/8 pulg grado 40, 2 discos de polifan de 4 ½ x 7/8 pulg grado 80, 5 discos de corte rápido 4 ½ x 7/8 pulg, escuadra, marcador o tiza, cincel, una amoladora angular y un aparato soldador SMAW.

4.1.2. SISTEMA DE BOMBEO Y FILTRADO

A continuación, se realiza un análisis técnico de los elementos críticos que componen el sistema de bombeo y filtrado de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo propuesta:

a) Agua desionizada

Para determinar la fuente de adquisición del agua desionizada necesaria para el proceso de electroerosión, se evalúa la factibilidad de la compra del agua desmineralizada con respecto a su producción. En el capítulo 2.6 se hizo el análisis de los requerimientos mínimos para diseñar un sistema de desionización de agua. Se consideraron características técnicas como el intervalo requerido de conductividad eléctrica, así como el tiempo durante el cual este fluido mantendría sus propiedades dieléctricas durante el proceso de electroerosión. En esta parte se considera la vida útil en almacenamiento de este fluido, el cual algunas referencias estiman como máximo un mes para que este mantenga sus propiedades, no obstante, otros productores consideran que este tiempo depende de las condiciones de almacenamiento y de la calidad de obtención y calidad requerida. Un tipo de agua desionizada de mayor calidad puede mantener sus propiedades hasta media hora y máximo una hora en condiciones de almacenamiento estrictas [66].

Para la máquina de corte por electroerosión mediante hilo propuesta en el presente trabajo de graduación para fines didácticos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, se ha considerado que el tiempo de uso de la máquina sería de aproximadamente dos meses del ciclo académico, y si se diseñara un sistema de desionización de agua, sólo se utilizaría dos veces al mes, por lo que no se le daría un uso constante. Por tanto, por la naturaleza del proceso de trabajo y las condiciones necesarias de uso y almacenamiento del fluido dieléctrico, resulta ser más factible la compra del agua desionizada, ya que no se incurriría en costos de diseño y fabricación del sistema.

Como parte de la proyección social que se busca con este proyecto, se ha considerado adquirir el agua desionizada a través de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, donde se tiene un sistema dedicado a la desionización de agua, con el cual proveen a los laboratorios de su facultad para el desarrollo de sus prácticas, y que de igual manera ponen a disposición este servicio para el público en general. Esto representa una ventaja debido a que el tiempo de almacenamiento se reduce, ya que se puede solicitar y utilizar en un tiempo corto, así también, la

accesibilidad de este se ve incrementada respecto a otros lugares fuera del recinto universitario.

b) Sistema de circulación del fluido dieléctrico

En el caso del sistema de circulación del fluido dieléctrico se optó por una combinación entre tuberías rígidas y flexibles, es decir, utilizar tramos de manguera reforzada de tipo industrial trenzada de ½ pulg y otros de tubería PVC también de ½ pulg de diámetro en donde sea necesario.

La forma de sujeción de estos elementos será a través de abrazaderas metálicas de acero inoxidable de 1 pulg de diámetro para las mangueras flexibles, y en el caso de las tuberías de PVC en algunos puntos será necesario utilizar adaptadores de PVC hembra y macho, uniones lisas, unión universal, codo liso de 90°, todos de ½ pulg de diámetro en los puntos donde se requiera; serán fijados con cemento solvente para tubos y accesorios de PVC.

Para el diseño propuesto en este trabajo de graduación, al ser de carácter didáctico y por las dimensiones de las probetas a cortar, no se requiere un sistema de conducción de dieléctrico en la misma línea de acción del hilo de corte, es decir, a través de la boquilla, por lo que resulta suficiente colocar una manguera modular que por su facilidad de maniobrabilidad ofrece diversas configuraciones para el chorro del dieléctrico.

c) Tanques del sistema de circulación

Los tanques para contener el fluido de trabajo se elaborarán de material acrílico (polímero de metil metacrilato) resistente de espesor de 10 mm. Estos se han diseñado de manera que puedan contener todo el volumen de dieléctrico necesario para todo el proceso de electroerosión. Las dimensiones de estos se especifican en el capítulo 2.6.5.

La conformación de estos tanques de almacenamiento será a partir de láminas de acrílico de espesor de 10 mm las cuales se cortarán con un esmeril angular de 4 ½ pulg, con disco de corte ultrafino de 4 ½ pulg de diámetro y se hará uso de lijas de grano 400, 800 y 1000 para eliminación de rebabas. Se fijarán a través de un pegamento especial para acrílico el cual crea enlaces de adhesión y unión permanentes soldando así los paneles de acrílico.

Este diseño se considera factible debido a que el material brinda diversidad de características funcionales para aplicación en el proyecto, además de ser resistente a la temperatura y de un menor costo en relación a depósitos metálicos.

d) Sistema de filtrado

Para este sistema se optó por una combinación de tres filtros en serie, cada uno con una capacidad de filtración diferente, el grado de filtración aumenta conforme el fluido dieléctrico avanza entre estos, reduciendo así al mínimo el paso de partículas resultantes del proceso.

Estos serán colocados seguidamente del depósito de prefiltración, por su forma y disposición, estos cuentan con estructura de soporte propia. Del depósito de pre filtrado se conectará a través de tubería rígida PVC de ½ pulg de diámetro el sistema de filtrado y de este se conectará al tanque de almacenamiento. Este tipo de filtros están disponibles en el mercado nacional (Ver capítulo 2.6.5).

4.1.3. SISTEMAS DE CONTROL

A continuación, se realiza un análisis técnico de los elementos críticos que componen los sistemas de control de hilo, movimiento, bombeo y filtrado de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo propuesta:

a) Generador de pulsos BX18

El generador de pulsos BX18 está construido con una caja cerrada de aluminio de 19 pulg con toma de tierra. Cuando se conecta un cable de alimentación sin blindaje, funcionará en parte como una antena que emite una gran cantidad de radiación al entorno. Esta emisión podría perturbar a otros equipos en ese mismo entorno, lo que podría introducir riesgos para la seguridad. Para evitarlo, el cable de alimentación de la máquina de electroerosión debe estar aislado eléctricamente y conectado a tierra.

La entrada de voltaje de alimentación del generador está etiquetada como X1, es un conector hembra del tipo estándar IEC C13, con un voltaje de entrada entre 110 y 230

V, una frecuencia de entrada entre 50 y 60 Hz, una potencia máxima de 350 W y posee dos fusibles de 4A cada uno, de fusión lenta (Fig. 4.2).



Fig. 4.2. Entrada de voltaje del BX18.

El generador de arco BX18 utiliza internamente varias fuentes de alimentación. Si alguna de estas fuentes de alimentación señala una falla, la salida del EDM se desactivará y se activará la advertencia de bajo o alto voltaje, dependiendo de la fuente de alimentación que haya fallado y la salida del generador se desconecte automáticamente como protección.

El generador de arco requiere poco mantenimiento. La parte superior de la carcasa está perforada para permitir una ventilación eficaz. Dependiendo de las condiciones ambientales, se puede acumular polvo en el interior de la carcasa. Según el fabricante, se recomienda comprobar periódicamente si hay exceso de polvo y, si lo hay, eliminarlo con breves ráfagas de aire comprimido. No se recomienda utilizar aspiradora, ya que se podrían dañar los circuitos impresos.

Se eligió esta alternativa al ser fabricada por una empresa especializada en equipos de electroerosión mediante hilo caseros, lo cual es adecuado para el presente proyecto.

b) Controlador C-Arc

El controlador C-arc de BaxEDM es una solución de control digital para controlar la velocidad y la tensión del hilo de electroerosión en la máquina de electroerosión mediante hilo, con la ayuda de dos servomotores y una celda de carga. El controlador C-

Arc integra un amplificador de celda de carga, un controlador digital de bucle cerrado para el servomotor de tensión, un generador de valores de consigna para el servomotor de velocidad e interfaces de datos digitales aislados ópticamente.

El entorno de compatibilidad electromagnética de una máquina de electroerosión es muy ruidoso debido al proceso de arco que emite perturbaciones electromagnéticas de banda ancha. Para que el controlador C-arc funcione correctamente, es necesario tomar medidas de protección contra estas radiaciones. Esto significa que el controlador debe estar encerrado en una caja aislada y estar correctamente conectada a tierra (Fig. 4.3).

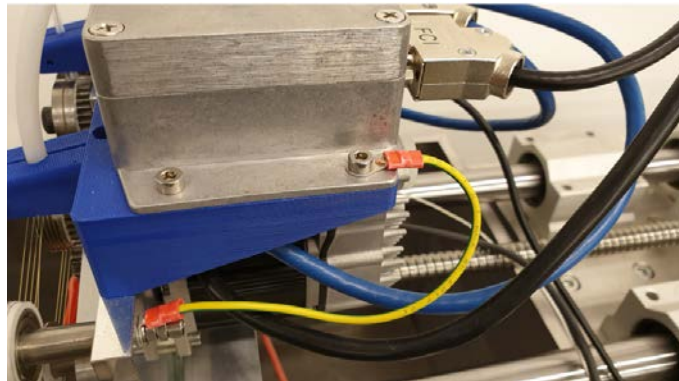


Fig. 4.3. Carcasa conectada a tierra.

En el interior de la caja del controlador C-Arc, es esencial que la toma de tierra de la placa de circuitos esté conectada a la caja montando un tornillo en el orificio de la toma de tierra (Fig. 4.4).

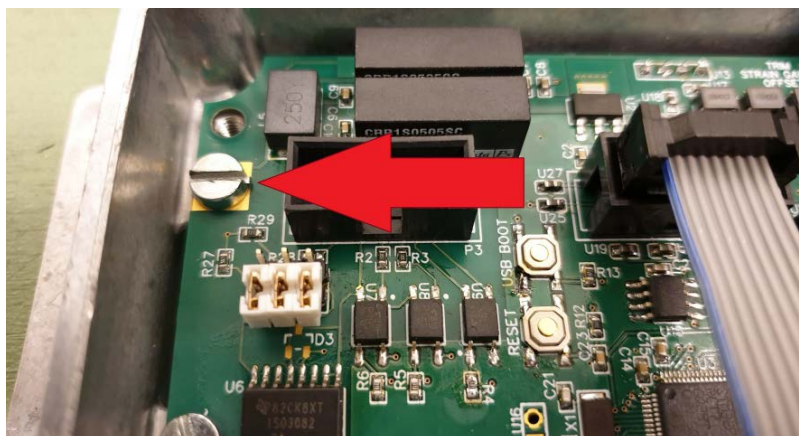


Fig. 4.4. Placa con tornillo para conexión a tierra.

Al igual que el generador de pulsos BX18, el controlador C-Arc es fabricado por BAXEDM, por lo que es la mejor alternativa a usar en el presente proyecto, ya que el fabricante también proporciona los manuales de instalación y operación. Un sistema de control para máquinas electroerosionadoras industriales no es viable debido al fin didáctico de esta máquina propuesta, además de los enormes costos económicos de adquisición y transporte de la misma.

c) Controlador de servomotor ECT60

El ECT60 es un controlador de servomotor controlado por bus de alto rendimiento con capacidad para integrar controladores de movimiento inteligentes. Los variadores EtherCAT de la serie EC pueden funcionar como esclavos EtherCAT estándar y admiten CANopen sobre EtherCAT. El ECT60 es de control en bucle cerrado. Este controlador posee unos conectores, donde se realizarán las conexiones de la fuente de alimentación, del servomotor, y del mismo controlador (ver Fig. 4.5).



Fig. 4.5. Conectores del controlador ECT60.

La conexión de la fuente de alimentación con el controlador se realizará mediante los conectores V+ y V-. La alimentación de voltaje del controlador es con corriente directa

y un voltaje de 24 a 80 voltios. La conexión del servomotor se hará por los conectores A+, A-, B+, B-, según sea la cantidad de cables del servomotor.

El ECT60 se fija utilizando los conectores IN1+, IN1-, IN2+ y IN2- como interfaz de entrada del controlador. La conexión del controlador en particular se debe basar en las instrucciones del fabricante del servomotor. Este controlador es una sugerencia de BAXEDM, además de su tamaño reducido, precio y factibilidad de obtención, se considera una opción adecuada para nuestro proyecto.

d) Placa Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es una placa microcontroladora basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada/salida digital, 16 entradas analógicas, 4 puertos seriales de hardware, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación y un botón de reinicio [67].

La longitud y el ancho máximos de la placa son de 4 y 2.1 pulg, respectivamente. Tres orificios para tornillos permiten fijar la placa a una superficie o caja. Está diseñado para ser compatible con la mayoría de los escudos diseñados para las placas Arduino Uno, Diecimila o Duemilanove.

La placa puede ser alimentada a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La alimentación externa (no USB) puede provenir de un adaptador de corriente alterna a corriente directa (de pared) o de una batería. El adaptador se puede conectar mediante un enchufe positivo central de 2.1 mm en el conector de alimentación de la tarjeta. Los cables de una batería se pueden insertar en las clavijas Gnd y Vin del conector POWER.

La tarjeta puede funcionar con una alimentación externa de 6 a 15 voltios. Sin embargo, si se suministra con menos de 7 V, la clavija de 5 V puede suministrar menos de cinco voltios y la placa puede ser inestable. Si se utilizan más de 12 V, el regulador de voltaje se puede sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

Para empezar a trabajar con la placa, primero se debe conectar a la computadora por medio de un cable USB a enchufe B que le proporcionará energía y permitirá programar la tarjeta (Fig. 4.6).

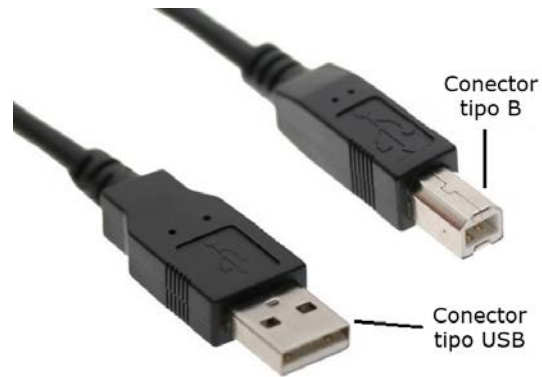


Fig. 4.6. Cable USB tipo B [67].

Se debe conectar el enchufe B del cable USB a la placa y el enchufe USB a la computadora. Se debe encender el LED verde etiquetado como ON en la placa como señal de la conexión exitosa. Para subir un programa a la placa, se debe usar la plataforma Arduino IDE.

Para instalar los controladores de la Arduino Mega 2560 en la computadora, se debe descargar la versión Windows del software Arduino de la página oficial. Cuando finalice la descarga, se debe iniciar el archivo para instalar el software y los controladores. Los controladores serán descargados e instalados desde Internet, directamente desde Windows.

Como puede observarse, la utilización de la placa Arduino para controlar el sistema de bombeo y filtrado es factible debido a la facilidad de obtención de esta placa, su precio, el software y los controladores son gratuitos, además de la gran cantidad de información disponible en el internet.

4.2. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

En este capítulo se realiza el desglose de precios de los materiales que componen a cada sistema de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo propuesta, así también los costos de mano de obra y los costos indirectos para obtener el costo total de la máquina propuesta.

Resaltar que se contempla la fabricación de algunas piezas que se han diseñado y cuyos detalles se dieron en el Capítulo 2. También se mencionan los elementos a

comprar, tanto en el mercado nacional como internacional, debido a su complejidad para poder ser diseñados en el presente Trabajo de Graduación, a su facilidad de obtención y para no aumentar los costos si algunos de estos se fabricaran.

4.2.1. COSTOS DE MATERIALES DE FABRICACIÓN

Para cada sistema que compone a la máquina propuesta se hace el desglose de sus elementos, haciendo una breve descripción de cada uno de ellos y especificando las cantidades requeridas, sus precios unitarios, precios de envío (si es necesario exportarlo) y el precio total. Finalmente, se hará la sumatoria de los precios totales de cada material para obtener el precio total en concepto de costo de materiales. Los costos de los materiales a utilizar para la fabricación de la estructura de soporte para la máquina electroerosionadora se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Costo de materiales de fabricación de la estructura de soporte.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Estructura de soporte	1	20.00	0.00	20.00
Pilares	4	10.00	0.00	40.00
Perno hexagonal M5 x 45	4	0.33	0.00	1.30
Tuerca M5	4	0.22	0.00	0.88
Arandela plana de 5 mm	4	0.03	0.00	0.13
Sub total =				62.31

Los costos de los materiales a utilizar para la fabricación del sistema de control de los movimientos en los ejes X,Y para la máquina electroerosionadora se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Costo de materiales de fabricación del sistema de control de movimientos X,Y.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Cable EtherCat/Ethernet	1	21.00	21.35	42.35
Cable USB/RS-485	1	41.00	25.40	66.40
Generador de arco BX18	1	4,519.71	25.40	4545.11
Controlador C-Arc Completo	1	261.78	25.40	287.18
Controlador ECT60	2	113.88	39.52	267.28
Computadora Minis Forum GK41	1	208.00	0.00	208.00
Kit teclado y mouse inalámbrico PHILIPS C501	1	22.95	0.00	22.95
Monitor LG 20MK400A-B 20P HD VGA	1	119.00	0.00	119.00
Cable de video VGA a VGA NEMAX de 4 pies NX101	1	4.00	0.00	4.00
Sub total =				5562.27

Los costos de los materiales a utilizar para la fabricación del sistema de bombeo y filtrado para la máquina electroerosionadora se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Costo de materiales de fabricación del sistema de control de bombeo y filtrado.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Placa Arduino Mega 2560	1	22.49	0.00	22.49
Medidor analógico de conductividad DFR0300	1	69.90	23.50	93.40
Sensor ultrasónico HC-SR04	1	2.75	0.00	2.75
Zumbador	1	3.00	0.00	3.00
Pantalla LCD 20x4.	1	8.99	0.00	8.99
Interruptor con piloto	1	1.25	0.00	1.25
Sub total =				131.88

Los costos de los materiales a utilizar para la fabricación del sistema de control de hilado para la máquina electroerosionadora se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Costo de materiales de fabricación del control de hilado.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Cabezal de hilo superior	1	150.00	0.00	150.00
Brazo inferior tipo L	1	150.00	0.00	150.00
Brida para polea motriz	2	75.00	0.00	150.00
Rodamiento 608 2Z	4	14.33	0.00	57.32
Perno ALLEN M 2.5 x 10	8	0.07	0.00	0.52
Perno ALLEN M 4 x 16	12	0.14	0.00	1.63
Polea motriz	2	100.00	0.00	200.00
Eje polea motriz	2	50.00	0.00	100.00
Polea conducida	2	75.00	0.00	150.00
Rodamiento 623 2Z	2	8.00	0.00	16.00
Perno ALLEN M3 x 30	2	0.10	0.00	0.21
Rodamiento 623	3	22.16	0.00	66.48
Perno ALLEN M3 x 25	2	0.22	0.00	0.45
Eje de rueda tensora	2	30.00	0.00	60.00
Rueda tensora de poleas motrices	2	25.00	0.00	50.00
Rodamiento 6000 2Z	3	7.70	0.00	23.10
Prisionero M4 x 5	2	0.05	0.00	0.11
Tapadera para rueda tensora	2	10.00	0.00	20.00
Perno ALLEN M5 x 16	2	0.24	0.00	0.47
Boquilla (Inferior y Exterior)	2	60.00	0.00	120.00
Sujeción de boquilla inferior	1	15.00	0.00	15.00
Perno ALLEN M3 x 20	11	0.16	0.00	1.75
Sujeción de boquilla superior	1	25.00	0.00	25.00
Regleta o nivel para boquilla superior	1	25.00	0.00	25.00
Acople de boquilla de superior	1	25.00	0.00	25.00
Prisionero M5 x 6	7	0.05	0.00	0.37
Acople WRAPFLEX 3R	2	85.00	0.00	170.00
Servomotor KOLLMORGEN AKM2 2C	2	576.64	121.84	1275.12
Tacos de soporte	2	5.00	0.00	10.00
Soporte para tornillo de potencia superior	1	100.00	0.00	100.00
Aislamiento	1	5.00	0.00	5.00
Perno ALLEN M6 x 50	2	0.76	0.00	1.52
			Sub total =	2970.05

Los costos de los materiales a utilizar para la fabricación del sistema de movimientos en los ejes X,Y para la máquina electroerosionadora se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Costo de materiales de fabricación del sistema de movimientos X,Y.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Acople WRAPFLEX 3R	2	85.00	0.00	170.00
Servomotor KOLLMORGEN AKM2 2C	2	567.64	121.84	1257.12
Soporte para tornillo de potencia superior	3	100.00	0.00	300.00
Rodamiento 6000 2Z	3	7.70	0.00	23.10
Guarda de rodamientos de tornillo de potencia	4	5.00	0.00	20.00
Perno ALLEN M3 x 25	16	0.22	0.00	3.60
Perno ALLEN M6 x 50	2	0.76	0.00	1.52
Placa para chumaceras	2	90.00	0.00	180.00
Chumacera de soporte	8	75.00	0.00	600.00
Bujes de desgaste	8	15.00	0.00	120.00
Perno ALLEN M6 x 45	20	0.52	0.00	10.34
Soporte para tuerca de tornillo de potencia	1	75.00	0.00	75.00
Perno ALLEN M4 x 25	8	0.20	0.00	1.56
Perno ALLEN M6 x 16	4	0.16	0.00	0.64
Soporte guía de Tornillo de Potencia Superior	2	9.00	0.00	18.00
Tornillo de Potencia Superior	1	75.00	0.00	75.00
Perno ALLEN M8 x 30	8	0.37	0.00	2.94
Soportes guía de Tornillo de Potencia Inferior	2	9.00	0.00	18.00
Tornillo de Potencia Inferior	1	75.00	0.00	75.00
Base para servomotores	2	15.00	0.00	30.00
Perno ALLEN M4 x 12	2	0.12	0.00	0.23
Perno ALLEN M4 x 16	10	0.13	0.00	1.29
Sub total =				2983.34

Los costos de los materiales a utilizar para la fabricación de la mesa de trabajo para la máquina electroerosionadora se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Costo de materiales de fabricación de la mesa de trabajo.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Mesa de trabajo principal	1	150.00	0.00	150.00
Perno ALLEN M10 x 40	1	0.55	0.00	0.55
Sujetadores de pieza de trabajo	3	12.00	0.00	36.00
Perno ALLEN M4 x 20	3	0.14	0.00	0.41
Sub total =				186.96

Los costos de los materiales a utilizar para la fabricación del tanque de trabajo para la máquina electroerosionadora se presentan en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Costo de materiales de fabricación del tanque de trabajo.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Tanque de dieléctrico	1	100.00	0.00	100.00
Guarda tanque	1	50.00	0.00	50.00
Perno ALLEN M4 x 8	4	0.12	0.00	0.50
Arandela plana de 4 mm	4	0.03	0.00	0.13
Arandela de presión de 4 mm	4	0.03	0.00	0.13
Sub total =				150.76

Los costos de los materiales a utilizar para la fabricación del tanque de trabajo para la máquina electroerosionadora se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Costo de materiales de fabricación del sistema de Bombeo y filtrado.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Bomba centrífuga 1/2 HP 120/240V Monofásica Marca: VERSA JET FRANKLIN ELECTRIC	1	399.00	0.00	399.00
Bomba centrífuga 4 HP Marca: LEO GROUP AC220	1	560.00	0.00	560.00
Agua desionizada (Galón)	30	2.00	0.00	60.00
Manguera de vinil reforzado \varnothing 1 1/4 pulg	4	1.40	0.00	5.60
Tubo PVC 1 1/4 pulg	1	7.25	0.00	7.25
Tubo PVC 1/2 pulg	2	2.70	0.00	5.40
Adaptador macho PVC 1 1/4	4	0.45	0.00	1.80
Unión Universal PVC 1 pulg	3	2.70	0.00	8.10
Unión Universal PVC 1 1/4 pulg	2	5.20	0.00	10.40
Adaptador macho PVC 1 pulg	5	0.35	0.00	1.75
Codo PVC 90° liso 1 pulg	7	0.50	0.00	3.50
Reducción PVC de 1 a 1/2 pulg	4	0.25	0.00	1.00
Adaptador macho PVC 1/2 pulg	6	0.15	0.00	0.90
Unión lisa PVC 1/2 pulg	3	0.17	0.00	0.51
Adaptador hembra PVC 1/2 pulg	5	0.20	0.00	1.00
Unión Universal PVC 1/2 pulg	4	1.50	0.00	6.00
Unión Universal PVC 1 1/2 pulg	2	5.95	0.00	11.90
Adaptador macho PVC 1 1/2 pulg	3	0.57	0.00	1.71
Tubo PVC 1 1/2	1	8.90	0.00	8.90
Reducción PVC de 1/4 a 1 pulg	2	0.50	0.00	1.00
Válvula de bola inoxidable 1 pulg GENE BRE	1	24.95	0.00	24.95
Unión Universal PVC 1 pulg	2	2.65	0.00	5.30
Codo PVC 90° roscado 1 pulg	2	0.80	0.00	1.60
Terminal para manguera 1/2 pulg x 1/2 npt hembra	3	3.50	0.00	10.50
Manguera modular \varnothing 1/4 pulg	1	13.99	47.25	61.24
Juego de boquilla de 16 piezas D. 1/4 pulg	1	27.59	78.80	106.39
Manguera de vinil reforzado \varnothing 1/2 pulg por pie	4	0.40	0.00	1.60

Continúa.

Continuación.- Tabla 4.9. Costo de materiales de fabricación del sistema de Bombeo y filtrado.

Elemento	Cant.	C. U., \$	C. E., \$	C. T., \$
Cinta teflón 1/2 x 12 m.	3	0.35	0.00	1.05
Pegamento PVC 1/32 Gal. Transparente. Marca: DURMAN	2	4.20	0.00	8.40
Abrazaderas acero inoxidable 1 pulg	4	1.25	0.00	5.00
Lámina de acrílico 5mm 1.22m x 2.44m. AquaKryl.	1	140.00	0.00	140.00
Lámina de acrílico 2mm 1.22m x 2.44m. AquaKryl.	1	60.00	0.00	60.00
Pegamento epóxico de inmersión y retención. DEVCON 25ml.	3	9.50	0.00	28.50
Bisagra común de acrílico. Tubelite.	4	10.00	0.00	40.00
Esponja absorbente de poliuretano.	4	0.30	0.00	1.20
Silicon 100% transparente 2.8 oz SISTA	3	6.75	0.00	20.25
Disco de corte multimaterial 4.1/2 x 1/32 x 7/8 pulg. RASTA	3	1.95	0.00	5.85
Lija de agua 600 3M	2	0.95	0.00	1.90
Lija de agua 800 3M	2	0.65	0.00	1.30
Lija de agua 1000 3M	2	1.15	0.00	2.30
Set de filtros de ultrafiltración.	1	109.00	0.00	109.00
Sub total =				1732.05

La suma de los costos de los materiales de fabricación de la máquina electroerosionadora se presenta en la Tabla 4.9.

Tabla 4.10. Costo de los materiales de fabricación del equipo.

Sistemas	Sub totales, \$
estructura de soporte	62.31
sistema de control de movimientos X,Y	5562.27
control de bombeo y filtrado	131.88
control de hilado	2970.05
sistema de movimientos X,Y	2983.34
mesa de trabajo	186.96
tanque de trabajo	150.76
Bombeo y filtrado	1732.05
Total =	13779.62

Como puede observarse, el material de mayor costo es el generador de arcos BX18 con un costo total de \$4,545.11. La complejidad de este componente complica su diseño, necesitándose más tiempo para su elaboración, además de ser necesario conseguir asesoría para su diseño, lo que se podría aumentar los costos, siendo más factible su adquisición.

4.2.2. COSTO DE MANO DE OBRA

A continuación, se hace el recuento económico en calidad de costo de mano de obra, realizándose el análisis de la siguiente manera: En base a experiencias laborales de los integrantes del grupo de trabajo y de personas que se dedican a trabajos mecánicos, además de cotizaciones realizadas, se han estimado los costos unitarios por pieza fabricada. Los subtotales se suman para obtener el costo total de mano de obra. Los detalles de los costos de mano de obra para la elaboración del sistema de hilado se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.11. Costos de mano de obra de sistema de hilado.

Elemento	C. U., \$	Tiempo de operación/unidad, h	Tiempo de entrega, días	Cant.	C. T., \$
Cabezal de hilo superior	50.00	8.00	2	1	50.00
Brazo inferior tipo L	50.00	5.00	2	1	50.00
Brida para polea motriz	25.00	4.00	2	2	50.00
Polea motriz	60.00	6.00	4	2	120.00
Eje polea motriz	15.00	1.00	4	2	30.00
Polea conducida	50.00	6.00	4	2	100.00
Eje de rueda tensora	15.00	1.00	4	2	30.00
Rueda tensora de poleas motrices	10.00	3.50	4	2	20.00
Boquilla (Inferior y Exterior)	25.00	6.00	4	2	50.00
Sujeción de boquilla inferior	20.00	6.00	2	1	20.00
Sujeción de boquilla superior	20.00	6.00	2	1	20.00
Regleta o nivel para boquilla superior	20.00	6.00	2	1	20.00
Acople de boquilla de superior	15.00	4.00	1	1	15.00
Tacos de soporte	4.00	0.50	2	2	8.00
Soporte para tornillo de potencia superior	30.00	1.00	1	1	30.00
Aislamiento	2.00	0.25	1	1	2.00
Sub total =					615.00

Los detalles de los costos de mano de obra para la elaboración del sistema de movimiento en los ejes X,Y se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.12. Costos de mano de obra de sistema de movimientos.

Elemento	C. U., \$	Tiempo de operación/unidad, h	Tiempo de entrega, días	Cant.	C. T., \$
Soporte para tornillo de potencia superior	30.00	1.00	1	1	30.00
Guarda de rodamientos de tornillo de potencia	5.00	3.00	1	1	5.00
Placa para chumaceras	20.00	32.00	8	2	40.00
Chumacera de soporte	80.00	48.00	15	8	640.00
Bujes de desgaste	20.00	5.50	10	8	160.00
Soporte para tuerca de tornillo de potencia	75.00	12.00	3	1	75.00
Soporte guía de Tornillo de Potencia Superior	20.00	1.00	2	2	40.00
Tornillo de Potencia Superior	60.00	24.00	2	1	60.00
Soportes guía de Tornillo de Potencia Inferior	20.00	1.00	2	2	40.00
Tornillo de Potencia Inferior	60.00	24.00	2	1	60.00
Base para servomotores	15.00	12.00	6	2	30.00
Sub total =					1180.00

Los detalles de los costos de mano de obra para la elaboración de la mesa de trabajo se presentan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.13. Costos de mano de obra de la mesa de trabajo.

Elemento	C. U., \$	Tiempo de operación/unidad, h	Tiempo de entrega, días	Cant.	C. T., \$
Mesa de trabajo principal	75.00	15.00	3	1	75.00
Sujetadores de pieza de trabajo	15.00	7.00	3	3	45.00
Sub total =					120.00

Los detalles de los costos de mano de obra para la elaboración del tanque de trabajo se presentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.14. Costos de mano de obra del tanque de trabajo.

Elemento	C. U., \$	Tiempo de operación/unidad, h	Tiempo de entrega, días	Cant.	C. T., \$
Tanque de dieléctrico	40.00	5.75	2	1	40.00
Guarda tanque	20.00	3.00	1	1	20.00
Sub total =					60.00

Los detalles de los costos de mano de obra para la elaboración de la estructura de soporte se presentan en la Tabla 4.14.

Tabla 4.15. Costos de mano de obra de estructura de soporte.

