

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



**PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE
ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN**

PRESENTADO POR:

**LUIS ANTONIO PÉREZ ALBERTO
GABRIELA LORENA RIVAS ALDANA
EMERSON ROLANDO SERPAS VIDAL**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL:

Ing. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO:

Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

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
ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN**

Presentado por:

**LUIS ANTONIO PÉREZ ALBERTO
GABRIELA LORENA RIVAS ALDANA
EMERSON ROLANDO SERPAS VIDAL**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, octubre de 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Estudiantes: Brs. Luis Antonio Pérez Alberto¹, Gabriela Lorena Rivas Aldana² y Emerson Rolando Serpas Vidal³

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 recopilación bibliográfica sobre el proceso de electroerosión por penetración con el fin principal de determinar los parámetros más importantes que controlan el proceso. Posteriormente, se realizó el diseño de la máquina en un programa CAD para determinar las dimensiones, tipo de material y factor de seguridad de cada uno de los componentes, luego se desarrollaron los cálculos teóricos con el fin de evidenciar el proceso de diseño. Además, se definió la forma del electrodo considerando que se maquina por electroerosión la sección de la muesca de una probeta Charpy. Luego se definieron los parámetros eléctricos y de control mecánicos de la máquina, como son la velocidad del portaelectrodo, el GAP y el voltaje entre electrodo - probeta (pieza). Posteriormente se desarrolló la programación en Arduino para poder controlar al motor, el relé y los sensores. A su vez se desarrolló la programación utilizando códigos G y M para poder maquina la punta del electrodo en una fresadora CNC y garantizar la reproducibilidad de dichos electrodos. Por último, se desarrolló la factibilidad técnica y económica del proyecto, con el fin de determinar la viabilidad de construir el mismo.

Palabras claves: Electroerosión, maquinado y electrodo.

1 E-mail: tonio_504@hotmail.com

2 E-mail: gabrielarivass@gmail.com

3 E-mail: rolans1112@hotmail.com

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

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mis padres:

Edith del Carmen Alberto de Pérez y Luis Gustavo Pérez Alfaro.

Mis hermanos:

Marina del Carmen Pérez Alberto y Luis Gustavo Pérez Alberto.

Mis amigos:

Vanesa Hernández y David Calles.

Luis Pérez

DEDICATORIA

A mi madre,

Lorena del Carmen Aldana, quien nunca dejó de animarme para seguir adelante y siempre confió en que Dios hace las cosas por una razón.

Gabriela Rivas

DEDICATORIA

A mi madre Licda. María Elena Vidal, que ha sido parte fundamental para mi desarrollo académico dándome cariño, ánimo y apoyo para culminar mi carrera universitaria. Y que me han enseñado que tomado de la mano de Dios puedo lograr mis propósitos.

A mi padre Lic. Santos Serpas que siempre tuvo la confianza en que yo culminaría mi carrera como ingeniero mecánico y que siempre me apoyo y me ayudo con mis estudios y que me enseñó que todo con esfuerzo y dedicación se puede llevar acabo.

A mi hermana Licda. Débora Serpas que siempre tuvo palabras de aliento para que siguiera esforzándome en el camino y que siempre confió en que culminaría mi carrera.

A mi tía Guadalupe, a mi primo Daniel y a mi abuela Alicia (Q.E.P.D), que siempre han estado a mi lado dándome ánimos y no dejando que me diera por vencido.

A mis amigos, Mirna, Alicia, Alma, Astrid, Francisco y el Ing. Kirio que desde inicios de la carrera han formado parte del camino y que aún continúan brindándome su amistad y apoyo esperando que siempre formen parte de mi vida. Y a los amigos que estuvieron en mis comienzos y por situaciones de la vida se alejaron pero compartieron parte de la vida universitaria.

Emerson Serpas

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haber derramado su sabiduría, discernimiento, salud, serenidad y bendiciones en mi vida.

A mi familia por haberme acompañado en este camino y brindado su apoyo incondicional en todo momento.

A la Universidad de El Salvador, por ser mi alma mater y formarme como ingeniero.

Al Dr. y M.Sc. Jonathan Berrios por su asesoría y apoyo constante durante el desarrollo del trabajo de graduación.

A mis compañeros de trabajo de graduación, porque a pesar que hubo complicaciones en el desarrollo de este trabajo de graduación, siempre formamos un buen equipo.

Y en general a todos los compañeros y amigos que me motivaron a cumplir la finalización de este sueño.

Luis Pérez

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar tan lejos rodeada de mis seres queridos, y por mostrarme las cosas que realmente valen la pena en esta vida.

A mi mamá por nunca perder su fe en mí, por su amor incondicional, por su esfuerzo y sacrificio, sin los cuales jamás habría llegado hasta aquí.

A mi amor por darle sentido a mi vida, hacerme crecer como persona, e inspirarme a seguir mis sueños.

A mis compañeros de trabajo de graduación por no darse por vencidos con este proyecto y por todos los buenos momentos que pasamos durante toda la carrera.

Gabriela Rivas

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por la vida, la salud, la familia, los amigos, las bendiciones y la sabiduría proporcionada para mi vida.

A mi familia y amigos por bríndame siempre ánimo, apoyo y las herramientas necesarias para que pueda culminar la carrera.

A la Universidad de El Salvador y los docentes que fueron parte de ir mi formación como ingeniero.

Al Dr y M.Sc. Jonathan Berrios por brindar su tiempo, apoyo y ayuda para durante la realización del trabajo de graduación.

A mis compañeros de trabajo de graduación, que a pesar que por momentos sentíamos que no teníamos mucho para avanzar pero aun así logramos culminar el trabajo de graduación y nuestra carrera como ingenieros mecánicos.

Emerson Serpas

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Generalidades.....	4
1.1.1. Definición.....	5
1.1.2. Principios de mecanizado por electroerosión.....	5
1.1.3. Propiedades del mecanizado por electroerosión.....	7
1.1.4. Análisis de descarga.....	7
1.2. Mecanizado por electroerosión.....	12
1.2.1. Tipos de mecanizado por electroerosión.....	12
1.2.2. Electroerosión por hilo.....	12
1.2.3. Electroerosión por perforación o rectificado por electroerosión.....	15
1.2.4. Electroerosión por penetración.....	16
1.3. Clasificación de las máquinas y sus componentes.....	21
1.3.1. Máquina de electroerosión por hilo.....	21
1.3.2. Máquina de electroerosión por penetración.....	23
1.3.3. Fluido dieléctrico.....	32
1.3.4. Materiales maquinables por electroerosión.....	36
1.4. Aplicaciones del maquinado por electroerosión.....	40
1.4.1. Aplicaciones de electroerosión por hilo.....	40
1.4.2. Aplicaciones de electroerosión por penetración.....	42
1.4.3. Factores que repercuten en la electroerosión.....	42
1.4.4. Superficie electroerosionada.....	43
1.4.5. Usos tradicionales de la superficie electroerosionada.....	44
2. DISEÑO DE LA MÁQUINA.....	45
2.1. Generalidades del proceso del maquinado por electroerosión.....	45
2.2. Coeficientes para el cálculo de desgaste del electrodos.....	47
2.2.1. Desgaste volumétrico de la herramienta.....	49
2.2.2. Tasa de eliminación del material.....	49
2.2.3. Coeficiente de desgaste de la herramienta.....	50
2.3. Parámetros en el proceso de electroerosión por penetración.....	51
2.3.1. Selección de parámetros generales.....	56
2.3.2. Selección de parámetros principales.....	62
2.4. Diseño de la estructura.....	69
2.4.1. Determinación del material del piñón.....	70
2.4.2. Determinación de material del cuerpo de la cremallera.....	76
2.4.3. Análisis de esfuerzo para el riel de la cremallera.....	88
2.4.4. Análisis de esfuerzo del tubo de perfil cuadrado.....	97
2.4.5. Análisis de soldadura.....	100
2.5. Maquinado CNC del electrodo.....	102
3. SISTEMA DE CONTROL Y FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA EDM.....	103
3.1. Elección de elementos electrónicos.....	103
3.2. Sistema de control.....	110
3.2.1. Configuración electrónica de la etapa de control.....	110

	Pág.
3.2.2. Cantidad de pasos del motor.....	113
3.2.3. Programación de la placa Arduino Uno.....	115
3.3. Funcionamiento de la máquina de electroerosión.....	120
4 FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA.....	123
4.1. Factibilidad técnica.....	127
4.2. Factibilidad económica.....	134
4.2.1. Costos fijos.....	135
4.2.2. Costo de mano de obra.....	138
4.2.3. Costo del local.....	140
4.3. Costos variables.....	140
4.3.1. Costo de consumo eléctrico.....	140
4.3.2. Costo de depreciación de equipos.....	142
4.3.3. Costo de consumibles.....	143
4.4. Resumen de costos.....	144
CONCLUSIONES.....	147
RECOMENDACIONES.....	149
REFERENCIAS.....	150
ANEXOS.....	155
Anexo A: Planos de fabricación.....	155
Anexo B: Cotizaciones.....	169
Anexo C: Manual de montaje de la máquina de electroerosión.....	185
Anexo D: Manual de operación y mantenimiento.....	196

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Desgaste aproximado del electrodo.....	29
Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del cobre electrolítico.....	56
Tabla 2.2. Composición química del acero SAE 1045.....	57
Tabla 2.3. Propiedades físicas del acero SAE 1045.....	58
Tabla 2.4. Características del Aceite Mineral EDM 250.....	59
Tabla 2.5. Dimensiones de la unidad de filtrado.....	60
Tabla 2.6. Especificaciones Técnicas de la bomba.....	61
Tabla 2.7. Resumen de Parámetros Generales.....	62
Tabla 2.8. Tasa de eliminación de material (MRR) experimental y parámetro de rugosidad (Ra).....	62
Tabla 2.9. Propiedades físicas del volumen del material removido, obtenida mediante simulación en SolidWorks.....	64
Tabla 2.10. Características del Generador regulable.....	68
Tabla 2.11. Resumen de Parámetros Principales ..	68
Tabla 2.12. Módulos según paso diametral [50].....	72
Tabla 2.13. Materiales para fatiga en engranes, según AGMA, utilizando Sac.....	75
Tabla 2.14. Recopilación los datos de área, de los centroides de cada figura y la multiplicación de las dos anteriores.....	86
Tabla 2.15. Recopilación los datos de área, de los centroides de cada figura y la multiplicación de las dos anteriores.....	94
Tabla 3.1. Configuración de pines del sensor óptico H21A1.....	106
Tabla 4.1. Elementos que comprenden la máquina.....	125
Tabla 4.2. Costos de materias primas y equipos necesarios para la construcción de una máquina electroerosión.....	136
Tabla 4.3. Escala de salarios según el art. N° 47 del Reglamento General del Sistema Escalafón del personal de la Universidad de El Salvador.....	139
Tabla 4.4. Costos de mano de obra directa e indirecta según el precio y número de horas trabajadas.....	139
Tabla 4.5. Costos de local.....	140
Tabla 4.6. Listado de equipos y potencias.....	141
Tabla 4.7. Pliego tarifario de electricidad para media tensión con medición de potencia.....	141
Tabla 4.8. Precio de electricidad por equipo y tiempo de uso.....	142
Tabla 4.9. Valor de la maquinaria luego de su uso o explotación.....	142
Tabla 4.10. Cálculo de depreciación de los equipos.....	143
Tabla 4.11. Precio de consumibles.....	142
Tabla 4.12. Resumen de costos.....	145

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Principio del proceso de electroerosión.....	6
Fig. 1.2. Ionización del dieléctrico.....	8
Fig. 1.3. Iniciación del canal de descarga.....	8
Fig. 1.4. Paso masivo de la corriente por el canal de descarga.....	9
Fig. 1.5. Efecto del paso masivo de la corriente por el canal de descarga.....	9
Fig. 1.6. Arranque de material producido por la descarga.....	10
Fig. 1.7. Fotografías de cráteres.....	10
Fig. 1.8. Estado final del cráter.....	11
Fig. 1.9. Electroerosión por hilo.....	13
Fig. 1.10. Rectificado por electroerosión.....	16
Fig. 1.11. Electroerosión por penetración.....	17
Fig. 1.12. Electroerosión por penetración utilizando un electrodo con imagen negativa a la pieza.....	19
Fig. 1.13. Máquina de electroerosión por hilo.....	21
Fig. 1.14. Componentes de una máquina de electroerosión por hilo.....	23
Fig. 1.15. Estructura de una máquina de electroerosión por penetración.....	27
Fig. 1.16. Componentes de una máquina de electroerosión por penetración.....	27
Fig. 1.17. Maquinado de un acero Sverker 21 mediante electroerosión.....	37
Fig. 1.18. Aleación Inconel 718 mecanizada mediante electroerosión por hilo.....	39
Fig. 1.19. Ejemplo de piezas fabricadas mediante electroerosión por hilo.....	41
Fig. 1.20. Superficie de un acero electroerosionado.....	43
Fig. 2.1. Ciclo de electroerosión: a) Etapas de descarga; b) Curva de voltaje en función del tiempo durante la descarga; y c) Curva de intensidad en función del tiempo durante la descarga [27].....	46
Fig. 2.2. Representación de los factores principales para la definición de la cavidad final [22].....	48
Fig. 2.3. Gap lateral y frontal.....	53
Fig. 2.4. Sistema del proceso de electroerosión por penetración [27].....	54
Fig. 2.5. Fuente de Alimentación de CD: regulable de 30 a 60 V [30].....	55
Fig. 2.6. Esquema y dimensiones del electrodo.....	57
Fig. 2.7. Dimensiones según norma ASTM E 23 – 02a [26].....	58
Fig. 2.8. Placa de Arduino UNO [16].....	59
Fig. 2.9. Motor paso a paso NEMA 17 [17].....	59
Fig. 2.10. Filtro de aceite para motocicleta [32].....	61
Fig. 2.11. Bomba de succión externa [20].....	61
Fig. 2.12. Volumen del material removido.....	64
Fig. 2.13. Generador regulable de 60 V [21].....	68
Fig. 2.14. Diseño del mecanismo el SolidWorks.....	70
Fig. 2.15. Cremallera con sección transversal triangular: a) Isométrico real; b) vista frontal; y c) vista lateral.....	77
Fig. 2.16. Cremallera de sección transversal rectangular: a) Isométrico; b) vista frontal; y c) vista superior.....	78

	Pág.
Fig. 2.17. Diagrama de cuerpo libre de la cremallera, la máxima abertura de la cremallera es de 140 mm.....	79
Fig. 2.18. Cargas puntuales en función de x , para la carga distribuida de tipo triangular, debido a la reacción que le provoca el riel a la cremallera.....	81
Fig. 2.19. Construcción del diagrama de cortante para la cremallera: a) Cargas que intervienen; b) Diagrama de cortante; y c) Diagrama de momento flector....	84
Fig. 2.20. Cremallera sometida a flexión pura, se presentan las dimensiones.....	85
Fig. 2.21. Ubicación del eje x' el cual pasa por el centroide de la figura, también se observa los centroides de las secciones 1 y 2, denotados por Y_1 y Y_2 respectivamente.....	85
Fig. 2.22. Distancias d_1 y d_2 a partir del nuevo eje x'	87
Fig. 2.23. Dimensiones del riel: a) Isométrico del riel; b) Sección transversal del riel; y c) Dimensiones de la vista de perfil del riel incluyendo los soportes para el motor y para el sensor 2. Cotas en mm.....	89
Fig. 2.24. Distribución de cargas sobre el riel, tomando en cuenta las cotas en que se ubican.....	90
Fig. 2.25. Diagrama de fuerza cortante y momento flector para el riel: a) Cargas que intervienen; b) Diagrama de cortante; y c) Diagrama de momento flector.....	93
Fig. 2.26. Cotas de la sección transversal del riel, dicha sección se subdivide en segmentos que servirán para el análisis por el método de áreas.....	94
Fig. 2.27. Centroide de la sección transversal del riel.....	95
Fig. 2.28. Ubicación del eje x'	96
Fig. 2.29. Isométrico del bastidor porta electrodo.....	94
Fig. 2.30. Cargas a las que está sometido el tubo del perfil cuadrado.....	98
Fig. 2.31. Sección transversal de un tubo de perfil cuadrado de 1 pulg, chapa 16.....	99
Fig. 2.32. Representación de la programación CNC para la punta del electrodo.....	102
Fig. 3.1. Sensor inductivo tipo PNP, cable marrón positivo, azul negativo y negro señal.....	104
Fig. 3.2. Modelo reflectivo: Tanto el emisor de luz como los elementos receptores están contenidos en una sola carcasa. El sensor recibe la luz reflejada desde el objeto.....	105
Fig. 3.3. Modelo tipo barrera: el transmisor y el receptor están separados. Cuando el objeto se encuentra entre el transmisor y el receptor, se interrumpe la luz [34].....	105
Fig. 3.4. Sensor H21A1 con su esquema electrónico.....	106
Fig. 3.5. Definición de pines del driver para controlar un motor paso a paso NEMA 14 o NEMA 17.....	107
Fig. 3.6. Pines de motor NEMA 17 monofásico.....	108
Fig. 3.7. Relé de 5 A y 125 V.....	109
Fig. 3.8. Configuración del relé que controla el paso de corriente hacia el electrodo.....	110
Fig. 3.9. Configuración de los componentes controlados por el Arduino.....	111
Fig. 3.10. Diagramas electrónicos de la etapa de control: a) diagrama de sensores y botón de inicio; b) diagrama de botón de paro de emergencia; c) diagrama del Arduino, motor paso a paso, relé y puente H; y d) diagrama de la fuente de 60 V.....	112
Fig. 3.11. Distancias de separación entre cada tramo de sensores.....	113

	Pág.
Fig. 3.12. Ubicación física de los componentes principales de la máquina. El sensor 1 es fotoeléctrico, el sensor 2 es fotoeléctrico, el sensor 3 es inductivo.....	122
Fig. 4.1. Isométrico de la mesa de madera.....	127
Fig. 4.2. Isométrico del reservorio de acrílico.....	128
Fig. 4.3. Isométrico del electrodo de cobre, el agujero pasado del electrodo permite conectar un pin de cobre.....	129
Fig. 4.4. Isométrico del bastidor porta probeta.....	130
Fig. 4.5. Isométrico del bastidor porta probeta con el soporte para motor y sensor.....	131
Fig. 4.6. Isométrico de la cremallera con el soporte de prensa soldado.....	132
Fig. 4.7. Engrane conductor y piñón.....	133
Fig. 4.8. Prensa de esquinera, de aluminio.....	134
Fig. 4.9. Isométrico de la prensa de aluminio.....	134

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ASTM:	Sociedad Americana para pruebas y materiales
CNC:	Control numérico por computadora
EDM:	Mecanizado por descarga eléctrica
EDM RC:	Mecanizado por descarga eléctrica (resistencia y capacitor)
ISO:	Organización Internacional de Normalización
MRR:	Tasa de eliminación del material
NEMA:	Asociación nacional de fabricantes eléctricos
PCD:	Diamante policristalino
PLC:	Control lógico programable
Ra:	Rugosidad media aritmética
SAE:	Sociedad de ingenieros automotrices
S _{máx} :	Esfuerzo a carga máxima
T _{ablan} :	Temperatura de ablandamiento
T _m :	Temperatura de fusión
TW:	Desgaste volumétrico de la herramienta
TWR:	Coeficiente de desgaste de la herramienta
UNE:	Asociación Española de Normalización
VID:	Medida de rugosidad alemana
γ :	Peso específico
σ_y :	Esfuerzo de fluencia
ρ :	Densidad
λ :	Conductividad térmica
c:	Calor específico
ν :	Coeficiente de Poisson
ρ :	Resistividad eléctrica
α :	Coeficiente de dilatación térmica
IACS:	Estándar internacional del cobre recocido

INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria de manufactura, el maquinado es uno de los procesos más importantes que se realizan. Este se basa en remover por medio de una herramienta de corte, todo el exceso del material, de tal forma que la pieza terminada sea realmente la deseada. El proceso de maquinado incluye la deformación cortante del material, creando una viruta, cuando ésta es removida, queda totalmente expuesta a una nueva superficie. Lo novedoso de este proceso es que a través de la historia se ha modificado e innovado la forma de realizar el maquinado.