Elemento	C. U., \$	Tiempo de operación/unidad, h	Tiempo de entrega, días	Cant.	C. T., \$
Estructura de soporte	60.00	7.25	1	1	60.00
Pilares	15.00	0.50	4	4	60.00
Sub total =					120.00

Los detalles de los costos de mano de obra para la elaboración de los tanques para fluido dieléctrico se presentan en la Tabla 4.15.

Tabla 4.16. Costos de mano de obra de tanques para dieléctrico.

Elemento	C. U., \$	Tiempo de operación/unidad, h	Tiempo de entrega, días	Cant.	C. T., \$
Corte de láminas de acrílico	3.50	5.00	3	20	70.00
Lijado de paneles de acrílico.	30.00	6.00	2	2	60.00
Fijación de paneles de acrílico.	1.00	8.00	4	18	18.00
Tapadera y bisagras	5.00	8.00	1	2	10.00
Pruebas de estancamiento	5.00	8.00	1	2	10.00
Sub total =					168.00

Los detalles de los costos de mano de obra para la elaboración del sistema de bombeo y filtrado se presentan en la Tabla 4.16.

Tabla 4.17. Costos de mano de obra del sistema de bombeo y filtrado.

Elemento	C. U., \$	Tiempo de operación/unidad, h	Tiempo de entrega, días	Cant.	C. T., \$
Instalación de bombas centrifugas	100.00	4.00	1	2	200.00
Instalación de sistema de filtrado, tuberías y mangueras.	100.00	8.00	2	1	100.00
Pruebas de estancamiento	15.00	8.00	1	1	15.00
Sub total =					315.00

Los detalles de los costos de mano de obra para la elaboración del sistema de control se presentan en la Tabla 4.17.

Tabla 4.18. Costos de mano de obra del sistema de control.

Elemento	C. U., \$	Tiempo de operación/unidad, h	Tiempo de entrega, días	Cant.	C. T., \$
Instalación de componentes eléctricos en general	100.00	8.00	5	1	100.00
Sub total =					100.00

Los subtotales de los costos de mano de obra de los diversos sistemas que conforman a la máquina electroerosionadora se suman para obtener el costo total de mano de obra que se presenta en la Tabla 4.18.

Tabla 4.19. Costo de mano de obra.

Sistema	Sub totales, \$
Hilado	615.00
Movimientos	1180.00
Mesa de trabajo	120.00
Tanque de trabajo	60.00
Estructura de soporte	120.00
Tanques para dieléctricos	168.00
Bombeo y filtrado	315.00
Control	100.00
Total =	2678.00

El total del costo de mano de obra es de \$2678.00. Se justifica el costo debido a la complejidad de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo, además de la diversidad de sistemas que la componen.

4.2.3. COSTOS VARIABLES

Los costos variables son aquellos que se modifican de acuerdo a variaciones del volumen de producción, tanto de bienes como de servicios. A continuación, se describen los costos que se estima puede haber durante la elaboración de la máquina:

a) Costos de consumo eléctrico

Este costo se determina en base a la potencia de los motores, transformadores o resistencias eléctricas presentes en los equipos a utilizar en la elaboración de la máquina. Se toma como referencia el pliego tarifario publicado en Octubre de 2023 por la SIGET. La empresa que suministra servicio eléctrico a la Universidad de El Salvador es CAESS, y la forma de facturación para la universidad está en la categoría mediana demanda ($10 < kW \leq 50$) en la subcategoría media tensión con medición de potencia, siendo el costo de 0.133426 US\$/kWh [68].

Para el cálculo de los costos eléctricos por equipo a utilizar, se considera la potencia, el tiempo de utilización y la tarifa eléctrica en US\$/kWh, y sustituyendo esos datos en la Ec. 4.1:

$$\text{Costo por máquina} = (\text{Potencia})(\text{Tiempo de uso})(\text{Tarifa eléctrica}) \quad (4.1)$$

Se presenta el resumen de los costos eléctricos por cada equipo a utilizar en la elaboración de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo en la Tabla 4.19.

Tabla 4.20. Costos de consumo eléctrico por equipo.

Equipos	Potencia, kW	Tiempo de utilización, h	Costo por máquina, \$
Fresadora universal marca TITANIUM	3.00	24.0	9.61
Taladro de mesa marca TITANIUM	0.75	6.0	0.60
Soldador SMAW Elite Arc 140 M Mini	15.40	5.0	10.27
Torno paralelo marca Pinacho	4.00	15.0	8.01
Esmeriladora angular, marca DeWalt	1.20	5.5	0.88
Esmeriladora angular 4 ½ pulg, marca Truper	1.20	24.0	3.84
Taladro inalámbrico 12 V marca DeWalt.	0.02	6.0	0.01
Soldador cautín 60 W 120 V marca INCO	0.06	12.0	0.10
Total			33.32

b) Costo de depreciación de equipos

Para el cálculo del costo de depreciación de los equipos a utilizar para la elaboración de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo, se utilizaron los porcentajes del precio de maquinaria o bienes muebles usados, dados en la ley de impuesto sobre la renta, título IV, artículo 30, numeral 2 literal b, el cual establece el valor residual de la maquinaria luego de su uso o explotación. Estos valores se presentan en la Tabla 4.20 [69].

Tabla 4.21. Porcentajes de precio de maquinaria o bienes muebles usados [69].

Años de vida	Porcentaje del precio de maquinaria o bienes muebles usados
1	80
2	60
3	40
4 o más	20

Para el cálculo de la depreciación de los equipos también se utilizó el método de línea recta, que se representa en la Ec. 4.2:

$$Depreciación = \frac{\text{Costo inicial} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil del equipo}} \quad (4.2)$$

Siendo el valor residual el producto del costo inicial y el porcentaje del precio de la maquinaria usada en función de los años de vida útil. Los resultados de los costos de depreciación de los equipos a utilizar durante la elaboración de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo se presentan en la Tabla 4.21.

Tabla 4.22. Costos de depreciación de maquinarias usadas.

Equipos	Costo inicial, \$	Vida útil, años	Porcentaje de precio de maquinaria usada, %	Valor residual, \$	Depreciación, \$
Fresadora universal marca TITANIUM	6000.00	20	20	1200.00	240.00
Taladro de mesa marca TITANIUM	349.00	20	20	69.80	13.96
Soldador SMAW Elite Arc 140 M Mini	144.00	7	20	28.80	16.46
Torno paralelo marca Pinacho	9000.00	20	20	1800.00	360.00
Esmeriladora angular, marca DeWalt	125.00	5	20	25.00	20.00
Esmeriladora angular 4 ½ pulg, marca Truper	75.00	20	20	15.00	3.00
Taladro inalámbrico 12 V marca DeWalt.	165.00	20	20	33.00	6.60
Soldador caudín 60W 120 V marca INCO	8.50	5	20	1.70	1.36
				Total	661.38

c) Costo de consumibles

Se considera consumible todo objeto que se agota con su utilización. Sus costos son variables porque el consumo de cada material depende de factores como la calidad de estos, estado de la maquinaria donde se utilizarán, condiciones de uso, habilidad de las personas que los utilizarán, etc.

Se enlistan los consumibles a utilizar durante el proceso de elaboración de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo, las cantidades aproximadas y sus costos en la Tabla 4.22.

Como se mencionó al inicio de este literal, estos costos son variables. Por tanto, se considera un 20% con respecto a la suma de los costos de consumibles en concepto de imprevistos y así tener la certeza de no sobrepasar lo presupuestado en concepto de consumibles. Por tanto, el costo total de los consumibles es de \$278.24.

Tabla 4.23. Costo de consumibles.

Consumible	Cant.	Unidad	P. U., \$	P. T., \$
Set de brocas de titanio 3 - 10 mm 8 piezas TACTIX	1	ud.	15.95	15.95
Broca de titanio 1/8 pulg para metal TACTIX	1	ud.	0.90	0.90
Buril cuadrado ¼ x 4 pulg c5 cobalto CMEC	2	ud.	6.95	13.90
Fresa cuadrada de metal duro recubierta de carbonitruro de titanio (TiCN), 4 flautas, ½ pulg diámetro	1	ud.	69.07	69.07
Electrodo para acero inoxidable 312-16 3/32 pulg	1	lb.	18.00	18.00
Disco polifan 4 ½ x 7/8 plg A40 PFC	2	uds.	5.15	10.30
Disco polifan 4 ½ x 7/8 plg A80 PFC	2	uds.	5.15	10.30
Disco de corte 4 ½ x 7/8 x 1.0mm para metal/acero inoxidable	5	uds.	1.75	8.75
Tiza jabonosa ½ x 5 plg	5	uds.	0.30	1.50
Lija de agua 400 3M	5	uds.	1.00	5.00
Lija de agua 1000 3M	5	uds.	1.15	5.75
Aceite soluble (taladrina)	1	gal.	39.95	39.95
Pegamento para pvc de 950 ml TANGIT	1	ud.	32.50	32.50
			Subtotal	231.87
			Imprevistos (20%)	46.37
			Total (subtotal + imprevistos)	278.24

d) Total de costos variables

Realizando la sumatoria de los costos variables en concepto de consumo eléctrico, depreciación de equipos y de consumibles, se obtiene un valor de \$972.94.

4.2.4. COSTO TOTAL DEL PROYECTO

Se presentan los costos totales en concepto de materiales de fabricación, mano de obra y costos variables, además del costo total del proyecto en la Tabla 4.23.

Tabla 4.24. Costos totales del proyecto.

Costo en concepto de	Valor, \$
Materiales de fabricación	13779.61
Mano de obra	2678.00
Variables	972.94
Costo total del proyecto	17430.55

El costo de mayor valor es en concepto de materiales de fabricación, debido a la complejidad del proyecto y la diversidad de sistemas integrados para su correcto funcionamiento. El material de mayor costo (y la mayor inversión del proyecto) es el generador de arco BX18 con un valor de \$4545.11. La complejidad de este componente aumenta su costo, además de la tecnología con la que está diseñado.

Los costos de mano de obra y variables son \$3650.94, lo que es una inversión justificable, ya que si se compraran todos los componentes para la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo propuesta, los costos de materiales de fabricación aumentarían, así como el costo total del proyecto, debido al alto costo de estos componentes y los costos de envío, ya que la mayoría no se encuentran disponibles en el mercado nacional.

4.3. PARÁMETROS MÁS RELEVANTES DEL PROYECTO

Finalmente entre las Tablas 4.25 y 4.30 se presenta los parámetros más relevantes del proyecto. Así, en la Tabla 4.25 se presentan los parámetros de la máquina y del proceso de corte.

Tabla 4.25. Parámetros de máquina y proceso de corte.

Parámetros	Valores
Recorrido máximo en eje X	174 mm
Recorrido máximo en eje Y	353 mm
Máximas dimensiones de la pieza	293 x 293 mm x 10 mm
Peso máximo de la pieza	13 kg
Máxima velocidad de los ejes	800 mm/min
Diámetro del hilo electrodo	0.25 mm
Peso total de la máquina	64 kg
Altura máxima	470 mm
Superficie en planta	1240 x 625 mm

En la Tabla 4.26 se presenta los parámetros más importantes referentes al generador de pulsos BX18, responsable de controlar las descargas eléctricas que cortarán la pieza de trabajo y los movimientos en los ejes X,Y.

Tabla 4.26. Resumen generador de pulsos BX18.

Parámetros	Valores
Voltaje de entrada	110-240 V AC
Corriente de salida	2-30 A, ajustable en 0.1 A
Voltaje máximo de salida	150 V
Tiempo de encendido (descarga)	1-100 μ s, en pasos de 1 μ s
Tiempo de apagado	1-100 μ s, en pasos de 1 μ s
Temperatura de funcionamiento	0 a 35 °C

En la Tabla 4.27 se presenta los parámetros más importantes referentes al controlador C-Arc, responsable de controlar la tensión y velocidad de alimentación del hilo electrodo.

Tabla 4.27. Resumen controlador C-Arc.

Parámetros	Valores
Voltaje de entrada	5 V DC, +/- 5%
Corriente de entrada	Menos que 100 mA
Corriente máxima de salida aislada	20 mA
Voltaje de salida	5 V +/- 5%
Condiciones de temperatura de servicio	0 – 30 °C

En la Tabla 4.28 se presenta los parámetros más importantes referentes a la placa Arduino Mega 2560, responsable de controlar el sistema de bombeo y filtrado.

Tabla 4.28. Resumen placa Arduino Mega 2560.

Parámetros	Valores
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines de entrada analógica	16
Corriente DC por pin de E/S	20 mA
Corriente DC para pin de 3.3 V	50 mA
Longitud	101.52 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	37 g

En la Tabla 4.29 se presenta los parámetros más importantes referentes al sistema de bombeo y filtrado encargado de limpiar las partículas metálicas desprendidas del proceso de corte.

Tabla 4.29. Resumen de sistema de bombeo y filtrado.

Parámetros	Valores
Combinación de filtros	Sedimento PP + carbón en bloque + membrana UF
Diámetro del filtro	60 mm
Altura del filtro	260 mm (sin tapa) o 282 mm (con tapa)
Entrada/salida	Racor rápido de 1/4
Peso bruto	15 kgs
Bomba de chorro Franklin Electric serie Versa Jet FVJ05CI	
Voltaje	1 fase, 115/230 V
Motor	1/2 HP
Suministro	20-40 o 30-50 psi
Bomba centrífuga multietapa LEO modelo 2ACm300H	
Amperaje de consumo	8.2 A
Potencia	3 KW / 4 HP
Succión máxima	8 m
Altura máxima de elevación	70 m (7 bar)
Conexión Aspiración	1 ½ pulg
Conexión Impulsión	1 1/4 pulg
Caudal máximo entregado	220 L/min (12,000 L/h – 12 m ³ /h)

En la Tabla 4.30 se presenta los costos relacionados a la fabricación de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo propuesta. La sumatoria de estos costos representa el costo total del proyecto.

Tabla 4.30. Costos del proyecto.

Descripción	Costo, \$
Materiales de fabricación	13800.00
Mano de obra	2680.00
Variables	980.00
Costo total del proyecto =	17460.00

CONCLUSIONES

- Con base en el análisis del costo total del proyecto, es evidente que la propuesta presentada en este Trabajo de Graduación es más económica en comparación con las ofertas comerciales disponibles en el mercado donde su costo inicia desde los \$25,000. Este aspecto financiero es crucial, ya que no solo garantiza la eficiencia económica, también podría tener un impacto significativo en la aceptación del proyecto.
- La factibilidad de fabricar los componentes mecánicos necesarios para la fabricación de la máquina electroerosionadora en talleres locales con materiales fácilmente disponibles en el mercado nacional refuerza la robustez mecánica del proyecto. Este enfoque no solo simplifica su elaboración, sino que también reduce la dependencia de insumos extranjeros, mitigando posibles riesgos logísticos y económicos.
- Desde el punto de vista eléctrico, la investigación respalda la viabilidad del proyecto, ya que los componentes eléctricos y electrónicos necesarios son accesibles tanto en el mercado nacional como en el extranjero. La disponibilidad de estos elementos es esencial para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la máquina electroerosionadora.

REFERENCIAS

- [1] Electrical discharge machining. (s.f.). Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_discharge_machining
- [2] Sommer, S., & Sommer, C. (2017). Complete EDM Handbook. Advance Pub.
- [3] Rúa, J. R. (2003). Proceso de mecanizado por electroerosión. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/319995360_Proceso_de_mecanizado_por_electroerosion
- [4] Introducción a la electroerosión. Centro Integrado Politécnico ETI de Tudela. (s.f.).
<http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/mipagina/downloads/electroerosiononamio.pdf>
- [5] Evolución tecnológica de las máquinas de electroerosión por penetración ONA. (s.f.). Interempresas. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1916-Evolucion-tecnologica-de-las-maquinas-de-electroerosion-por-penetracion-ONA.html>
- [6] Wire selection. (s.f.). Novotec - EDM supplies & consumables. <https://www.novotec-edm.com/wire-selection>
- [7] Jameson, E. C. (2001). Electrical Discharge Machining (Primera ed.). Society of Manufacturing Engineers.
- [8] Wire EDM | Makino. (s.f.). Makino | CNC Machine Tool Manufacturer & Machining Centers.
<https://www.makino.com/en-us/machine-technology/machines/wire-edm>
- [9] Villarreal, E. Q. (s.f.). Intercambio Iónico.
<https://es.scribd.com/presentation/367651184/INTERCAMBIO-IONICO>
- [10] VERLEK Ingeniería SAS. (Noviembre 2020). Métodos para desmineralizar agua con resinas: intercambio iónico.
- [11] Equipos y Laboratorio de Colombia. (s.f.).
<https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/desionizaciOn-del-agua>
- [12] Hovstadius, G., & Bolles, S. (2018). Manual de optimización de sistemas de bombeo.
- [13] Ordóñez Jiménez, J. L. (s.f.). Filtros para electroerosión: La Importancia de un Cambio Oportuno. <https://es.scribd.com/document/333745383/Filtros-EDM>
- [14] Air Quality de México. (Junio 2021). Principios de filtración de líquidos.
- [15] Understanding ISO 6892-1:2016 and the Most Notable Changes. (s.f.). AZoM.com.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13017>
- [16] Science Signpost Publishing INC. (s.f.). Differences of Latest Versions of ISO 6892-1 and ASTM E8 Tensile Testing Standards. <https://www.ss-pub.org/wp-content/uploads/2018/01/BCR2017112202.pdf>
- [17] American Society for Testing and Materials. (2013). Designation: E8/E8M – 13a. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [18] Serviaceró. (s.f.). Hoja técnica SAE 1045.
https://portal.serviacero.com/assets/webfiles/3/files/50_1045.pdf
- [19] Aceromafe. (Junio 2021). Acero 1045: Características y usos.

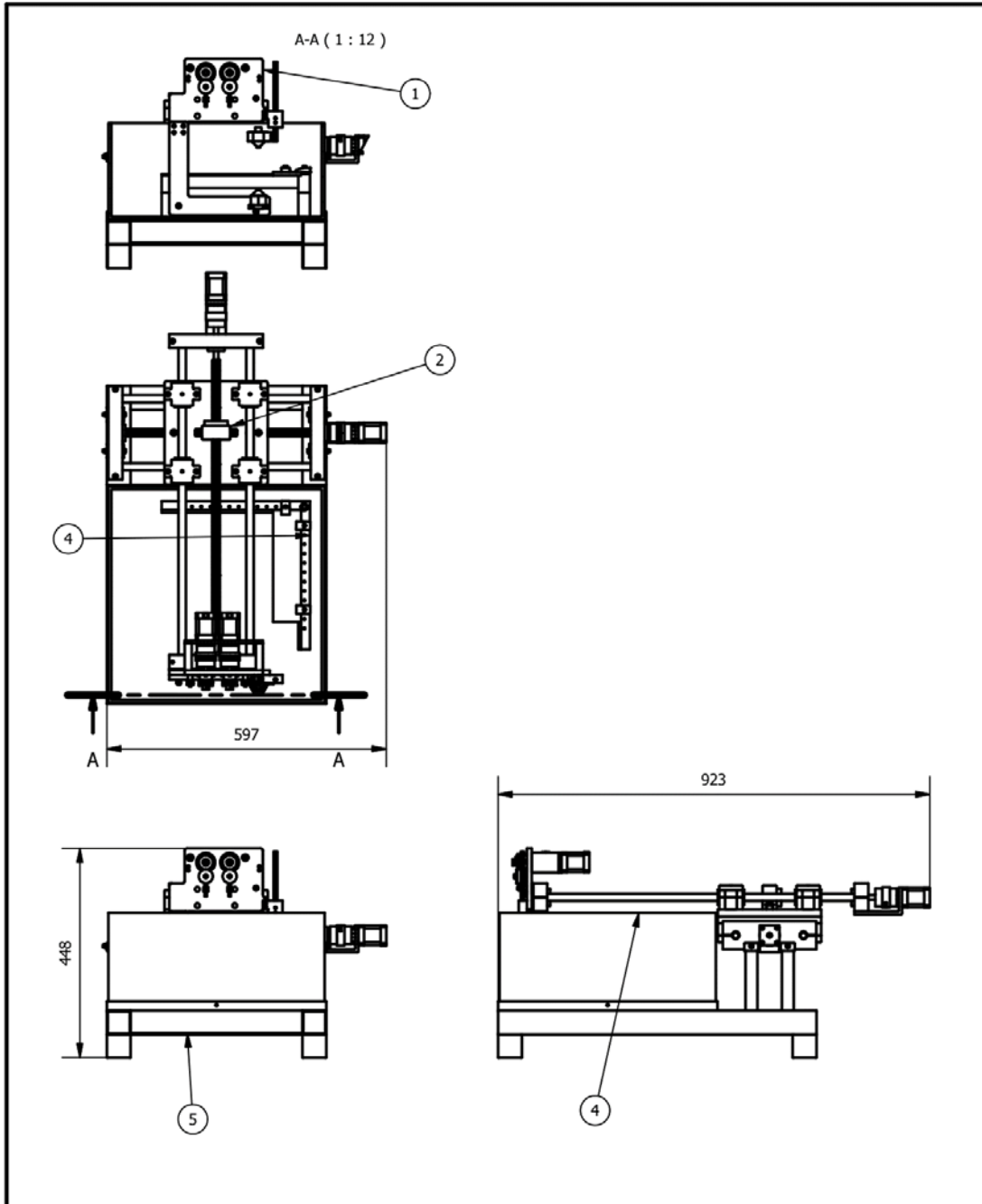
- [20] ACERO 1045. (s.f.). Ingeniería de los materiales.
<https://ingenieriadelosmaterialess.blogspot.com/2015/11/acero-1045-ficha-tecnica.html>
- [21] Mott, R. L. (2006). Diseño de elementos de máquinas (Cuarta ed.). Prentice Hall México.
- [22] Nisbett, J. K., & Budynas, R. G. (2019). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (Novena ed.). McGraw-Hill.
- [23] Deutschman, A. D., Michels, W. J., & Wilson, C. E. (1975). Diseño de máquinas, Teoría y Práctica (Primera ed.). Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
- [24] Norfolk Bearings and Supply Company, Inc. (2007). Falk Wrapflex Elastomer Couplings.
- [25] Norton, R. L. (2009). Diseño de maquinaria. Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos (Cuarta ed.). P. E. Roig Vázquez, Ed. McGraw-Hill.
- [26] Sistema de control. (2003, 3 de diciembre). Wikipedia.
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control
- [27] Arduino: Guía completa para principiantes y expertos | Aprende ya. (s.f.). aula21 | Formación para la Industria. <https://www.cursosaula21.com/arduino-todo-lo-que-necesitas-saber/#:~:text=La%20placa%20Arduino%20se%20conecta,como%20sensores,%20motores%20y%20luces>
- [28] Shields para Arduino. (s.f.). Aprendiendo Arduino.
<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2015/03/23/shields-para-arduino/>
- [29] Que es un servomotor y como funciona - Ingeniería Mecafenix. (s.f.). Ingeniería Mecafenix.
<https://www.ingmecafenix.com/electronica/motores-electronicos/servomotor/>
- [30] M. M. Kane, A. A. Phanse, H. J. Bahirat y S. Kulkarni (2020). Classification and comparative study of EDM pulse generators.
https://www.researchgate.net/publication/342146786_Classification_and_Comparative_Study_of_EDM_Pulse_Generators
- [31] L. Straka y G. Dittrich (2019). Intelligent Control System of Generated Electrical Pulses at Discharge Machining.
https://www.researchgate.net/publication/338639877_Intelligent_Control_System_of_Generated_Electrical_Pulses_at_Discharge_Machining
- [32] Carga (electricidad). (2015, 26 de febrero). Wikipedia.
[https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_\(electricidad\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_(electricidad))
- [33] Back to Basics (3/6): Wire EDM Machine Basics | EDM Proud. (s.f.). EDM Proud | EDM is what we do. <https://edmproud.com/back-to-basics-3-6-wire-edm-machine-basics/#:~:text=Wire%20EDMs%20require%20an%20NC,and%20cutting%20of%20the%20wire>
- [34] The Differences Between G Code and M Code | American Micro. (s.f.). AmericanMicroIndustries. <https://www.americanmicroinc.com/resources/difference-g-code-m-code/#:~:text=M%20code%20is%20the%20machine,particular%20operations%20of%20the%20equipment>
- [35] Camworks | DISEGNO SOFT SRL. (s.f.). DISEGNO SOFT SRL.
<https://disegnosoftware.com.ar/camworks.php>
- [36] Soldadura de acero inoxidable. (Marzo 2021). Linde Latam Norte.
<https://tiendalinde.com.mx/blog/soldadura-de-acero-inoxidable/>

- [37] Sagati Tools, S.L. (s.f.). Hilo latón. <https://www.sagati.com/productos.html>
- [38] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, Quinta ed., PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [39] SKF (2006). Catálogo General.
- [40] A. Rehman Siddiqui (2010). Kerfs width analysis for wire cut electro discharge machining of SS 304L using design of experiments. https://www.researchgate.net/publication/289170368_Kerfs_width_analysis_for_wire_cut_electro_discharge_machining_of_SS_304L_using_design_of_experiments
- [41] Kollmorgen Corporation (2071). AKM Servo Motor Selection Guide.
- [42] Rexnord Corporation (2014). Falk Wrapflex Elastomeric Couplings (Inch).
- [43] ¿Cuáles son las propiedades del acrílico?- Zhejiang Leasinder Technology Co., Ltd. (s.f.). Fabricantes de láminas de acrílico, proveedores de láminas de acrílico al por mayor. <https://es.acrylicleasinder.com/news/what-are-the-properties-of-acrylic.html>
- [44] E. J. Osorio Díaz (2008). Recipiente rectangular con tirantes bajo presión hidrostática.
- [45] MXPA06013730A - Sistema y proceso de tratamiento de aguas. - Google Patents. (s.f.). Google Patents. <https://patents.google.com/patent/MXPA06013730A/es>
- [46] G. Wälder, D. Fulliquet, N. Foukia, F. Jaquenod, M. Lauria, R. Rozsnyo, B. Lavazais y R. Perez (2018). Smart Wire EDM machine.
- [47] Bomba centrífuga. (s.f.). Comparte y Descubre Presentaciones | SlideShare. <https://es.slideshare.net/mayconingarucagomez/bomba-centrifuga>
- [48] Franklin Electric FVJ05CI-P Shallow Well VersaJet Pro Series Jet Pump 0.5 HP 115/230V 1PH. (s.f.). R.C. Worst & Company Inc. <https://www.rcworst.com/franklin-electric-fvj05ci-p-shallow-well-versajet-pro-series-jet-pump-0-5-hp-115/230v-1ph.html>
- [49] Bomba centrífuga de dos etapas 2ACM | LEO. (s. f.). <http://pump-leo.com/1-3-2-1-multistage-centrifugal-pump/>
- [50] McT-Enterprises. (2023, 12 mayo). BOQUILLA PLÁSTICA DE 1/8 PARA MANGUERA MODULAR LOC-LINE - McTools. Mctools. <https://mctools.co/producto/boquilla-plastica-de-1-8-para-manguera-modular-loc-line/#>
- [51] A. Camprubí Graell (2007). Electro-Erosión: Fundamentos de su Física y su Técnica.
- [52] C. J. Pacheco Lepe (2018). Diseño de máquina de erosión electroquímica.
- [53] iAgua, R. (2020, 6 octubre). ¿Qué es la ultrafiltración? iAgua. [https://www.iagua.es/respuestas/que-es-ultrafiltracion#:~:text=La%20Ultrafiltraci%C3%B3n%20\(UF\)%20es%20un,travel%C3%A9s%20de%20una%20membrana%20semipermeable](https://www.iagua.es/respuestas/que-es-ultrafiltracion#:~:text=La%20Ultrafiltraci%C3%B3n%20(UF)%20es%20un,travel%C3%A9s%20de%20una%20membrana%20semipermeable)
- [54] BAXEDM. (2023, 19 marzo). Game changer for custom EDM builds! [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=U2BVB2LzUlo>
- [55] BAXEDM (s.f.). BX18 Arc generator Installation and EtherCAT programmers manual.
- [56] BAXEDM (s.f.). C-arc controller manual.
- [57] Shenzhen ReitE Electrical and Mechanical Technology Co., Ltd. (s.f.). ECR60/ECT60 User manual.