Así, el mundo ha evolucionado en todo momento con tecnologías que suplen nuevas necesidades o mejoran la forma de llevar a cabo un procedimiento tradicional. Dado lo anterior, la industria metalmeccánica no es ajena a esto y por ende se han creado procesos automatizados manejados con lenguajes de programación tales como Control Numérico Computarizado (CNC), Arduino, Control Lógico Programable (PLC), etc., que facilitan el mecanizado de piezas complejas para las industrias, y garantizan factores como versatilidad, altas capacidades de producción y preparación, altísima precisión dimensional del orden de micras, mejores acabados superficiales, rapidez y flexibilidad.

El conjunto de órdenes que siguen unas secuencias lógicas constituye un programa de maquinado. Al ingresar las órdenes o instrucciones adecuadas a la máquina, ésta es capaz de maquinar una simple ranura, una cavidad irregular, la cara de una persona en alto o bajo relieve, un grabado artístico, un molde de inyección de una cuchara o una botella, o lo que el operador requiera.

En las máquinas automatizadas o semiautomatizadas, a diferencia de las convencionales o manuales, una computadora o un circuito integrado que contiene la programación adecuada controla la posición y la velocidad de los motores que accionan los ejes de estas, hecho por el cual pueden hacer movimientos que no se logran manualmente como círculos, líneas diagonales y figuras tridimensionales complejas. Dicha computadora controla el movimiento

de la mesa, los carros y el husillo de la máquina que, una vez programada, ejecuta las operaciones autónomamente sin intervención del operario; acción que permite aprovechar mejor el tiempo del personal y aumentar su productividad.

Actualmente, las computadoras son cada vez más pequeñas y accesibles, por lo que el uso de estas se ha extendido e implementado en maquinaria como: tornos, fresadoras, rectificadoras, electroerosionadoras, punzonadoras, dobladoras, etc.

Uno de los principales procesos de mecanizado que está teniendo auge y que está reemplazando máquinas convencionales tales como fresadoras, es la electroerosión, esto es debido a que este tipo de mecanizado presenta múltiples ventajas, como por ejemplo, permite obtener bordes sin rebabas, tolerancias más estrictas, trabajar metales muy duros o aleaciones refractarias, mecanizar materiales explosivos o inflamables ya que el proceso tiene lugar dentro de un fluido, producción de piezas complejas y el proceso se lleva a cabo sin contacto por lo que no genera vibración ni esfuerzos de corte.

El proceso de electroerosión consiste en la remoción de material a través de una serie de sucesivas descargas eléctricas de muy corta duración, separadas entre sí un cierto tiempo, las cuales tienen lugar entre dos polos (pieza y electrodo), por lo que ambos deben ser materiales conductores. Las descargas se crean mediante generadores de corriente directa.

Existen dos tipos de electroerosión, en primer lugar, se tienen la Electroerosión por Penetración, esta se encarga del mecanizado de agujeros y formas ciegas, en las que el electrodo tiene la forma negativa de la que se desea mecanizar, y en segundo lugar, está la Electroerosión por Hilo que por su definición el electrodo es un hilo continuo, con movimiento en los tres ejes, que mecaniza agujeros pasantes y contornos de formas muy complejas.

En la actualidad, la electroerosión encuentra cabida en el sector aeronáutico y automotriz, entre algunas de sus aplicaciones en estos sectores se pueden citar la producción de piezas muy pequeñas y precisas, así como grandes piezas tales como matrices de estampado para automóviles y componentes para el fuselaje de aviones. Todos los materiales que se someten a mecanizado por

electroerosión deben ser eléctricamente conductores o semiconductores, sin zonas de corte no conductoras.

Finalmente, el presente trabajo de graduación trata sobre una propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración dirigida a realizar la muesca de las probetas de impacto tipo Charpy; es decir se va a desarrollar el diseño de dicha máquina, teniendo en cuenta todos los factores que intervienen en el proceso tales como, la velocidad del carnero, la corriente, el voltaje y GAP, con el fin de realizar el proceso de maquinado por electroerosión de dicha muesca. Cabe mencionar que la iniciativa de este proyecto nace a partir de la ausencia de equipo apropiado, dentro del Laboratorio de Ensayos Mecánicos del Área de Materiales, para realizar el maquinado preciso de la muesca de dichas probetas para ensayos Charpy.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una descripción general del proceso de mecanizado por electroerosión con el propósito de dar a conocer los diferentes fenómenos físicos que intervienen, luego se describirán los diferentes tipos de mecanizado por electroerosión que se disponen en la actualidad con la finalidad de seleccionar la técnica de electroerosión que mejor se adecue a la propuesta de diseño, también se revisaran los diferentes tipos de electrodos que existen actualmente para poder seleccionar con criterio uno que tenga una tasa de desgaste adecuada. Además, dado que en el mecanizado por electroerosión es necesario el uso de fluido dieléctrico, se describirán las características y los diferentes tipos que se pueden encontrar en el mercado. También, se presenta una revisión de los diferentes tipos de materiales que se pueden maquinar utilizando la técnica de electroerosión; sin embargo, la norma para ensayos de impacto Charpy estipula al acero SAE 1020 como material para las probetas, por lo tanto, debido a esto se ve afectada la selección de algunos parámetros. Finalmente, se recopilará información sobre los factores que repercuten en los procesos electroerosivos, así como también la calidad de la superficie maquinada por electroerosión.

1.1. GENERALIDADES

Existe una variedad de procesos para eliminar material por fusión, evaporación, o acción química y/o eléctrica; a menudo se les llama colectivamente procesos no convencionales o no tradicionales. Como grupo, se caracterizan por la insensibilidad a la dureza del material de la pieza de trabajo, de ahí que sean adecuados para formar piezas con base en materiales completamente tratados térmicamente, evitando así los problemas de distorsión y de cambio dimensional que con frecuencia acompañan al tratamiento térmico [1].

La electroerosión permite realizar trabajos que antes no se podían realizar de ningún modo o en circunstancias difíciles. La ventaja más sensible de este procedimiento de mecanizado con respecto al convencional radica en:

- No se toca la pieza de trabajo y por lo tanto no se producen las fuerzas de corte que se dan en los procesos de mecanizado por arranque de viruta ni deformaciones en las piezas de paredes delgadas. Tampoco necesita utillajes complejos para sujetar las piezas debido a las fuerzas de corte.
- Los materiales usados como electrodos se pueden mecanizar con facilidad.
- Los electrodos se mecanizan exteriormente en la mayor parte de las aplicaciones, ya que el ámbito más importante de la electroerosión está constituido por la mecanización de huecos [2].

1.1.1. DEFINICIÓN

El mecanizado por electroerosión es un proceso de arranque de material por una serie de sucesivas descargas eléctricas muy cortas, separadas entre sí un cierto tiempo, que saltan, en un medio dieléctrico, entre dos polos (pieza y electrodo o herramienta), por lo que ambos deben ser materiales conductores [3].

Este proceso también se conoce como mecanizado por descarga eléctrica (Electrical Discharge Machining, EDM).

La duración de la chispa es muy corta, pues suele variar desde 1 a 2 μ s, según los regímenes de mecanizado, y va acompañada de un gran aumento de temperatura, que suele alcanzar hasta decenas de miles de $^{\circ}$ C [4].

1.1.2. PRINCIPIOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN

El principio físico de la electroerosión es el siguiente [2]:

- El mecanizado por electroerosión se efectúa mediante el salto de chispas eléctricas entre dos electrodos sometidos a una determinada tensión eléctrica y sumergidos ambos en un líquido aislante (líquido dieléctrico).
- La tensión aplicada a los electrodos ha de crear un campo eléctrico mayor que la rigidez dieléctrica del líquido. Bajo la acción de este campo eléctrico, iones libres positivos (+) y electrones (-) se encontrarán acelerados creando un canal de descarga que se vuelve conductor (plasma), donde salta la chispa.
- Alrededor del canal de plasma se forma una bola de gas que empieza a crecer. Por otro lado, las altas temperaturas que se han dado en los dos polos, van fundiendo y eliminando parte del material de la pieza, mientras que el electrodo apenas se desgasta muy ligeramente.
- En esta situación (bola de gas grande y material fundido en ambos polos), se corta la corriente eléctrica. El canal de plasma se derrumba y la chispa desaparece. El líquido dieléctrico entonces rompe la bola de gas haciéndola implosionar (explotar hacia adentro). Ello hace salir el material fundido, formando cráteres en las superficies de la pieza.
- El material fundido se solidifica y es arrastrado en forma de bolas por el líquido dieléctrico, constituyendo lo que se puede llamar "viruta del proceso de electroerosión" (ver, Fig. 1.1).

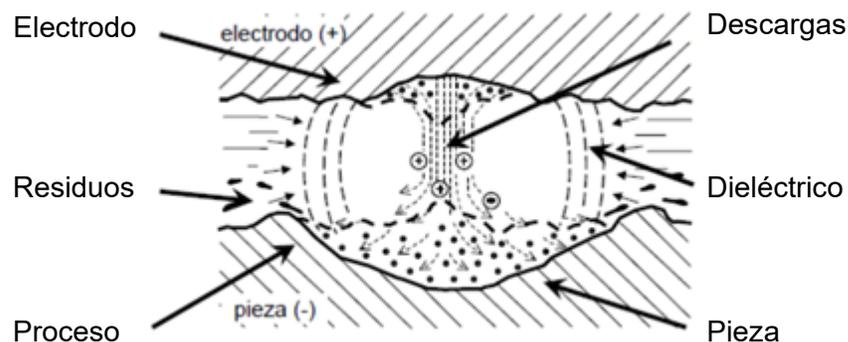


Fig. 1.1. Principio del proceso de electroerosión [5].

1.1.3. PROPIEDADES DEL MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN

Este procedimiento de mecanizado se distingue principalmente por dos de sus propiedades [4]:

- a) Dado que en este proceso el arranque de material no depende de las características mecánicas (dureza, etc.) del material a trabajar sino de sus características térmicas y eléctricas, se tiene que destacar su gran aptitud para mecanizar aceros, metales o aleaciones de alta dureza o refractarias, poco aptas para ser mecanizadas por procedimientos convencionales de arranque de viruta. Ello permite el mecanizado de los aceros templados y en general, de materiales de baja maquinabilidad siempre y cuando sean suficientemente conductores.
- b) Otra propiedad fundamental es su gran aptitud para realizar formas complejas, tanto pasantes como ciegas. Fabricando por medios convencionales, u otros, el electrodo que suele ser de cobre o grafito normalmente, se puede realizar la pieza, adaptándose en el mecanizado de ésta a la forma de aquél.

1.1.4. ANÁLISIS DE DESCARGA

La concentración e intensificación del campo eléctrico tiene como efecto la ionización del dieléctrico y la polarización de las partículas e iones (ver, Fig. 1.2). Los iones son, por definición, partículas polarizadas [4].

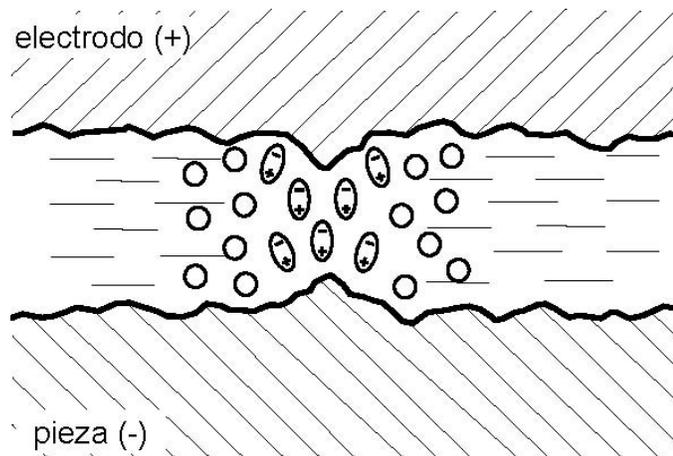


Fig. 1.2. Ionización del dieléctrico.

De esta forma se da lugar a la formación del canal de la descarga, que queda rodeado por los iones positivos que comprimen y aíslan del medio circundante, reduciendo así su sección (ver, Fig. 1.3).

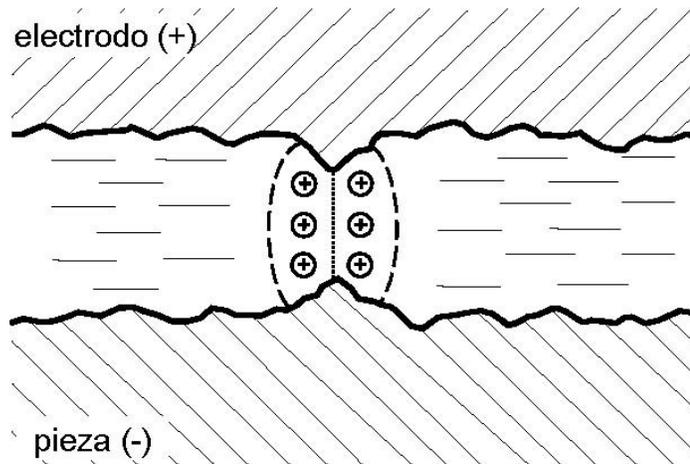


Fig. 1.3. Iniciación del canal de descarga.

La brusca caída de la resistencia del canal permite que la corriente alcance valores elevados y su paso masivo origine un aumento de la ionización que, a su vez, crea un potente campo magnético que comprime aún más el canal de la descarga produciendo su calentamiento (ver, Fig. 1.4).

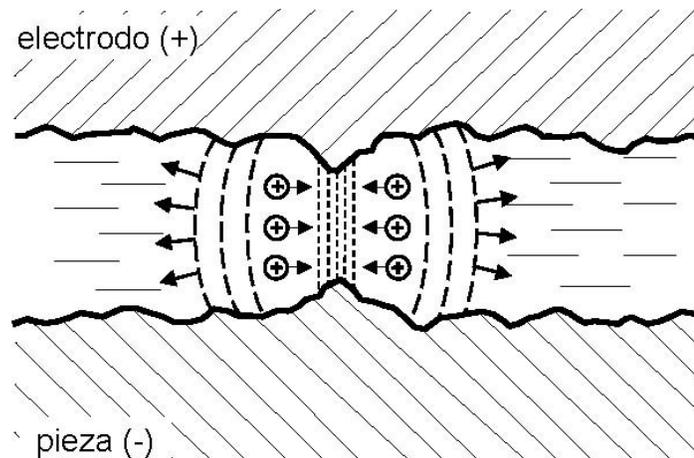


Fig. 1.4. Paso masivo de la corriente por el canal de descarga.

La velocidad de aumento de la corriente se cifra en unos 10 a 100 millones de amperios por segundo, alcanzando temperaturas del orden de hasta decenas de miles de grados Celsius en un tiempo de 2 a 4 μs (ver, Fig. 1.5).

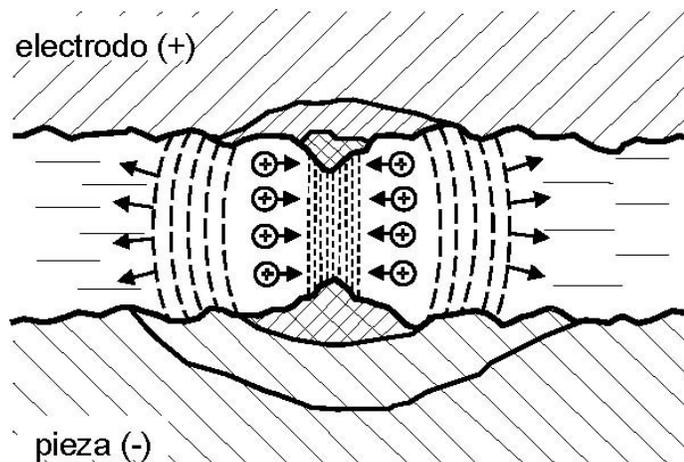


Fig. 1.5. Efecto del paso masivo de la corriente por el canal de descarga.

El resultado de tan intensa acción térmica es la fusión, e incluso evaporación, de un reducido volumen de material tanto en la pieza como también en el electrodo. Incluso se generan residuos como consecuencia de la ruptura del dieléctrico (ver, Fig. 1.6).

Mediante la utilización de cámaras fotográficas de alta velocidad se ha podido constatar la existencia de una burbuja de gas alrededor del canal, cuyo volumen es superior al de éste.

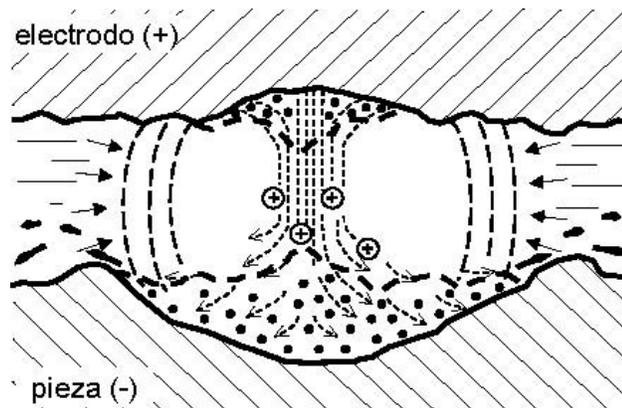


Fig. 1.6. Arranque de material producido por la descarga.

Paralelamente a la acción térmica de la descarga se tiene que considerar su efecto dinámico, que produce la eyección a gran velocidad del material fundido y que, junto al efecto térmico confiere a los cráteres su forma peculiar.

Esta forma de los cráteres es análoga a la obtenida por el choque de un proyectil lanzado a gran velocidad (ver, Fig. 1.7).