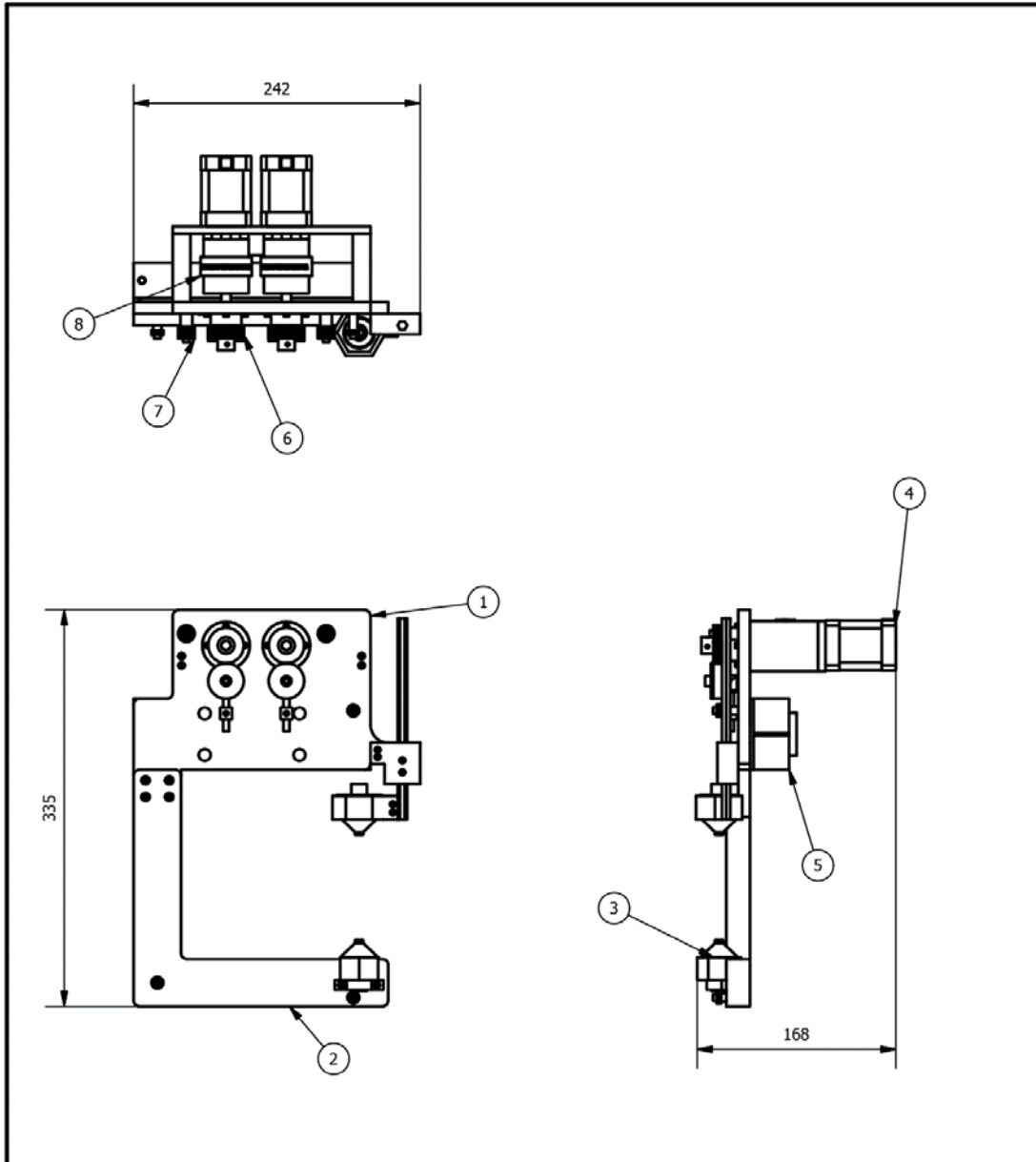
- [58] David, & David. (2020, 6 noviembre). Minisforum GK41 un compacto mini PC con 8 GB de RAM y salidas 4K@60fPS. AndroidPC.es. <https://androidpc.es/minisforum-gk41-opinion-specs/>
- [59] Antonio. (2020, 8 agosto). Arduino Mega 2560 Características, especificaciones | Proyecto Arduino. Proyecto Arduino. <https://proyectoarduino.com/arduino-mega-2560/>
- [60] Gravity Analog Electrical Conductivity Sensor Meter V2 K=1 SKU DFR0300-DFRoBoT. (s. f.). https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Electrical_Conductivity_Sensor__Meter_V2__K%3D1__SKU_DFR0300
- [61] Sensor ultrasonido HC-SR04. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú. <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>
- [62] Tecnick (s.f.). Modulo zumbador Activo (Buzzer) KY-012 para Arduino.
- [63] TECmikro Ecuador. (s. f.). Pantalla LCD 20x4 - Display LCD 20x4. [https://tecmikro.com/led-lcd/182-pantalla-lcd-20x4.html#:~:text=La%20pantalla%20LCD%2020x4%20\(conocido,por%20I%C3%ADnea%2C%20en%204%20I%C3%ADneas](https://tecmikro.com/led-lcd/182-pantalla-lcd-20x4.html#:~:text=La%20pantalla%20LCD%2020x4%20(conocido,por%20I%C3%ADnea%2C%20en%204%20I%C3%ADneas)
- [64] OpenAI. <https://chat.openai.com/>.
- [65] Wokwi - online ESP32, STM32, Arduino Simulator. (s. f.). <https://wokwi.com/>
- [66] D. Ghodsiyeh y A. Golshan (2013). Review on Current Research Trends in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM).
- [67] SKF (2016). SKF Power Transmission Belts.
- [68] Tarifas de Electricidad año 2023. (2023, enero 19). Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. <https://www.siget.gob.sv/gerencias/electricidad/tarifas-de-electricidad/tarifas-de-electricidad-ano-2023/>
- [69] Ley de impuesto sobre la renta. (s/f). Oas.org. Recuperado el 6 de diciembre de 2023, de https://www.oas.org/juridico/spanish/mesicic3_slv_renta.pdf

ANEXOS

ANEXO A: PLANOS DE FABRICACIÓN



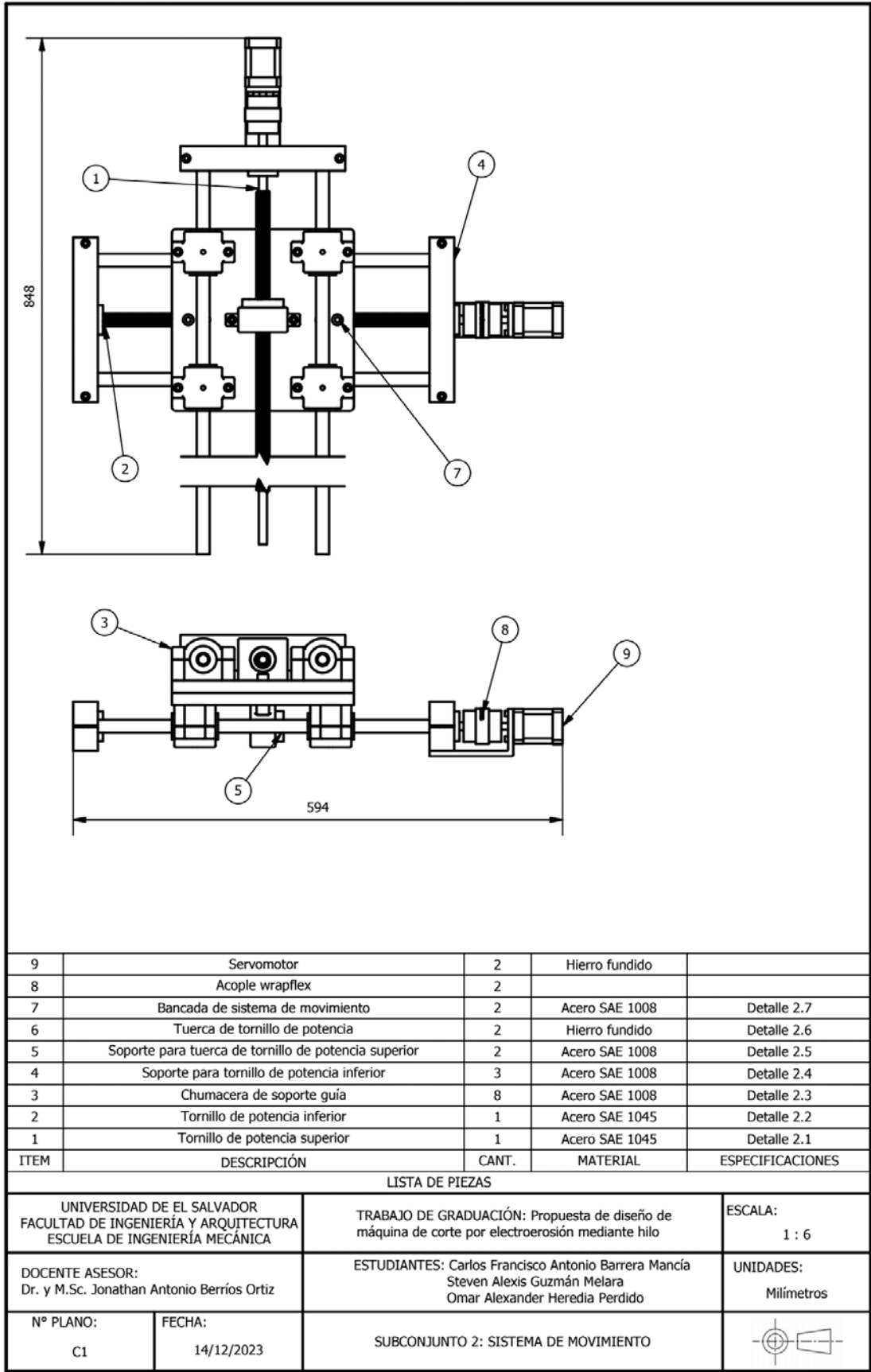
5	Estructura de soporte	1	Acero SAE 1008	Subconjunto 5
4	Tanque de dieléctrico	1	Acero SAE 304L	Subconjunto 4
3	Mesa de trabajo	1	Acero SAE 304L	Subconjunto 3
2	Sistema de movimiento	1	Acero SAE 1045	Subconjunto 2
1	Sistema de hilo	1	Acero SAE 304L	Subconjunto 1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIALES	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo		ESCALA: 1 : 12
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancia Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: A1	FECHA: 14/12/2023	CONJUNTO: ELECTROEROSIONADORA DE CORTE POR HILO		



8	Acople flexible wrapflex	2		
7	Polea conductora	2	Acero SAE 304L	Detalle 1.6
6	Polea conducida	2	Acero SAE 304L	Detalle 1.5
5	Soporte para tornillo de potencia superior	1	Acero SAE 1045	Detalle 1.4
4	Servomotor	2	Hierro fundido	
3	Boquilla superior e inferior	2	Acero SAE 304L	Detalle 1.3
2	Cabezal inferior de hilo	1	Acero SAE 304L	Detalle 1.2
1	Cabezal superior de hilo	1	Acero SAE 304L	Detalle 1.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

LISTA DE PIEZAS

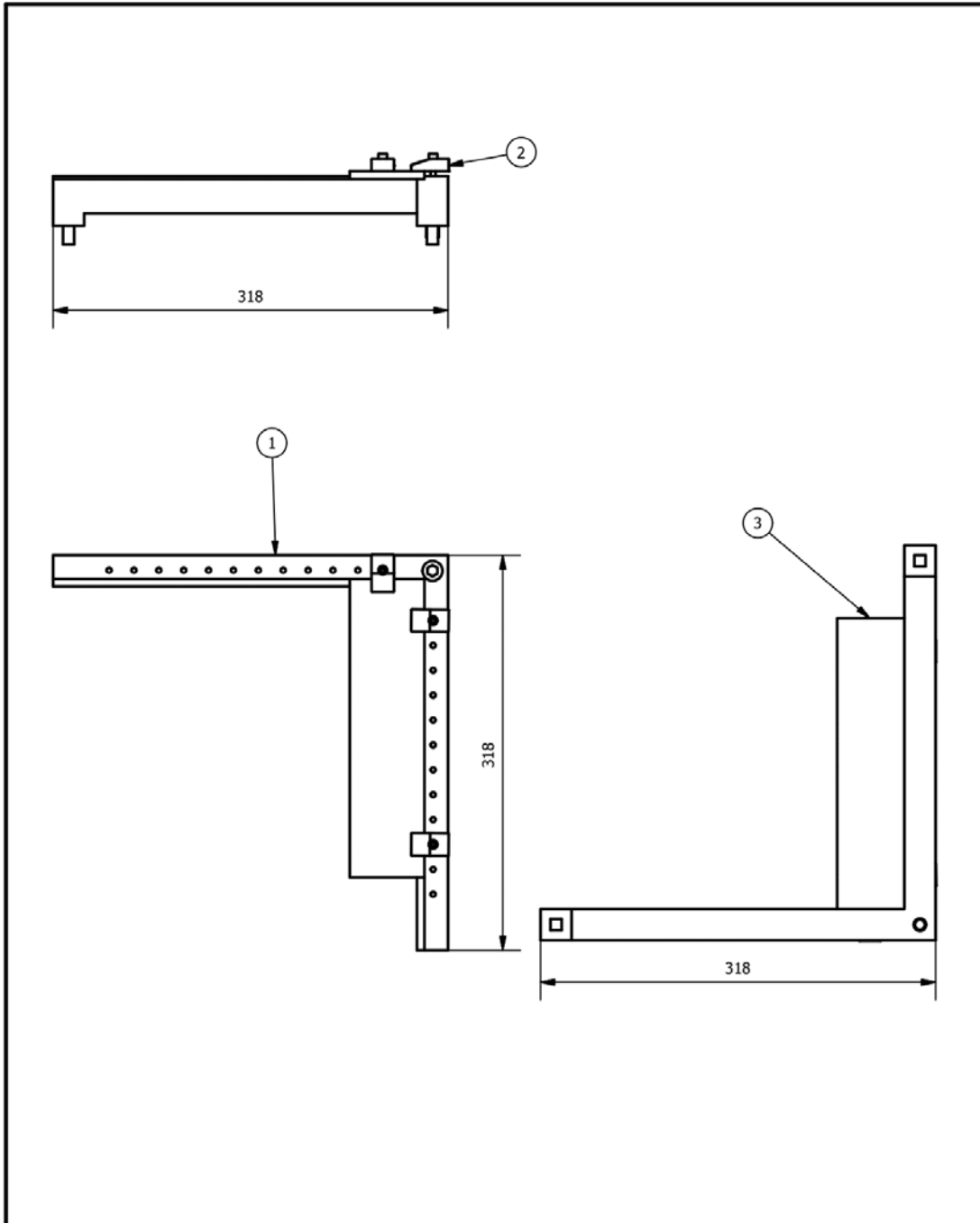
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 1 : 5
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancia Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: B1	FECHA: 14/12/2023	SUBCONJUNTO 1: SISTEMA DE HILO	



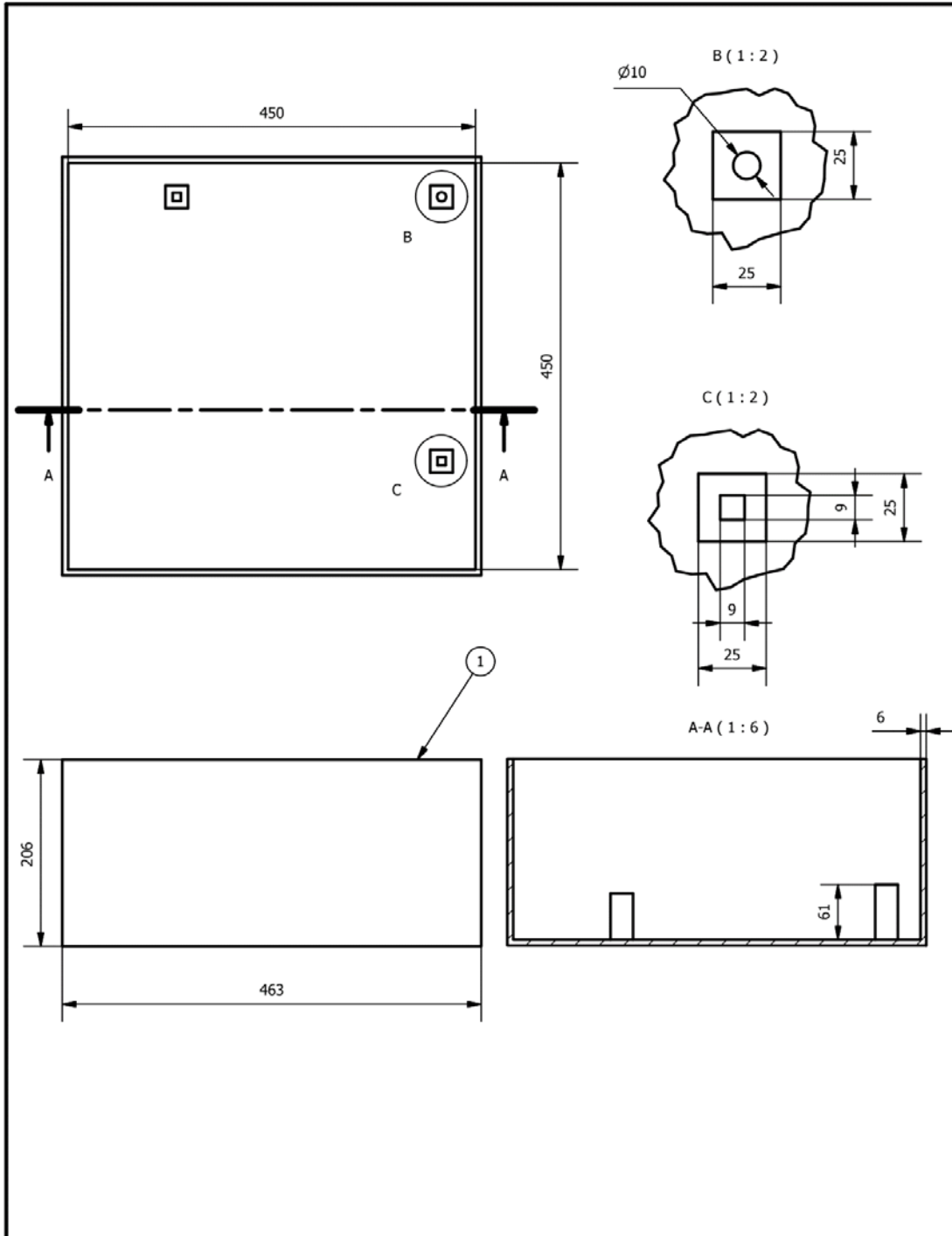
9	Servomotor	2	Hierro fundido	
8	Acople wrapflex	2		
7	Bancada de sistema de movimiento	2	Acero SAE 1008	Detalle 2.7
6	Tuerca de tornillo de potencia	2	Hierro fundido	Detalle 2.6
5	Soporte para tuerca de tornillo de potencia superior	2	Acero SAE 1008	Detalle 2.5
4	Soporte para tornillo de potencia inferior	3	Acero SAE 1008	Detalle 2.4
3	Chumacera de soporte guía	8	Acero SAE 1008	Detalle 2.3
2	Tornillo de potencia inferior	1	Acero SAE 1045	Detalle 2.2
1	Tornillo de potencia superior	1	Acero SAE 1045	Detalle 2.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

LISTA DE PIEZAS

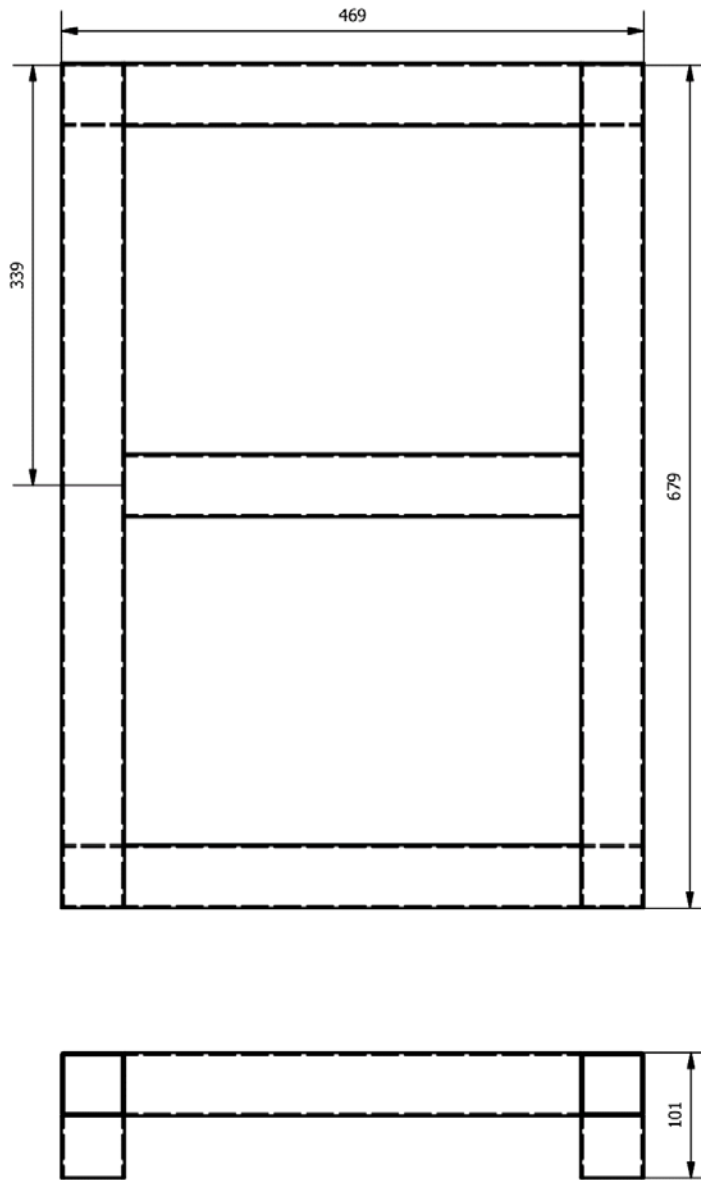
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 1 : 6
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancia Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: C1	FECHA: 14/12/2023	SUBCONJUNTO 2: SISTEMA DE MOVIMIENTO	



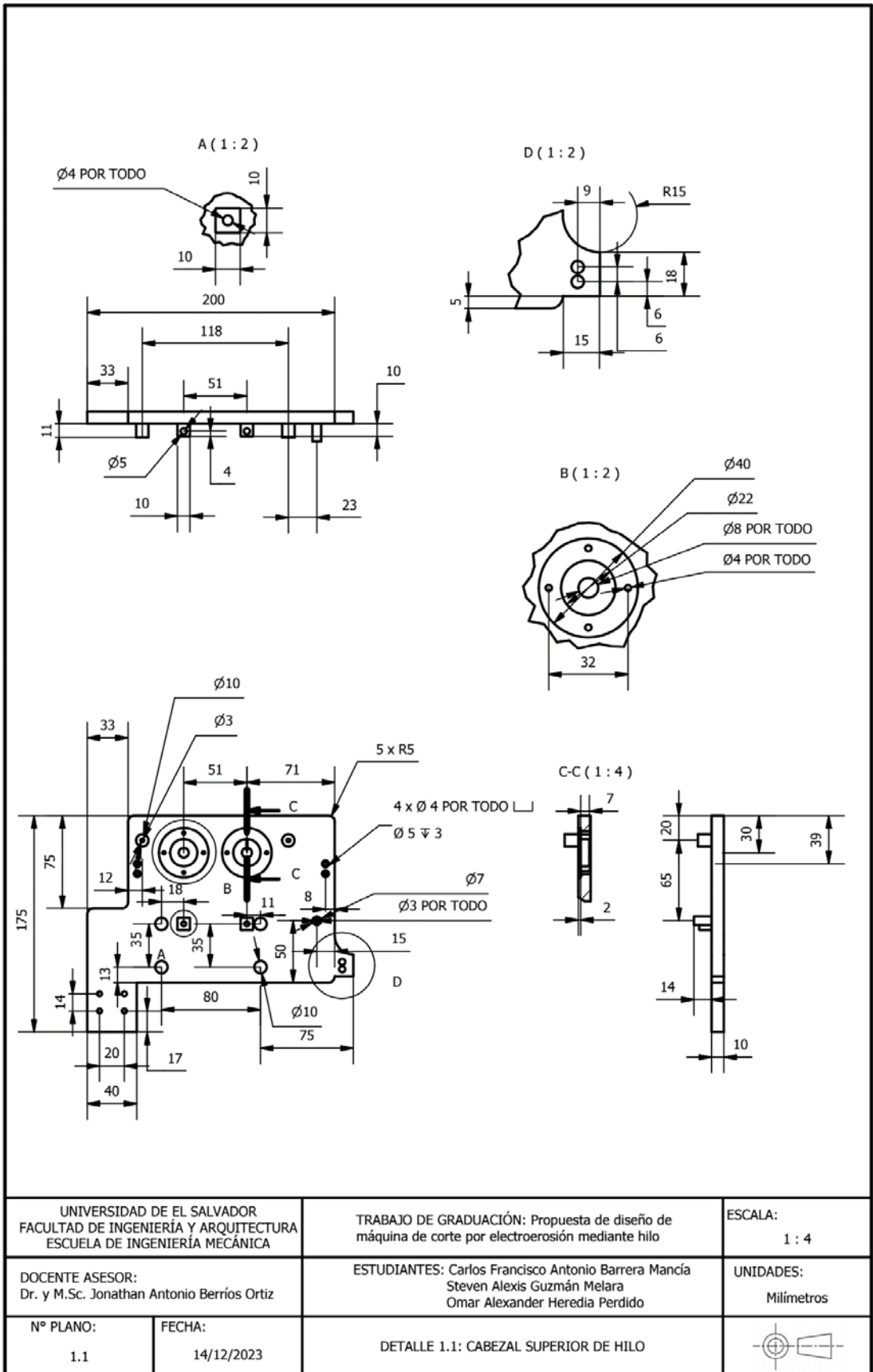
3	Pieza de trabajo	1	Acero SAE 1045	
2	Sujetadores de pieza de trabajo	1	Acero SAE 304L	Detalle 3.2
1	Mesa de trabajo principal	1	Acero SAE 304L	Detalle 3.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
LISTA DE PIEZAS				
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo		ESCALA: 1 : 4.5
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancia Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido		UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: D1	FECHA: 14/12/2023	SUBCONJUNTO 3: MESA DE TRABAJO		



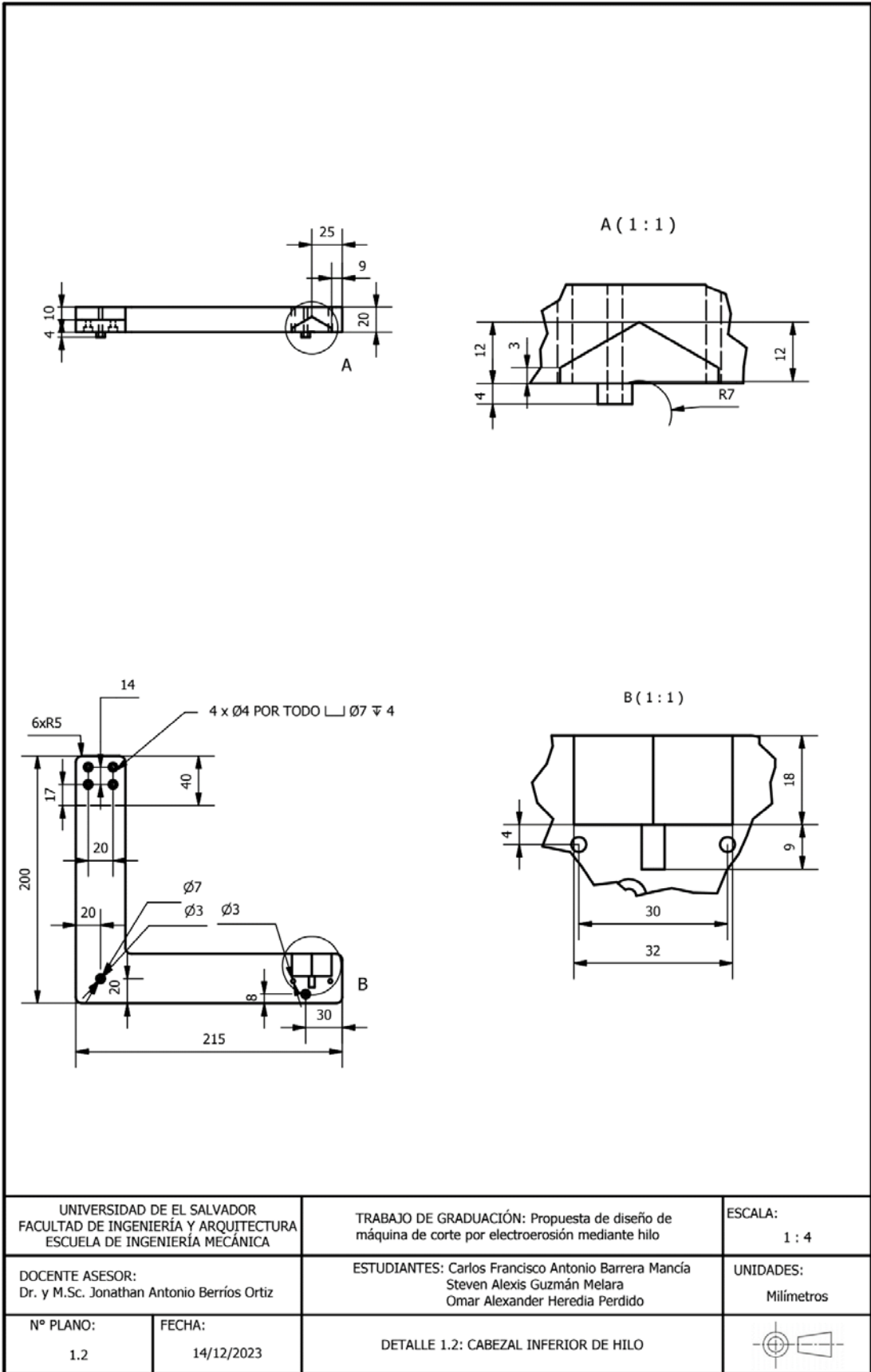
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
1	Tanque de dieléctrico	1	Acero SAE 304L	
LISTA DE PIEZAS				
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo		ESCALA: 1 : 6
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancía Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: E1	FECHA: 14/12/2023	SUBCONJUNTO 4: TANQUE DE DIELECTRICO		

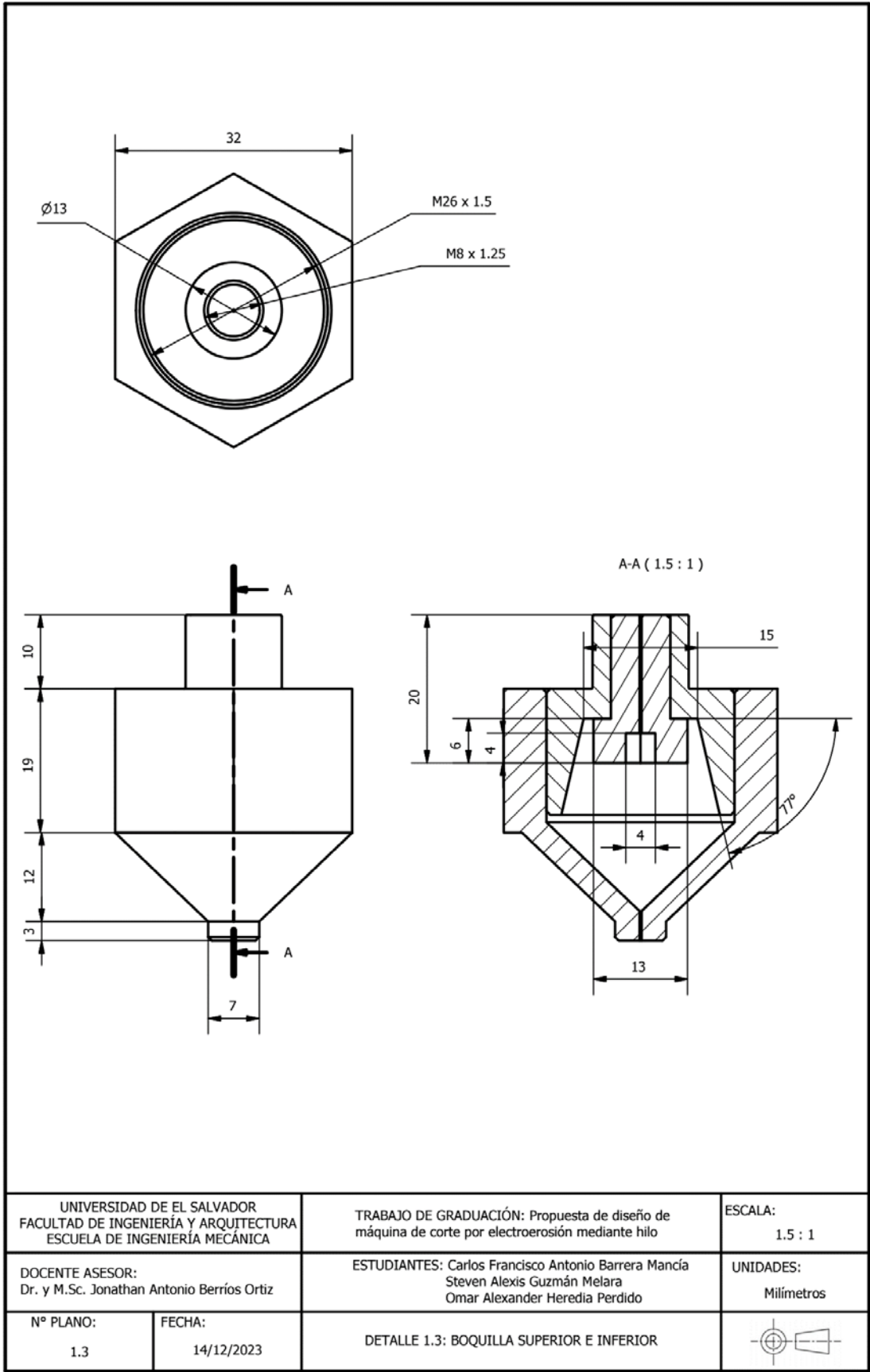


ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
1	Estructura de soporte	1	Acero SAE 1008	
LISTA DE PIEZAS				
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo		ESCALA: 1 : 5
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancía Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: F1	FECHA: 14/12/2023	SUBCONJUNTO 5: ESTRUCTURA DE SOPORTE DE TUBO CUADRADO DE 2" CHAPA 14		

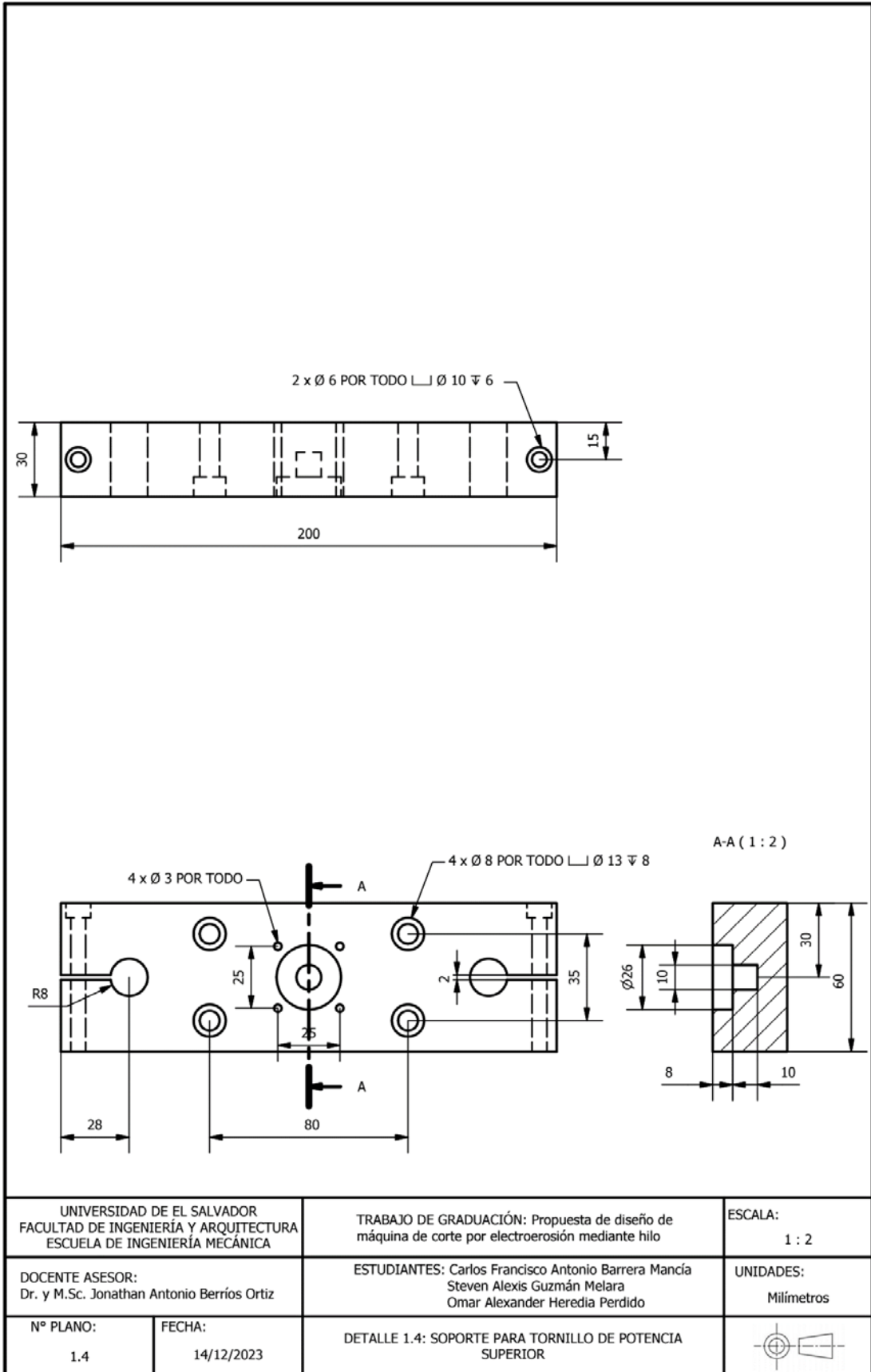


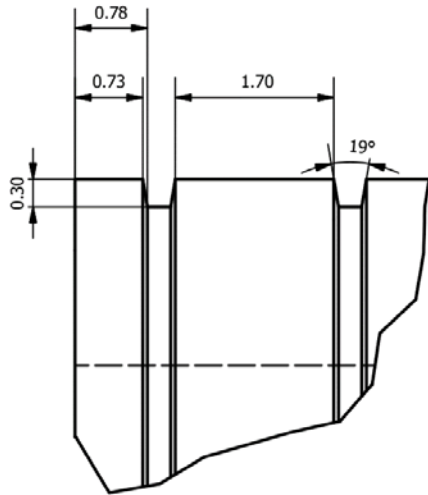
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 1 : 4
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancia Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 1.1	FECHA: 14/12/2023	DETALLE 1.1: CABEZAL SUPERIOR DE HILO	



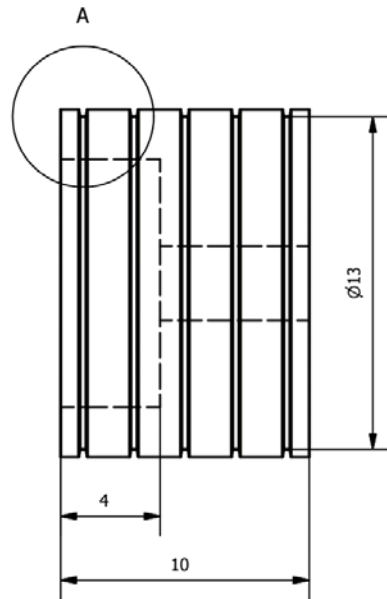
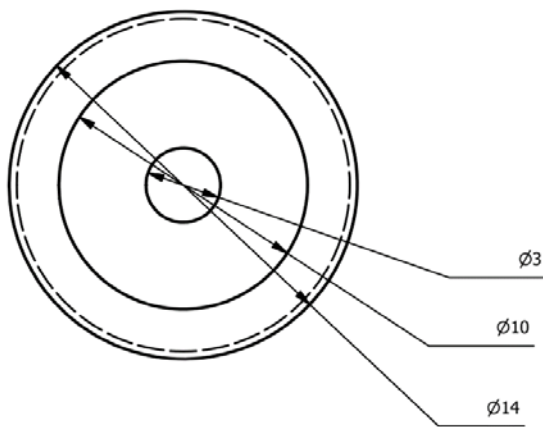


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 1.5 : 1
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancía Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: 1.3	FECHA: 14/12/2023	DETALLE 1.3: BOQUILLA SUPERIOR E INFERIOR	

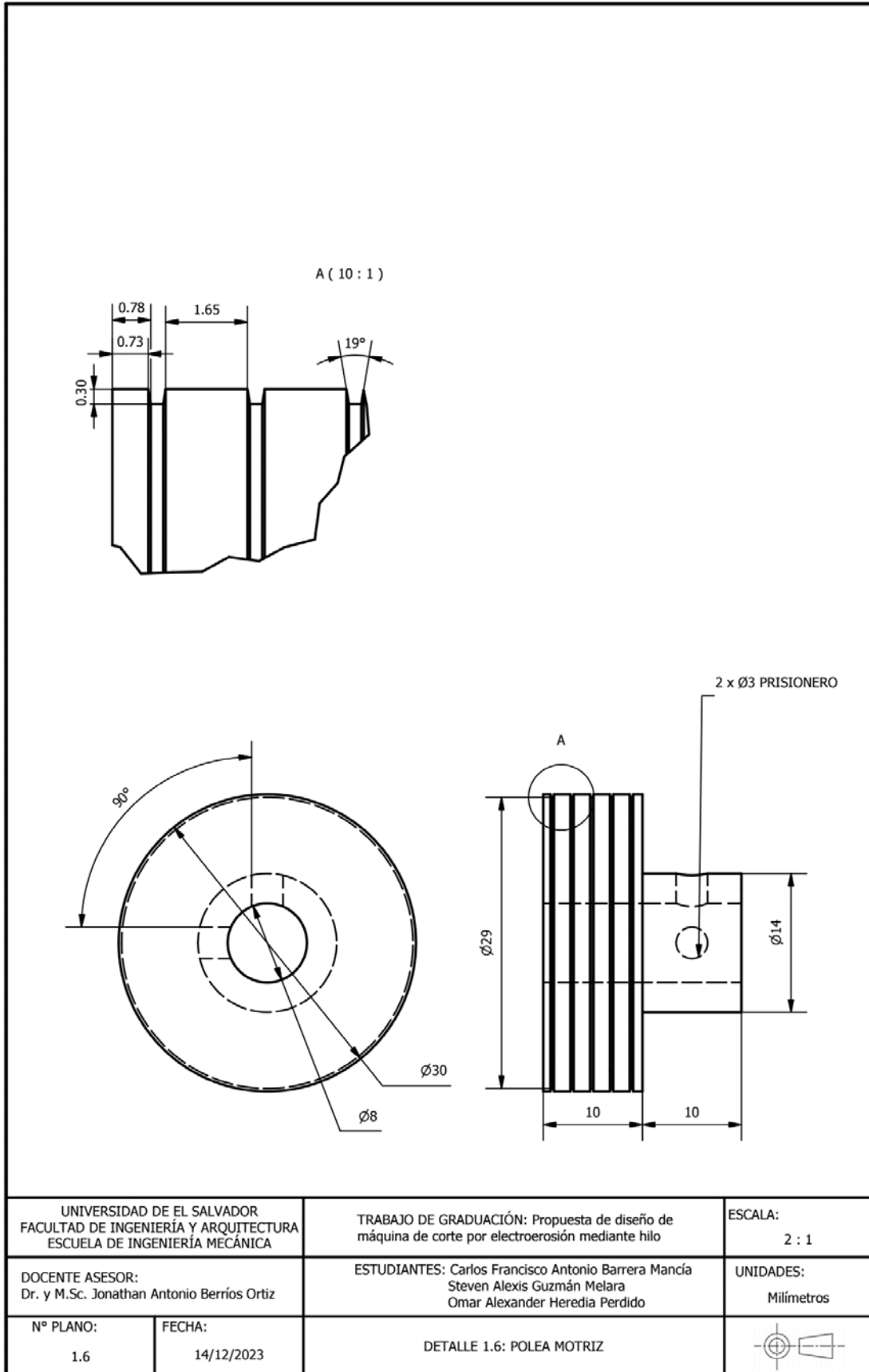


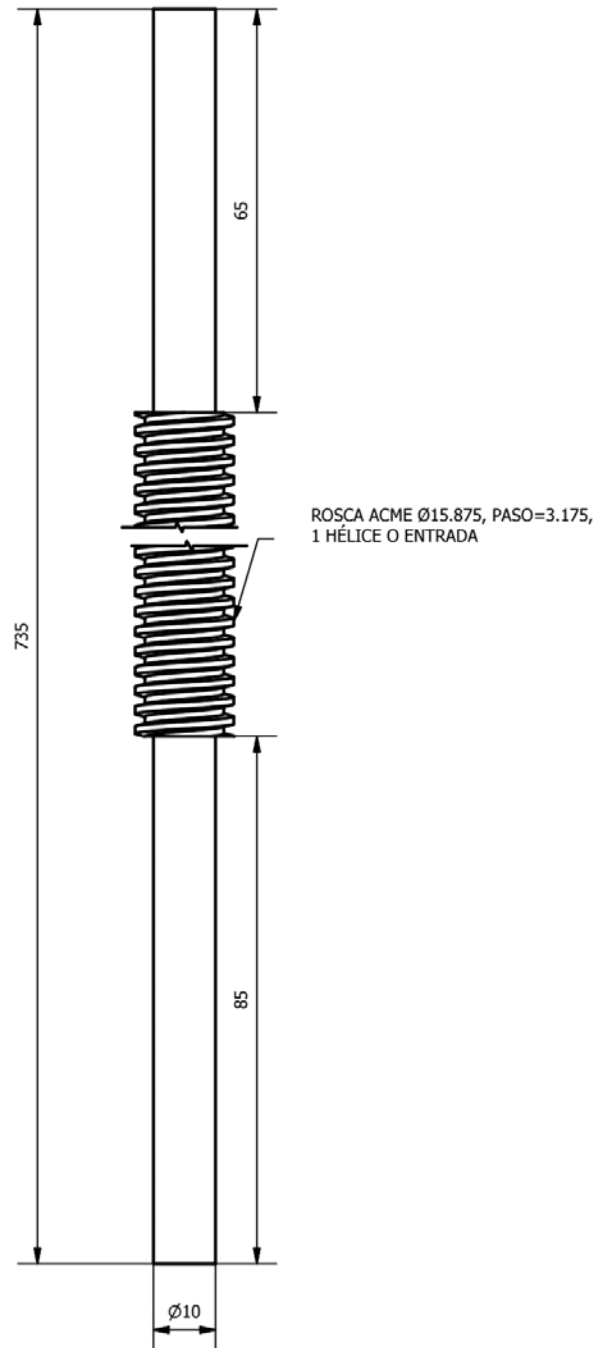


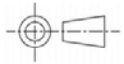
A (15 : 1)

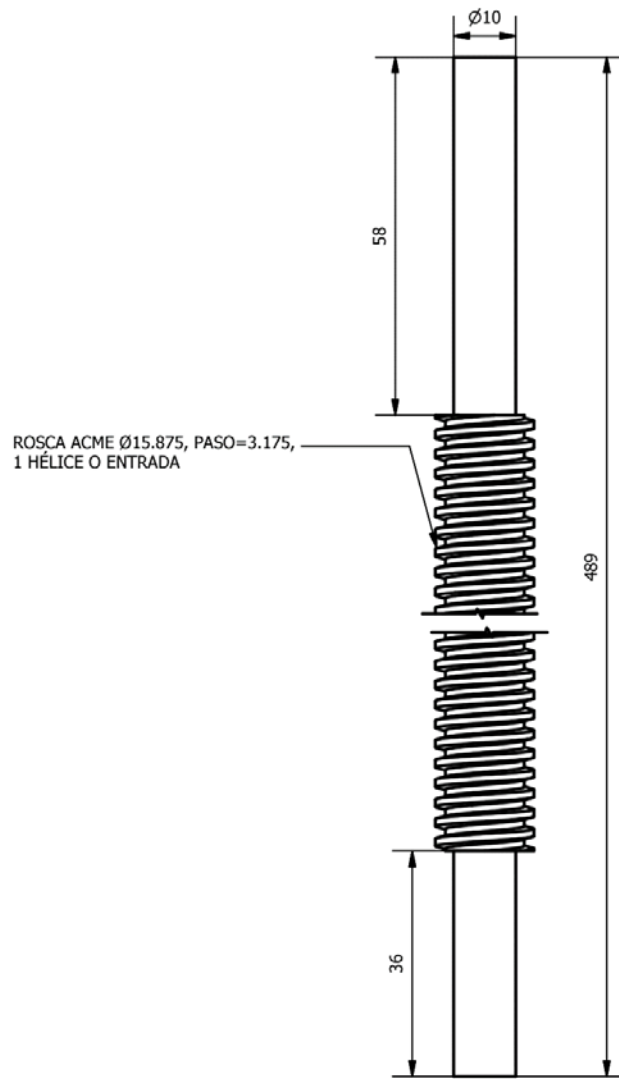


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 4 : 1
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancia Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: 1.5	FECHA: 14/12/2023	DETALLE 1.5: POLEA CONDUCCIDA	

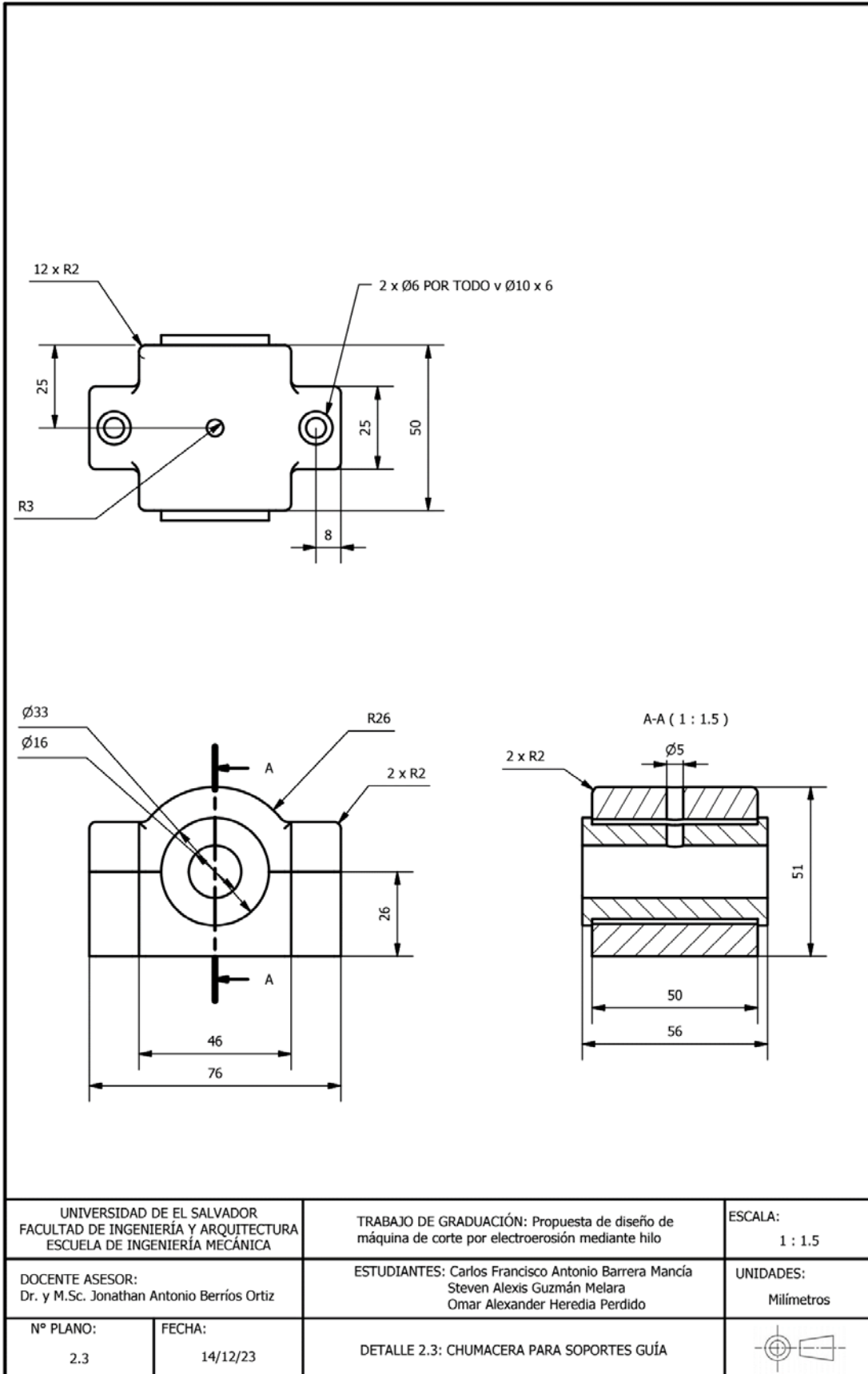


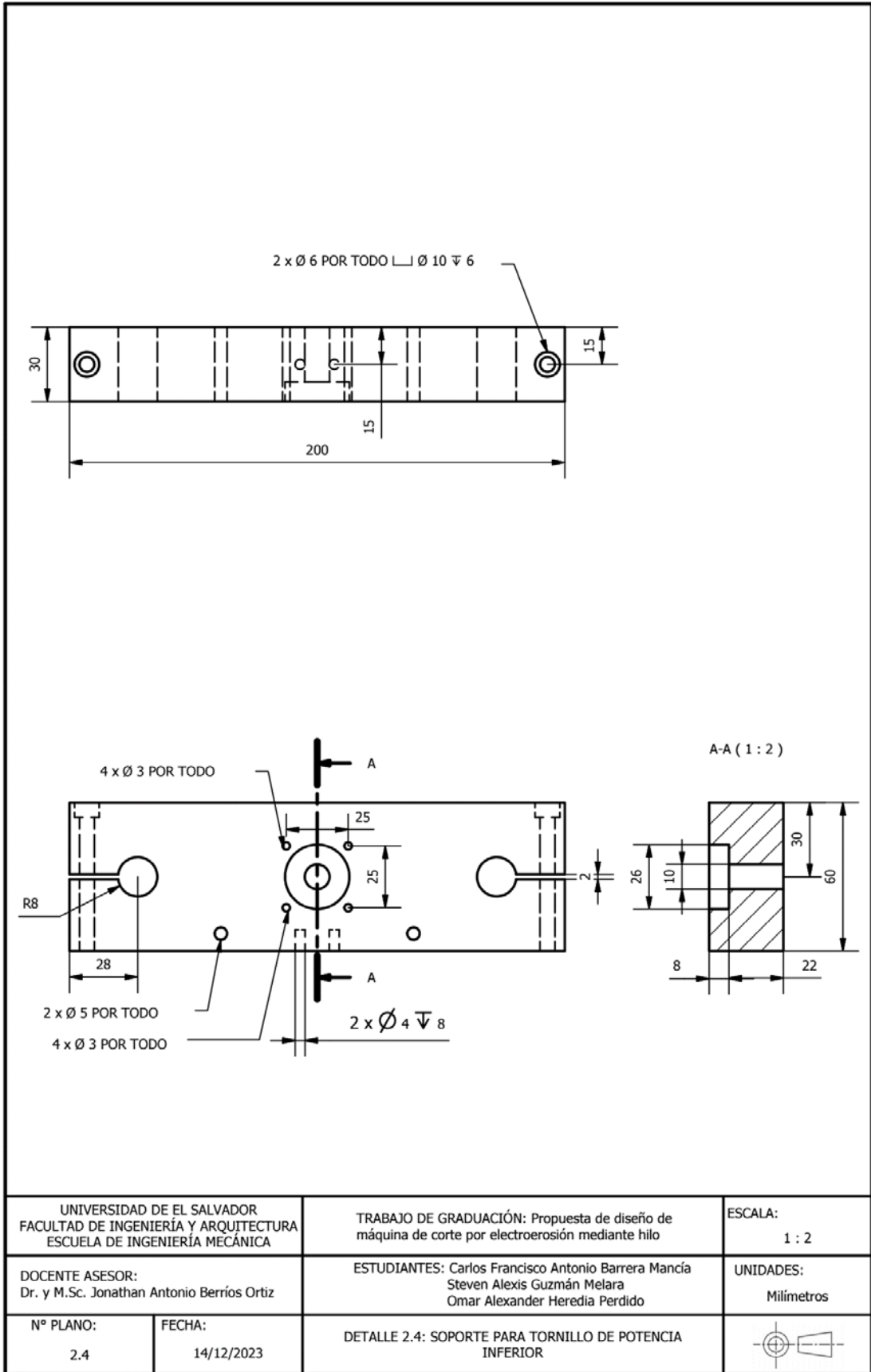


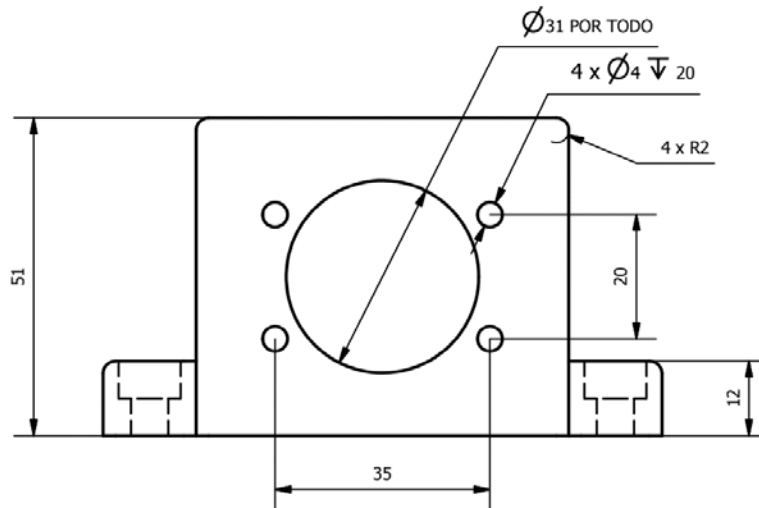
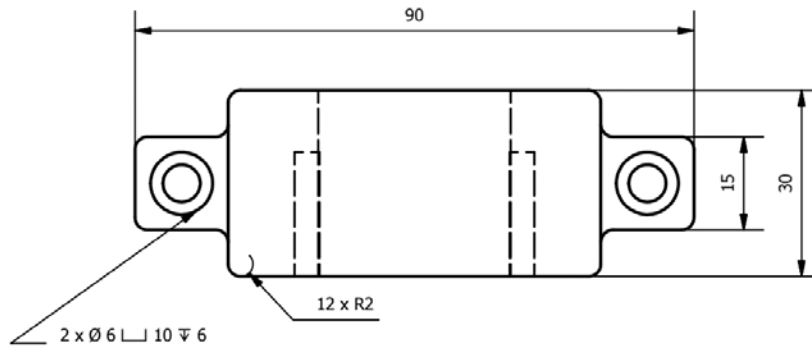
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 1 : 1
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancia Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 2.1	FECHA: 14/12/2023	DETALLE 2.1: TORNILLO DE POTENCIA SUPERIOR	



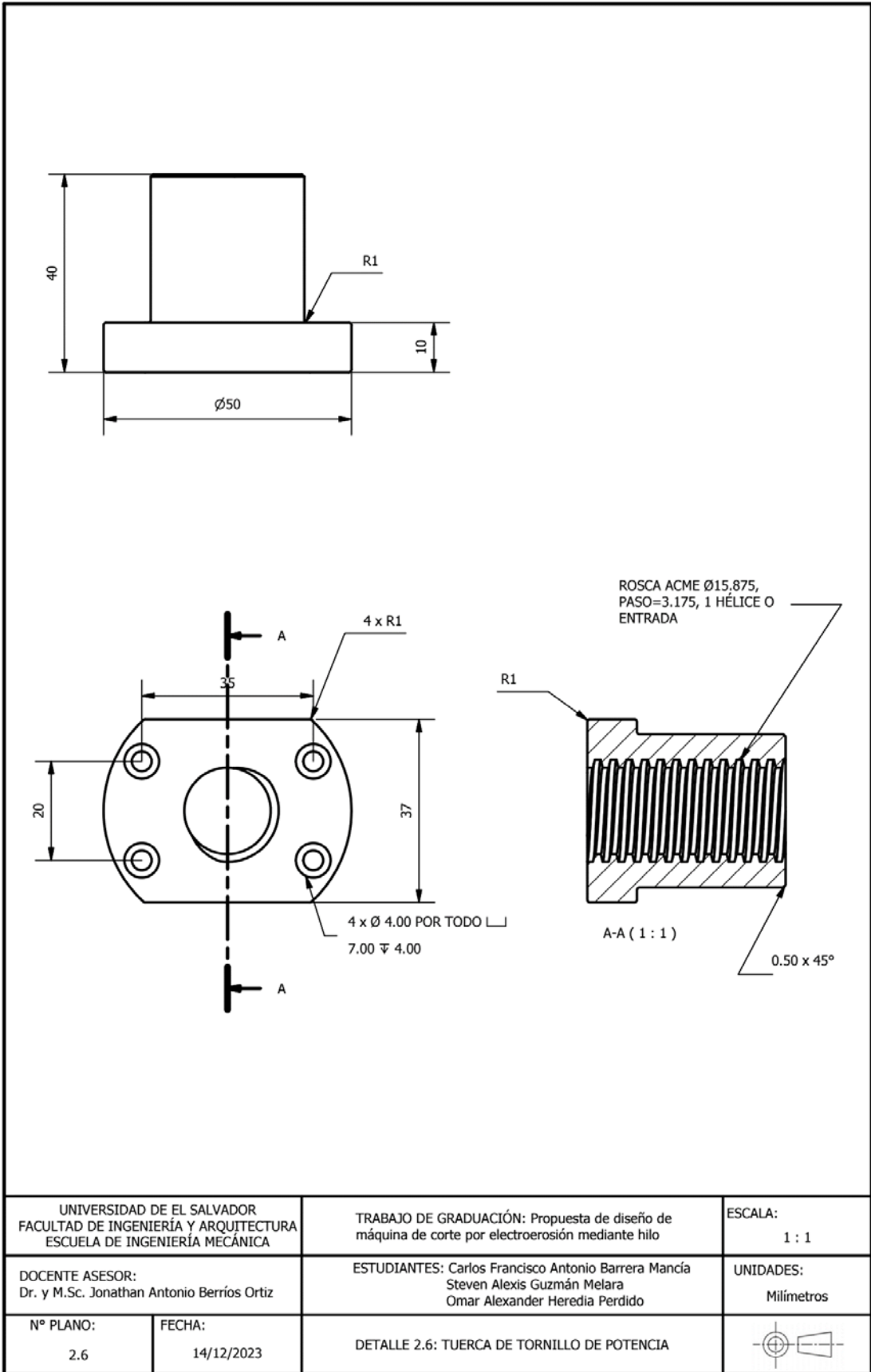
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 1 : 1
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancía Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 2.2	FECHA: 14/12/2023	DETALLE 2.2: TORNILLO DE POTENCIA INFERIOR	