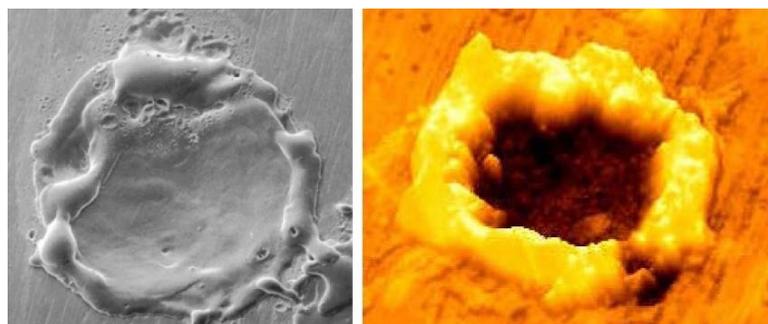


Fig. 1.7. Fotografías de cráteres.

Al final de la descarga, la presión del interior de la burbuja cae bruscamente, a consecuencia de lo cual se genera una depresión de manera que el dieléctrico arrastra los residuos existentes en el cráter recién formado, a la vez que enfría su superficie, impidiendo la conducción del calor hacia el interior del

metal. Al agotar por completo la energía de la descarga, el ciclo ha llegado a su fin.

El canal de conductividad eléctrica se cierra cuando se desioniza el dieléctrico y recobrar de nuevo su rigidez dieléctrica, pudiendo así comenzar ya el ciclo correspondiente a la siguiente descarga, que se dará entre los dos puntos de máxima aproximación entre electrodo y pieza (ver, Fig. 1.8).

El tiempo de pausa entre cada dos descargas es fundamental para el correcto desarrollo del proceso. Si este tiempo no existiera o fuese insuficiente, la chispa se colapsaría.

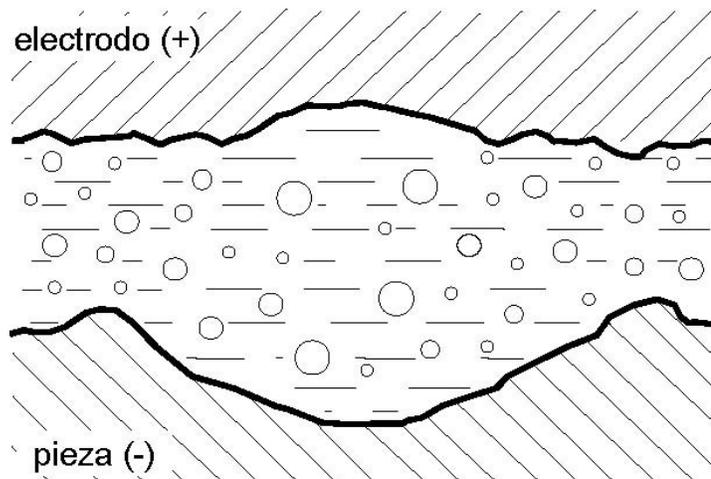


Fig. 1.8. Estado final del cráter.

La acumulación de residuos en la cavidad también puede llegar a producir este efecto. Resumiendo, se puede decir que durante el proceso de electroerosión se va efectuando en la pieza un proceso de copiado, a nivel microscópico, de la forma del electrodo, lo que dará lugar a la obtención de un negativo exacto de éste, salvando claro está la longitud de las chispas o distancia de chispeo, conocido como GAP, medida que habrá que tener en consideración durante la fabricación de los electrodos.

1.2. MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN

El mecanizado mediante electroerosión es un proceso por arranque de viruta para materiales conductores de la electricidad. La gran diferencia respecto a la mayoría de las operaciones de mecanizado es que el electrodo extrae material sin tener contacto físico con la pieza de trabajo.

1.2.1. TIPOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN

Distinguiendo según la forma del electrodo y según el movimiento relativo de éste con relación a la pieza, se pueden hacer varias subdivisiones dentro del concepto general de mecanizado por electroerosión:

- Electroerosión por hilo,
- Electroerosión por penetración, y
- Rectificado por electroerosión.

1.2.2. ELECTROEROSIÓN POR HILO

En la electroerosión por hilo se usa un hilo metálico para cortar un contorno programado en la pieza (ver, Fig. 1.9). La forma del electrodo no influye directamente en la forma de la pieza a obtener, ya que lo único que se pretende realizar un corte en la pieza y no obtener una copia con la forma del electrodo.

En el procedimiento de electroerosión por hilo se puede obtener tolerancias dimensionales de hasta ± 0.02 mm en piezas de pequeño espesor (hasta 50 mm) y rugosidades de hasta 20 VDI. Se pueden erosionar piezas prismáticas de perfil recto y cónico. Las piezas de perfil recto se obtienen cuando el desplazamiento se da únicamente en la pieza (plano X-Y) y por lo tanto el hilo se mantiene vertical.

Por otro lado, si se desplaza la guía superior (ejes U-V) se pueden obtener piezas con perfiles diferentes en sus extremos. A modo de ejemplo esta opción es muy interesante cuando en los troqueles se necesitan cavidades con salida cónica para facilitar la expulsión de las piezas recortadas [2].

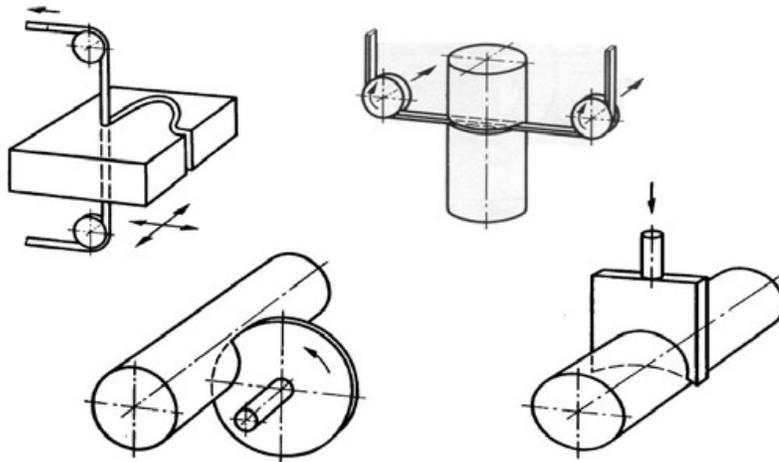


Fig. 1.9. Electroerosión por hilo [6].

En la electroerosión por hilo, un CNC controla el movimiento relativo entre el hilo y la pieza. El hilo es de diámetro pequeño, normalmente de 0.25 o 0.3 mm, aunque los diámetros se pueden reducir hasta valores de 0.025 mm en aplicaciones de micromecánica.

En este tipo de electroerosión, el líquido dieléctrico habitualmente utilizado es el agua desionizada, aunque también existen algunas máquinas que funcionan con aceite.

Las ventajas de la electroerosión por hilo se pueden resumir en: rapidez, ya que no es necesario mecanizar el electrodo, y la no influencia del desgaste del hilo sobre la precisión de las piezas, al estar el hilo animado de un movimiento de desplazamiento que permite que la zona ya desgastada vaya reponiéndose en modo continuo [6].

Entre las características principales de la electroerosión por hilo se puede citar:

- Se generan geometrías únicamente pasantes en la pieza, en función de la trayectoria recorrida por el hilo, se pueden realizar cortes rectos y cortes cónicos.
- El fluido dieléctrico es agua desionizada.
- Dado que el hilo es muy delgado, la energía utilizada es limitada y las tasas de extracción son bajas.
- Velocidad de corte en aceros: hasta 500 mm²/min.
- Capacidad de extracción de metal: ~350 cm³/h.
- Rugosidad mínima en aceros: menos que 0.3 μm (cortes de repaso) [7].

Conocidas las características principales de la electroerosión por hilo, a continuación, se describen las características que debe tener el hilo para realizar dicho proceso, así:

- El hilo metálico puede ser fabricado de latón o de zinc. En prácticas de protección al medio ambiente, después del uso y descarte del hilo empleado y sus residuos, el material del hilo ya sea en forma de hilo o éste pulverizado, es acumulado separadamente con el fin de ser reciclado [5].
- Existen varios diámetros en el mercado, incluyendo 0.25 mm (0.010 pulg) y 0.30 mm (0.012 pulg). Generalmente el hilo se vende en rollos y por peso, más que por su longitud [5].
- La tensión del hilo es importante para producir un corte efectivo, y por consiguiente una mejor parte; la sobretensión del hilo resulta en que este se rompa cuando no sea deseado. Además, la ruptura del hilo es común durante el proceso, y también es necesaria [5].

Luego de estudiar el proceso de electroerosión por hilo y las características del hilo, se listan las ventajas y desventajas de este proceso, estas son:

A) Las ventajas de este proceso son las siguientes [5]:

- No precisa el mecanizado previo del electrodo;
- Es un proceso de alta precisión;
- Complejas formas pueden ser logradas;

- Resultados constantes;
 - Dependiendo de la capacidad de la máquina, el trabajo con alambre puede incluir variaciones de ángulos controlados o geometría independiente (cuarto eje);
 - Se puede mecanizar materiales previamente templados y así evitar las deformaciones producidas en el caso de hacer este tratamiento térmico después de terminada la pieza;
 - Mecanizado fácil de orificios cuadrados;
 - Fácil mecanización de materiales duros;
 - Ausencia de esfuerzos por mecanizado;
 - No hay desviación de medidas; y
 - Reducción de tiempos de fabricación.
- B) La desventaja principal de este tipo de electroerosión sucede después del proceso, que suele quedar una capa superficial de metal fundido, frágil y de extremada dureza, que se debe eliminar en aquellas piezas que requieran resistencia a la fatiga [5].

1.2.3. ELECTROEROSIÓN POR PERFORACIÓN O RECTIFICADO POR ELECTROEROSIÓN

Un tercer tipo de electroerosión está diseñado para la perforación de orificios pequeños (de entre 0.015 y 0.65 cm) en diámetro, pero muy profundos, con una relación de profundidad a diámetro de 30 a 1, o superior. Para ello, se emplean electrodos rotatorios concéntricos de hasta 30 cm de largo que giran a unas 100 rpm y perforan la pieza de trabajo (ver, Fig. 1.10) [7].

Básicamente los electrodos realizan las mismas funciones que un taladro de columna, excepto que: a) la extracción del material se realiza mediante descargas eléctricas sin contacto directo entre electrodo y pieza, b) la dureza del material es irrelevante y c) la precisión del orificio terminado es muy superior a lo que cualquier taladro podría producir. Así, a medida que se generan las

descargas eléctricas, la rotación ayuda al lavado y provee un desgaste parejo del electrodo.

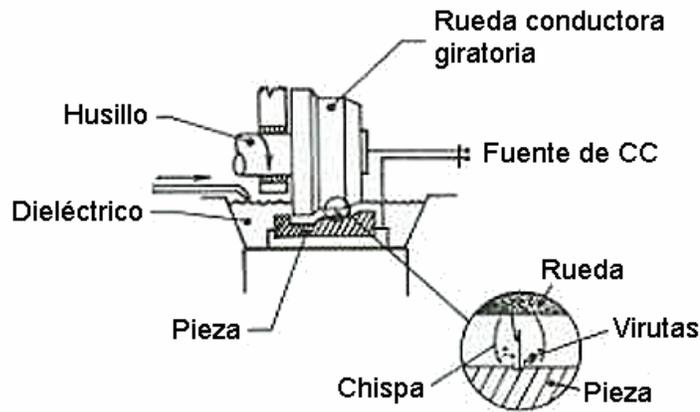


Fig. 1.10. Rectificado por electroerosión [7].

1.2.4. ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Durante el proceso de electroerosión, la pieza y el electrodo se sitúan muy próximos, dejando un hueco que oscila entre 0.01 y 0.05 mm, por el que circula un líquido dieléctrico (normalmente aceite de alta conductividad). Al aplicar una diferencia de tensión continua y pulsante entre ambos, se crea un campo eléctrico intenso que provoca el paulatino aumento de la temperatura, hasta que el dieléctrico se vaporiza (ver, Fig. 1.11).

Al desaparecer el aislamiento del dieléctrico salta la chispa, incrementando la temperatura hasta los 20,000 °C, eliminando una pequeña cantidad de metal de la pieza y el electrodo formando una burbuja que hace de puente entre ambas.

Cuando se anula el pulso de la fuente eléctrica, el puente se rompe separando las partículas del metal en forma gaseosa de la superficie original. Estos residuos se solidifican al contacto con el dieléctrico y son finalmente arrastrados por la corriente junto con las partículas del electrodo.

Dependiendo de la máquina y ajustes en el proceso, es posible que el ciclo completo se repita miles de veces por segundo. También, es posible cambiar la polaridad entre el electrodo y la pieza.

El resultado deseado del proceso es la erosión uniforme de la pieza, reproduciendo las formas del electrodo. En el proceso el electrodo se desgasta, por eso es necesario desplazar el electrodo hacia la pieza para mantener el hueco constante. En caso de que el desgaste sea severo, el electrodo es reemplazado. Si se quiere un acabado preciso (tolerancia de forma ± 0.05 mm es preciso la utilización de 2 electrodos) [5].

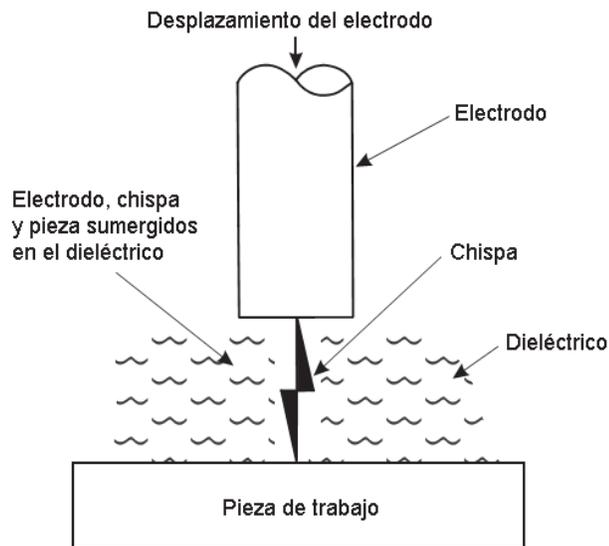


Fig. 1.11. Electroerosión por penetración [7].

La pieza terminada puede exhibir varias capas distintas. La capa superficial presenta pequeños glóbulos de metal extraído de la pieza, así como partículas del electrodo adheridas que se eliminan fácilmente. La segunda capa se denomina capa blanca o capa refundida, donde la electroerosión ha alterado la estructura de la pieza. La tercera capa es la zona afectada por el calor o capa recocida, la cual ha sido calentada pero no fundida. La distribución, extensión y profundidad de estas capas tienen una influencia muy importante en la calidad del acabado superficial y se ven afectadas por:

- Los ciclos de activación y desactivación del proceso;

- El ciclo de trabajo, que es la relación entre el ciclo de activación y el tiempo de ciclo total;
- La distancia de separación, “hueco o gap” entre la pieza de trabajo y el electrodo; y
- El electrodo, por lo general de grafito o cobre electrolítico, se fabrica con la imagen inversa o negativa de la pieza que se desea obtener, por lo cual genera cavidades en la pieza.

Entre las características principales de la electroerosión por penetración se puede citar:

- El fluido dieléctrico es aceite mineral, aunque algunas máquinas pueden usar agua u otros líquidos especiales;
- Se pueden obtener tanto formas pasantes como también en formas ciegas de geometrías complicadas;
- Capacidad de extracción en aceros, hasta 2000 mm³/min; y
- Rugosidad mínima en aceros, hasta menos de 0.4 μm Ra [7].

Conocidas las características principales de la electroerosión por penetración, a continuación, se describen las características que debe tener el electrodo para realizar dicho proceso, las cuales son:

- El electrodo es comúnmente hecho de grafito pues éste, por tener una elevada temperatura de vaporización, es más resistente al desgaste. Puede ser trabajado en una fresadora específica con el fin de crear ya sea un electrodo macho o un electrodo hembra, lo que significa que el electrodo tendrá la forma opuesta a la forma deseada y resultante en la pieza de trabajo [5].
- Según la forma del electrodo y según la profundidad que se dé a las formas erosionadas en la pieza, se podrán obtener tanto formas pasantes como también en formas ciegas de geometrías complicadas (ver, Fig. 1.12) [5].

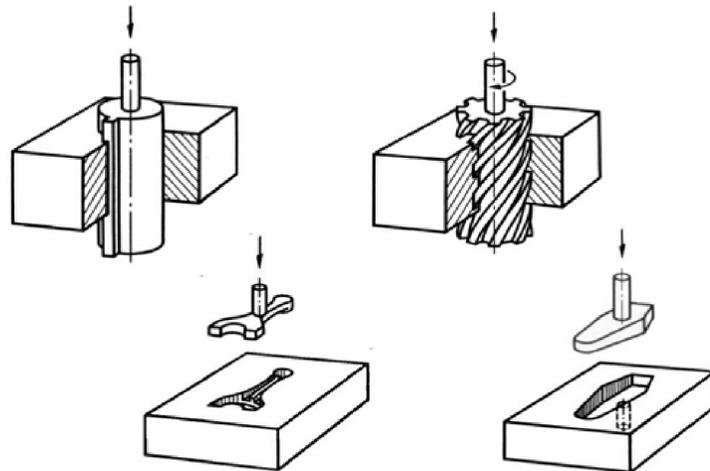


Fig. 1.12. Electroerosión por penetración utilizando un electrodo con imagen negativa a la pieza.

- Los electrodos pueden ser manufacturados en forma que múltiples formas pertenezcan al mismo pedazo de grafito.
- También el cobre es un material predilecto para la fabricación de electrodos precisos, por su característica conductividad, aunque por ser un metal suave su desgaste es más rápido. El electrodo de cobre es ideal para la elaboración de hoyos o agujeros redondos y profundos. Comúnmente estos electrodos se encuentran de diámetros con tamaños milimétricos en incrementos de medio milímetro y longitudes variadas. Este proceso en particular es muy utilizado para antes del proceso de electroerosión con hilo, para producir el agujero inicial donde pase el hilo a través de un grosor de material que es inconveniente al taladro convencional. Si se desea un buen acabado en el objeto a erosionar, sea cual sea el material en que se construya el electrodo este debe ser repasado a mano después ser mecanizado en la fresadora o torno debido a las marcas que las herramientas de corte utilizadas en estas máquinas producen pequeñas marcas en los electrodos.

Luego de estudiar el proceso de electroerosión por penetración y las características del electrodo, se listan las ventajas y desventajas de este proceso, estas son:

A) Las ventajas de este proceso son las siguientes [5]:

- Al no generar fuerzas de corte como en los procesos de mecanizado, el torneado y el taladrado, resulta aplicable para materiales frágiles.
- Se pueden producir agujeros muy inclinados en superficies curvas sin problemas de deslizamiento. Así como de elevada relación de aspecto (cociente entre la longitud y el diámetro), es decir, con pequeño diámetro y gran profundidad imposibles con un taladro convencional.
- Al ser un proceso esencialmente térmico, se puede trabajar cualquier material mientras este sea conductor.
- Las tolerancias que se pueden obtener son muy ajustadas, desde ± 0.025 hasta ± 0.127 mm.
- Es un proceso de fabricación único para lograr complejas configuraciones que son imposibles de otra forma.
- Ahorran en ocasiones la realización de un acabado rugoso en la pieza por medio de ataques de ácido, denominándose "Acabado de Electroerosión". No es un acabado quizás tan perfecto como el que se obtendría con el ataque de ácido, pero por costos y plazos resulta satisfactorio en la mayoría de las ocasiones.