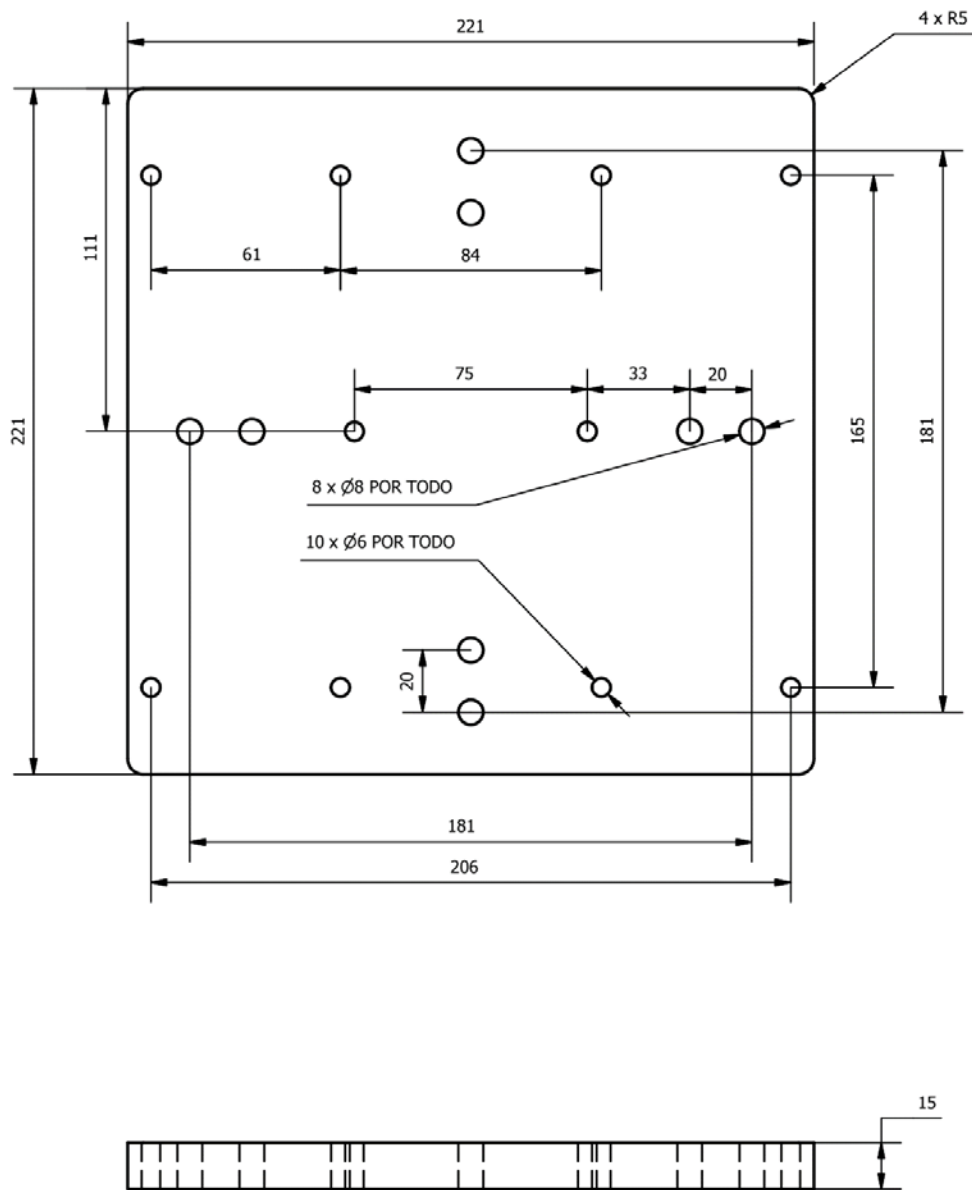




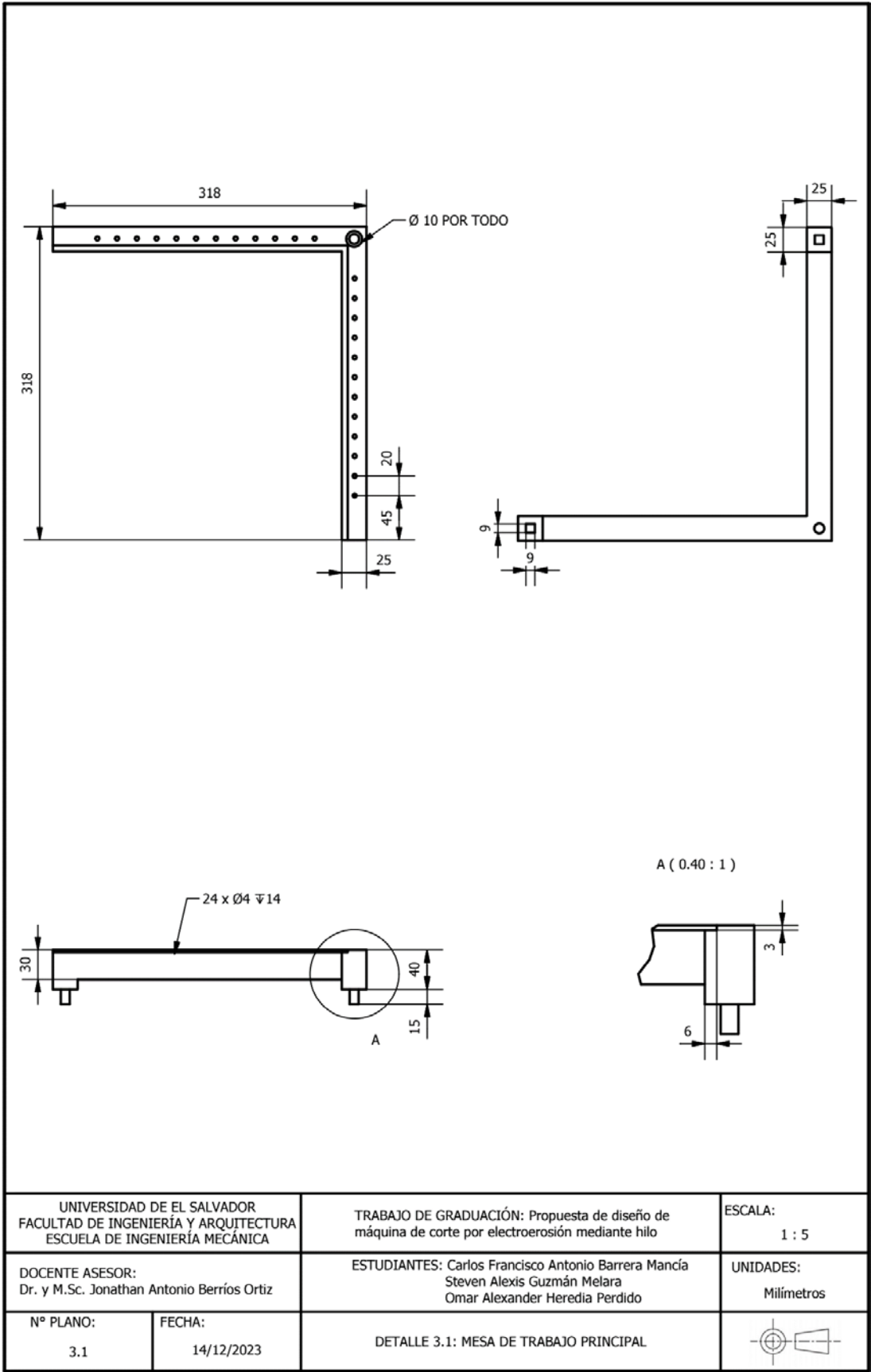


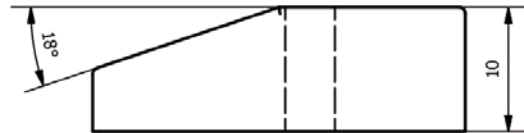
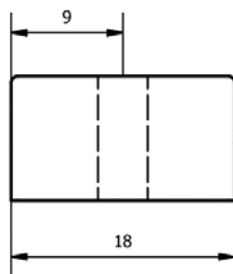
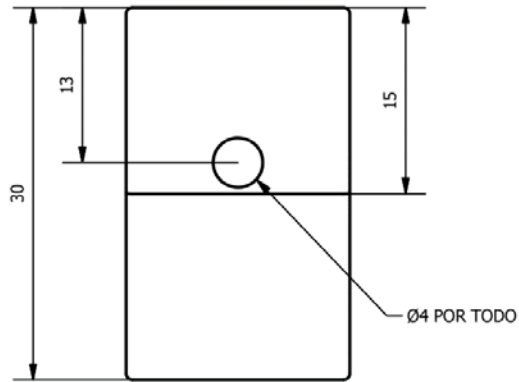
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 1 : 1
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancía Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 2.5	FECHA: 14/12/2023	DETALLE 2.5: SOPORTE PARA TUERCA DE TORNILLO DE POTENCIA	





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 1 : 2
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancia Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 2.7	FECHA: 14/12/2023	DETALLE 2.7: BANCADA DE SISTEMA DE MOVIMIENTO	





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de máquina de corte por electroerosión mediante hilo	ESCALA: 2 : 1
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Carlos Francisco Antonio Barrera Mancía Steven Alexis Guzmán Melara Omar Alexander Heredia Perdido	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: 3.2	FECHA: 14/12/2023	DETALLE 3.2: SUJETADORES DE PIEZA DE TRABAJO	

ANEXO B: MANUAL DE MONTAJE DE LA MÁQUINA

El este manual de montaje se proporciona las instrucciones detalladas sobre cómo ensamblar la máquina. Se divide en los diferentes sistemas de la máquina, como el sistema de hilo, mesa de trabajo, sistema de movimiento, tanque de trabajo y estructura de soporte.

a) Sistema de hilo

El sistema de hilo se compone de aproximadamente 40 elementos, y es el más complejo debido al contacto directo con la pieza de trabajo y el hilo electrodo, también por su variedad de piezas, las cuales se presentan en la Fig. B.1.

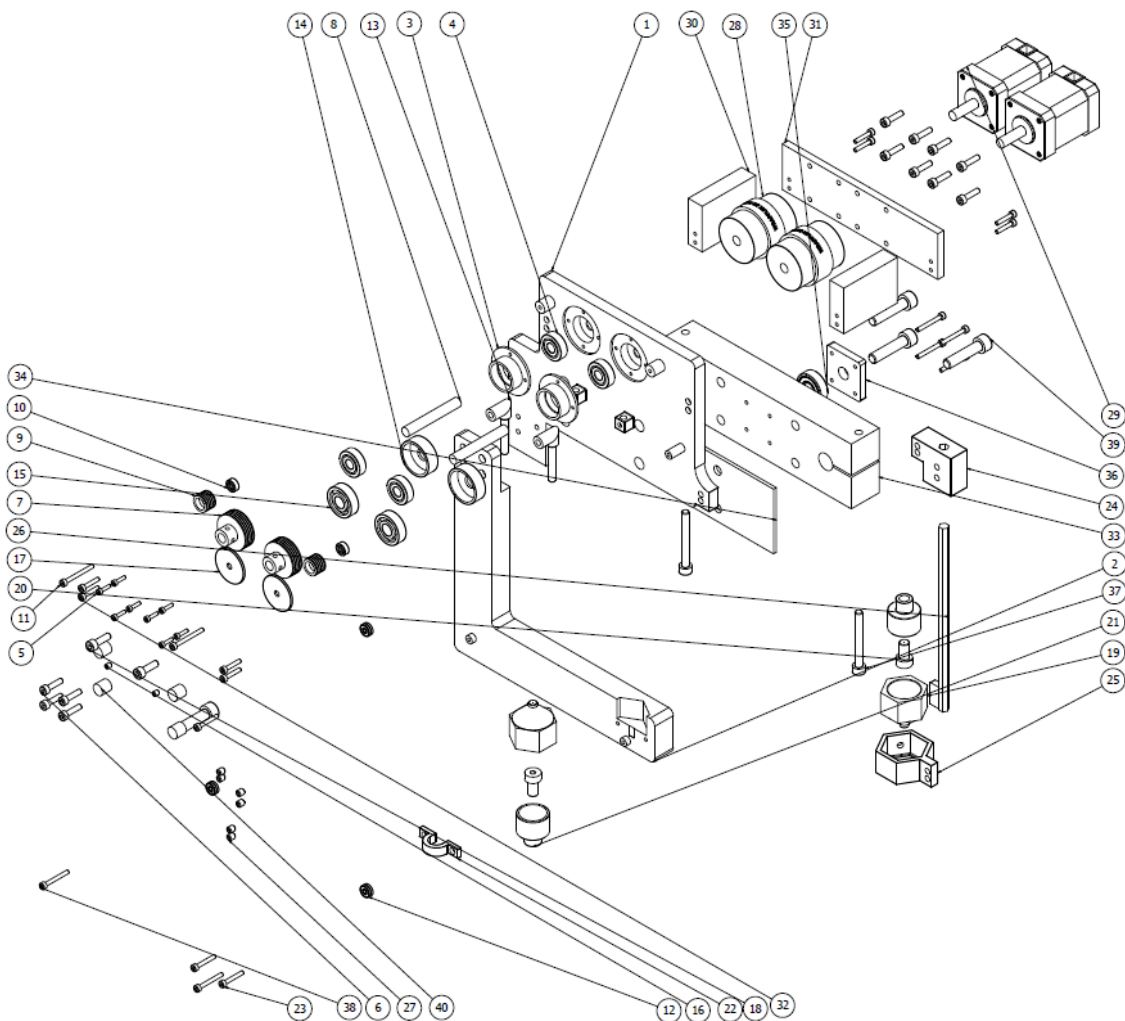


Fig. B.1. Explosivo del sistema de hilo.

El listado de piezas que componen al sistema de hilo, así como el material del cual están fabricadas y las cantidades necesarias se presenta en la Tabla B.1.

Tabla B.1. Lista de elementos de Sistema de hilo

N°	Elemento	Material	Cant.
1	Cabezal de hilo superior	Acero inoxidable 304L	1
2	Brazo inferior tipo L	Acero inoxidable 304L	1
3	Brida para polea motriz	Acero SAE 1045 CD	2
4	Rodamiento SKF 608 - 2Z	Acero para rodamientos	4
5	Perno Allen M 2.5 x 10	Acero Grado 2	8
6	Perno Allen M 4 x 16	Acero Grado 2	12
7	Polea motriz, 5 canales, Ø 30 mm	Acero SAE 1045 CD	2
8	Eje de polea motriz, Ø 8 mm	Acero SAE 1045 CD	2
9	Polea conducida, 5 canales, Ø 14 mm	Acero SAE 1045 CD	2
10	Rodamiento SKF 623 - 2Z	Acero para rodamientos	2
11	Perno Allen M 3 x 30	Acero Grado 2	2
12	Rodamiento SKF 623	Acero para rodamientos	3
13	Eje de rueda tensora	Acero SAE 1045 CD	2
14	Rueda tensora de poleas motrices	Tivar	2
15	Rodamiento SKF 6000	Acero para rodamientos	2
16	Prisionero Allen M 4 x 5	Acero Grado 2	2
17	Tapadera de rueda tensora	Tivar	2
18	Perno Allen M 5 x 16	Acero Grado 2	2
19	Boquilla (Parte A)	Acero Inoxidable 304L	2
20	Boquilla (Parte B)	Acero Inoxidable 304L	2
21	Boquilla (Parte C)	Acero Inoxidable 304L	2
22	Sujeción de boquilla inferior	Acero Inoxidable 304L	1
23	Perno Allen M 3 x 20	Acero Grado 2	3
24	Sujeción de regleta o nivel	Acero Inoxidable 304L	1
25	Cuna de boquilla superior	Acero Inoxidable 304L	1
26	Regleta o nivel de boquilla superior	Acero Inoxidable 304L	1
27	Prisionero Allen M 5 x 6	Acero Grado 2	7
28	Acople FALK Wrapflex 3R		2
29	Servomotor KollMorgen AKM2 - 2C		2
30	Tacos de soporte de servomotor	Hierro fundido	2
31	Placa de soporte de servomotor	Acero SAE 1045 CD	1
32	Perno Allen M 3 x 16	Acero Grado 2	8
33	Soporte para tornillo de potencia superior	Acero SAE 1045 CD	1
34	Placa para aislamiento	Acrílico	1
35	Rodamiento SKF 6000 - 2Z	Acero para rodamientos	1
36	Guarda para rodamientos de tornillo	Tivar	1
37	Perno Allen M 6 x 50	Acero Grado 2	2
38	Perno Allen M 3 x 25	Acero Grado 2	6
39	Perno Allen M 8 x 35	Acero Grado 2	4
40	Tacos aislantes	Acrílico	4

Los pasos a seguir para el montaje del sistema de hilo para la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo propuesta se presentn a continuación:

- Paso 1: los rodamientos SKF 608 – 2Z (elemento N° 4) deben entrar en la cuna o cama del cabezal superior de hilo, dado a que estos sirven de soporte y elemento rodante para el eje de la polea motriz (ver Fig. B.2).

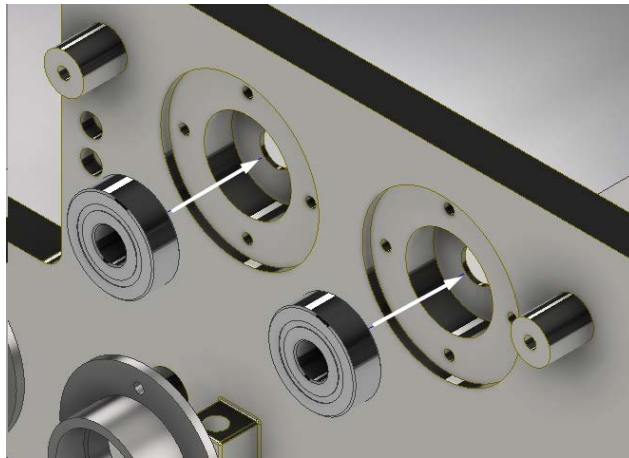


Fig. B.2. Montaje de rodamientos SKF 608–2Z.

- Paso 2: se coloca la brida de polea motriz (elemento N° 3) alineada con los agujeros para los pernos. Posteriormente, se instalan los pernos Allen M 2.5 x 10 (cuatro por brida) (ver Fig. B.3).



Fig. B.3. Montaje de polea motriz.

- Paso 3: Introducir los rodamientos SKF 608 – 2Z (elemento N° 4) en cada brida de polea motriz (elemento N° 3). Teniendo el debido cuidado de no dañar, tanto la pista externa o sellos metálicos del rodamiento al introducirlo (ver Fig. B.4).

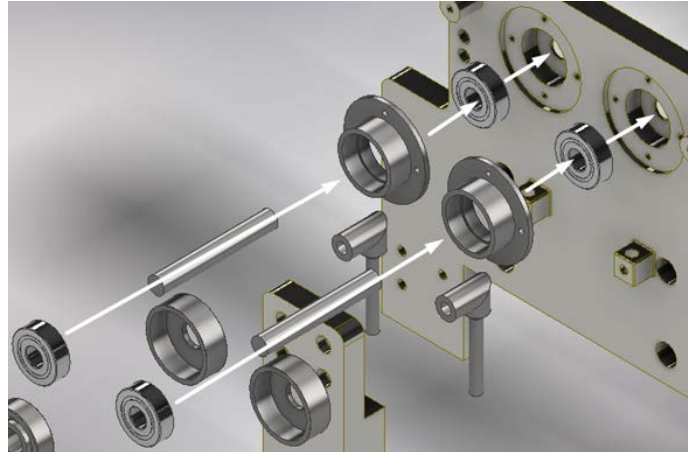


Fig. B.4. Montaje de rodamientos SKF 608–2Z en bridas de polea motriz.

Para que un eje tenga un buen soporte y la acción de poder girar sobre su mismo centro, este debe poseer al menos dos rodamientos. El ensamble de los pasos anteriores debe quedar tal como se presenta en la Fig. B.5.

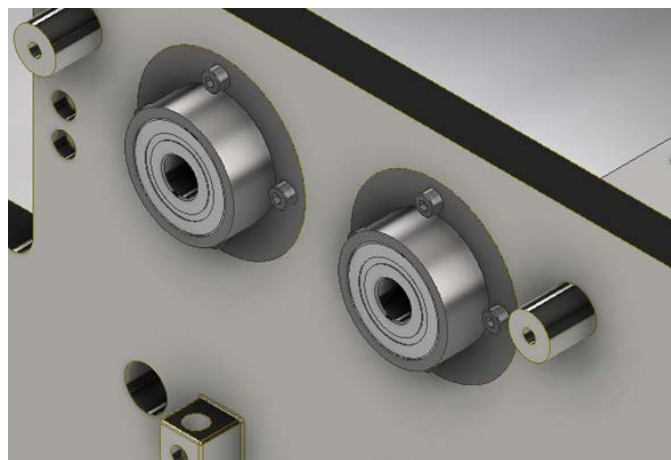


Fig. B.5. Correcto montaje de rodamientos.

- Paso 4: Introducir el eje de las poleas motrices (elemento N° 8). La cara “A” se debe ubicar a 31 mm de la cara “B” (superficie del cabezal superior de hilo) para instalar las

poleas motrices por la parte frontal y por la parte trasera del acople flexible (ver Fig. B.6).

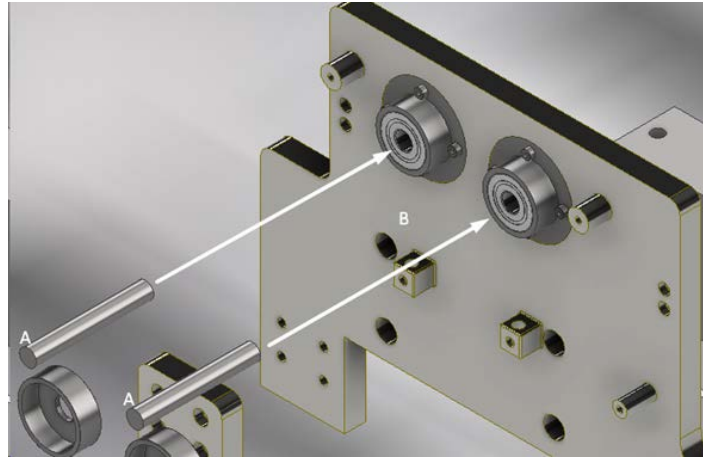


Fig. B.6. Introducción de ejes para poleas motrices.

- Paso 5: Montar las poleas motrices (elemento N° 7) en ambos ejes, donde la cara frontal de la masa de las poleas debe coincidir con la cara frontal del eje. También se debe considerar la instalación de dos prisioneros de $1/8 \times 1/4$ pulg (ver Fig. B.7).

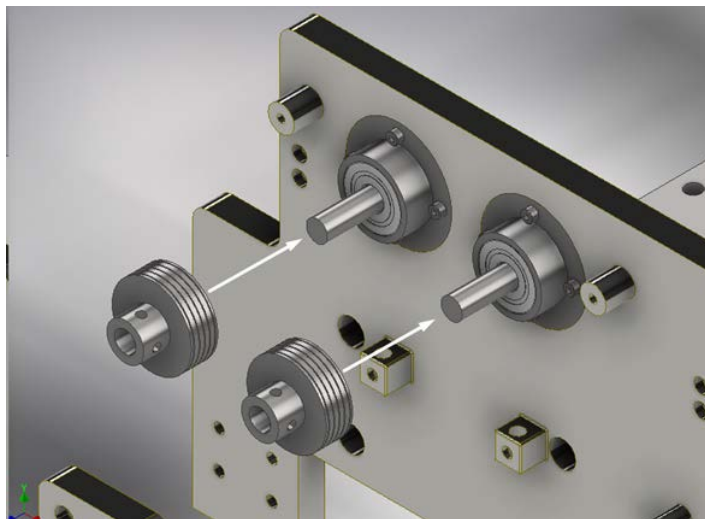


Fig. B.7. Montaje de poleas motrices.

- Paso 6: Montar las poleas conducidas (elemento N° 9) y el rodamiento SKF 623–2Z (elemento N° 10), donde este último debe entrar en la pulea para que pueda funcionar

como elemento rodante para la misma y generar la potencia y tensión necesaria para el proceso (ver Fig. B.8).

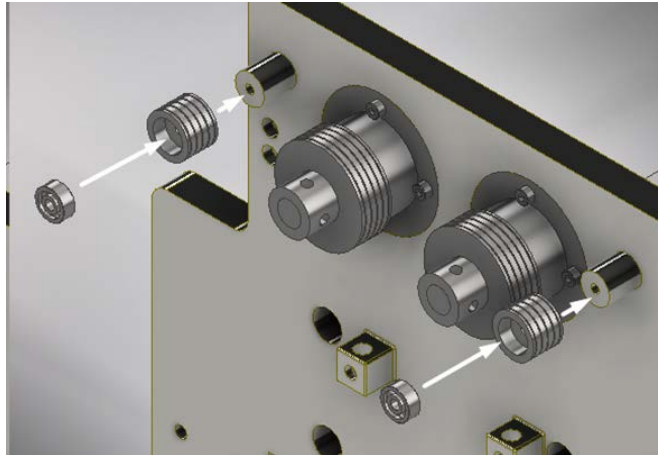


Fig. B.8. Montaje de poleas conducidas y rodamientos SKF 623-2Z.

- Paso 7: Instalar los pernos Allen M 3 x 30 (elemento N° 11) en las poleas conducidas. Estos sujetarán la polea y el rodamiento; la cabeza del perno Allen se debe sentar en la pista interna del rodamiento (ver Fig. B.9).

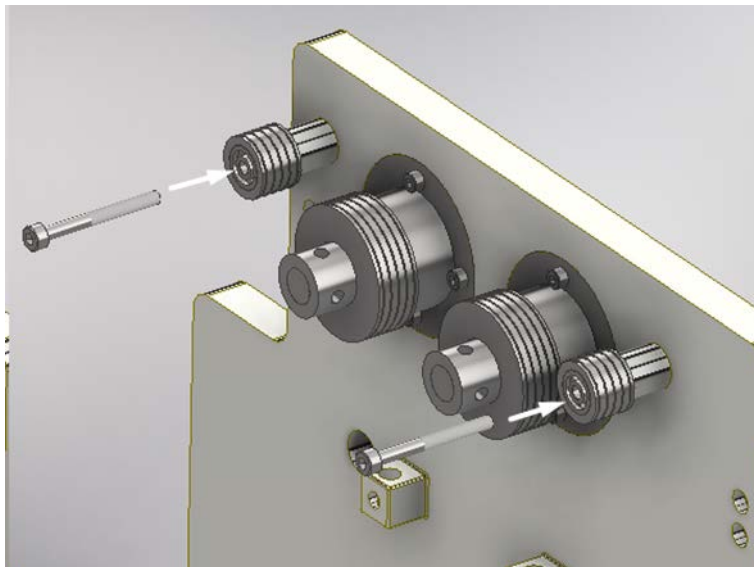


Fig. B.9. Montaje de pernos Allen M3 x 30.

Las poleas deben quedar alineadas. La desalineación afecta en la transmisión de potencia y en el tensado de la banda (ver Fig. B.10).



Fig. B.10. Correcto montaje de poleas.

- Paso 8: Montar el eje de la rueda tensora (elemento N° 13) (ver Fig. B.11).

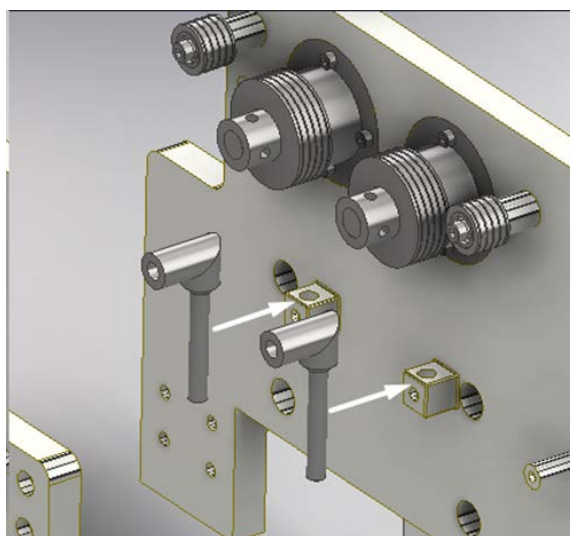


Fig. B.11. Montaje de eje de rueda tensora.

- Paso 9: Montar el perno Allen de sujeción M5 x 16 (elemento N° 18), la tapadera de rueda tensora (elemento N° 17), rodamiento SKF 6000 (elemento N° 15) y la rueda tensora (elemento N° 14). El perno tiene la finalidad de sujetar todo el conjunto en el eje de rueda tensora para que se pueda transmitir el giro con respecto a su eje central (ver Fig. B.12).

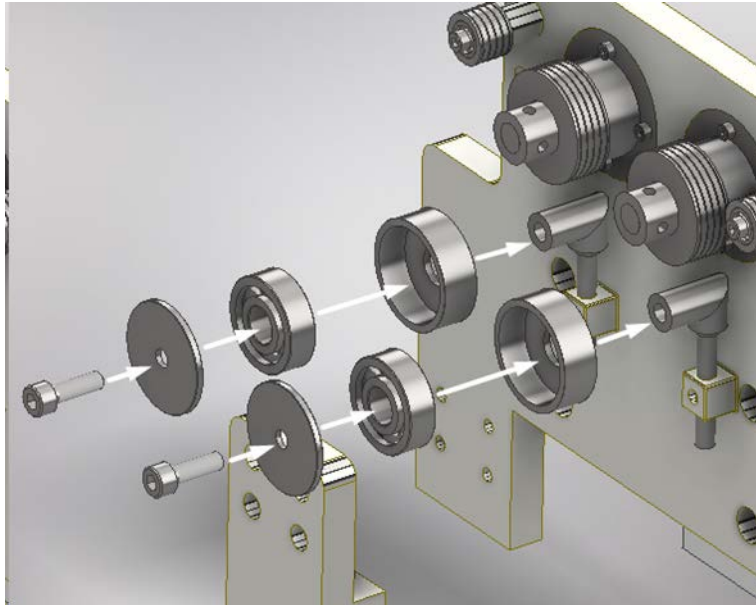


Fig. B.12. Montaje de elementos N° 14, 15, 17 y 18.

- Paso 10: Montar el rodamiento SKF 623 (elemento N° 12) que funciona como rueda guía o tensora para el hilo. También se monta el perno de sujeción M3 x 20 (elemento N° 23) (ver Fig. B.13).

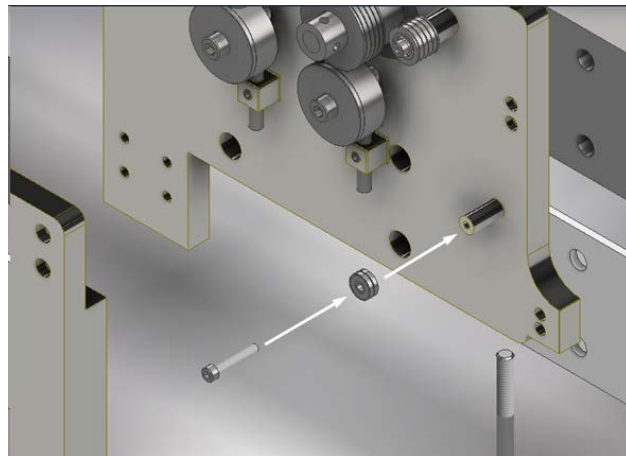


Fig. B.13. Montaje de elementos N° 12 y 23.

- Paso 11: Montar el brazo inferior tipo L (elemento N° 2) al cabezal superior (elemento N° 1) por medio de pernos Allen M 4 x 16 (elemento N° 6) (ver Fig. B.14).

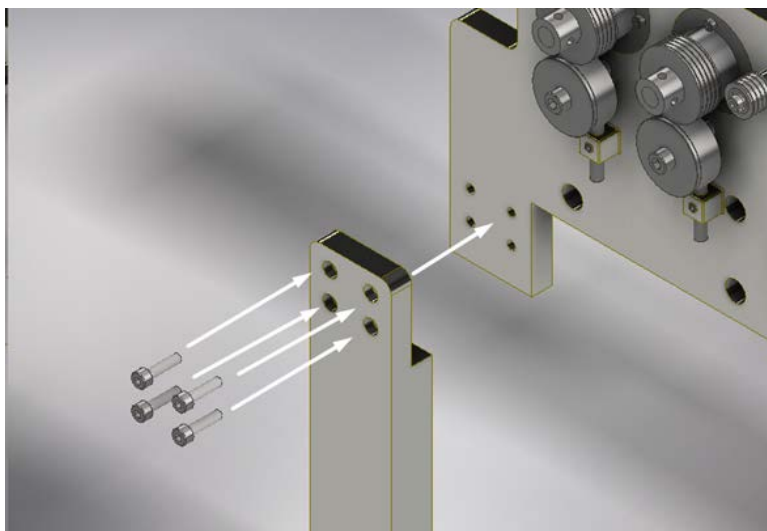


Fig. B.14. Montaje de elementos N° 2 y 6.

- Paso 12: Montar las ruedas guías o tensoras por medio de un rodamiento SKF 623 (elemento N° 12) y un perno Allen M 3 × 20 (ver Fig. B.15).



Fig. B.15. Montaje de ruedas guías.

- Paso 13: Armar la boquilla inferior (elementos N° 19, 20 y 21). Primero se monta la pieza intermedia en la inferior, luego la pieza superior en la anteriormente armada (ver Fig. B.16).



Fig. B.16. Montaje de boquilla.

- Paso 14: Montar la boquilla armada en el paso 13 en la parte inferior del brazo tipo L por medio de un cincho (elemento N° 22) que se sujeta con dos pernos Allen M 3 × 20 (Fig. B.17).

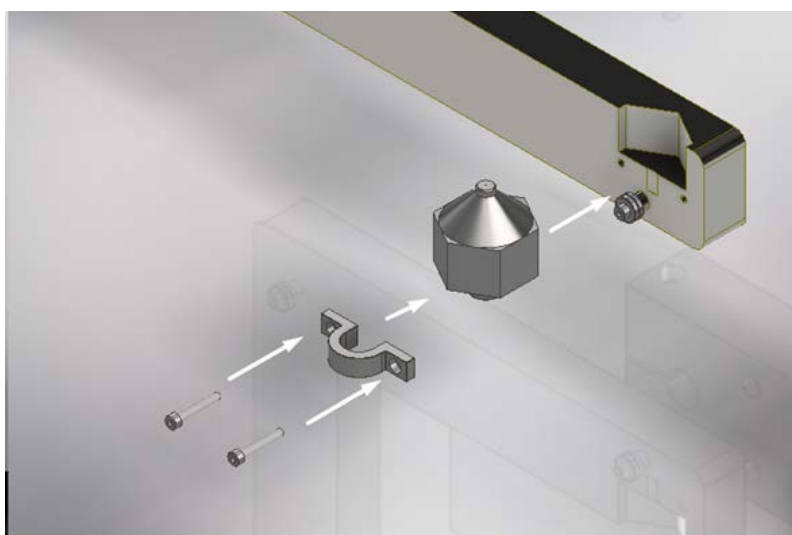


Fig. B.17. Montaje de boquilla inferior.