B) Las desventajas de este proceso son las siguientes [5]:

- Después del proceso suele quedar una capa superficial de metal fundido, frágil y de extremada dureza, que se debe eliminar en aquellas piezas que requieran resistencia a la fatiga. Tiene más resistencia a la fatiga una pieza acabada por arranque de viruta (fresadora, torno y rectificadora) que una pieza acabada por penetración eléctrica (electroerosión).
- El grafito es un material frágil, por lo que la manipulación de los electrodos debe ser muy cuidadosa.
- La rugosidad que deja en la superficie puede ser muy elevada en función del tipo de aplicación y la reducción de ésta utilizando intensidades menores requiere mucho tiempo y en ocasiones se pueden producir efectos indeseados como formación de carbonillas o manchas.

- El acabado superficial rugoso no es perfecto resultando más rugoso sobre las caras planas que sobre las paredes verticales por efecto de las chispas esporádicas que se producen al evacuar los restos de material.

1.3. CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS Y SUS COMPONENTES

Entre la clasificación de las máquinas de electroerosión las más comunes son las máquinas de electroerosión por hilo y por penetración.

1.3.1. MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN POR HILO

A diferencia de las máquinas de electroerosión con electrodo de forma a las que la polaridad aplicada puede ser invertida, la polaridad en el proceso de electroerosión con hilo es constante, o sea que la "mesa" o marco donde las piezas son montadas para ser trabajadas es tierra; esto significa que es de polaridad negativa. El hilo, por consiguiente, es el componente mecánico al que la carga positiva es dirigida (ver, Fig. 1.13).

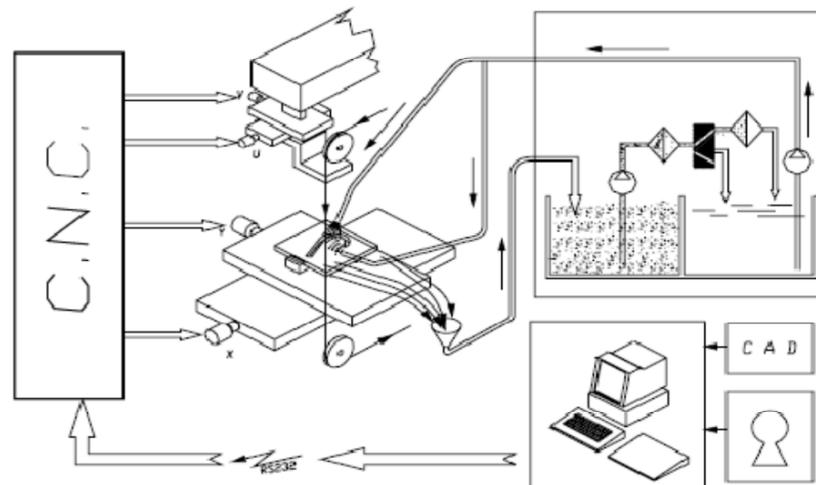


Fig. 1.13. Máquina de electroerosión por hilo.

La máquina de electroerosión por hilo dispone de 5 ejes con control numérico: X e Y en la mesa donde se fija la pieza y U, V y Z que se mueven desde la boquilla de arriba.

Las boquillas entre las que va fijo el hilo tienen la misión de proporcionar un chorro de agua a presión que se llevará el material erosionado para la limpieza del canal de erosión.

Se puede trabajar en aspersion: en la que el único dieléctrico es el agua del chorro de las boquillas o en inmersión en la que la pieza está sumergida en un baño de agua desionizada, aunque no se recomienda en la mayoría de los casos.

El agua con el material de erosión pasa al filtrado que se realiza por un filtro permanente de carbono activo que recoge todas las “virutas” de la erosión. De vez en cuando se limpia el filtro y las virutas se pasan a unos tanques en los que por decantación se van acumulando formando lodos.

El hilo, una vez realizada la electroerosión se lleva por un sistema de rodillos y guiado más o menos complejo hasta un troceador dónde se corta para su reciclado posterior (chatarra).

La eficiencia, exactitud y complejidad con que la pieza ha de ser trabajada es afectada por la calidad, condición y funcionalidad de la máquina a ser utilizada. El tamaño del recipiente, contenedor del líquido, puede ser un factor determinante a cuantas piezas y tamaño de las piezas que pueden ser preparadas para el proceso [5].

Partes fundamentales de una máquina de electroerosión por hilo (ver, Fig. 1.14):

- Armazón: constituye el esqueleto de la máquina. Aunque puede tener formas diversas, ha de estar concebido para servir de base de sujeción al cabezal por una parte y a la mesa de trabajo por otra.
- Cabezal: es un elemento esencial de la misma, ya que lleva consigo todo el sistema de movimiento de los ejes Z, U y V así como también los dispositivos para dirigir convenientemente el hilo.

- Mesa de trabajo: mesa de coordenadas que permite los movimientos en los ejes X e Y.
- Unidad de filtrado: en el tanque del dieléctrico se tiene una bomba que eleva el líquido hasta la zona de trabajo. El filtro limpia las partículas procedentes de la erosión.
- Generador: es el encargado de realizar las descargas para la erosión.
- Panel de control: aquí se encuentran los órganos para el gobierno de la máquina [2].



Fig. 1.14. Componentes de una máquina de electroerosión por hilo [2].

1.3.2. MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Las máquinas utilizadas en este tipo de proceso de electroerosión, siguen la siguiente estructura:

En la Fig. 1.15 se presenta la forma de trabajar con un total de 5 ejes, los cuales están repartidos entre la mesa de trabajo (dispone de movimiento en dos ejes X e Y) y el cabezal (que dispone de movimiento en tres ejes W, V y U) [5].

Partes fundamentales de una máquina de electroerosión por penetración (ver, Fig. 1.16):

- El armazón: Constituye el esqueleto de la máquina. Aunque puede tener formas diversas ha de estar concebido para servir de base de sujeción a todos los elementos y dispositivos necesarios para el proceso de electroerosión, tales como los dedicados al accionamiento del sistema portaelectrodos, en las de penetración, al sistema de movimiento y guiado del hilo, en las de hilo, y a la mesa de trabajo con el tanque de dieléctrico por otra.

Además, estos dispositivos deben estar dispuestos de forma que sean fáciles de maniobrar, tales como el cambio de electrodos o la puesta a punto de las piezas a mecanizar. En máquinas pequeñas, normalmente, en la construcción del armazón se adopta la forma de cuello de cisne.

- El cabezal: El cabezal de una máquina de electroerosión es un elemento esencial de la misma, ya que lleva consigo todo el complejo sistema de mecanizado automático.

Su parte principal es el servosistema de control que actúa sobre el portaelectrodos asegurando un desplazamiento vertical del electrodo, siempre sobre el mismo eje. La rigidez de estos elementos ha de ser muy cuidada.

El servosistema de control es el encargado de mantener el gap constante. En el proceso de electroerosión se van desgastando ambos electrodos, lo cual produce como consecuencia su separación en el momento en que el gap se hubiera agrandado. La velocidad de arranque de material y el desgaste dependen de la intensidad de la descarga y del tiempo de impulso.

Según sean las dimensiones del electrodo, ambos polos se tenderán a separar en un tiempo más o menos corto. Por ello el servosistema de control ha de tener gran velocidad de respuesta para acercar el electrodo a la pieza y un avance muy preciso.

- La mesa de trabajo: La mesa de trabajo es la unidad en la que se fija la pieza para su mecanización. Según sea el concepto constructivo de la máquina, el sistema de coordenadas que permite los desplazamientos relativos entre la pieza y el electrodo puede hacer que sea éste o bien la mesa el elemento

móvil. Las máquinas de electroerosión se pueden considerar como semipunteadoras, lo que indica que la precisión del recorrido del portaelectrodos es de algunos micrómetros en el total de su carrera y la precisión de desplazamiento relativo entre la mesa y el electrodo es del orden de 0.01 mm en carreras de unos 350 mm.

- La unidad de filtrado: debe tener una capacidad proporcional (2 o 3 veces la capacidad de la cuba de mecanizado).

Esta unidad es la encargada de extraer del líquido dieléctrico los residuos del material arrancado durante el proceso de electroerosión.

Además de los elementos necesarios para la función de filtración, esta unidad incluye los dispositivos necesarios para asegurar el envío del líquido hacia el tanque de trabajo y poder ejecutar los diferentes tipos de limpieza de la zona de trabajo.

- En el tanque del dieléctrico: se tiene una bomba que eleva el líquido hasta la zona de trabajo. El filtro limpia las partículas procedentes de la erosión.

Envolviendo a la mesa de trabajo se halla el tanque de trabajo, que se llena de líquido dieléctrico, y es donde se efectúa el mecanizado. El volumen de dicho tanque depende del tamaño de la pieza y de la potencia del generador.

- El servomecanismo: Es un motor utilizado para obtener una salida precisa y exacta en función del tiempo. Dicha salida está expresada habitualmente en términos de posición, velocidad y/o torque.

La principal ventaja de un servomotor, sobre los motores tradicionales de corriente continua o alterna, es la incorporación en los mismos, de un sistema de retroalimentación. Esta información puede ser utilizada para detectar un movimiento no deseado, o para garantizar la exactitud del movimiento ordenado. Un sistema de control de motor que responde a este diseño es conocido como sistema de "Lazo Cerrado" (ClosedLoop). La retroalimentación es generalmente provista por un codificador de algún tipo.

En el proceso de electroerosión es el encargado de mantener el GAP constante. Ha de ser rápido para acercar o alejar el electrodo a la pieza según

el tamaño de la chispa, además de controlar el avance. Ha de evitar que el electrodo y la pieza entren en contacto, produciéndose un cortocircuito.

- El generador: Éste genera la corriente con la que se mecaniza.

El generador es uno de los elementos fundamentales de la máquina de electroerosión. Con el paso del tiempo se han ido desarrollando diversos tipos. Principalmente se pueden distinguir dos grandes grupos:

- ✓ Generadores de relajación, y
- ✓ Generadores de impulsos transistorizados.

La tensión de mantenimiento de las descargas cebadas es característica de cada pareja de metales electrodo-pieza y es independiente de la corriente de la descarga.

Así pues, el generador que proporciona los impulsos o descargas erosivas tiene como fundamento el proporcionar la tensión necesaria para el cebado o encendido de la descarga, así como para su mantenimiento. Además, tiene que limitar la corriente de las descargas, así como imponer su duración en el tiempo y la frecuencia de sucesión de las descargas.

- El panel de control: concentra los órganos de gobierno de la máquina.

La evolución tecnológica de la electrónica ha permitido que desde comienzos de la década de los ochenta comenzase la incorporación de los controles numéricos a las máquinas de electroerosión.

De este modo, en el plazo de veinte años, prácticamente la totalidad de las máquinas de electroerosión ya vienen equipadas con unidades CNC, que permiten la realización de una muy variada gama de funciones, las cuales, en conjunción con la programabilidad de los regímenes de potencia de los generadores, el control del estado del proceso y los sistemas automáticos de intercambio de electrodos y piezas, han supuesto, desde entonces, un muy elevado grado de automatización y la posibilidad de trabajar en modo inatendido durante largos períodos de tiempo.

- El almacén de electrodos que permite un funcionamiento completamente autónomo de la máquina [4].

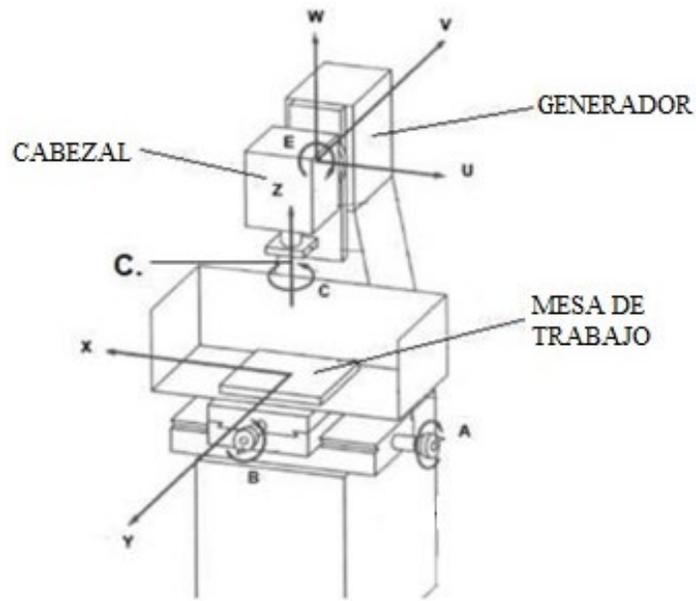


Fig. 1.15. Estructura de una máquina de electroerosión por penetración [4].

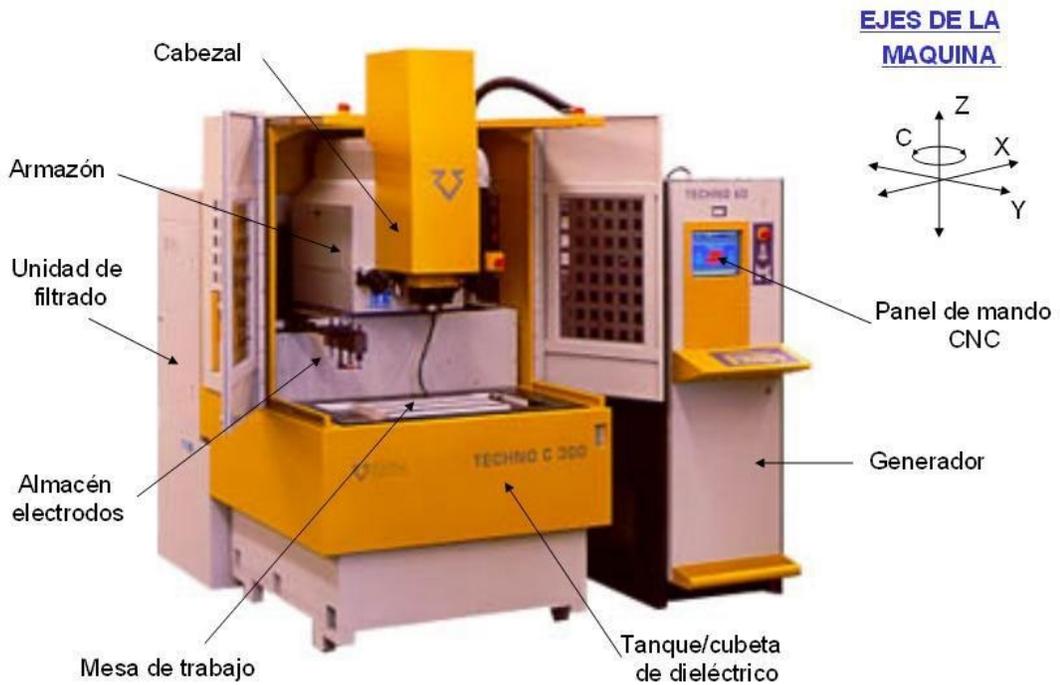


Fig. 1.16. Componentes de una máquina de electroerosión por penetración [8].

Una parte importante para el proceso de electroerosión por penetración es la correcta selección del electrodo, por lo cual, en los siguientes apartados se dan a

conocer los tipos de electrodo que incluye sus características y propiedades correspondientes; criterios de selección de material de electrodo, así:

A) Tipos de electrodo.-

Ningún material de electrodo único ofrece todas las características deseadas para cualquier aplicación particular. Los siguientes materiales están propuestos como una guía para la selección del material para el electrodo en la electroerosión por penetración [9]:

- a) Latón: Es un material fácilmente disponible. El grado que se utilizará normalmente se especifica como latón de libre mecanizado. Cuenta con una buena relación de desgaste en el mecanizado de piezas de acero, y una relación muy alta al desgaste en el mecanizado de carburo de tungsteno. El latón no se recomienda para su uso con fuentes de alimentación EDM RC (Resistencia y Capacitor).
- b) Cobre: Está fácilmente disponible y normalmente se especifica como cobre electrolítico, o de aleación de cobre - telurio. El cobre de grado electrolítico se puede considerar como cobre puro. El cobre es difícil de moler, pero tiene buenas características de no desgaste – mecanizado, a menudo se utiliza para las fuentes de alimentación RC.
- c) Cobre – tungsteno: Es un material sinterizado hecho de cobre y tungsteno con una relación común de 70 % de W y 30 % de Cu, tiene muy buenas características de desgaste. Difícil de maquinar.
- d) Grafito: Está disponible en diferentes densidades, la densidad depende del grano o tamaño de partícula (se especifica en μm) del polvo utilizado para producir el producto. El grafito tiene muy buenas cualidades de desgaste y es muy maquinable.

El grafito no se derrite, sino que se sublima, es decir, que pasa de un sólido directamente en un gas, sin fundir y sin pasar por el estado líquido. La temperatura de sublimación del grafito es aproximadamente igual a la temperatura de fusión de tungsteno. El grafito no es recomendable para el mecanizado de carburo de tungsteno.

- e) Grafito de cobre: Es el grafito de grano fino que se infiltra con cobre. Tiene las cualidades de grafito, además de la conductividad eléctrica del cobre.
- f) Zinc: Las aleaciones de zinc se pueden usar como un material de electrodo, pero las características de desgaste son muy pobres.

En la Tabla 1.1 se presenta los valores de desgaste aproximado de los bordes del electrodo que se espera tener cuando se utilizan ciertas polaridades de los electrodos en diferentes combinaciones de materiales para el electrodo y la pieza de trabajo. El desgaste de los electrodos que se presenta se basa en un espesor de la pieza de 25.4 mm (1 pulg).

Tabla 1.1. Desgaste aproximado del electrodo.

Electrodo	Pieza de trabajo	Polaridad	Desgaste	
			mm	pulg
Latón	Acero	Negativa	38.10	1.50
Latón	Carburo de Tungsteno	Negativa	101.60	4.00
Cobre	Acero	Positiva	2.54	0.10
Cobre	Acero	Negativa	25.40	1.00
Cobre	Carburo de Tungsteno	Negativa	15.24	0.60
Cobre Tungsteno	Acero	Positiva	10.16	0.40
Cobre Tungsteno	Carburo de Tungsteno	Negativa	17.78	0.70
Grafito	Acero	Positiva	0.254	0.01
Grafito	Acero	Negativa	10.16	0.40

El electrodo debe pasar a través de la pieza de trabajo de tal forma que el desgaste de la esquina presente la forma original sin desgaste. La longitud del electrodo debe tener en cuenta el espesor de la pieza, así como el espesor para fijar el electrodo a un dispositivo de sujeción. En muchos casos, esto requiere el uso de considerablemente más material de electrodo que es necesario para la operación de mecanizado.

B) Criterios para la selección de material de electrodo.

En el instante de seleccionar el material de electrodo más adecuado para una cierta aplicación se deben considerar una serie de aspectos que convertirán a un cierto material en la opción más adecuada. Se pueden resumir en 5 los

puntos claves o criterios que se deben considerar en la elección, aunque éstos son probablemente los aspectos más fácilmente cuantificables [6].

En este apartado se analizarán únicamente los que se pueden considerar como criterios objetivos y que se pueden resumir en 5 puntos [6]:

- Capacidad de arranque: La maximización de la capacidad de arranque se consigue mediante la adecuada combinación de los parámetros eléctricos de la máquina, del dieléctrico y del modo de limpieza y, por supuesto del material de electrodo. A partir de este último aspecto, se consigue la máxima capacidad de arranque pasa por concentrar al máximo la energía de la descarga sobre la pieza. Dicho de otro modo, se deben reducir cuanto sea posible las pérdidas de energía a través del electrodo. Así, la conductividad térmica y la temperatura de fusión del material de electrodo se convierten en aspectos de máxima importancia. Una conductividad térmica baja resulta beneficiosa, puesto que reduce la energía conducida a través del electrodo, concentrando dicha energía en la zona de descarga y maximizando el arranque. Para poder soportar el aumento de temperatura debido a dicha concentración sin deterioro, el punto de fusión del material de electrodo debe ser elevado.
- Resistencia al desgaste: El desgaste se debe analizar también a partir de la combinación de parámetros de erosión y material de electrodo. Se han hecho ya comentarios sobre la influencia de los parámetros de erosión sobre el desgaste, por lo que se tratará a continuación el papel del material de electrodo en este fenómeno. Evidentemente, la temperatura de fusión es una propiedad fundamental. Cuanto más baja sea ésta, para una cierta concentración de energía en la zona de erosión mayor será la pérdida de material de electrodo. Pero no es el único factor. La naturaleza del material de electrodo, y más concretamente su densidad, también está directamente relacionada con los mecanismos de desgaste. Por ejemplo, en condiciones de acabado un grafito de grano medio tiende a perder dichos granos lo que resulta en un mayor desgaste y en inestabilidad del proceso, especialmente

si debido al tamaño de esos granos no es posible limpiar adecuadamente el canal de descarga.

- Acabado superficial final del componente erosionado: El acabado superficial final de la pieza erosionada es otro de los aspectos a tener en consideración. La cavidad erosionada resulta ser una copia exacta del electrodo que se ha utilizado para su erosión, tanto en geometría como también en rugosidad. Esto quiere decir que el electrodo imprime su rugosidad en la pieza y que, por lo tanto, la mínima rugosidad que se pueda obtener en el material de electrodo determinará la mínima rugosidad de la pieza. Además, como ya se ha citado, se debe tener en consideración que las operaciones de acabado se caracterizan por elevados desgastes de electrodo, pero este desgaste no está asociado a las altas temperaturas alcanzadas durante la operación puesto que los parámetros de acabado son poco energéticos, por lo que en esta situación más que a la temperatura de fusión del material de electrodo se debería atender a su densidad.
- Maquinabilidad: La maquinabilidad del material de electrodo es otro de los aspectos de más interés. Tan importante es la facilidad de obtener tolerancias ajustadas en un cierto material como la ausencia de problemas operativos durante la operación de mecanizado.
En el caso del grafito la capacidad de generar corte sin rebaba, que luego se deba eliminar en costosas operaciones de acabado, es un punto a favor. Sin embargo, también en el caso del grafito el material arrancado en forma de polvo, que resulta muy abrasivo, se puede depositar en elementos sensibles del centro de mecanizado, especialmente las guías, y resultar en un deterioro de su funcionamiento y reducción de su vida útil.
- Costo final del electrodo: Aunque en ocasiones el usuario se tiende a fijar en el costo del material en bruto, la variable a considerar debería ser el costo total del electrodo incluyendo los costos de mecanizado. En este costo total el peso del costo del material de partida suele ser algo secundario, especialmente en electrodos de pequeño tamaño. Es cierto que muchos

usuarios de electrodo metálico de cobre se ven sorprendidos por los precios de las mejores calidades de grafito, que pueden ser hasta 5 veces más caras que el cobre. Sin embargo, es justo reconocer que las calidades más caras se reservan solo para ciertas aplicaciones, mientras que las calidades más corrientes presentan precios más cercanos a los del cobre.

1.3.3. FLUIDO DIELECTRICO

El fluido dieléctrico juega un papel fundamental en cualquier operación de electroerosión. Los fabricantes y los usuarios de estas máquinas reconocen la importancia de utilizar un dieléctrico de buenas características, que sea suministrado de forma conveniente a la zona de corte, y que sea adecuadamente filtrado [6].

De manera general, las características que se buscan en un buen fluido dieléctrico son las siguientes [6]:

- Buen aislamiento eléctrico,
- Reducción al mínimo de la superficie de descarga,
- Refrigeración de electrodo y pieza,
- Buena acción de lavado de los residuos de la erosión,
- Buena capacidad de filtración,
- Alta velocidad de ionización y desionización, y
- Tener una viscosidad adecuada.

Además de estas características, que se pueden considerar fundamentales, al fluido se le exigen también otros aspectos, tales como ser inodoro e incoloro, no poseer hidrocarburos aromáticos y tener baja tendencia a la evaporación, para evitar provocar demasiados humos.

La función primera de un fluido dieléctrico es procurar aislamiento entre electrodo y pieza de manera que salte la chispa cuando la distancia entre ambos sea mínima. Un gap mínimo permite aumentar el rendimiento de la erosión provocada por la energía de la descarga, así como mejorar la precisión

dimensional de la pieza erosionada. El valor óptimo del gap, a igualdad de tensión de descarga, depende de la resistencia eléctrica del fluido, la cual varía en función de la presencia de burbujas de gas y de la contaminación producida por los residuos sólidos de la erosión. En otras palabras, la aparición de canales de descarga no controlados depende, hasta cierto punto, de la eficacia del filtrado.

El gap que se establece en el proceso de erosión representa un compromiso entre dos factores diferentes: por un lado, una capacidad aislante elevada permite trabajar con gap más estrecho, con lo que se consiguen altos niveles de precisión en el corte; por el contrario, una distancia demasiado reducida entre los dos electrodos provoca un aumento en el desgaste del electrodo y una reducción en la capacidad de arranque. Por lo tanto, la resistividad eléctrica es un factor crítico en la actuación de estos fluidos.

Otra de las funciones del fluido dieléctrico es mantener el canal de descarga tan reducido como sea posible con objeto de concentrar la energía y la temperatura en una zona localizada, lo que permite obtener el mejor rendimiento de erosión por cada descarga. A medida que el canal de descarga se vuelve conductor por efecto de la ionización, la viscosidad del fluido tiende a reducir la difusión del vapor y del gas.

Cuanto mayor sea la viscosidad, mayor será la concentración de la energía y la profundidad de los cráteres, que se encuentran concentrados en una zona relativamente localizada. Por lo tanto, la viscosidad del fluido es la característica fisicoquímica que gobierna el diámetro del canal de ionización para que un mismo amperaje.

El fluido dieléctrico lleva también a cabo una función de refrigeración de la pieza y del electrodo para evitar fenómenos de sobrecalentamiento. En el curso de la descarga toda la energía se convierte en calor, que será el responsable de la fusión y/o evaporación del material de la pieza. Una cantidad inapropiada de fluido dieléctrico en la zona de erosión puede ser causa de sobrecalentamiento de la pieza (lo cual puede comprometer su precisión) y de producción de gas y vapor en cantidades altas. En aquellos casos en los que la producción de calor

durante el proceso sea excesiva se recomienda disponer un enfriador en el sistema de recirculación del dieléctrico.

La capacidad de filtración es otro de los aspectos críticos en el instante de su selección. Como ya se ha citado, una de las funciones primarias del fluido es eliminar de la zona del gap los residuos sólidos que se generan como consecuencia del proceso. Sin embargo, esta afirmación entraña una matización de gran importancia. Los residuos para eliminar deben ser aquellas partículas cuyo tamaño sea superior a 5 μm . Las partículas más finas (entre 1 y 3 μm) juegan un papel fundamental en el instante de aumentar la conductividad residual del dieléctrico, para facilitar la ionización y la formación del canal de descarga.

La presencia de residuos metálicos y carbonos de gran tamaño, debidos a un filtrado inadecuado puede ser causa de un proceso de oxidación rápida del fluido, que traiga como consecuencia una degradación de sus propiedades. La capacidad de filtración de un fluido para EDM viene determinada por un elevado número de factores, entre los cuales cabe citar su viscosidad y su susceptibilidad a la degradación térmica y a la oxidación.

Como consecuencia, aparecen resinas que pueden quedar depositadas tanto en la zona de corte como también a lo largo del circuito de recirculación del dieléctrico.

La capacidad de ionización y deionización rápida permite reducir los intervalos entre descargas. Ya se han citado las ventajas que esto implica, desde un aumento de la eficiencia del proceso hasta una mejora del acabado superficial de la pieza erosionada. La formación del canal de descarga durante la emisión de iones depende de la resistividad del fluido dieléctrico, que en el caso de los aceites se encuentra aproximadamente 1015 $\Omega\cdot\text{cm}$. Como ya se ha citado la resistividad del fluido se ve fuertemente influida por el grado de contaminación. De este modo, tanto la eficiencia del sistema de filtrado como la propia capacidad de filtración del fluido influyen en su capacidad de ionización.

Los fluidos dieléctricos más utilizados en el proceso de electroerosión son a base de aceites vegetales y derivados del petróleo. Los aceites vegetales en

estado natural son de: maíz, algodón, canola, mamona y girasol. Los fluidos derivados del petróleo son de: kerosene y aceite mineral.

Entre el amplio espectro de compuestos de hidrocarburos existentes, solamente un número limitado de los mismos posee las características adecuadas para ser utilizado en operaciones de erosión, teniendo en cuenta que aquellos con un punto de inflamación inferior a 70 °C no son indicados por motivos de seguridad debido a su tendencia a generar vapores fácilmente inflamables; y que los que tienen una viscosidad superior a 8 cSt a 20 °C son demasiado viscosos como para permitir un desplazamiento suficiente en la zona del gap, especialmente cuando se han de erosionar cavidades profundas. De hecho, de entre los fluidos utilizados, los más viscosos presentan valores límite de 5.5 cSt a 20 °C.

Algunas recomendaciones en el instante de seleccionar el aceite dieléctrico más adecuado para una cierta aplicación son:

- Aceites entre 1.75 y 1.85 cSt a 20 °C. Esta clase de fluidos proporciona los mejores resultados en la erosión de geometrías simples con altos requisitos de rugosidad. Un ejemplo puede ser la fabricación de moldes para inyección de piezas de plástico con tolerancias y acabados muy ajustados.
- Aceites entre 2.1 y 2.4 cSt a 20 °C. Cuando se pretende erosionar geometrías algo más complejas manteniendo la precisión y una buena rugosidad, los aceites en este intervalo de viscosidad constituyen una buena opción.
- Aceites entre 2.65 y 3 cSt a 20 °C. Los aceites de esta gama están relacionados con operaciones de más arranque caracterizadas por intensidades de corriente media-alta, después de las cuales se requiere una buena rugosidad, como es el caso de ciertos moldes para termoplásticos.
- Aceites entre 3.3 y 3. cSt a 20 °C. Este tipo de aceites proporcionan los mejores resultados en operaciones de desbaste, con intensidades superiores a 70 A. Un ejemplo de uso podría ser la erosión de cavidades en útiles para forja.

1.3.4. MATERIALES MAQUINABLES POR ELECTROEROSIÓN

De manera general, se puede decir que cualquier material con una resistividad eléctrica por debajo de $100 \Omega \cdot \text{cm}$ es susceptible de ser mecanizado por electroerosión. Se trata de un umbral de resistividad lo suficientemente alto como para que todos los materiales metálicos y algunos no metálicos puedan ser procesados por esta técnica. Sin embargo y como ya se ha citado, la utilización económica del proceso sólo está justificada cuando la maquinabilidad del material sea baja. Es por ello que el uso de esta tecnología se centra fundamentalmente en los siguientes grupos de materiales [6]:

a) Aceros de herramientas:

- UNE F-5211/SAE D2/ISO 160CrMoV12 (denominación comercial Sverker 21, de Uddeholm) (ver, Fig. 1.17): Se trata de un acero de herramientas para trabajo en frío, con alto contenido de carbono y cromo, aleado con molibdeno y vanadio, caracterizado por una alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la compresión, alta dureza superficial después del temple, buenas propiedades de temple profundo, excelente estabilidad en el temple y buena resistencia al revenido. Este acero se recomienda para fabricar herramientas que deban tener una resistencia muy alta al desgaste, combinada con una tenacidad moderada. Además, se utiliza para cortar materiales gruesos y duros, y en herramientas para dar forma expuestas a esfuerzos de flexión y cargas de impacto. Sus aplicaciones más comunes son cizallas, herramientas de embutición profunda, herramientas de corte de alto rendimiento, herramientas para extrusión, moldes de plástico, instrumentos de medida, etc.
- UNE F-5318/AISI H13/ISO 40CrMoV5 (denominación comercial Orvar Supreme, de Uddeholm): Se trata de un acero de alta tenacidad y resistencia en caliente, buena conductividad térmica y es insensible a la formación de grietas por calor. Este acero puede ser nitrurado y también es apto para temple al vacío. Presenta un 0.39% de carbono y 5.1% de cromo, aleado con molibdeno y vanadio. Entre sus aplicaciones más

comunes se encuentran casquillos de fundición inyectada, cuchillas para cortar en caliente, fabricación de cuerpos huecos y cámara hueca, herramientas de extrusión en caliente, herramientas para fundición inyectada, insertos de estampa, etc.

- UNE F-528 bonificado/ISO 55NiCrMoV7: Es un acero clásico de trabajo en caliente, con 0.56% de carbono, con contenido en cromo y níquel y aleado con molibdeno y vanadio. Sus aplicaciones más comunes incluyen estampas y matrices de forja de todo tipo, matrices de conformado, punzones de extrusión, portamatrices, anillos y placas de sujeción, cuchillas de corte en caliente y moldes para la inyección de plástico.



Fig. 1.17. Maquinado de un acero Sverker 21 mediante electroerosión.

b) Superaleaciones:

Las aleaciones de níquel, cromo y otros compuestos duros se utilizan de manera amplia en la industria aeronáutica debido a su alta resistencia a tracción y su dureza a alta temperatura. Probablemente entre estas aleaciones una de las más populares sea el Inconel 718 (ver, Fig. 1.18) que se presenta

con diferentes tratamientos térmicos. Este tipo de materiales se utiliza principalmente en la producción de componentes para aviación que deben trabajar a temperaturas por encima de 500 °C, por ejemplo, álabes y hélices de compresores, discos, ejes, carcasas y anillos, etc.

Sin embargo la combinación de propiedades tales como una baja conductividad térmica, alta resistencia a la deformación plástica, tendencia al endurecimiento mecánico y una alta afinidad química con los materiales de herramienta provocan que el mecanizado de Inconel 718 sea extremadamente difícil, ya que las propiedades anteriormente citadas resultan en temperaturas de corte elevadas, tensiones en las piezas y una delgada capa adherida en el interfaz herramienta-pieza durante el proceso de mecanizado. En definitiva, las aleaciones base níquel poseen una baja conductividad térmica y una gran tendencia a la abrasión y a soldarse principalmente sobre la cara de desprendimiento de la herramienta de corte.

A esto se tiene que añadir que estas aleaciones tienden a un importante endurecimiento mecánico durante la deformación plástica del corte debido a su matriz austenítica. Estas dificultades obligan al usuario a utilizar parámetros de corte excesivamente conservadores, con los elevados tiempos de mecanizado y costos asociados que esto implica.

Por todo lo anterior, la electroerosión resulta una alternativa de interés para la industria aeronáutica. Probablemente, los mayores énfasis se encuentran en los estrictos controles de integridad superficial que deben superar los componentes aeronáuticos con objeto de asegurar su resistencia a la fatiga termo-mecánica. Se debe tener en cuenta que la naturaleza térmica de la electroerosión puede afectar a dicha integridad. Sin embargo, tanto fabricantes de máquinas como también usuarios de la tecnología se están esforzando por desarrollar tecnologías tanto de hilo como también de penetración que minimicen dichos daños.

Las capacidades de arranque dependen de la composición química de la aleación concreta de que se trate. En el caso del Inconel, debido a su elevado

contenido en hierro las velocidades son cercanas a las de un acero común tanto en hilo como también en penetración.



Fig. 1.18. Aleación Inconel 718 mecanizada mediante electroerosión por hilo.

c) Materiales extra-duros:

En este grupo se engloban materiales avanzados de extrema dureza como pueden ser ciertas cerámicas y materiales compactos como el diamante policristalino (PCD). En general, la conductividad eléctrica de estos materiales es bastante reducida en comparación con la de los materiales metálicos y es por ello que en muchos casos no pueden ser mecanizados por electroerosión. Este es el caso de una cerámica como el óxido de aluminio (alúmina), muy utilizada. Sin embargo, en otros casos la resistividad eléctrica está por debajo del umbral de los $100 \Omega \cdot \text{cm}$ antes mencionado. Es el caso del carburo de silicio (SiC) y del carburo de boro (B_4C) entre otros. Se debe tener en cuenta que bien por su extrema dureza y fragilidad, o bien por su carácter altamente abrasivo, estos materiales no pueden ser mecanizados por métodos convencionales por lo que se debe recurrir a técnicas no convencionales. En este contexto la electroerosión se convierte en una alternativa viable frente a otras técnicas de mecanizado.

1.4. APLICACIONES DEL MAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN

La electroerosión se utiliza para producir piezas muy pequeñas y precisas, así como grandes piezas tales como matrices de estampado para automóviles y componentes para el fuselaje de aviones. Todos los materiales que se someten a mecanizado por electroerosión deben ser eléctricamente conductores o semiconductores, sin zonas de corte no conductoras. Estos materiales incluyen aceros endurecidos y con tratamiento térmico, carburo, diamante policristalino, titanio, aceros laminados en caliente y en frío, cobre, bronce y aleaciones de altas temperaturas [10].

Existen múltiples aplicaciones del mecanizado por electroerosión a nivel industrial, por ejemplo, se puede citar el agujereado de las boquillas de los inyectores en la industria automotriz, así como en la fabricación de moldes y matrices para procesos de deformación plástica. Un campo de aplicación en el que el maquinado por electroerosión ha tenido mucho auge es el del sector aeronáutico, ya que este mecanizado sirve para desarrollar piezas que conforman al motor, obteniendo un excelente acabado y dimensiones muy precisas [10].