- Paso 15: Armar la boquilla superior (seguir instrucciones en paso 13). Luego montar en la pieza tipo cuna o cama (elemento N° 25) y sujetar con un tornillo tipo Allen M5 × 6 (elemento N° 23) (ver Fig. B.18).



Fig. B.18. Armado y montaje de boquilla superior.

- Paso 16: Montar la pieza de sujeción de regleta o nivel (elemento N° 24) y la regleta o nivel de boquilla superior (elemento N° 26). Estas se sujetan por medio de prisioneros tipo Allen M5 x 6 (elemento N° 23). La regleta tiene un diseño tal que no pueda girar sobre su mismo eje (ver Fig. B.19).



Fig. B.19. Montaje de regletas superior e inferior.

- Paso 17: Acoplar la boquilla superior y cuna de sujeción a la regleta y su respectiva pieza de sujeción. Todos estos elementos acoplados se instalarán en el cabezal de hilo superior (ver Fig. B.20).

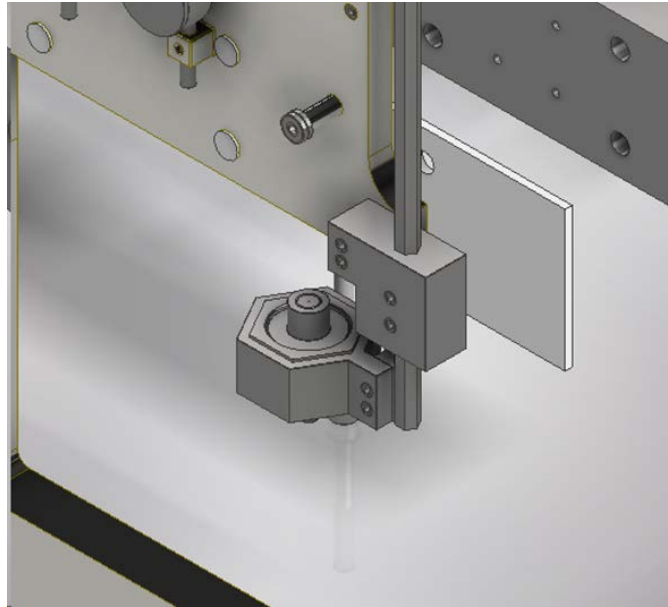


Fig. B.20. Montaje de boquilla y cuna de sujeción superior.

- Paso 18: Montar los servomotores (elemento N° 29) en la placa de soporte (elemento N° 31) y sujetados con pernos Allen M 4 x 16 (elemento N° 6) (ver Fig. B.21).

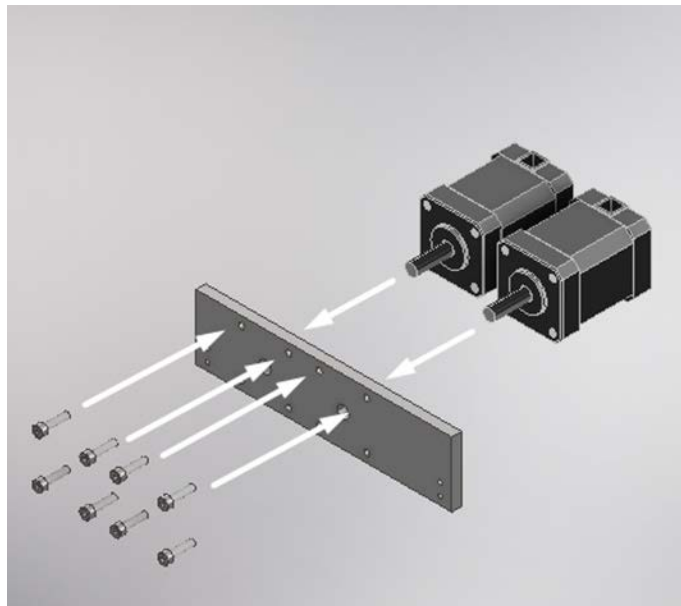


Fig. B.21. Montaje de servomotores.

- Paso 19: Montar los tacos de soporte de servomotor (elemento N° 30), los cuales van sujetos por pernos Allen M 3 x 16 (elemento N° 32). Estos sirven para dar soporte y

distancia requerida para montar los acoples flexibles Wrapflex (elemento N° 28) (ver Fig. B.22).

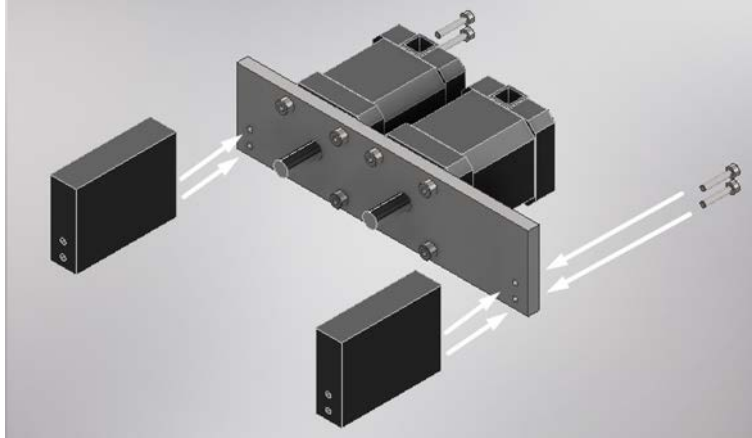


Fig. B.22. Montaje de elementos 28, 30 y 32.

- Paso 20: Montar una placa para aislamiento (elemento N° 34), la cual debe coincidir con los agujeros de los pernos Allen M 8 x 35 (elemento N° 39). Posteriormente, se debe montar el soporte para tornillo de potencia superior (elemento N° 33), luego el rodamiento SKF 6000-2Z (elemento N° 35), así como los pernos anteriormente mencionados, y luego la guarda de rodamiento (elemento N° 36), y finalizando con los pernos Allen M 3 x 25 (elemento N° 38). Este conjunto tiene el objetivo de soporte para el tornillo de potencia del sistema de movimiento (ver Fig. B.23).

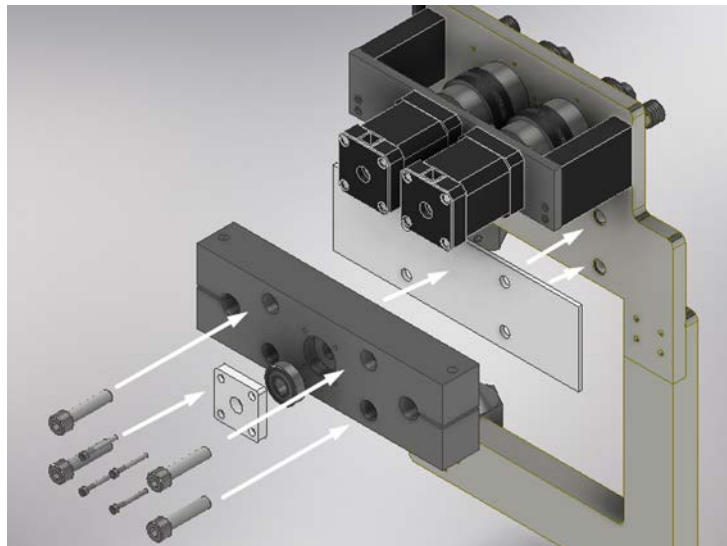


Fig. B.23. Montaje de elementos 33, 34, 35, 36 y 38.

El acople flexible Wrapflex viene dado por dos cubos, la cubierta, el árbol o elemento y la tornillería. Uno de los aspectos de tomar en cuenta en el montaje es la distancia de separación entre cubos, para un 3R debe ser de $2 \text{ mm} \pm 10\%$ (ver Fig. B.24).

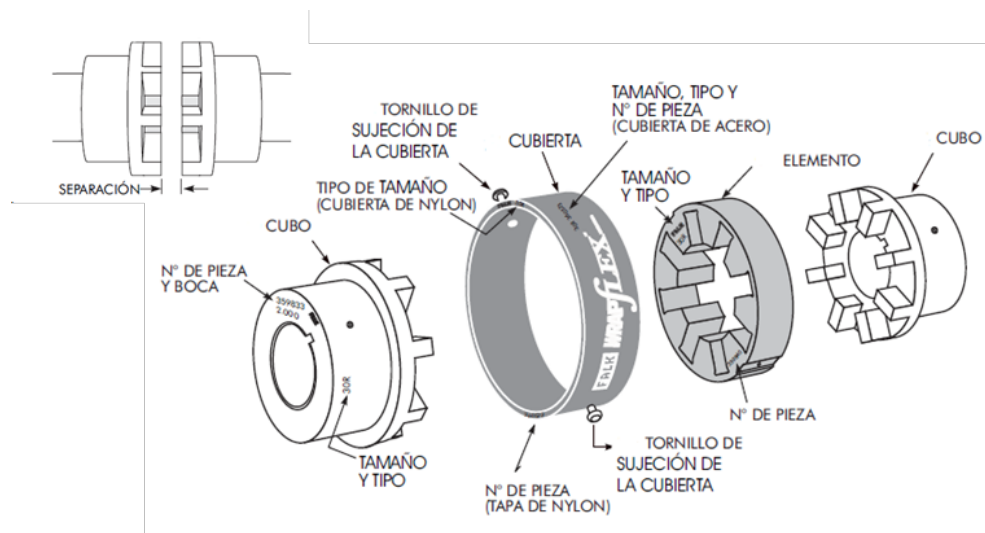


Fig. B.24. Montaje de acople flexible FALK WRAPFLEX.

El montaje finalizado del sistema de hilo de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo propuesta se presenta en la Fig. B.25.

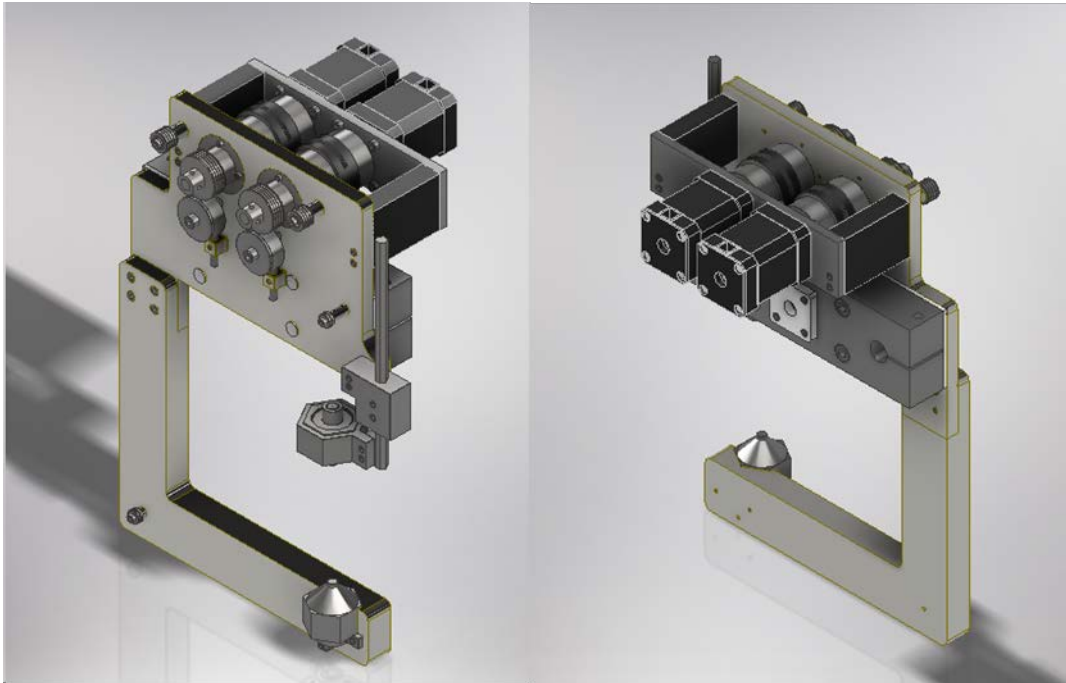


Fig. B.25. Montaje final del sistema de hilo.

b) Sistema de movimiento

El sistema de movimiento de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo se compone de 17 elementos que permiten la precisión y eficacia en el proceso de corte. El dibujo explosivo del sistema de movimiento se presenta en la Fig. B.26, mientras el listado de piezas que conforman este sistema se presenta en la Tabla B.2.

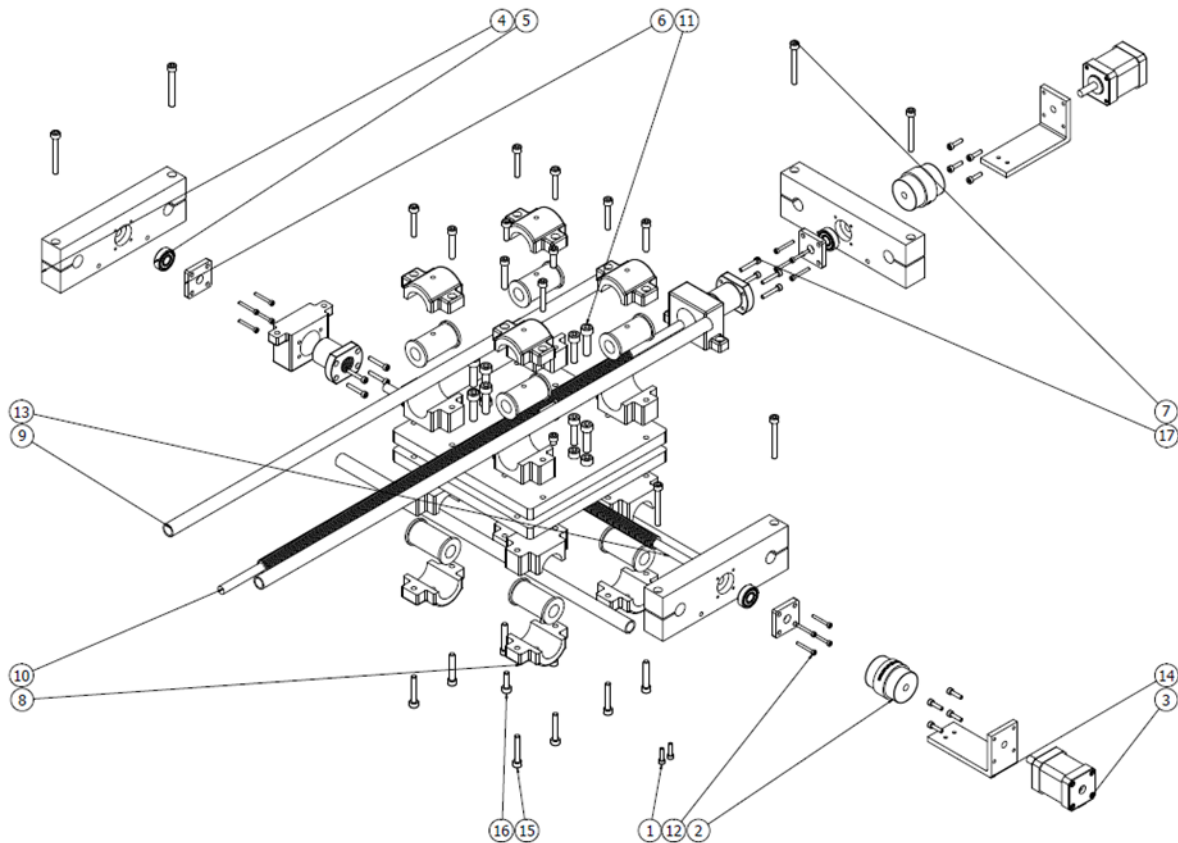


Fig. B.26. Explosivo del sistema de movimiento.

Tabla B.2. Lista de elementos de Sistema de movimiento.

N°	Elemento	Material	Cant.
1	Perno Allen M 4 x 16	Acero Grado 2	10
2	Acople FALK Wrapflex 3R		2
3	Servomotor KollMorgen AKM2 - 2C		2
4	Soporte para tornillo de potencia	Acero SAE 1020 CD	3
5	Rodamiento SKF 6000 - 2Z	Acero para rodamientos	3
6	Guarda para rodamientos de tornillo	Tivar	3
7	Perno Allen M 6 x 50	Acero Grado 2	6
8	Chumaceras y tuerca (Ensamble)	Hierro fundido	2
9	Soportes guía de tornillo de potencia	Acero Inoxidable 304L	4
10	Tornillo de potencia superior	Acero SAE I 1045 CD	2
11	Perno Allen M 8 x 30	Acero Grado 2	12
12	Perno Allen M 3 x 25	Acero Grado 2	12
13	Tornillo de potencia inferior	Acero SAE 1045 CD	1
14	Base para servomotores de tornillos	Acero SAE 1020 CD	2
15	Perno Allen M 6 x 35	Acero Grado 2	16
16	Perno Allen M 6 x 20	Acero Grado 2	4
17	Perno Allen M 4 x 25	Acero Grado 2	8

Destacar que el elemento N° 8 se refiere a un conjunto, por ello no se presenta el despiece de este (ver Fig. B.27).

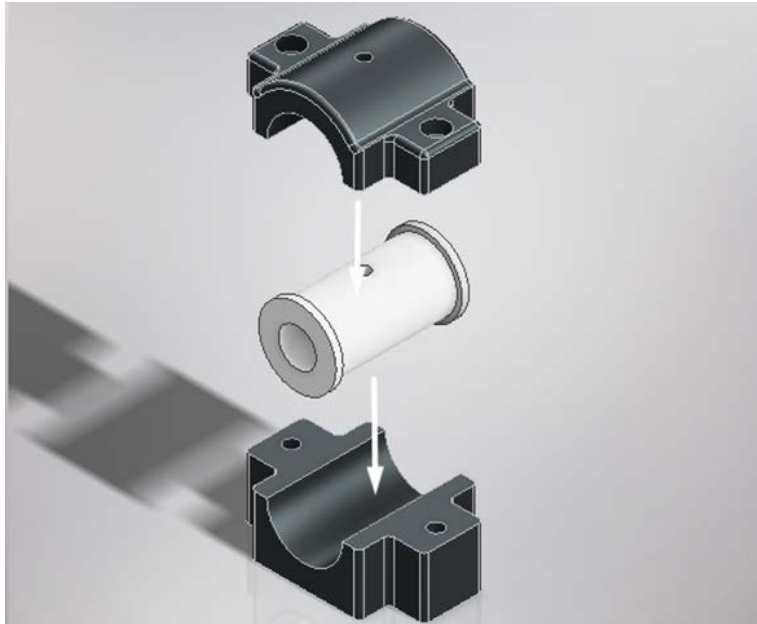


Fig. B.27. Montaje de chumacera bipartida (elemento N° 8).

El procedimiento paso a paso para el montaje del sistema de movimiento de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo se presenta a continuación:

- Paso 1: Montar las chumaceras bipartidas (ver Fig. B.28).



Fig. B.28. Montaje de chumacera bipartida.

- Paso 2: Montar las chumaceras bipartidas en la placa para chumaceras y sujetarlas con pernos Allen M 6 x 50. El soporte de la tuerca, la tuerca del tornillo de potencia y los pernos Allen M 4 x 25 que hacen la sujeción entre elementos se presentan en la Fig. B.29.

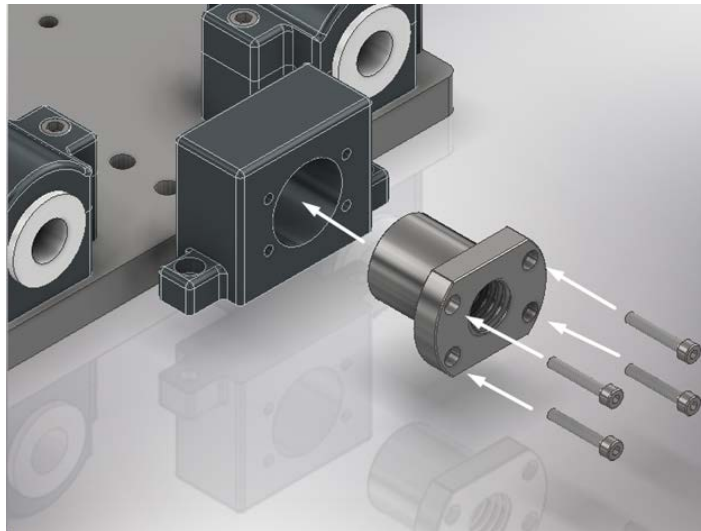


Fig. B.29. Montaje de chumaceras bipartidas.

El ensamble completo de chumaceras y tuerca del sistema de movimiento de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo se presenta en la Fig. B.30.

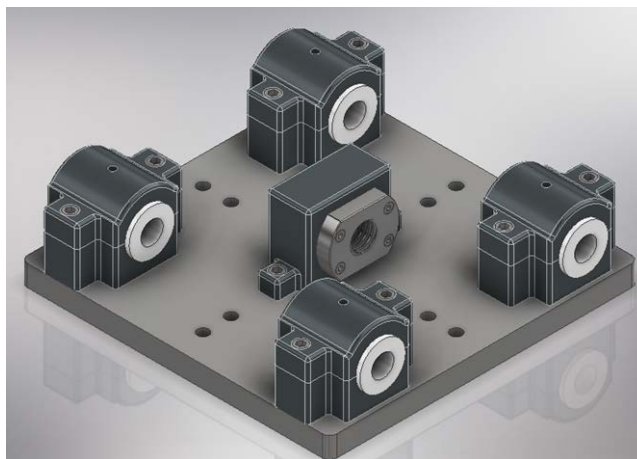


Fig. B.30. Chumaceras y tuerca en sistema de movimiento.

- Paso 3: Fijar con pernos de sujeción tipo Allen M 8 x 30 (elemento N° 11) los ensambles de chumaceras y tuerca. Por cada tornillo de potencia se necesita un ensamble (ver Fig. B.31).

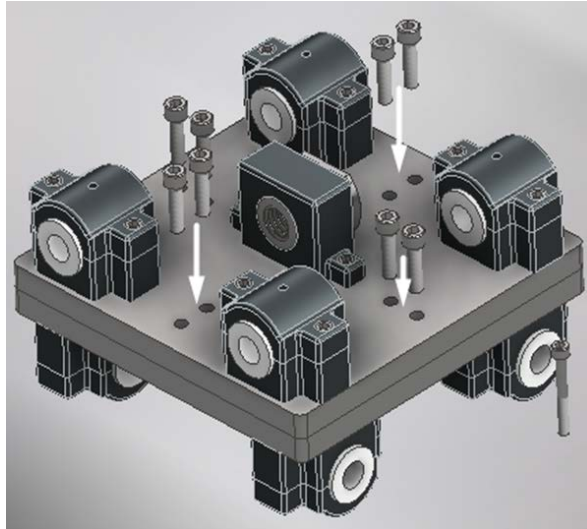


Fig. B.31. Sujeción de ensambles de chumaceras y tuercas.

- Paso 4: Montar el tornillo de potencia superior (elemento N° 10) y soportes guías (elemento N° 9) en las chumaceras bipartidas (ver Fig. B.32).

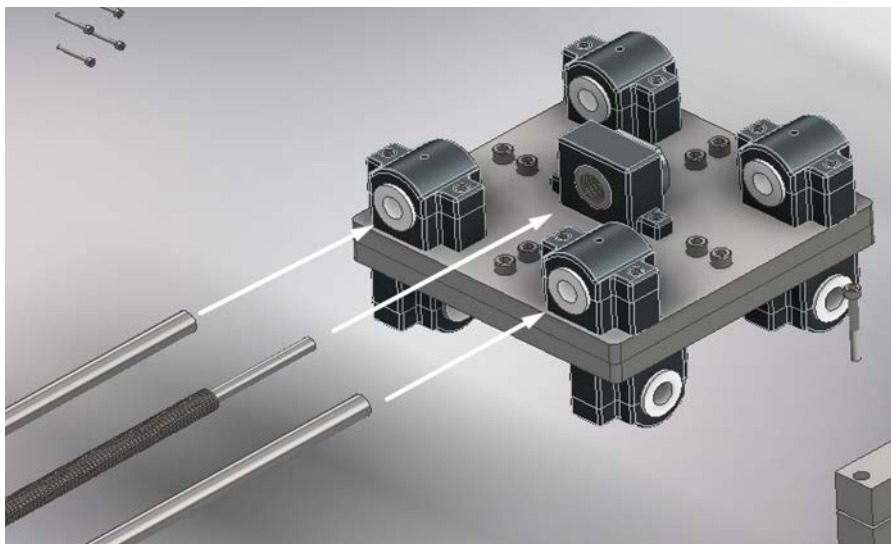


Fig. B.32. Montaje de tornillo de potencia superior.

- Paso 5: Montar el rodamiento SKF 6000–2Z (elemento N° 5), el tornillo de potencia superior (elemento N° 10), la guarda para rodamientos de tornillos (elemento N° 6) y los pernos Allen M 4 x 25 (elemento N° 17) (ver Fig. B.33).



Fig. B.33. Montaje de elementos 5, 6, 10 y 17.

- Paso 6: Montar los pernos Allen M 6 x 50 (elemento N° 7), donde estos aprietan los soportes guía, impidiendo el deslizamiento del tornillo de potencia superior. El soporte del tornillo de potencia debe ir posicionado de tal forma que la cara frontal o transversal de los soportes guía queden alineados con la cara posterior del soporte del tornillo (ver Fig. B.34).



Fig. B.34. Montaje de pernos Allen M 6 x 50.

- Paso 7: Montar el servomotor (elemento N° 3) en la bancada o base para motores de tornillos de potencia (elemento N° 14). Los pernos Allen M 4 x 16 (elemento N° 1) deben acoplar al servomotor, luego instalar el acople Wrapflex 3R (elemento N° 2) (ver Fig. B.35).

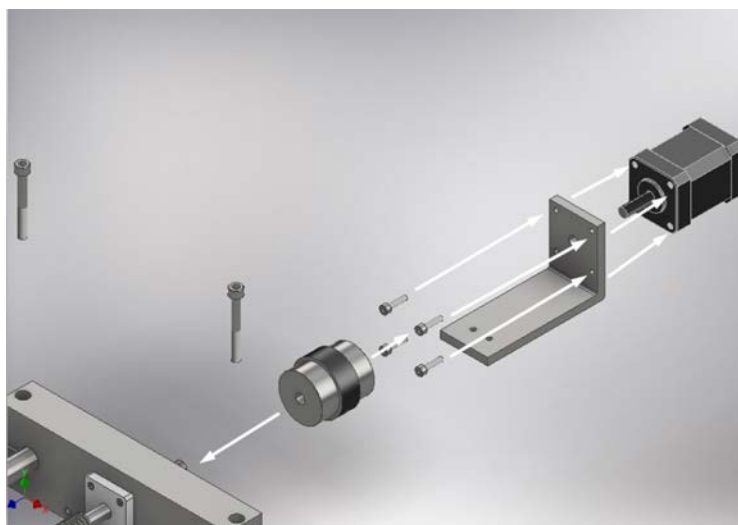


Fig. B.35. Montaje de elementos 1, 2, 3 y 14.

- Paso 8: Repetir los pasos desde el 4 hasta el 7 para montar el tornillo de potencia inferior (ver Fig. B.36).

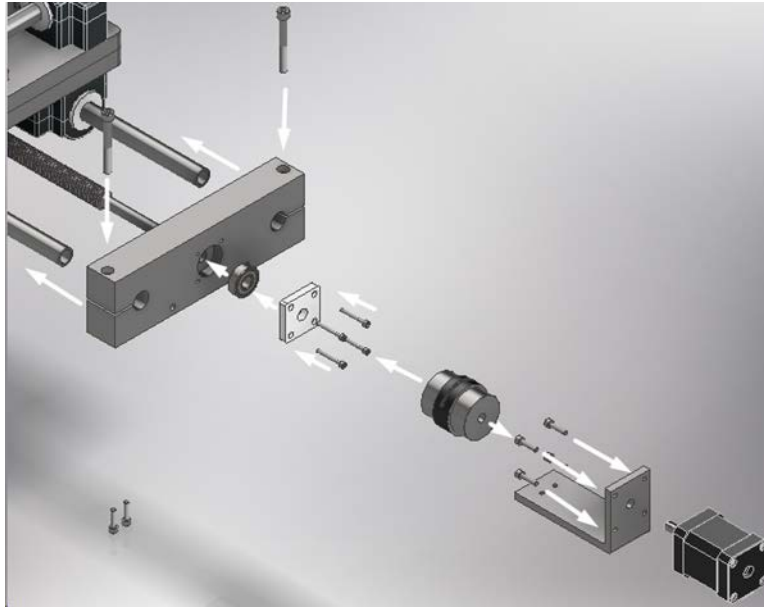


Fig. B.36. Montaje de tornillo de potencia inferior.

El sistema de movimiento es crucial en una maquina electroerosionadora de corte mediante hilo, por lo que es necesario tomar precauciones en aspectos como instalación del rodamiento de los tornillos de potencia e instalación del acople flexible. Si bien, estos permiten cierto grado de desalineación, lo recomendado por el fabricante es alinear lo mejor posible la transmisión, tanto paralela como angularmente. El resultado final del montaje del sistema de movimiento se observa en la Fig. B.37.

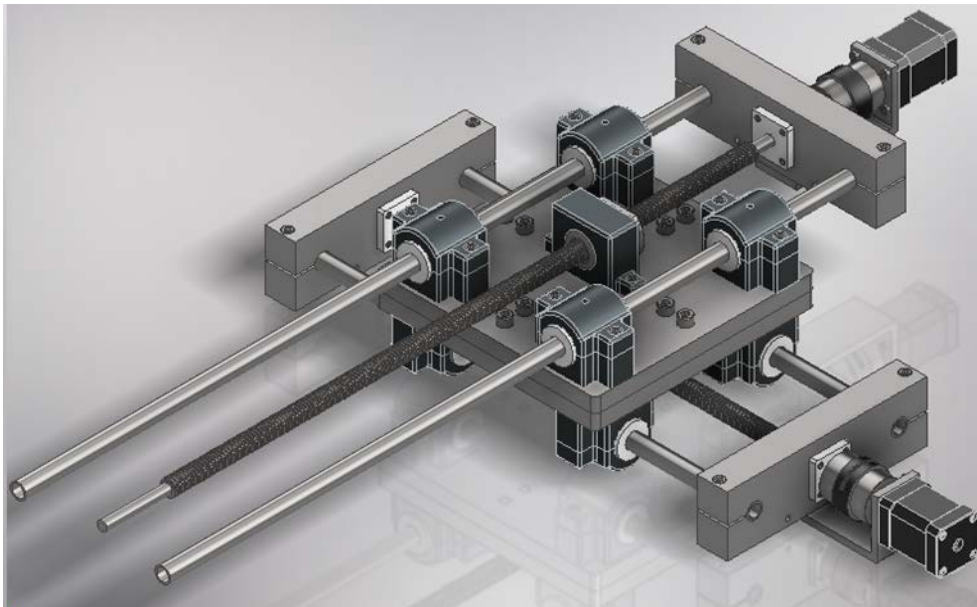


Fig. B.37. Sistema de movimiento.

c) Mesa de trabajo

En la fabricación de herramientas y piezas de precisión, la mesa de trabajo en una máquina electroerosionadora mediante hilo es fundamental. La correcta instalación de la mesa no solo asegura la estabilidad requerida, también influye en la eficiencia y exactitud de las piezas a fabricar. El dibujo explosivo de la mesa de trabajo se presenta en la Fig. B.38, mientras el detalle de los elementos que la componen se presenta en la Tabla B.3.