1.4.1. APLICACIONES DE ELECTROEROSIÓN POR HILO

Las aplicaciones de este proceso son amplias, debido a su flexibilidad. Las más usuales son (ver, Fig. 1.19) [5]:

- Moldes de plástico de precisión y alto volumen (mecheros, nebulizadores, móviles);
- Estampas de forja;
- Matrices de sinterización;
- Aplicaciones especiales: Aplicaciones de producción (aviación y nuclear);
- Punzones y matrices de corte;
- Matrices metálicas para pulvimetalurgia;

- Matrices de extrusión y de embutición;
- Prototipos, pequeñas series, piezas de recambio
- Plantillas;
- Calibres;
- Levas de disco;
- Herramientas de troquelado de corte fino y normal;
- Electrodo para electroerosión convencional; y
- Componentes electrónicos.

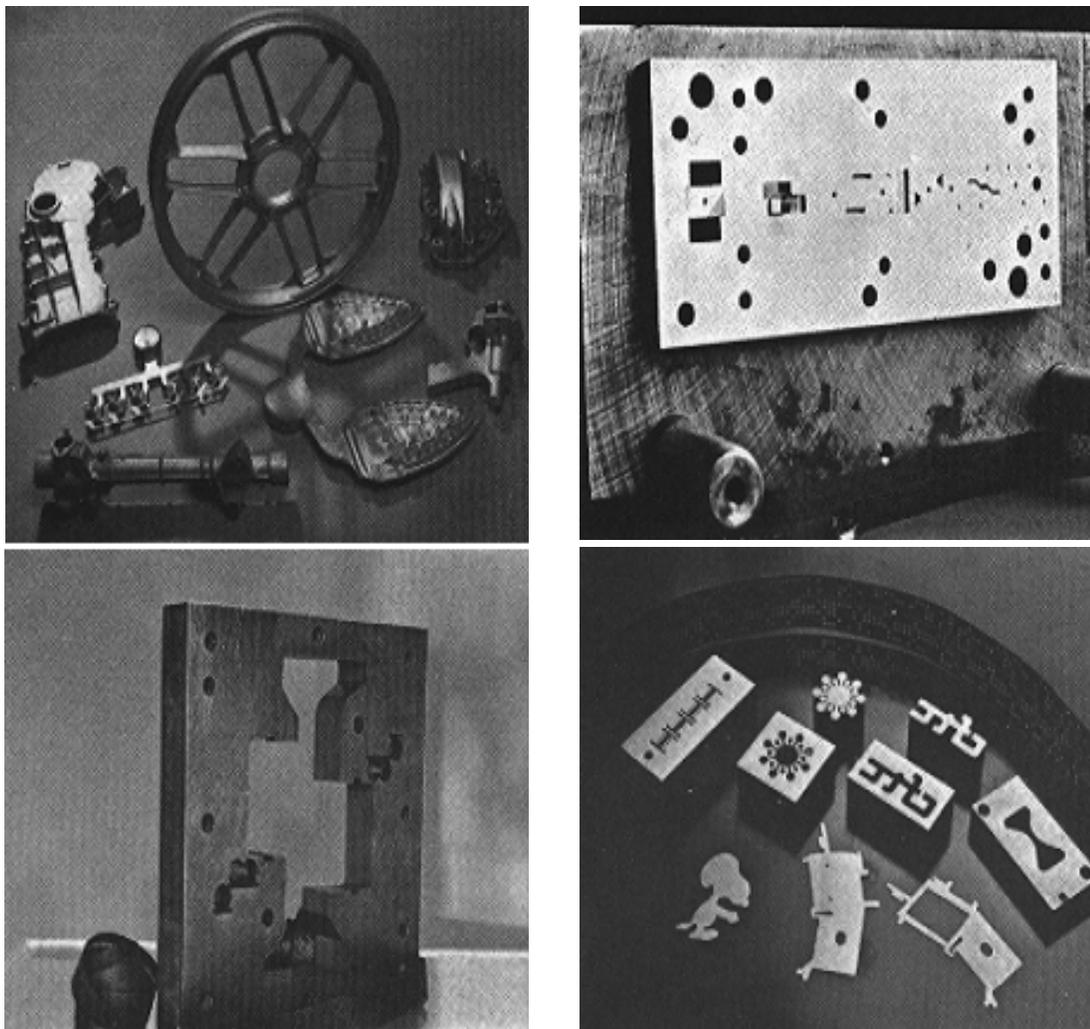


Fig. 1.19. Ejemplo de piezas fabricadas mediante electroerosión por hilo [5].

1.4.2. APLICACIONES DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Su posibilidad de aplicación a la industria es muy extensa, están presente en campos industriales como: automotriz, fabricación de moldes, fabricación de herramientas, etc.

La técnica de la electroerosión por penetración se utiliza en las siguientes aplicaciones [5]:

- Boquillas para inyección (Automotriz),
- Fabricación de moldes y matrices para la inyección de plástico,
- Fabricación de microestructuras para aplicaciones médicas,
- Moldes para termoformado,
- Moldes para forjado, y
- fabricación de moldes y troqueles de embutición.

Actualmente, el campo de aplicación de la electroerosión por perforación es muy reducido y su uso más común reside en perforar orificios para comenzar la electroerosión por hilo en materiales ya endurecidos, así como orificios muy pequeños y precisos para industrias como la de los equipos médicos y aeroespaciales.

1.4.3. FACTORES QUE REPERCUTEN EN LA ELECTROEROSIÓN

Los factores que repercuten en los procedimientos electroerosivos están relacionados con la preforma, con el electrodo, con el líquido dieléctrico y con las condiciones de trabajo de la máquina [9].

La naturaleza y la composición de los materiales de la preforma, del electrodo y del líquido dieléctrico repercuten decisivamente en las condiciones para lograr la electroerosión, aunque los factores metalúrgicos del procedimiento electroerosivo son menos determinantes que en el mecanizado electroquímico.

Las condiciones de funcionamiento de la máquina de electroerosión constituyen los factores operacionales y se consideran los siguientes [9]:

- a) Potencia de la máquina. El voltaje aplicado y la intensidad de la corriente que circula por los electrodos, definen la energía de la máquina que incide en las chispas a producir, que son las causantes de la electroerosión.
- b) La distancia entre el electrodo y la preforma, o gap, también influye considerablemente en las chispas.
- c) El flujo del líquido dieléctrico, debido a la presión de entrada y de salida, contribuye a la eliminación de los residuos metálicos procedentes del mecanizado de la preforma y a la eliminación de calor.

Estos factores citados definen la capacidad de arranque del material y el desgaste del electrodo en el proceso electroerosivo.

1.4.4. SUPERFICIE ELECTROEROSIONADA

La superficie de las piezas electroerosionadas queda con un aspecto ligeramente mate, aspecto parecido al que ofrecen las piezas chorreadas (ver, Fig. 1.20). Esta característica es debida al singular procedimiento que utiliza la electroerosión para eliminar el metal en la pieza a mecanizar donde quedan diminutos cráteres [11].

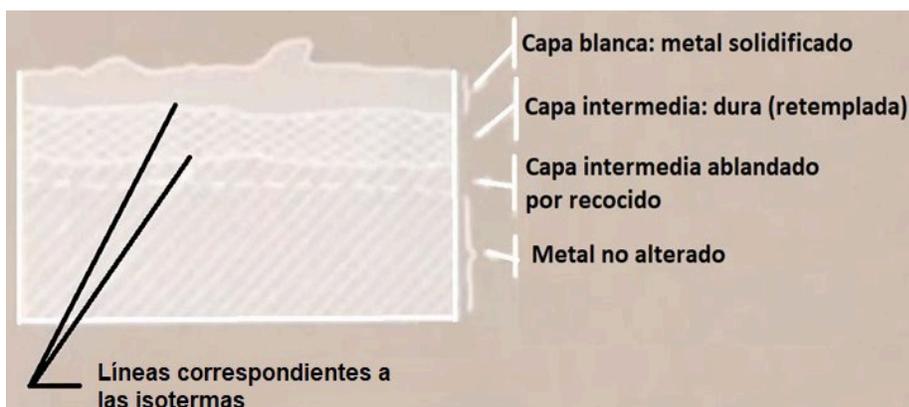


Fig. 1.20. Superficie de un acero electroerosionado [11].

La velocidad de eliminación de materia de la pieza se incrementa a medida que aumenta el valor de la intensidad media. Pero para una sección activa

definida del electrodo, aquella velocidad no aumenta indefinidamente al incrementar el valor de la intensidad media y, por lo tanto, de la densidad de corriente. Una densidad de corriente muy elevada puede desgastar considerablemente los electrodos, sobre todo si son de cobre, aumentando el riesgo de formación de arcos que originan cráteres [11].

A continuación, se presenta algunos de los usos tradicionales de la superficie electroerosionada según sean los requisitos establecidos de la pieza.

1.4.5. USOS TRADICIONALES DE LA SUPERFICIE ELECTROEROSIONADA

Dependiendo de los requerimientos estéticos o mecánicos de la pieza final, en muchas ocasiones la superficie electroerosionada debe ser removida por procesos de pulido manual. Ya sea para poder lograr superficies con acabados tipo espejo en las piezas plásticas, o para permitir la aplicación de recubrimientos superficiales en las cavidades del molde; sin embargo, existe una tendencia a evitar en lo posible el sobre costo de este último trabajo mediante la aplicación funcional del acabado superficial dejado por el proceso de la electroerosión [12].

La primera posibilidad, que se aplica desde hace mucho tiempo, es el uso de superficies electroerosionadas en las piezas plásticas como característica de diseño. Ya sea para aprovechar su apariencia de acabado “mate” como elemento estético o su rugosidad superficial para dar propiedades táctiles específicas en ciertas áreas como manijas o carcasas [12].

Adicionalmente, los nuevos tipos de aceros pre-endurecidos para moldes, con excelentes propiedades anticorrosivas, hacen que los tratamientos superficiales sean menos necesarios, dejando aún más espacio para la decisión de no deteriorar la superficie después de la electroerosión. Esta tendencia se ha venido viendo en la industria de la fabricación de moldes últimamente y está generando resultados sorprendentes [12].

2. DISEÑO DE LA MÁQUINA

En este capítulo se establecen los parámetros de funcionamiento en el proceso de maquinado por electroerosión para realizar una muesca sobre una probeta para ensayos Charpy; también se diseñan y seleccionan los componentes principales de una máquina de electroerosión por penetración.

2.1. GENERALIDADES DEL PROCESO DEL MAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN [27]

La muesca se genera mediante el proceso de electroerosión sin inducir ningún tipo de esfuerzos que pueda alterar la resistencia del material. El proceso para realizar la muesca consiste en hacer fluir un líquido dieléctrico entre el material y un electrodo de cobre electrolítico de manera que, al acercar el electrodo, se produzca un arco eléctrico que se encargue de erosionar la superficie de la pieza produciendo la muesca. El electrodo debe tener un perfil sólido triangular con una punta de acción que tiene un radio de 0.25 mm. Durante el proceso de electroerosión las variables más importantes a controlar son: corriente (I), voltaje (V); sin descuidar variables como: velocidad de avance y distancia de descarga o GAP.

Es importante analizar estas variables puesto que la ionización del canal de descarga, la chispa y el arranque están determinados por su evolución en el tiempo. En la Fig. 2.1 se presenta cómo evolucionan, en un ciclo, tanto el voltaje como también la corriente en el proceso de eliminación de material (ver, Fig. 2.1).

Fase de pre-ignición: al encender el generador el voltaje comienza a aumentar hasta alcanzar el valor establecido como parámetro (ver, fase i de la Fig. 2.1).

Fase de ignición: se aplica una alta diferencia de potencial entre dos electrodos que no están en contacto (ver, fase ii de la Fig. 2.1). El campo eléctrico aumenta en el espacio entre electrodos a medida que el electrodo se mueve

hacia la pieza de trabajo hasta que se alcanza el voltaje de ruptura dieléctrica. Normalmente, la descarga ocurre entre el punto más cercano de la herramienta y la pieza de trabajo. La ubicación podría cambiar si se generan desechos o impurezas presentes en el espacio antes mencionado.

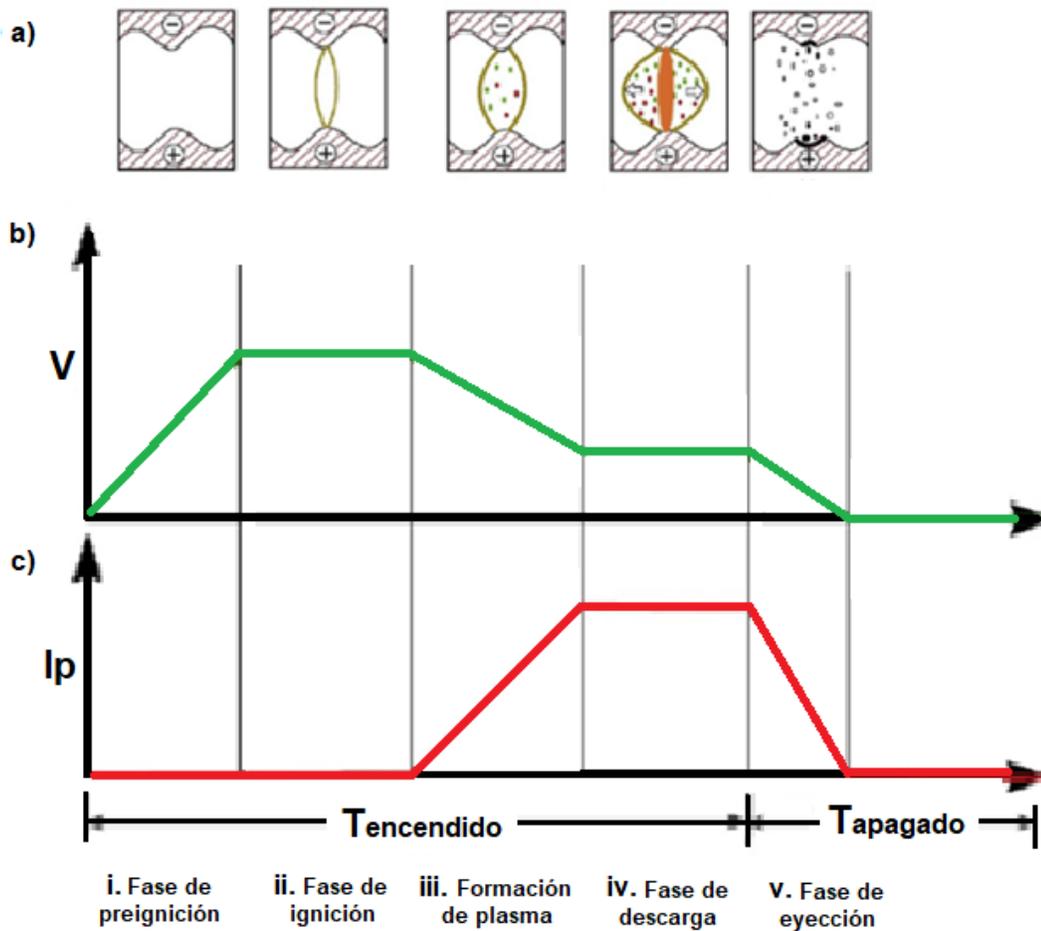


Fig. 2.1. Ciclo de electroerosión. a) Etapas de descarga; b) Curva de voltaje en función del tiempo durante la descarga; y c) Curva de intensidad en función del tiempo durante la descarga [27].

Fase de plasma: Una vez que se forma el canal de plasma, las corrientes comienzan a fluir a través del canal y el voltaje cae a medida que se produce la ionización dieléctrica (ver, fase iii de la Fig. 2.1).

Fase de descarga: la pieza de trabajo recibe calentamiento continuo ya que existe un ataque constante de iones y electrones en los electrodos que

finalmente conduce a un calentamiento intenso de la pieza de trabajo. Debido a este flujo continuo de corriente de descarga, la temperatura aumenta y forma un pequeño charco de metal fundido en las superficies de los electrodos, así el metal se vaporiza directamente. En esta fase, el tamaño del charco de metal fundido sigue aumentando a medida que el canal de plasma sigue ensanchándose (ver, fase iv de la Fig. 2.1).

Fase de eyección: durante esta fase, el canal de plasma colapsa cuando se cierra el voltaje y la presión ejercida por el dieléctrico vecino. Esto crea una pequeña cavidad en la superficie de la pieza de trabajo a medida que el baño de metal fundido se introduce con fuerza en el dieléctrico (ver, fase v de la Fig. 2.1). Las cantidades infinitesimales del material de la pieza de trabajo se eliminan en forma de metal fundido, que solidifica y forma desechos. El lavado dieléctrico a través del espacio entre electrodos eliminó los desechos de la zona de descarga. El aumento en el espacio después de la chispa cambia la posición de la siguiente chispa donde los electrodos están más cerca. Asimismo, se forma un facsímil de naturaleza opuesta en la superficie de la pieza de trabajo debido a miles de descargas eléctricas de este tipo que tienen lugar en numerosos lugares.

La generación de temperaturas muy altas y un enfriamiento rápido provocan la resolidificación del metal fundido y forman una capa refundida sobre la superficie mecanizada. Propiedades como resistencia a la corrosión, La resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga se ven obstaculizadas debido a la existencia de microgrietas de esta capa. Para restablecer la integridad de la superficie, las operaciones de mecanizado posterior son obligatorias.

2.2. COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DE DESGASTE DEL ELECTRODOS

Puesto que los requisitos impuestos por los usuarios de dicha tecnología son cada vez más exigentes, y las tolerancias dimensionales requeridas en las piezas mecanizadas mediante electroerosión por penetración son cada vez más

pequeñas, se requiere un mayor conocimiento de los factores que afectan al proceso de mecanizado de piezas mediante electroerosión por penetración [22].

La pérdida de precisión en el mecanizado de materiales en el proceso de electroerosión por penetración es debida tanto al desconocimiento del desgaste de los electrodos, como también de la dimensión del gap a lo largo del perfil de los mismos. Siendo dichos factores los que mayor relevancia tienen a la hora de definir la cavidad final generada mediante este proceso de mecanizado de materiales (ver, Fig. 2.2) [22].

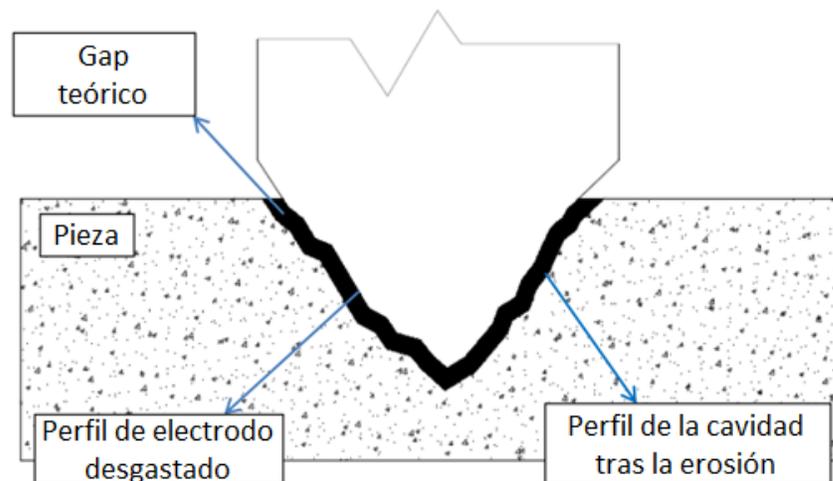


Fig. 2.2. Representación de los factores principales para la definición de la cavidad final [22].

El desgaste del electrodo es producido debido a que cada descarga, además de erosionar el material, produce un desgaste en el electrodo, conocido mediante las siglas TWR (Tool wear rate) [22].

Los coeficientes para el cálculo del desgaste en los electrodos más importantes son [22]:

- Desgaste volumétrico de la herramienta,
- Tasa de eliminación del material, y
- Coeficiente de desgaste en la herramienta.

2.2.1. DESGASTE VOLUMÉTRICO DE LA HERRAMIENTA

La tasa de desgaste de la herramienta en mm^3/s (Tool Wear, TW), es un coeficiente que relaciona el volumen de material perdido por la herramienta y la duración del ensayo. Con el análisis de este parámetro se podrá determinar el desgaste volumétrico que se produce en el electrodo, a su vez este coeficiente es muy útil al tratar de conseguir un ahorro económico puesto que al minimizarlo se reduce el número de electrodos que se deben adquirir. La Ec. 2.1 permite el cálculo de este parámetro, así [27]:

$$TW = \frac{V_1}{60t} \quad (2.1)$$

donde: V_1 es el volumen perdido del electrodo en mm^3 , y
 t es el tiempo en min.

Para calcular V_1 se hace uso de la Ec. 2.2,

$$V_1 = \frac{m_e}{\rho} \quad (2.2)$$

donde: m_e es la masa perdida del electrodo, y
 ρ es densidad del electrodo en g/mm^3 .

La masa perdida del electrodo se encuentra mediante la Ec. 2.3, así:

$$m_e = m_{fe} - m_{ie} \quad (2.3)$$

donde: m_{fe} es la masa final del electrodo en g, y
 m_{ie} es la masa inicial del electrodo en g.

2.2.2. TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL

La tasa de eliminación de material en mm^3/s (Material Removing Rate, MRR), es un coeficiente que relaciona el volumen de la pieza arrancado durante

cada ensayo práctico realizado, con el tiempo transcurrido en dicho ensayo, este parámetro se expresa normalmente en unidades de mm³/min. Este parámetro en si presenta cómo se está produciendo el arranque de material durante el tiempo de duración del ensayo, si se busca minimizar el tiempo de arranque de material se tiene que tomar en consideración que un proceso más rápido está relacionado con una mayor intensidad de descarga; es decir, un entorno más agresivo para la herramienta, que producirá un mayor desgaste en esta. Para el cálculo se utiliza la Ec. 2.4 [27].

$$MRR = \frac{V}{t} \quad (2.4)$$

donde: V es el volumen de material arrancado en la pieza en mm³, y
t es el tiempo en min.

2.2.3. COEFICIENTE DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

El coeficiente de desgaste de la herramienta (Tool Wear Rate, TWR) relaciona el volumen de material perdido por la herramienta con el material arrancado en la pieza para cada ensayo individual. El resultado obtenido será en valor porcentual. Para el cálculo se utiliza la Ec. 2.5 [27].

$$TWR = \frac{V_1}{V_2} * 100\% \quad (2.5)$$

donde: V₁ es el volumen perdido del electrodo en mm³, y
V₂ es el volumen de material arrancado en la pieza en mm³.

2.3. PARÁMETROS EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Corriente pico (I_p): En cada tiempo de activación de pulso, la corriente aumenta hasta alcanzar el nivel preestablecido. El área de la superficie de la pieza a mecanizar rige el requerimiento de amperaje. Un aumento en el pulso de la corriente aumenta la presión del canal de plasma a medida que aumenta el número de electrones y de iones por unidad de área. El aumento de la corriente permite una fácil expulsión de material a medida que aumenta la fuerza impulsora específica. Por lo tanto, se utilizan corrientes de pico elevadas en la operación de paso o para mecanizar un área de superficie mayor. Las corrientes pico más altas mejoran la MRR, pero a costa de comprometer la tasa de desgaste de la herramienta y la integridad de la superficie. El desarrollo de materiales de electrodo mejorados como el electrodo de grafito permite operar cómodamente a corrientes más altas [29].

Voltaje de descarga (V): El voltaje de espacio abierto aumenta para crear una ruta de ionización a través del sistema eléctrico para que la corriente fluya. El voltaje de circuito abierto cae a medida que las corrientes comienzan a fluir a través del canal de plasma hasta que se estabiliza. Un espacio de trabajo entre dos electrodos se puede ajustar seleccionando un voltaje apropiado. La selección del voltaje de descarga depende de la fuerza de ruptura del dieléctrico y la brecha entre electrodos. El voltaje de descarga influye en la energía de chispa y, por lo tanto, en MRR y TWR [29].

Tiempo de activación del pulso (T_{on}): Es el tiempo durante el cual se permite que la corriente fluya por ciclo. Generalmente se comunica en microsegundos. La ionización de los dieléctricos tiene lugar durante este período. La cantidad de energía aplicada durante el tiempo de activación decide la cantidad de material eliminado. Para un pulso más prolongado, se concentra más energía en la pieza de trabajo, lo que resulta en un cráter más ancho y profundo, la capa refundida será más grande y la zona afectada por el calor será más

profunda. Dado que el mecanizado se realizará solo durante el tiempo de pulso, la duración y la frecuencia de los pulsos son parámetros críticos [29].

Tiempo de desactivación de impulsos (Toff): El tiempo de desactivación de impulsos es el tiempo durante el cual se corta la tensión de alimentación. Básicamente, es el tiempo intermedio entre dos tiempos de activación de impulsos. Durante este período, el dieléctrico recupera su fuerza mediante la desionización y los residuos se eliminan del espacio de chispas. Como no se realiza ningún mecanizado en fase, el tiempo debe ser mínimo. Pero la disminución del tiempo de desactivación del pulso puede provocar inestabilidad en el proceso debido a una descarga inadecuada e ineficaz [29].

⊕ Voltaje de GAP (V gap): Este parámetro es el responsable de crear la diferencia de potencial, la cual se genera por una fuente de corriente continua, la cual entrega valores entre 40 y 400 voltios. Cuanto mayor sea el voltaje de Gap, mejor es el acabado superficial. El grosor de la capa refundida aumenta a medida que la expansión de la brecha de chispas le da más poder. En un espacio más alto, la columna de descarga de voltaje se diverge, por lo tanto, el espesor de la capa refundida se reduce [29].

Tamaño del GAP: Como se mencionó anteriormente el GAP es el espacio en el cual se produce la erosión y se ubica entre el electrodo y la pieza de trabajo. Se puede apreciar dos tipos de GAP [27]:

- GAP frontal: Se utiliza esta denominación cuando el espacio y el eje de penetración no son paralelos.
- GAP lateral: Se lo denomina así cuando el espacio y el eje de penetración son paralelos. (ver, Fig. 2.3)

La densidad de la energía en la superficie del canal de plasma está determinada por la Ec. 2.6 [31]:

$$Q = q * \rho \quad (2.6)$$

donde: Q es la densidad de la energía en la superficie del canal J/m³,

q es el calor específico de fusión en J/kg·K, y

ρ es la densidad del material en kg/m³.

La Ec. 2.7 se aplica al caso del procesamiento térmico, para la formación de depósitos y la fusión de superficies en varios otros procesos.

$$Q = \frac{W}{A * S} \quad (2.7)$$

donde: Q es la densidad de la energía en la superficie del canal en J/m³,

W es la energía liberada en el gap en J,

A es el área del canal en m³, y

S es el tamaño del gap en m [31].

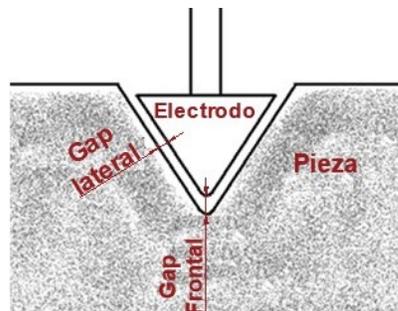


Fig. 2.3. Gap lateral y frontal.

Rugosidad media (R_a): La desviación de una superficie de su nivel ideal se define en términos de rugosidad superficial. La rugosidad de superficie se define según la norma internacional ISO 4287:1997. El término rugosidad promedio es a menudo denominada rugosidad y determina la textura de la superficie. La rugosidad media se calcula por las desviaciones, es decir, la desviación de la superficie de una línea central teórica. Si las desviaciones son grandes, la rugosidad de la superficie es alta, mientras que la superficie se considera lisa para pequeñas desviaciones. Esto se conoce como rugosidad superficial media aritmética R_a [23].

Polaridad: Normalmente en el proceso de electroerosión el electrodo corresponde al cátodo y la pieza el ánodo, aunque existe la posibilidad de invertir

la polaridad, pero este cambio no provocará alteraciones importantes lo que hace recomendable trabajar con una polaridad constante, a continuación, se presenta un esquema del sistema en el proceso de electroerosión por penetración (ver, Fig. 2.4) [27].

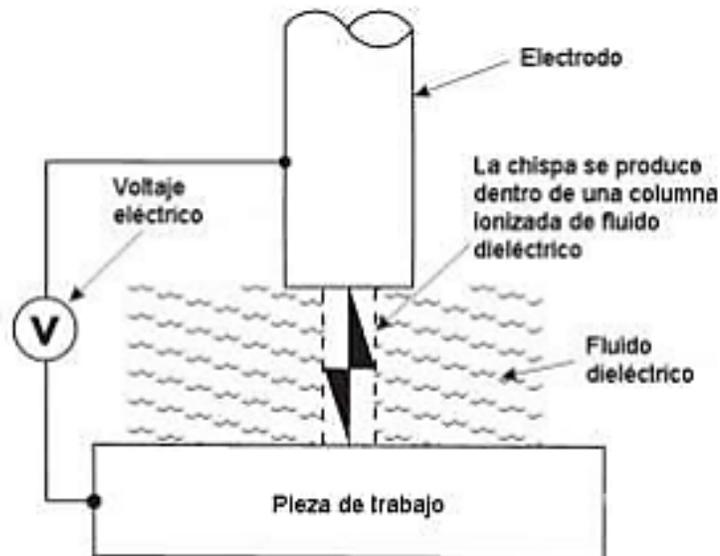


Fig. 2.4. Sistema del proceso de electroerosión por penetración [27].

Generador: Para el desarrollo del proyecto se seleccionó una fuente de poder RC. Esto debido a que su implementación resulta más sencilla de llevar a cabo. El costo y complejidad de los elementos necesarios es menor en comparación con las fuentes conmutadas.

El grupo de fuentes de poder RC se basan en el empleo de una resistencia y un capacitor que determinan la frecuencia de descargas por medio de su propia frecuencia natural de oscilación (ver, Fig. 2.5) [30].

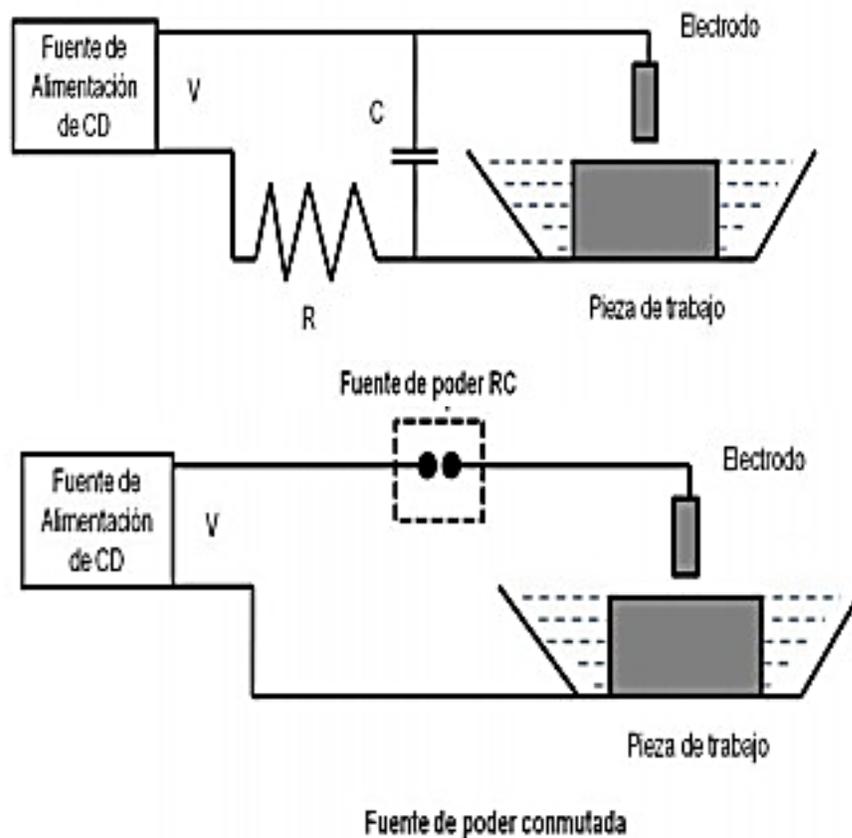


Fig. 2.5. Fuente de Alimentación de CD: regulable de 30 a 60 V [30].

Dispositivo de control: Placa de Arduino, Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre para los creadores y desarrolladores. El Arduino es una placa basada en un microcontrolador. Los microcontroladores son circuitos integrados en los que se pueden grabar instrucciones, las cuales se escriben con el lenguaje de programación Arduino IDE. Estas instrucciones permiten crear programas que interactúan con los circuitos de la placa.

El microcontrolador de Arduino posee lo que se llama una interfaz de entrada, es una conexión capaz de soportar diferentes tipos de periféricos. La información de estos periféricos se traslada al microcontrolador, el cual se encarga de procesar los datos que le lleguen a través de ellos.

Los tipos de periféricos capaces de ser controlados son cámaras para obtener imágenes, teclados para introducir datos, o diferentes tipos de sensores.

También cuenta con una interfaz de salida, que es la que se encarga de llevar la información que se ha procesado en el Arduino a otros periféricos. Estos periféricos pueden ser pantallas o altavoces en los que reproducir los datos procesados, pero también pueden ser otras placas o controladores [15].

2.3.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS GENERALES

Electrodo: El material seleccionado es cobre electrolítico que se caracteriza por su excelente conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, atractivo color y fácil conformado. Su composición química es 99.9% Cu y 0.1% otros elementos. Las características mecánicas se presentan en la Tabla 2.1 [14].

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del cobre electrolítico [14].

T_m , °C	$S_{m\acute{a}x}$, kg/mm ²	σ_y , kg/mm ²	Alargamiento 50 mm, %	HB	$T_{ablandamiento}$, °C	γ , kg/dm ³
1,083	22-40	5-34	6-48	45-115	250	8.9

a) Propiedades eléctricas:

- Resistividad eléctrica: 0.017 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ (muy buena), y
- Conductividad eléctrica: 100-101 % I.A.C.S. por sus siglas en inglés (International Annealed Copper Standard) es decir el estándar internacional del cobre recocido.

b) Características de operación:

- En condiciones de trabajo normales se llega a desgastes volumétricos inferiores al 0.5%, en operaciones con intensidades menores a 80 A;
- Para intensidades de unos 18 A, se llegan a conseguir también desgastes inferiores al 0.5%, pero a costa de una disminución de la capacidad de arranque; y
- En intensidades de acabado, los desgastes son mayores, situándose entre el 1 y el 5% [14].

c) Dimensiones: Las dimensiones del electrodo se basan con respecto a la muesca a realizar sobre la pieza, tomando en consideración que durante el proceso de electroerosión el electrodo sufre un desgaste, por lo tanto, se debe sobredimensionar el perfil triangular (ver, Fig. 2.6).

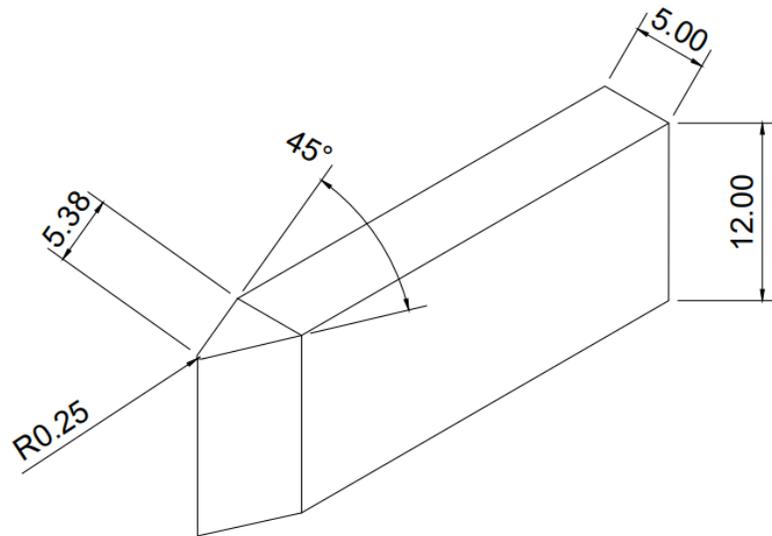


Fig. 2.6. Esquema y dimensiones del electrodo.

Material base: el material y las dimensiones de la probeta se retoman de la Norma ASTM E 23 “Métodos de prueba estándar para prueba de impacto de barra con muesca de materiales metálicos”.

a) Material: acero SAE 1045, es un acero grado ingeniería de aplicación universal que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad. Este acero puede ser usado en condiciones de suministro; laminado en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite y revenido). En la Tabla 2.2 se presenta la composición química, y en la Tabla 2.3 se presenta las propiedades físicas del material base [13].

Tabla 2.2. Composición química del acero SAE 1045 [13].

Composición Química, %	C	Mn	P _{máx}	S _{máx}	Si _{máx}
Análisis típico en %	0.43-0.50	0.6-0.9	0.04	0.05	0.2-0.4

Tabla 2.3. Propiedades físicas del acero SAE 1045 [13].

ρ , g/cm ³	E, Pa	λ , W/m·°C	c, J/kg·K	ν	$\dot{\rho}$, $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	α (20 – 200 °C), 1/°C
7.85	2×10^{11}	52	4.60	0.3	a 32 °F = 16.2 a 212 °F = 22.3	12.3×10^{-6}

b) Dimensiones: Según norma ASTM E 23 (ver, Fig. 2.7) [26].