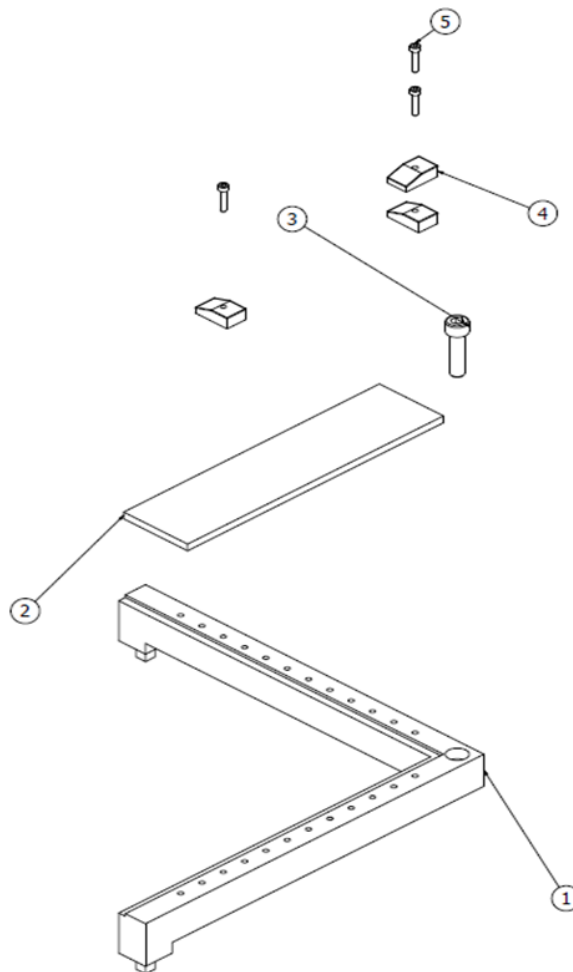


Fig. B.38. Explosivo de mesa de trabajo.

Tabla B.3. Lista de elementos de Mesa de trabajo.

N°	Elemento	Material	Cant.
1	Mesa de trabajo	Acero inoxidable 304L	1
2	Probeta	Acero SAE 1045 CD	1
3	Perno Allen M 10 x 40	Inoxidable	1
4	Sujetadores de pieza de trabajo	Acero inoxidable 304L	3
5	Perno Allen M 4 x 20	Inoxidable	3

Los pasos para el montaje de la mesa de trabajo de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo se presentan a continuación:

- Paso 1: Montar la pieza de trabajo (elemento N° 2) en la mesa de trabajo (elemento N° 1) La pieza de trabajo debe encajar justamente en el escalón de la mesa de trabajo (ver Fig. B.39).



Fig. B.39. Montaje de probeta en mesa de trabajo.

- Paso 2: Montar los sujetadores de pieza de trabajo (elemento N° 4) con pernos Allen M 4 x 20 (elemento N° 5) (ver Fig. B.40).

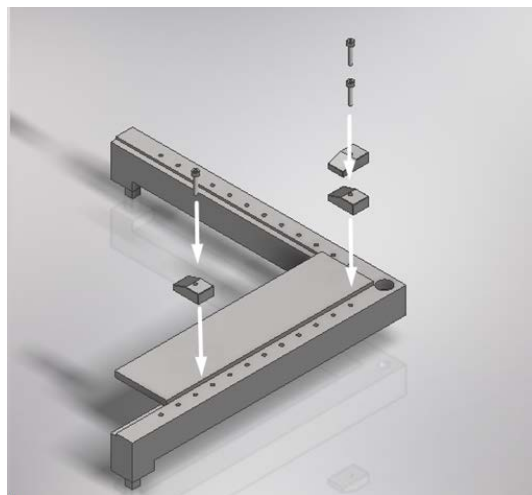


Fig. B.40. Montaje de sujetadores de probeta.

El montaje de la mesa de trabajo no es complicado. El perno Allen M 10 x 40 (elemento N° 3) funciona para acoplar la mesa al tanque para dieléctrico. El ensamble final de la mesa de trabajo se presenta en la Fig. B.41.



Fig. B.41. Montaje final de mesa de trabajo.

d) Tanque de trabajo y estructura de soporte.

En el funcionamiento óptimo de una máquina electroerosionadora de corte mediante hilo, tanto el tanque de trabajo como la estructura de soporte desempeñan un papel crucial. El tanque de trabajo es un componente fundamental para el enfriamiento y la eliminación de residuos durante el proceso de corte por descarga eléctrica, y por otro lado la estructura de soporte proporciona la base y estabilidad necesarias para el funcionamiento óptimo de la máquina, asegurando su correcta alineación y reduciendo vibraciones que podrían afectar la precisión del corte.

El dibujo del tanque de trabajo y la estructura de soporte de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo propuesta se presenta en la Fig. B.42, mientras el listado de elementos que componen al tanque y a la estructura se presenta en la Tabla B.4.

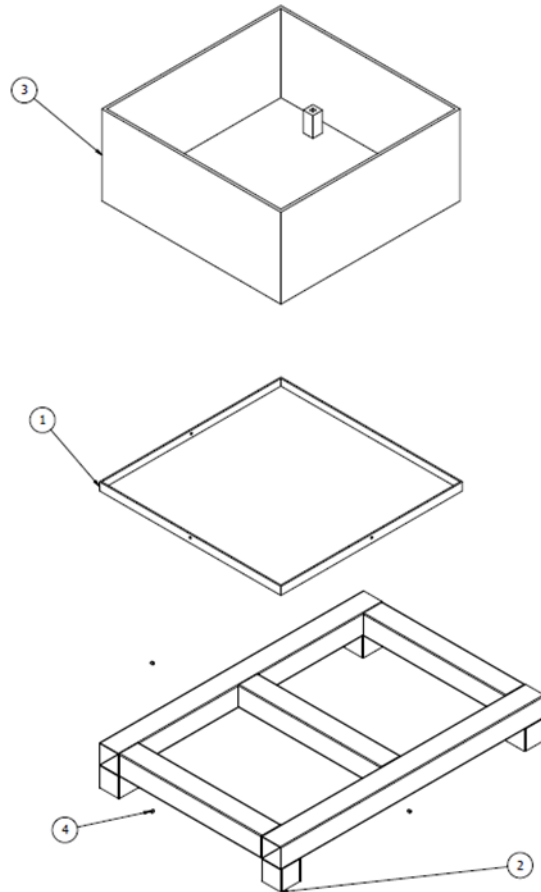


Fig. B.42. Dibujo explosivo de tanque de trabajo y estructura de soporte.

Tabla B.4. Elementos de tanque para dieléctrico y estructura de soporte.

N°	Elemento	Material	Cant.
1	Guarda del tanque	Hierro negro	1
2	Estructura de soporte	Hierro negro	1
3	Tanque de dieléctrico	Acero inoxidable 304L	1
4	Prisionero tipo Allen M 5 x 6	Acero Grado 2	3

Los pasos para el montaje del tanque de trabajo y la estructura de soporte de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo se presentan a continuación:

- Paso 1: Montar la guarda del tanque (elemento N° 1) a la estructura de soporte (elemento N° 2) mediante soldadura. La guarda sirve para poder montar y desmontar el tanque de trabajo (elemento N° 3). Este tiene tres agujeros roscados en tres de sus

caras, los cuales sujetan el tanque por medio de prisioneros tipo Allen M 5 × 6 (elemento N° 4) (ver Fig. B.43).

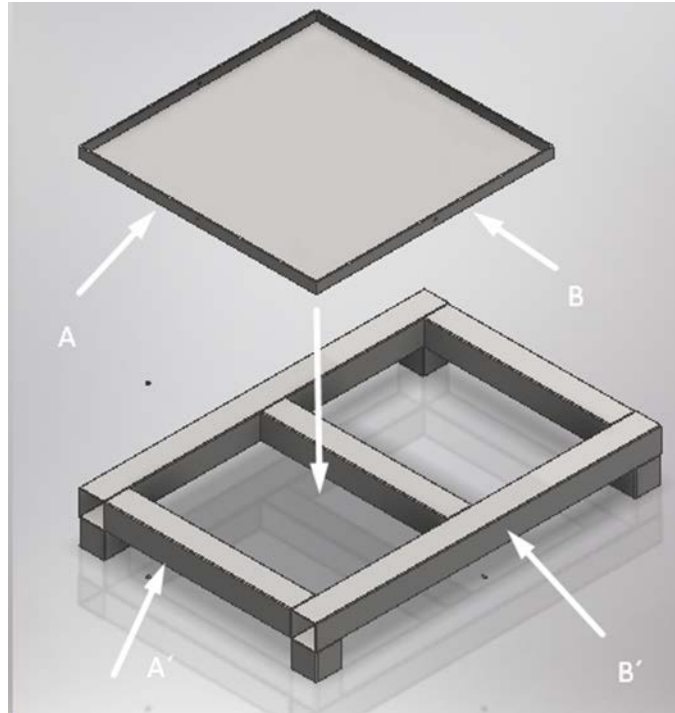


Fig. B.43. Montaje de guarda del tanque de trabajo.

Las caras A y A', así como B y B' son coincidentes, y tanto la estructura de soporte como la guarda del tanque coinciden para que todos los elementos mecánicos acoplen adecuadamente.

- Paso 2: Montar el tanque de trabajo (Elemento N° 3) y sujetarlo sujetarán con los prisioneros tipo Allen M 5 × 6 (elemento N° 4) (ver Fig. B.44).

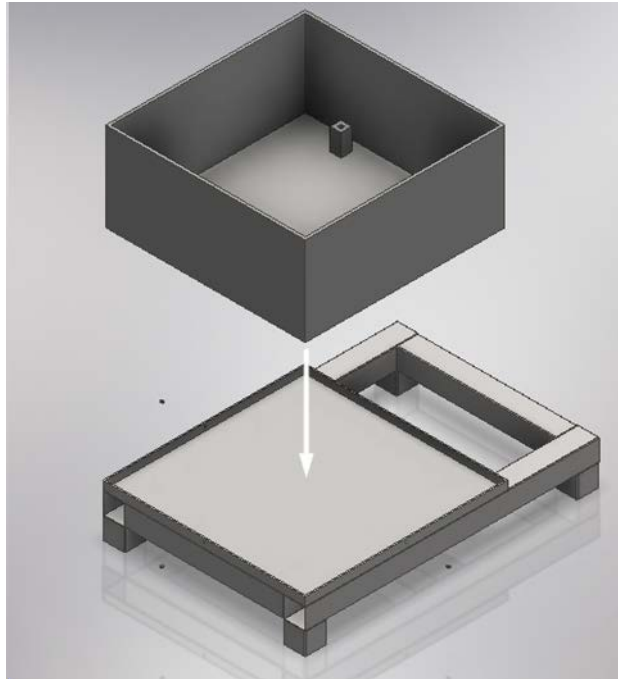


Fig. B.44. Montaje de tanque de trabajo.

El ensamble del tanque de trabajo y la estructura de soporte de la máquina de corte por electroerosión mediante hilo se presenta en la Fig. B.45.

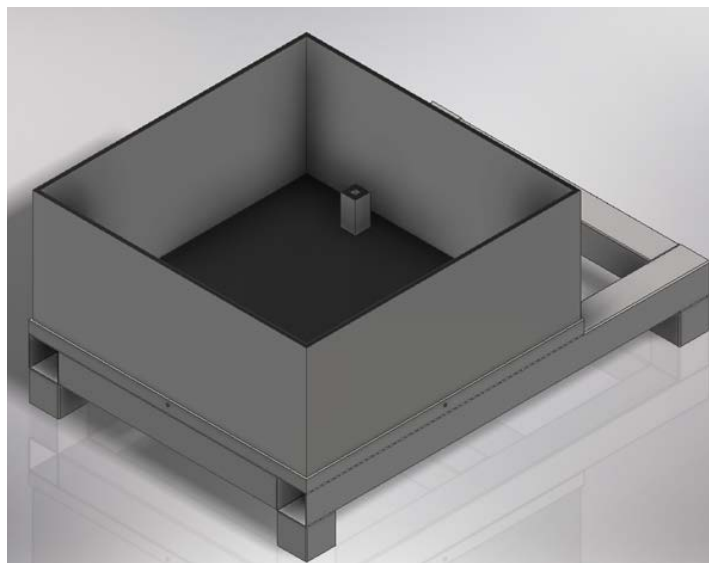


Fig. B.45. Montaje final de tanque de trabajo y estructura de soporte.

e) Electroerosionadora por hilo

En los literales anteriores fue explicado el paso a paso del montaje de los diversos sistemas que componen a la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo (Fig. B.46).

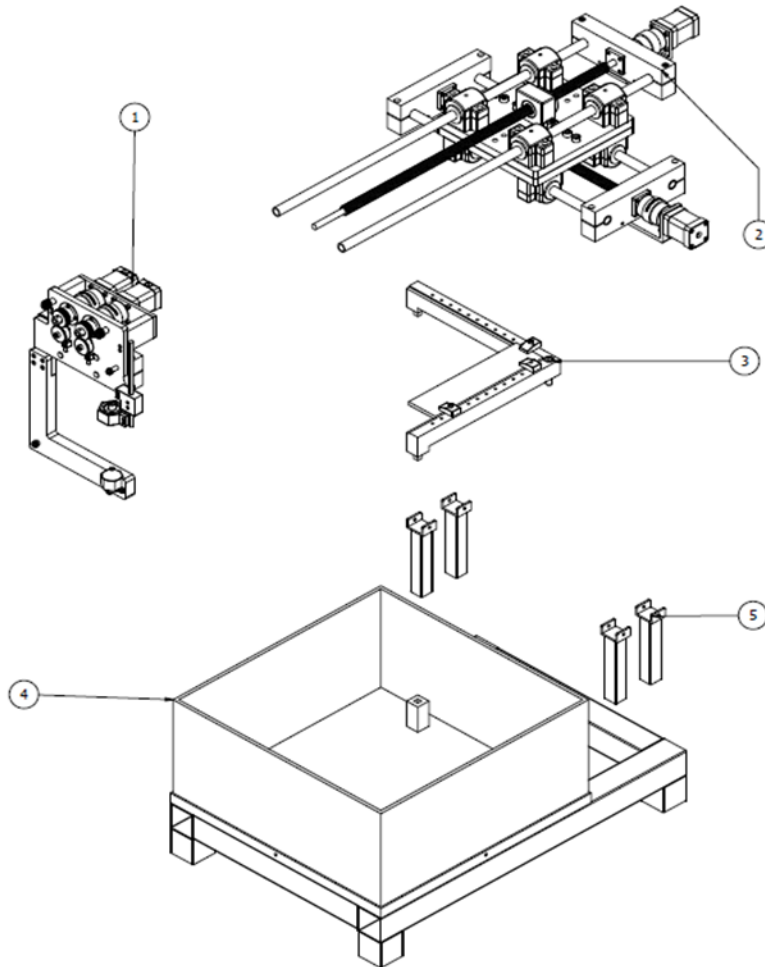


Fig. B.46. Explosivo de sistemas de electroerosionadora mediante hilo

A continuación, se explica el procedimiento paso a paso de montaje de estos sistemas para poder conformar la máquina propuesta en el presente trabajo de graduación.

- Paso 1: Los soportes (elemento N° 5) se acoplan al sistema de movimiento (elemento N° 2), la estructura de soporte y el tanque de trabajo (elemento N° 4). Los soportes

se deben de soldar a la estructura de soporte, con una distancia del tanque de trabajo de 63 mm y una distancia entre ellos 52 mm (ver Fig. B.47).

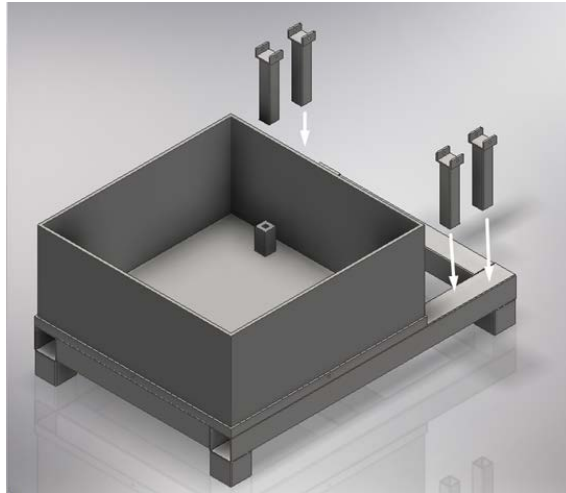


Fig. B.47. Montaje de soportes.

- Paso 2: Instalar la mesa de trabajo (elemento N° 3) al tanque de dieléctrico (elemento N° 4). El tanque de trabajo tiene tres pilares, los cuales ajustan con la mesa de trabajo y se sujetan por medio de un perno Allen M 10 x 40 del elemento N° 3 (ver Fig. B.48).

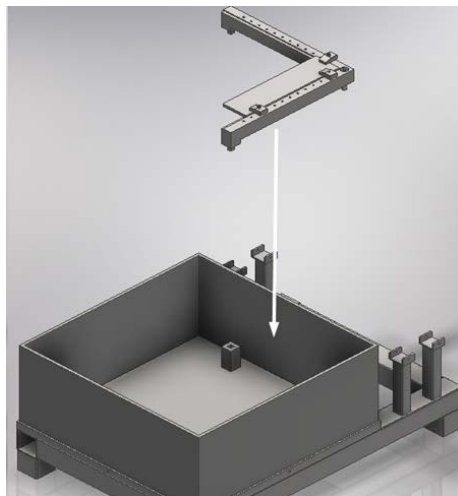


Fig. B.48. Montaje de mesa de trabajo.

- Paso 3: Ensamblar el sistema de movimiento (N° 3, Fig. B.46) y el sistema de hilo (N° 1, Fig. B.46), donde los soportes guías y el tornillo de potencia superior se montan en

el soporte y se sujetan con pernos Allen M 6 x 50, los cuales restringen el movimiento a los soportes guías del tornillo de potencia superior (ver Fig. B.49).

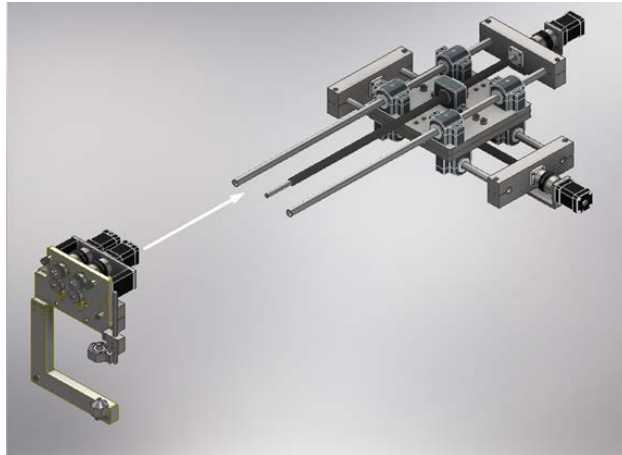


Fig. B.49. Ensamble de sistemas de movimiento y de hilo.

- Paso 4: Instalar el sistema de movimiento y de hilo en las bases y soportes (elemento N° 5). Los soportes para el tornillo de potencia inferior se deben apoyar sobre los soportes anteriormente mencionados (ver Fig. B.50).

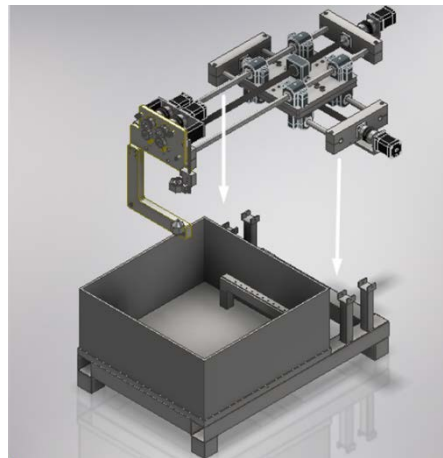


Fig. B.50. Montaje de sistemas sobre soportes.

El sistema de movimiento y la estructura de soporte deben llevar un perno de cabeza hexagonal M 5 x 45 de hierro negro Grado 5, que hace la función de sujeción de ambos conjuntos de elementos mecánicos (ver Fig. B.51).

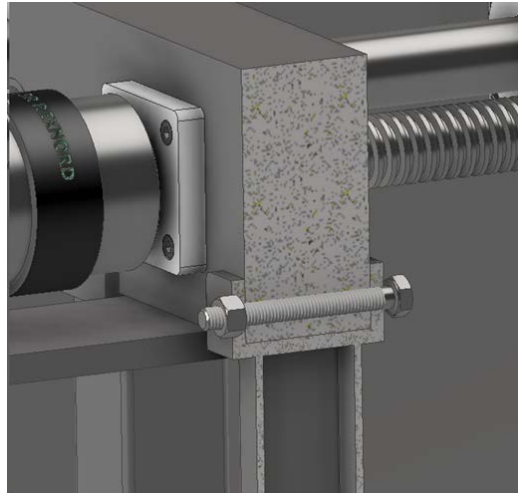


Fig. B.51. Sujeción de sistema de movimiento a estructura de soporte.

La maquina electroerosionadora de corte mediante hilo ha finalizado su montaje mecánico, tanto del sistema de hilo, sistema de movimiento, mesa de trabajo, tanque de trabajo y la estructura de soporte (ver Fig. B.52).

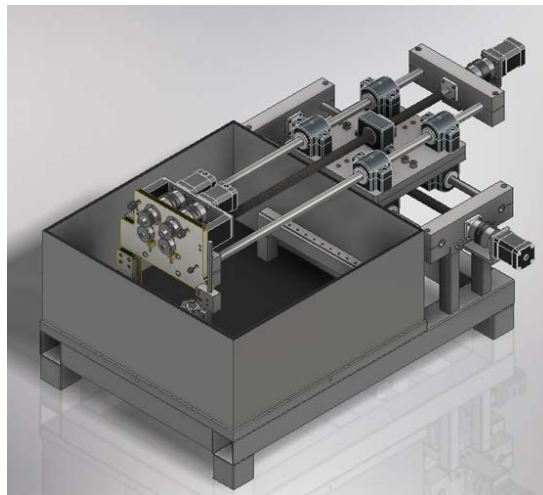


Fig. B.52. Máquina electroerosionadora de corte mediante hilo.

f) Sistema de bombeo y filtrado

Una vez ejecutada la instalación de los elementos mecánicos de la máquina electroerosionadora de corte mediante hilo, se instalarán los sistemas de bombeo y de

filtrado. Esto se realizará partiendo desde el tanque de trabajo en el sentido de flujo del proceso. Los pasos son los siguientes:

- Paso 1. Colocar el tramo de manguera de vinil reforzada de diámetro 1 ¼ pulg de la parte inferior del tanque de trabajo, sujetándola con una abrazadera metálica hacia el tanque de retención parcial de partículas con su respectiva tapadera de manera que por efecto de la gravedad el fluido dieléctrico contaminado se desplace hasta este. Colocar en el interior de dicho tanque, en uno de sus compartimentos esponjas absorbentes cubriendo el fondo de este, el otro compartimento quedará libre (ver Fig. B.53).

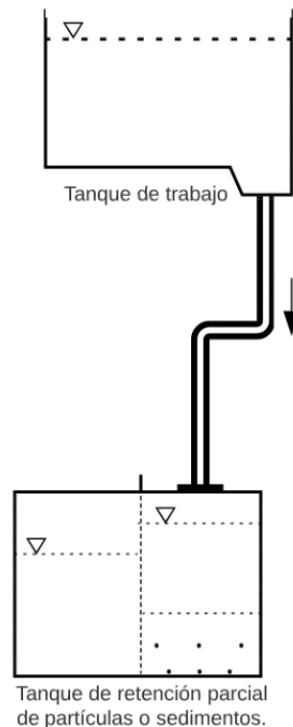


Fig. B.53. Instalación de tanque retención parcial de partículas y sedimentos.

- Paso 2. A partir del tanque de retención parcial de partículas, colocar el tramo de tubería de PVC de 1 ¼ pulg de diámetro hacia la bomba número 1. Los accesorios de PVC necesarios para esta sección como uniones lisas, universales, adaptadores hembras y macho, así como la tubería serán unidos a través de pegamento para PVC.

La instalación de la bomba se hará a través de pernos de sujeción. La alimentación eléctrica de dicha bomba será de 110 - 120 V (ver Fig. B.54).

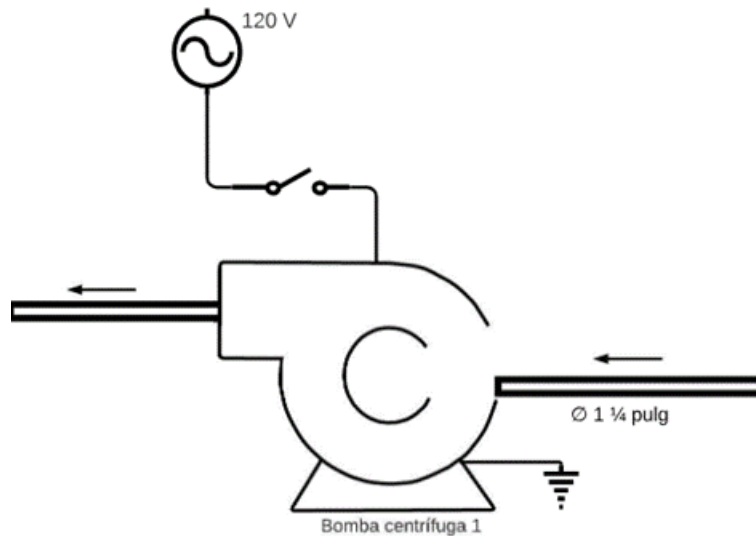


Fig. B.54. Instalación de bomba centrífuga 1.

- Paso 3. Instalar el sistema de filtrado, el cual ofrece la facilidad de tener su propia base. De la salida de la bomba 1, colocar un tramo de tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ pulg de diámetro con sus respectivos accesorios, hacia la entrada del equipo filtrante. De la salida de la bomba se debe realizar una reducción de diámetro por medio de los accesorios reductores de 1 pulg a $\frac{1}{2}$ pulg de diámetro. El resto de accesorios serán de $\frac{1}{2}$ pulg de diámetro y serán unidos a través de pegamento PVC y/o cinta teflón cuando se amerite. La ubicación de este equipo será al mismo nivel que el de la bomba 1 y el del tanque de retención parcial (ver Fig. B.55).

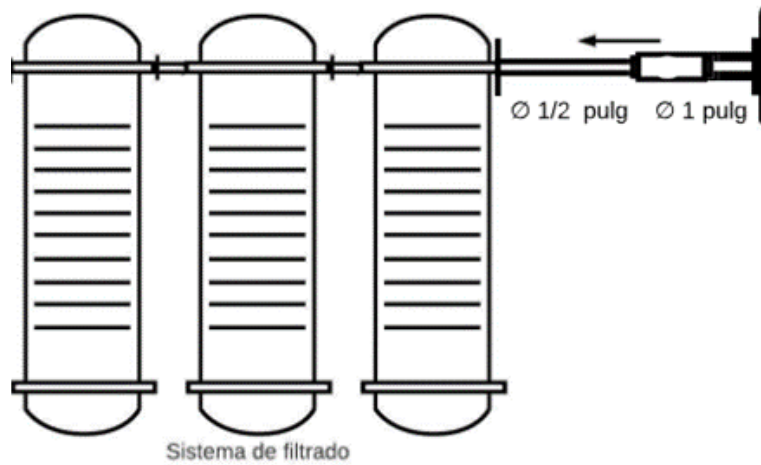


Fig. B.55. Instalación del equipo de filtrado.

- Paso 4. De la salida del equipo de filtrado, instalar tramos de tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ pulg de diámetro, utilizando codos lisos, unión universal y adaptadores hembra y macho de $\frac{1}{2}$ pulg de diámetro hasta llegar al tanque de almacenamiento del fluido dieléctrico sin contaminantes. Este poseerá su respectiva tapa y su ubicación será al mismo nivel que el tanque de trabajo (ver Fig. B.56).

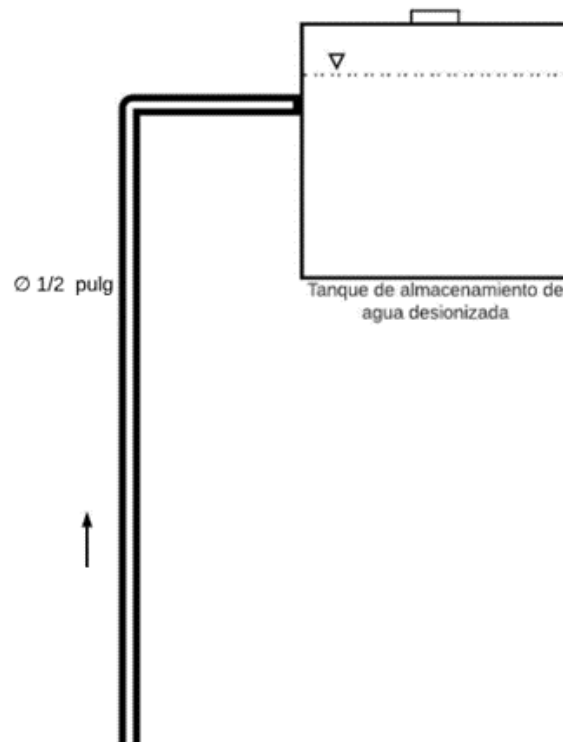


Fig. B.56. Montaje de tanque de almacenamiento.

- Paso 5. A partir de la salida del tanque de almacenamiento, colocar un tramo de tubería de 1 ½ pulg de diámetro hacia la entrada de la bomba centrífuga. De la salida de dicha bomba, colocar un tramo de tubería de 1 ¼ pulg de diámetro y posteriormente hacer una reducción de diámetro de tubería de 1 ¼ a 1 pulgada. Colocar la válvula de bola de 1 pulg de diámetro para controlar el caudal entregado. Luego instalar una unión universal, accesorios y un tramo de tubería de 1 pulg de diámetro (ver Fig. B.57).

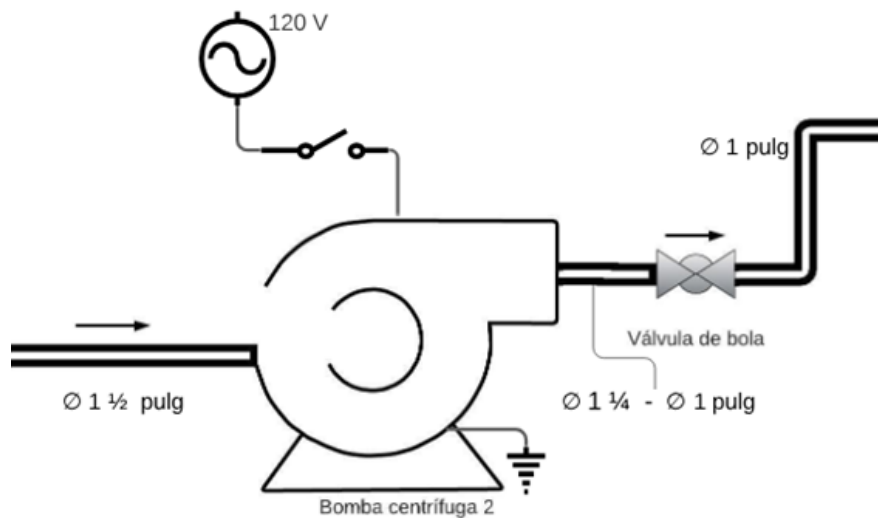


Fig. B.57. Montaje de bomba centrífuga 2.

- Paso 6. Del tramo de tubería de 1 pulg de diámetro, utilizar accesorios de PVC como codos lisos a 90° y tramos de tubería de 1 pulg de diámetro hasta llegar al cabezal de hilado. En este punto, realizar una reducción de diámetros de 1 a 1/2 pulg a través de accesorios PVC reductores. Posteriormente, instalar un adaptador macho de PVC y un adaptador hembra de bronce en el cual se instalará la manguera modular, la cual llegará hasta la base de soporte de la pieza de trabajo para suministrar el fluido dieléctrico (ver Fig. B.58).

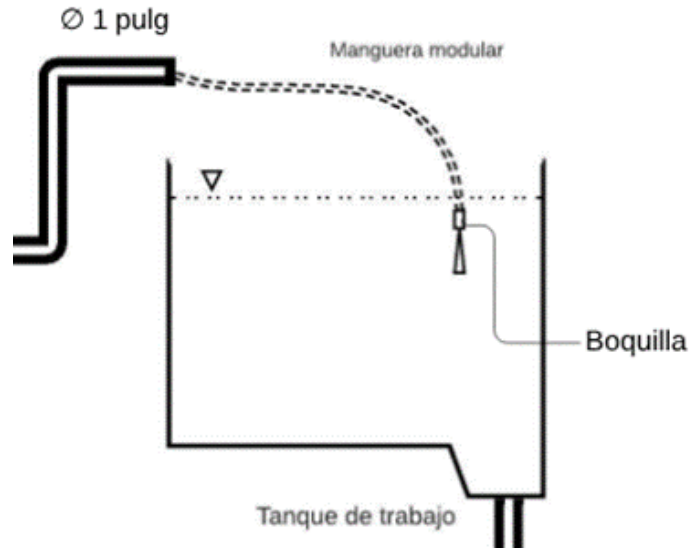


Fig. B.58. Montaje de manguera modular.

g) Sistemas de control

El generador de arco BX18 está construido a partir de una carcasa cerrada de aluminio con conexión a tierra de 19 pulg sin cables conectados. Cuando se conecta un cable de alimentación sin blindaje, funcionará en parte como una antena que emitirá una gran cantidad de radiación al entorno. Esta emisión podría perturbar otros equipos en ese mismo entorno, lo que podría suponer riesgos para la seguridad. Para evitar esto, el cable de alimentación de la máquina de electroerosión debe estar blindado y conectado a tierra.

El generador de arco tiene 5 tipos diferentes de interfaces eléctricas, 1 en el panel frontal y 4 en la parte posterior.

La interfaz del panel frontal del BX18 es la interfaz EtherCAT y consta de una entrada y una salida EtherCAT (ver Fig. B.59).



Fig. B.59. Interfaz frontal del BX18.

La entrada denominada "IN", se utiliza para controlar el BX18 a través de EtherCAT. La salida etiquetada como "OUT" se usa opcionalmente si la aplicación requiere múltiples dispositivos EtherCAT en el mismo bus y el generador de arco no es el último dispositivo en la cadena. NOTA: Para una buena inmunidad al ruido de la interfaz EtherCAT, se recomienda el uso de cables Ethernet de clase 7 o superior.

El panel trasero tiene 4 interfaces diferentes (X1, salida EDM, X2 y X3). A continuación, se describen sus funciones y distribución de pines:

- Entrada de voltaje de alimentación (X1): Esta entrada es del tipo estándar IEC C13 (ver Fig. B.60).



Fig. B.60. Interfaz X1.

La entrada de voltaje de alimentación X1 tiene las especificaciones que se describen en la Tabla B.5.

Tabla B.5. Especificaciones de interfaz X1.

Propiedad	Especificación
Voltaje de entrada	110V-230V
Frecuencia de entrada	50-60Hz
máximo poder	350W
Fusibles del dispositivo	Dos fusibles de 4A cada uno, de acción lenta. Los fusibles se pueden reemplazar abriendo la puerta abatible en el cuerpo del chasis de la interfaz X1.

- Salida de electroerosión (EDM): La salida EDM en la parte posterior del BX18 tiene 3 interfaces diferentes en las que se pueden fijar terminales de anillo. Las interfaces se visualizan en la Fig. B.61 y se describen sus funciones en la Tabla B.6.

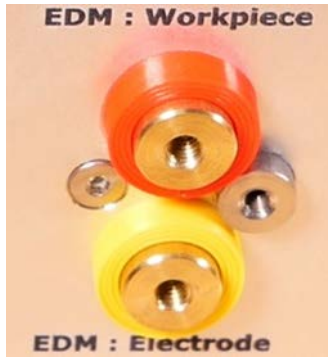


Fig. B.61. Interfaz de salida EDM.

Tabla B.6. Terminales de interfaz de salida EDM.

Etiqueta de terminal	Función	Tipo de sujetador
EDM: pieza de trabajo	Salida de potencia que se debe conectar a la pieza de trabajo. Puede ser positivo o negativo, según la configuración del generador de arco.	M4
EDM: hilo	Salida de potencia que se debe conectar al hilo. Puede ser positivo o negativo, según la configuración del generador de arco.	M4
Sin etiquetar	Orificio de toma de tierra.	M3, máximo 8 mm de largo

Para el punto de montaje en tierra M3, no utilice tornillos de más de 8 mm. Los tornillos más largos provocarán daños y mal funcionamiento. Los cables de alimentación largos degradan el rendimiento de la electroerosión, por lo que se debe mantener una longitud máxima del cable de alimentación de 1.5 m, asegurándose de torcer los cables de alimentación para minimizar la inducción como se indica en la Fig. B.62.

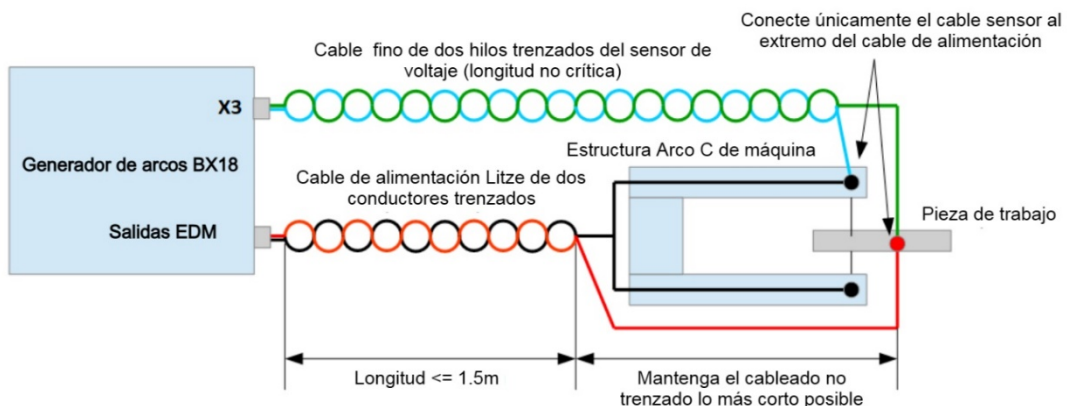


Fig. B.62. Conexión de cables desde BX-18 hacia pieza de trabajo e hilo.

- Conector de parada de emergencia y luz de advertencia (X2): El conector X2 tiene 6 pines, los cuales se presentan en la Fig. B.63, y se explican sus funciones en la Tabla B.7.



Fig. B.63. Conector X2.

Tabla B.7. Pines de conector X2.

Pin	Función
1	Sobreescritura de la parada de emergencia. Conecte este pin al pin #2 en X2 para desactivar la función de parada de emergencia.
2	Salida +12V no aislada, se puede utilizar para una luz que indique que el generador tiene corriente, y/o conectarlo al pin #1 para desactivar la funcionalidad de parada de emergencia.
3	Entrada de parada de emergencia aislada de +24V. Alimentar 24V continuos a esta patilla para un funcionamiento normal. Si se desconectan los 24 V, se producirá una parada de emergencia inmediata.
4	Tierra aislada que se utilizará para la entrada de parada de emergencia.
5	Salida de luz de advertencia de +12 V, no aislada. Esta salida se activa cuando se activa la salida EDM. La capacidad de corriente de alimentación de este pin es de 1A. Utilizar sólo luces LED.
6	Tierra no aislada, que se utilizará para la luz de advertencia activa EDM.

- Entrada de detección de arco (X3): El conector X3 tiene dos pines, los cuáles se presentan en la Fig. B.64 y se explican sus funciones en la Tabla B.8.

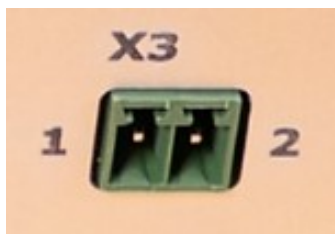


Fig. B.64. Conector X3.

Tabla B.8. Funciones de pines conector X3.

Pin	Función
1	Entrada del cable sensor de potencia de la pieza de trabajo. Conectar este pin con un par de cables finos trenzados al extremo del cable de alimentación de la pieza de trabajo, como se presenta en la figura.
2	Entrada del cable sensor para la potencia del hilo. Conecte este pin con un par de cables finos trenzados al extremo del cable de alimentación del hilo, como se presenta en la figura.

El generador de arco BX18 opera a un voltaje de trabajo letal de 150 V y puede suministrar altos niveles de potencia. Además, los niveles de emisión radiada del proceso de formación de arcos son muy altos. Estas propiedades requieren que se tenga cuidado en la aplicación del generador de arco BX18 y en el diseño y uso de la máquina de electroerosión en la que está integrado.

El controlador arco C de BaxEDM es una solución de control digital para controlar la velocidad y la tensión del hilo electrodo en una máquina de electroerosión por hilo, con la ayuda de dos servomotores y una celda de carga. El controlador integra un amplificador de celda de carga, un controlador digital de bucle cerrado para el servomotor de tensión, un generador de consigna para el servomotor de velocidad e interfaces de datos digitales (ver Fig. B.65).



Fig. B.65. Controlador arco C.

A continuación, se realiza una descripción de las interfaces que contiene el controlador arco C:

- Alimentación, comunicación, entradas y salidas digitales (X1): la función de cada uno de los pines se explica en la Tabla B.9.

Tabla B.9. Pines de interfaz X1 del controlador arco C.

N° de pin	Función
1	Salida aislada de la señal de rotura del hilo: emisor del optoacoplador
2	Entrada aislada de señal +5 V # 2
3	Entrada aislada de señal de +5 V #1: Tensión del cable y control de velocidad encendido/apagado
4	RS-485 B = cable amarillo FTDI
5	Entrada de alimentación de +5 V
6	Salida aislada de la señal de rotura del hilo: colector del optoacoplador
7	Tierra aislada
8	RS-485 A = cable naranja FTDI
9	Conexión a tierra

- Interfaz del motor de tensión (X2): la función de cada uno de los pines se explica en la Tabla B.10.

Tabla B.10. Pines de interfaz X2 del controlador arco C.

N° de pin	Función
1	No conectado
2	No conectado
3	Entrada de 5 V para retroalimentación del motor de tensión
4	Salida del valor de consigna de la modulación de anchura de impulsos del motor de tensión 5 V
5	Salida Habilitada de 5V del motor de tensión
6	No conectado
7	Salida de +5 V
8	Tierra
9	Tierra

- Interfaz del motor de velocidad (X3): la función de cada uno de los pines se explica en la Tabla B.11.

Tabla B.11. Pines de interfaz X3 del controlador arco C.

N° de pin	Función
1	No conectado
2	No conectado
3	Entrada de 5 V para retroalimentación del motor de velocidad
4	Salida del valor de consigna de la modulación de anchura de impulsos del motor de velocidad 5 V
5	Salida Habilitada de 5V del motor de velocidad
6	No conectado
7	Salida de +5 V
8	Tierra
9	Tierra

La placa de circuito se debe conectar a los conectores DSUB-9 de la caja mediante 3 cables planos cortos idénticos de 9 conductores (ver Fig. B.66).



Fig. B.66. Cableado de la caja a la placa de circuitos.

El cable debe tener un conector DSUB-9 en un lado del cable y un conector IDC 2x5 con paso de 2.54 mm en el otro lado. Como el conector IDC tiene 10 patillas, una de ellas no se debe conectar (ver Fig. B.67).

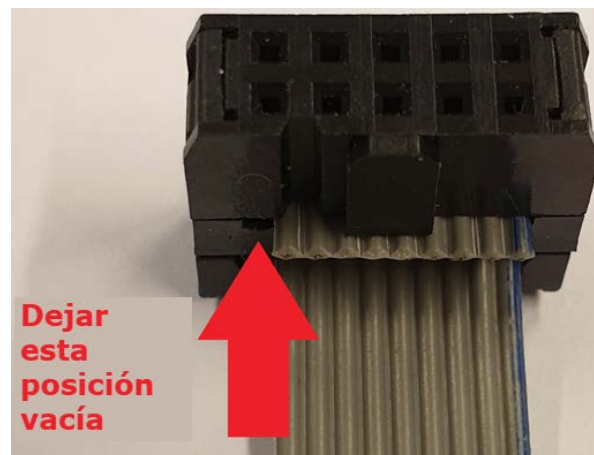


Fig. B.67. Conexión de cable IDC.

El circuito impreso del controlador arco C contiene 4 interfaces. Las interfaces P1, P2 y P3 utilizan la numeración de patillas descrita en la Fig. B.68.



Fig. B.68. Numeración de los pines de las interfaces P1, P2 y P3.

A continuación, se realiza una descripción de las interfaces que contiene el circuito impreso del controlador arco C:

- Alimentación, comunicación y entradas/salidas digitales (P3): la función de cada uno de los pines se explica en la Tabla B.12.

Tabla B.12. Pines de interfaz P3 del controlador arco C.

Nº de pin	Función
1	Entrada de alimentación de +5 V
2	Toma de tierra
3	RS-485 B = cable amarillo FTDI
4	RS-485 A = cable anaranjado FTDI
5	Entrada aislada de señal de +5 V #1: Tensión del cable y control de velocidad encendido/apagado
6	Tierra aislada
7	Entrada aislada de señal +5 V #2
8	Salida aislada de señal de rotura del hilo: Colector del optoacoplador
9	Salida aislada de señal de rotura del hilo: Emisor optoacoplador
10	No conectado

- Interfaz del motor de tensión (P1): la función de cada uno de los pines se explica en la Tabla B.13.
- Interfaz del motor de velocidad (P2): la función de cada uno de los pines se explica en la Tabla B.14.
- Interfaz de celda de carga (U13): la función de cada uno de los pines se explica en la Tabla B.15.

Para controlar los servomotores se utilizará el controlador ECT60, un controlador de servomotores controlado por bus de alto rendimiento con capacidad para integrar controladores de movimiento inteligentes. Los variadores EtherCAT de la serie EC

pueden funcionar como esclavos EtherCAT estándar y admiten CoE (CANopen sobre EtherCAT). El ECT60 es de control en bucle cerrado.

Tabla B.13. Pines de interfaz P1 del controlador arco C.

Nº de pin	Función
1	Habilitar la salida de 5 V del motor de tensión
2	Tierra
3	Salida del valor de consigna de la modulación de anchura de impulsos del motor de tensión 5 V
4	Tierra
5	Entrada de 5 V para retroalimentación del motor de tensión
6	Salida +5 V
7	No conectado
8	No conectado
9	No conectado
10	No conectado

Tabla B.14. Pines de interfaz P2 del controlador arco C.

Nº de pin	Función
1	Habilitar la salida de 5 V del motor de velocidad
2	Tierra
3	Salida del valor de consigna de la modulación de anchura de impulsos del motor de velocidad 5 V
4	Tierra
5	Entrada de 5 V para retroalimentación del motor de velocidad
6	Salida +5 V
7	No conectado
8	No conectado
9	No conectado
10	No conectado

Tabla B.15. Pines de interfaz U13 del controlador arco C.

Nº de pin	Función
1	Tierra
2	Voltaje del puente 1
3	Voltaje del puente 2
4	Voltaje de alimentación de la celda de carga

Los conectores necesarios para alimentar al controlador y para conectar el servomotor se describen en la Tabla B.16.

Tabla B.16. Conectores del ECT60 para alimentación y servomotor.

Conector	Función
V+	Alimentación en corriente continua positiva. El voltaje es de 24 a 80 V
V-	Alimentación en corriente continua negativa. El voltaje es de 24 a 80 V
A+	Interfaz de bobinado de servomotor bifásico
A-	
B+	
B-	
B-	

Para conectar el controlador a la fuente de alimentación de corriente continua, se hace mediante los conectores V+ y V-. Se debe garantizar una conexión fiable entre el controlador y la conexión a tierra por medio de un tornillo de tierra. El rango de voltaje de operación aceptable es de 24 a 80 VDC. Se debe prestar atención a la polaridad positiva y negativa de la fuente de alimentación.

Para la conexión del bobinado del servomotor, se utilizarán los conectores A+ / A- y B+ / B-. La forma de conexión dependerá de la configuración del servomotor.

El ECT60 se conecta mediante IN1+ / IN1- y IN2+ / IN2- como interfaz de entrada del controlador. La conexión del controlador en cuestión se debe basar en las instrucciones del fabricante del servomotor.

Para instalar la placa Arduino que será el controlador del sistema de bombeo, primero se debe conectar a la computadora por medio de un cable USB tipo B. El cable proporcionará energía y permitirá programar la tarjeta (ver Fig. B.69).



Fig. B.69. Cable USB tipo B.

Conectar el enchufe B del cable USB al Arduino Mega y el enchufe A al computador. Se debe encender el LED verde de encendido (etiquetado como ON en la placa Arduino). Para programar la placa, seguir los pasos siguientes:

- Abrir en la computadora el programa “IDE Arduino”.
- En el menú “Herramientas” elegir “Puerto serie” y seleccionar el puerto serie del Mega 2560.
- En el menú “Herramientas > Tarjetas” seleccionar “Arduino Mega 2560”.
- Cargar el código a la placa.

ANEXO C: MANUAL DE MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA

a) Mantenimiento mecánico

El presente manual es una guía fundamental para asegurar el funcionamiento óptimo de la máquina y prolongar su vida útil. El principio fundamental del funcionamiento de esta máquina son las descargas eléctricas controladas, por lo que se requiere cuidado y atención específicos para garantizar su rendimiento continuo. El manual proporciona una detallada serie de procedimientos, inspecciones y recomendaciones para el mantenimiento preventivo y correctivo, abordando desde el ajuste de componentes clave hasta la lubricación adecuada y la identificación temprana de posibles problemas. Con esta guía, se busca no solo maximizar la eficiencia operativa de la máquina, sino también minimizar tiempos de inactividad, asegurando la calidad y precisión del corte.

El mantenimiento preventivo es un pilar fundamental para asegurar el rendimiento óptimo a largo plazo. Esta técnica proactiva implica una serie de inspecciones, ajustes y actividades planificadas destinadas a evitar fallas inesperadas y a mantener el equipo en condiciones óptimas de funcionamiento. Al centrarse en la limpieza regular, la lubricación adecuada, la verificación de componentes claves y la identificación temprana de posibles problemas.

b) Revisión o rutina diaria

La revisión diaria de una máquina electroerosionadora de corte mediante hilo es un paso fundamental para mantener su funcionamiento óptimo y prevenir problemas durante el proceso de mecanizado. Esta rutina, que forma parte del mantenimiento regular, implica una serie de aspectos específicos a revisar. Desde la inspección visual de componentes clave hasta la comprobación de lubricación y revisión de aprete de diferentes pernos de sujeción. Por lo tanto, algunos puntos a revisar en la rutina diaria son:

- Alineación de poleas y ruedas guías.
- Revisión y reaprete de pernos y/o prisioneros de sujeción en general.
- Revisión de araña de acople flexible.
- Revisión de superficie de rueda tensora de hilo.

- Lubricación de soportes guías (grasa SKF LGWA 2/0.4).
- Lubricación de tornillos de potencia (grasa SKF LGWA 2/0.4).
- Revisión de enhebrado de hilo.
- Revisión de soldadura de tanque de trabajo.
- Revisión de sujetadores o fijadores de pieza de trabajo.

Cabe recalcar que la lubricación se hace con grasa SKF LGWA 2/0.4 con un grado NLGI 2, con una base jabonosa de Litio, un grado ISO 220 (viscosidad cinemática media $cSt @ 40\text{ }^{\circ}C$). Esto es así porque se pueden llegar a experimentar grandes cargas y por las bajas revoluciones que tiene el sistema de movimiento. Si en el dado caso fueran altas velocidades, el grado ISO tendría que bajar considerablemente, porque en tribología se tiene el concepto de que a altas velocidades menor viscosidad y a bajas velocidades mayor viscosidad, porque los elementos rodantes sometidos a altas velocidades, la grasa con un grado ISO mayor e inadecuado puede provocar el efecto de fricción o viscosidad fluida.

c) Enhebrado de hilo

El enhebrado del hilo en una máquina electroerosionadora de corte mediante hilo es un proceso crítico que asegura la continuidad y precisión del corte. Esta técnica implica el paso cuidadoso del hilo conductor a través de la máquina, permitiendo que las descargas eléctricas realicen cortes precisos en el material. El enhebrado adecuado garantiza no solo la estabilidad del proceso de mecanizado, sino también la integridad del hilo, fundamental para mantener la calidad y precisión en la fabricación de piezas. Por lo tanto, el enhebrado se hace de la siguiente forma:

- El hilo se introduce por la entrada a la polea motriz (numeral 1) y después hacia la polea conductora (numeral 2). En esos dos puntos dan cinco vueltas, dado a que las poleas son de cinco canales.
- Posteriormente, el hilo pasa a la rueda guía (numeral 3), y luego hacia las boquillas superior e inferior (numeral 4 y 5).
- El hilo entra a la rueda guía (numeral 6 y 7).
- Para finalizar, el hilo entra a la polea conductora (numeral 8) y después hacia la polea motriz (numeral 9), donde se encarrila cinco veces, y luego sale el hilo.

Es decir, que el camino de enhebrado es 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9. Si no se realiza alguno de estos pasos, el enhebrado sería defectuoso y no se podría trabajar la pieza (ver Fig. C.1).

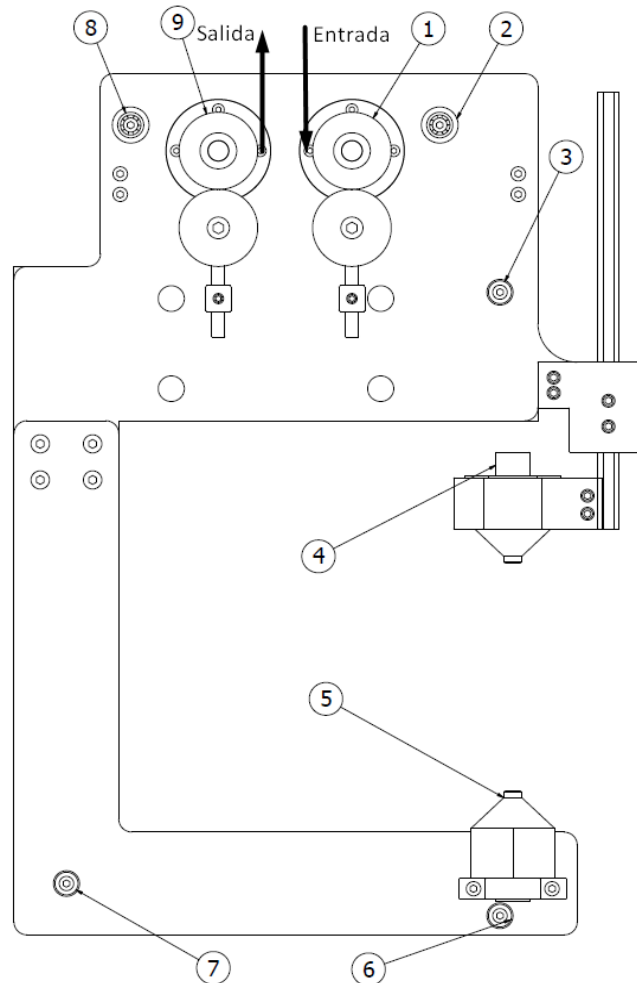


Fig. C.1. Enhebrado de hilo.

d) Mantenimiento sistema de bombeo y filtrado

Para mantener la funcionalidad de la máquina electroerosionadora propuesta, es importante realizar mantenimientos preventivos e inspecciones de frecuencia diaria. A continuación, a través de una orden de trabajo, se especifica el área del equipo que se debe someter a inspección (ver Tabla C.1).

Tabla C.1. Formato de mantenimiento preventivo programado del sistema de bombeo y filtrado.

Orden de trabajo de actividades programadas			
[LOGO DE EMPRESA]	Fecha de ejecución: / /		
	Planta:	Periodicidad: Semanal	
	Equipo: Sistema de bombeo y filtrado.	Identificación:	
Sector: Mecánico	Actividad: Preventiva	Ubicación:	Bloque:
Herramientas generales		Equipo de protección	
Destornillador estrella	Cinta métrica (flexómetro).	Casco.	
Llave Stillson.	Lámpara de mano.	Zapatos industriales.	
Llave Cangreja.	Lámpara de casco.	Tapones auditivos industriales.	
Destornillador plano.	Guantes cortos de nitrilo y franela para limpieza.	Mascarilla N95.	
Recomendaciones de seguridad	Servicio	Si	No
1. Desenergizar alimentación eléctrica de toda la máquina y sus equipos.	Sistema de bombeo y filtrado		
2. Asegurar el bloqueo de la máquina.	Revisión de los niveles de agua desionizada en los tanques del sistema.		
3. Esperar a que el elemento acabe su ciclo de trabajo.	Revisión general de fugas de agua desionizada en el sistema.		
4. Asegurar el buen estado del EPP.	Revisión del estado del pegamento en uniones de accesorios PVC.		
5. Usar EPP.	Revisión del estado de uniones roscadas de accesorios PVC.		
	Limpieza de esponja de depósito de retención parcial de partículas.		
Herramientas especiales	Revisión de las uniones de los tanques de almacenamiento del agua desionizada.		
Nivel	Revisión del alineamiento de las bombas con respecto a sus puntos de entrada y salida.		
Tenaza amperimétrica.	Perdida del cebado de las bombas centrifugas.		
- Estetoscopio. - Extractor de rodamientos.	Revisión de estado de rodamientos en general (desgaste, ruido, vibración, etc.) de bombas centrifugas. NOTA: tener precaución al energizar alimentación eléctrica.		
Tenaza amperimétrica.	Revisión de rangos de operación del motor eléctrico. NOTA: tener precaución al energizar alimentación eléctrica.		
Termómetro infrarrojo.	Inspección de la temperatura del motor eléctrico en operación. NOTA: tener precaución al energizar alimentación eléctrica.		
	Inspección general del caudal de todo el sistema. NOTA: tener precaución al energizar alimentación eléctrica.		
	Realizar limpieza general a todos los componentes del sistema de bombeo y filtrado.		
Ocurrencia y Diagnóstico del equipo.			
Falla		Falla	
Causa		Causa	
Solución		Solución	
OBSERVACIONES			
Plenamente atendido: []		Provisional atendido: []	No atendido: []
Técnico:		Supervisor:	En el plazo [] / Fuera del plazo []
			Inicio Mantenimiento: (am/pm)
			Final Mantenimiento: (am/pm)

ANEXO D: MANUAL DE OPERACIÓN

<p>A. Procedimientos y lista de verificación previos a la puesta en marcha.</p> <p>Antes de poner la máquina de electroerosión en marcha, es necesario verificar que se ha cumplido los pasos siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Preparar la pieza de trabajo haciéndole un agujero por donde se colocará el hilo electrodo. 2) Atravesar el hilo electrodo por el agujero para poder cortar la pieza de trabajo. 3) En el programa instalado en la computadora, dar clic en la opción “Encontrar centro” para que el hilo electrodo se coloque en el centro del agujero. 4) Inspeccionar visualmente completamente el sistema de bombeo y filtrado. 5) Verificar que el líquido dieléctrico se encuentre en óptimas condiciones. 6) Despejar el área de trabajo tanto de personas como también de objetos. 7) Trabajar en una zona perfectamente iluminada. 	
Preparar la pieza de trabajo	Por medio de taladro y broca, hacer un agujero a la pieza de trabajo. Luego pasar a través del agujero el hilo electrodo.
Inspeccionar completamente el sistema de bombeo y filtrado.	Verificar que estén energizadas ambas bombas, cerciorarse que los niveles de agua desionizada en los tanques se encuentren dentro de los parámetros de operación para el arranque inicial.
Inspeccionar el estado de válvula de bola y manguera modular.	Verificar que la válvula de bola se encuentre en posición normalmente abierta. En el caso de la manguera modular verificar que ésta no interfiera en los movimientos de la base porta probeta.
<p>B. Accionamiento de la máquina</p> <p>Una vez completados los procedimientos y la lista de verificación previo al arranque, se puede operar la máquina de electroerosión mediante hilo.</p> <p>ADVERTENCIA: No ocupar la máquina sin el equipo de seguridad adecuado. Si se encuentra algún elemento en mal estado después de la verificación, notificar inmediatamente al técnico.</p> <p>Para poner la máquina en marcha:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) El operario de la máquina debe corroborar que la probeta esté correctamente ubicada y fijada en la mesa de trabajo, normal al hilo de corte. 2) El operario debe presionar el botón de arranque del sistema de bombeo para iniciar la circulación del líquido dieléctrico; una vez cumplido este paso se puede dar inicio al proceso de electroerosión y a su vez al sistema de control del equipo. 3) En la interfaz de Linux CNC, dar clic en el botón “inicio” para iniciar el proceso de corte. 4) Iniciado el proceso de corte por electroerosión mediante hilo, el operario debe verificar que el chorro de líquido dieléctrico sea preciso e incida en la zona de corte, de lo contrario debe ajustarlo. De ser necesario, parar el proceso y cambiar la boquilla de la manguera modular hasta lograr esta condición. 5) Verificar las condiciones de los equipos mientras se desarrolle el proceso de corte, temperatura del líquido dieléctrico, conductividad eléctrica y niveles del líquido en los tanques de trabajo. Una vez finalizado el proceso, dar paro al sistema de bombeo y demás sistemas. 	

C. Limpieza e inspección final

Luego de haber finalizado el proceso de electroerosión, seguir los pasos siguientes:

- a) Revisar que en la línea de entrada de la bomba 1 no exista presencia excesiva de partículas metálicas o sedimentos que puedan comprometer el funcionamiento de esta, en caso de que exista se deberá remover este exceso y a su vez inspeccionar el estado de la esponja absorbente en el tanque de retención parcial de partículas.
- b) Inspeccionar el estado de la esponja absorbente en el tanque de retención parcial de partículas, observar si ésta presenta alta acumulación de sedimentos partículas. Realizar limpieza.
- c) Inspeccionar que el equipo de filtrado se encuentre en óptimas condiciones de funcionamiento.
- d) Verificar que el nivel de agua desionizada sea el adecuado antes de volver a poner la máquina en marcha.

ADVERTENCIA:

Prestar especial cuidado al estado de la esponja absorbente y de la entrada a la bomba.

D. Disposiciones finales

Si la máquina no se va a usar recurrentemente, se recomienda almacenar la mayoría del líquido dieléctrico en un depósito hermético, de esta manera se evita que pierda sus propiedades o se contamine. Recordar almacenar la máquina en un lugar:

- Limpio, seco y seguro.
- Alejado de fuentes de calor, llamas abiertas, chispas.
- Cubrirlo para ofrecer mayor resguardo de la suciedad u objetos extraños.
- Es el operario quien debe revisar que todos los procesos de la máquina se lleven a cabo correctamente, de no ser así la máquina deberá ser revisada para determinar el origen del fallo o problema.

ADVERTENCIA:

Antes de ejecutar labores de mantenimiento, leer detenidamente el “MANUAL DE MANTENIMIENTO” y seguir sus instrucciones.