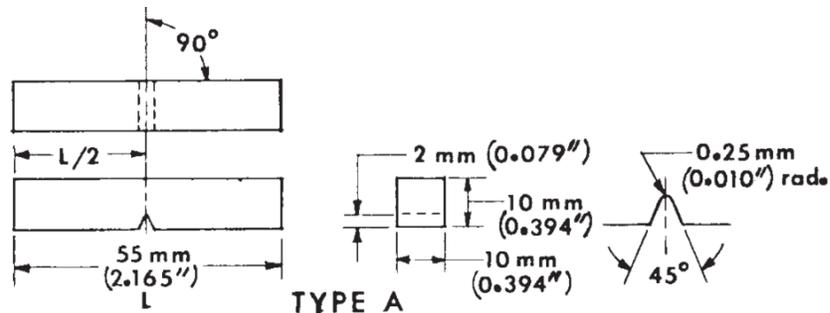


Fig. 2.7. Dimensiones según norma ASTM E 23 – 02a [26].

Dispositivo de control: Se selecciona una Placa de Arduino UNO, la cual contiene la programación encargada de manipular el encendido de la chispa, las rpm de los motores y los sensores ópticos (ver, Fig. 2.8).

Arduino UNO es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usando con modulación por ancho de pulsos o PWM por sus siglas en inglés pulse width modulation), 6 entradas analógicas, un cristal de 16 Mhz, conexión USB, conector jack de alimentación, terminales para conexión ICSP (puerto para programar Arduino) y un botón de reinicio. Tiene toda la electrónica necesaria para que el microcontrolador opere, simplemente hay que conectarlo a la energía por el puerto USB o con un transformador AC-DC [16].

La etapa de control se describe en el capítulo 3, esta incluye los elementos electrónicos que intervienen, la programación de la placa Arduino UNO, la descripción del funcionamiento de la máquina de electroerosión y la configuración electrónica de la etapa de control.

Servomotor: Se selecciona un motor paso a paso NEMA 17 (ver, Fig. 2.9), cuyas características se especifican en el capítulo 3.

Fluido dieléctrico: Aceite mineral EDM 250, está diseñado para resistir la degradación térmica de las aplicaciones de alto amperaje, es uno de los aceites dieléctricos de mayor duración disponible y puede durar hasta 3 años o más. EDM-250 tiene baja viscosidad para un excelente lavado y acabado. Las propiedades del aceite dieléctrico se presentan en la Tabla 2.4 [19].



Fig. 2.8. Placa de Arduino UNO [16].

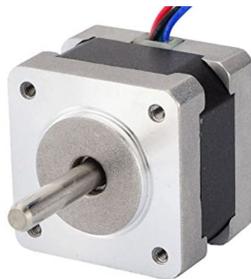


Fig. 2.9. Motor paso a paso NEMA 17 [17].

Tabla 2.4. Características del Aceite Mineral EDM 250 [19].

Característica	Valor
Viscosidad a 40 °C, cSt	2.7
Tasa de consumo permitido, A	400
Gravedad específica	0.81
Densidad, lb/gal	6.8
Color	claro
Punto de ebullición, °F	469
Punto de inflamación, °F	>200
Tasa de evaporación	<1
Densidad del vapor	>1
Olor	casi inodoro
Vida útil, años	2

Medición de temperatura del fluido dieléctrico: para evitar una degradación acelerada de las propiedades del dieléctrico debido a la temperatura, se opta por incorporar un termómetro digital con vástago, dicho vástago se encuentra sumergido en el líquido con el propósito de censar la temperatura que alcanza este durante el proceso de electroerosión, y así evitar que se sobrepase la temperatura máxima de trabajo, la cual en condiciones normales es de 50 °C. Durante el proceso, el operario debe revisar continuamente la lectura del termómetro, y en caso de tener un sobrecalentamiento debe detener el proceso. Por lo tanto, se selecciona un termómetro digital marca Taylor, el cual tiene un rango de medición de la temperatura de -40 a 150 °C. [51]

Mesa: se selecciona caoba como material principal de la mesa de madera para sujetar a los dos bastidores y mantener en su posición al reservorio. El material fue elegido por sus propiedades aislantes con el fin de evitar corrientes de fuga durante el proceso de electroerosión, y a su vez, la mesa ha de ser revestida con fórmica ya que esta posee una alta resistencia a los daños ocasionados por la exposición a diferentes tipos de fluidos.

Unidad de filtrado: debido a que los filtros convencionales son demasiado grandes, no aptos para este diseño, se opta por utilizar un filtro universal de aceite para motocicleta porque cumple con las dimensiones del diseño (ver, Fig. 2.10). Las dimensiones del filtro se presentan en la Tabla 2.5 [32].

Tabla 2.5. Dimensiones de la unidad de filtrado.

Dimensiones	Valor
Diámetro interno, mm	10
Diámetro externo, mm	44
Altura, mm	40



Fig. 2.10. Filtro de aceite para motocicleta [32].

Bomba Hidráulica: Se utiliza una bomba de succión externa marca Ftvogue, autocebante, de silicón para recircular el aceite dieléctrico del sistema (ver, Fig. 2.11) [20].



Fig. 2.11. Bomba de succión externa [20].

A continuación, en la Tabla 2.6 se presenta las especificaciones técnicas de la bomba.

Tabla 2.6. Especificaciones Técnicas de la bomba [20].

Descripción	Valor
Diámetro de entrada, mm	6
Diámetro de salida, mm	6
Diámetro de la bomba, mm	60
Altura de la bomba, mm	100
Rango máximo de succión, m	2
Altura máxima, m	3
Caudal, l/min	1.5-2
Voltaje DC, V	12
Corriente, A	0.5-0.7
Potencia, W	25
Temperatura máxima, °C	80
Vida útil, horas	2500

Todos los parámetros seleccionados en este apartado se presentan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Resumen de Parámetros Generales.

Parámetro	Descripción
Electrodo	Cobre electrolítico
Material Base	Acero SAE 1045
Dimensiones de la Probeta	Norma ASTM E 23-02a
Dispositivo de Control	Arduino UNO
Servomotor	NEMA 17
Fluido Dieléctrico	Aceite Mineral EDM 250
Unidad de filtrado	Filtro universal de aceite para moto
Bomba Hidráulica	Bomba de succión externa Ftvogue
Mesa	Madera forrada con formica
Termómetro	Tipo digital

2.3.2. SELECCIÓN DE PARÁMETROS PRINCIPALES

La selección de los parámetros se realiza a partir de los datos experimentales recabados por el editor de revistas científicas Multidisciplinary Digital Publishing Institute cuyas siglas son MDPI (ver, Tabla 2.8), para material base de acero y electrodo de cobre electrolítico [23].

Tabla 2.8. Tasa de eliminación de material (MRR) experimental y parámetro de rugosidad (Ra) [23].

N° S	IP, A	T _{on} , μs	T _{off} , μs	V, V	MRR, mm ³ /min	R _a , μm
1	1	5	11	60	1.2	1.97
2	1	10	22	55	2.5	2.4
3	1	20	43	55	2.1	3.1
4	1	30	64	55	2.3	2.7
5	1	50	107	55	3.1	2.9
6	1.5	5	11	60	2.0	2.4
7	1.5	10	22	55	4.9	3.0
8	1.5	20	43	55	4.7	3.1
9	1.5	50	107	55	6.2	3.1
10	1.5	100	213	55	4.0	3.3
11	2	5	11	60	2.3	2.6
12	2	10	22	55	7	2.6
13	2	20	43	55	8	3

Continúa.

Continuación.- Tabla 2.8. Tasa de eliminación de material (MRR) experimental y parámetro de rugosidad (Ra) [23].

N° S	IP, A	T _{on} , μs	T _{off} , μs	V, V	MRR, mm ³ /min	R _a , μm
14	2	50	107	55	9	3.6
15	3	5	11	50	7.8	2.2
16	3	10	22	50	11.5	2.7
17	3	20	43	50	12.6	3.7
18	3	50	107	50	13.7	4.9
19	3	100	213	50	10.3	6
20	6	5	11	50	17.0	2.8
21	6	10	22	50	26.0	3.6
22	6	20	43	50	29.0	4.5
23	6	50	107	50	31.0	6.3
24	6	100	213	50	32.0	7.7
25	6	150	319	50	28.0	8.7
26	6	200	425	50	25.0	10
27	10	50	107	50	50.0	10
28	10	75	160	50	48.0	10
29	10	100	213	50	60.0	11.6
30	10	150	319	50	58.0	13.1
31	10	200	425	50	56.0	14.4
32	20	100	213	50	133.0	15
33	20	150	319	50	121.0	16.8
34	20	200	425	50	132.0	18.0
35	20	500	1063	50	124.0	23.7
36	30	150	319	50	182.0	18.8
37	30	200	425	50	174.0	20.5
38	30	500	1063	50	187.0	27.4
39	30	1000	2125	50	158.0	34.2
40	40	100	213	50	244.0	18
41	40	150	319	50	240.0	20.4
42	40	200	425	50	218.0	22.3
43	40	500	1063	50	270.0	29.5
44	40	1000	2125	50	216.0	45
45	40	2000	4250	50	240.0	25
46	50	200	850	50	330.0	41
47	50	400	1063	50	350.0	32
48	50	500	2125	50	310.0	32
49	50	2000	2150	50	310.0	41
50	50	2000	4250	50	300	50

El dato de entrada para seleccionar los parámetros en la Tabla 2.8 es el MRR. Conocido el MRR, es posible determinar la corriente Ip, el tiempo de encendido Ton, el tiempo de apagado Toff, el voltaje de GAP y la rugosidad media Ra.

Elección del MRR con respecto al tiempo de maquinado (ver, Tabla 2.8):

A continuación, se presenta una serie de cálculos retomando la Ec. 2.4 con el fin de obtener un tiempo de maquinado adecuado.

El volumen del material removido se representa en la Fig. 2.12 y es de 23.15 mm^3 , el cual se obtiene a partir del programa de diseño SolidWorks, mediante la herramienta de medición de Propiedades físicas (ver, Tabla. 2.9).

Tabla 2.9. Propiedades físicas del volumen del material removido, obtenida mediante simulación en SolidWorks.

Propiedades de masa de pieza 1	
Densidad	0.00 g/mm ³
Masa	0.02 g
Volumen	23.15 mm ³
Área	70.39 mm ²
Centro de masa	X 1.00 mm Y 0.76 mm Z 5.00 mm
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia	lx (0.00, 0.00, 1.00) Px 0.01 ly (0.00, -1.00, 0.00) Py 0.20 lz (1.00, 0.00, 0.00) Pz 0.20

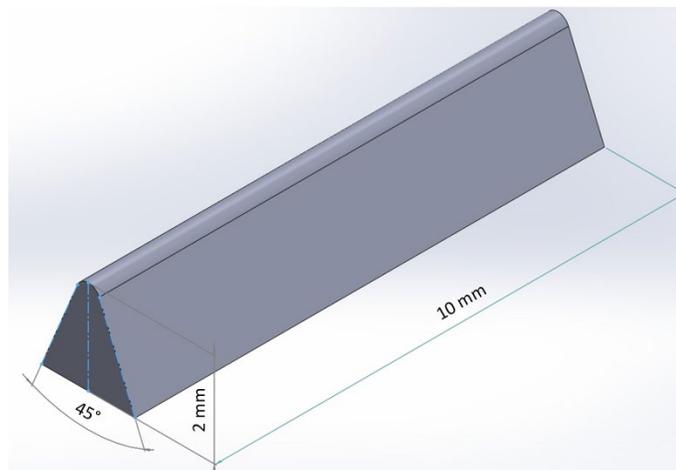


Fig. 2.12. Volumen del material removido.

El primer valor de MRR a seleccionar de la Tabla 2.8 es $50 \text{ mm}^3/\text{min}$:

$$50 \text{ mm}^3/\text{min} = \frac{23.15 \text{ mm}^3}{t}$$

$$t = 0.46 \text{ min} = 27.8 \text{ s}$$

El segundo valor de MRR a seleccionar de la Tabla 2.8 es 25 mm³/min:

$$25 \text{ mm}^3/\text{min} = \frac{23.15 \text{ mm}^3}{t}$$
$$t = 0.93 \text{ min} = 55.6 \text{ s.}$$

El tercer valor de MRR a seleccionar de la Tabla 2.8 es 12.6 mm³/min:

$$12.6 \text{ mm}^3/\text{min} = \frac{23.15 \text{ mm}^3}{t}$$
$$t = 1.84 \text{ min} = 110.2 \text{ s.}$$

El cuarto valor de MRR a seleccionar de la Tabla 2.8. es 2 mm³/min:

$$2 \text{ mm}^3/\text{min} = \frac{23.15 \text{ mm}^3}{t}$$
$$t = 11.58 \text{ min} = 694.5 \text{ s.}$$

De la Tabla 2.8 se seleccionar el quinto valor de MRR el cual es de 1.2 mm³/min:

$$1.2 \text{ mm}^3/\text{min} = \frac{23.15 \text{ mm}^3}{t}$$
$$t = 19.29 \text{ min} = 1,157.5 \text{ s.}$$

De la Ec. 2.4, se deduce que el MRR es inversamente proporcional al tiempo de maquinado, es decir que a menor MRR mayor tiempo de maquinado y viceversa. Por lo tanto, para un valor de MRR de 25 corresponde un tiempo de aproximadamente un minuto, lo cual no garantiza un buen maquinado debido a que la velocidad de avance del carnero tiene que ser muy alta para cumplir con ese tiempo de maquinado, lo cual puede provocar una colisión entre el electrodo y la probeta, o que no se obtengan las dimensiones establecidas para la muesca. Sin embargo, un MRR de 2 corresponde a un tiempo de aproximadamente 12 min lo cual se considera adecuado para un maquinado eficiente.

Con el MRR ya establecido, se obtienen de la Tabla 2.8 los siguientes parámetros:

- $I_p = 1.5 A$
- $T_{on} = 5 \mu s$
- $T_{off} = 11 \mu s$
- $V_{GAP} = 60 V$
- $Ra = 2.4 \mu m$

Con el tiempo obtenido para un MRR de $2 \text{ mm}^3/\text{min}$ y con una profundidad a maquinar de 2 mm (ver, Fig. 2.6), entonces se calcula la velocidad de avance del carnero:

$$Vel = \frac{X}{t} = 2 \text{ mm}/694.5 \text{ s}$$

$$Vel = 2.88 \mu m/s = 0.00288 \text{ mm/s}$$

$$Vel \approx 3 \mu m/s$$

A continuación, se calcula el período T para un MRR de $2 \text{ mm}^3/\text{min}$, el cual corresponde a la suma de los tiempos de encendido (T_{on}) y apagado (T_{off}):

$$T_{on} = 5 \mu s$$

$$T_{off} = 11 \mu s$$

$$T = 16 \times 10^{-6} \frac{s}{\text{ciclos}}$$

Conocido el período se calcula la densidad de chispa por segundo:

$$\text{Ciclos de chispa por segundo} = \frac{1 \text{ s}}{16 \times 10^{-6} \frac{s}{\text{ciclos}}} = 62500 \text{ ciclos}$$

Al dividir el tiempo de encendido T_{on} entre el período, se obtiene el factor del tiempo de encendido de la chispa:

$$\text{factor de encendido} = \frac{5 \mu s}{16 \mu s} = 0.3125$$

Con el factor de encendido y la cantidad de ciclos se calcula la cantidad de chispas de encendido en 1 s :

$$\text{Cantidad de chispas} = 0.3125 \times 62500 = 19531 \text{ chispas}$$

Entonces se determina que en 12 min, que es el tiempo de maquinado, hay 13.56 millones de chispas de encendido.

Cálculo del espacio entre el electrodo y la pieza (GAP) mediante la Ec. 2.8: [24]

$$GAP = \frac{V}{E} \text{ mm} \quad (2.8)$$

donde: V es el voltaje de GAP, y

E es la constante de rompimiento dieléctrico que depende las características del fluido.

Datos: E aceite mineral: $E = 12.5 \text{ MV/m}$

Voltaje de GAP: $V = 60 \text{ V}$

Al utilizar la Ec. 2.8, el valor del GAP es:

$$\begin{aligned} GAP &= \frac{V}{E} \\ GAP &= \frac{60 \text{ V}}{12.5 \times 10^6 \text{ V/m}} \\ GAP &= 0.0000048 \text{ m} = 4.8 \mu\text{m} \\ GAP &\approx 5 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Generador: Se selecciona un generador Baugger Wanptek Nps605W con regulador de voltaje y corriente, además posee una protección de equipo ante sobrecargas, cortocircuitos y sobre temperatura (ver, Fig. 2.13) [21].



Fig. 2.13. Generador regulable de 60 V [21].

Las características técnicas del Generador se presentan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Características del Generador regulable [21].

Descripción	Valor
Voltaje de salida DC, V	0 - 60
Corriente de salida, A	0 - 5
Voltaje de entrada AC, V	230/115
Frecuencia, Hz	60
Potencia, W	300
Fusible, A	3
Temperatura de trabajo, °C	0 - 40
Largo, mm	207
Ancho, mm	70
Alto, mm	123
Peso, kg	1.37

Todos los parámetros seleccionados en este apartado se presentan en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Resumen de Parámetros Principales.

Parámetro	Valor
Tasa de eliminación de material (MRR), mm ³ /min	2
Tiempo de maquinado (t), min	11.58
Corriente pico (I _p), A	1.5
Tiempo de encendido (T _{on}), μs	5
Tiempo de apagado (T _{off}), μs	11
Voltaje de GAP (V _{GAP}), V	60
Velocidad de avance de carnero (V), μm/s	2.88
Constante de rompimiento dieléctrico (E), MV/m	12.5
Distancia entre electrodo y pieza (GAP), μm	4.8

2.4. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

En esta sección se presentan los cálculos que justifican la selección del material y el dimensionamiento de los componentes de manera que se reduzca las probabilidades de falla por fatiga, flexión o desgaste. En la Fig. 2.14 se presenta el prototipo de la máquina propuesta.

Es importante aclarar que el dimensionamiento del reservorio se ve influenciado por dos factores, el primero es la prensa que existe actualmente en el mercado, la cual es de aluminio y posee un tamaño relativamente pequeño pero suficiente para la aplicación de electroerosión que se necesita, y el segundo es la necesidad de que al menos una mano del operario pueda manipular de manera cómoda y segura tanto la probeta como también el electrodo. Debido a dichos factores es que el reservorio mide 20 x 20 x 10 cm, entonces las dimensiones de cada elemento se basan a partir del tamaño del reservorio. Por lo tanto, se restringe la longitud que se debe desplazar la cremallera, la posición en que se encuentra la prensa porta probeta, y la altura de ambos bastidores.

A continuación, se presentan los cálculos para determinar el material del piñón, el material del bastidor porta electrodo (incluyendo el riel y las soldaduras que intervienen), y además se presenta un análisis de flexión para la cremallera. Cabe mencionar que las dimensiones del porta electrodo son similares a las del porta probeta, por consiguiente, al diseñar el bastidor porta electrodo (en su punto crítico que es cuando la cremallera está completamente extendida), también se diseña el bastidor porta probeta.

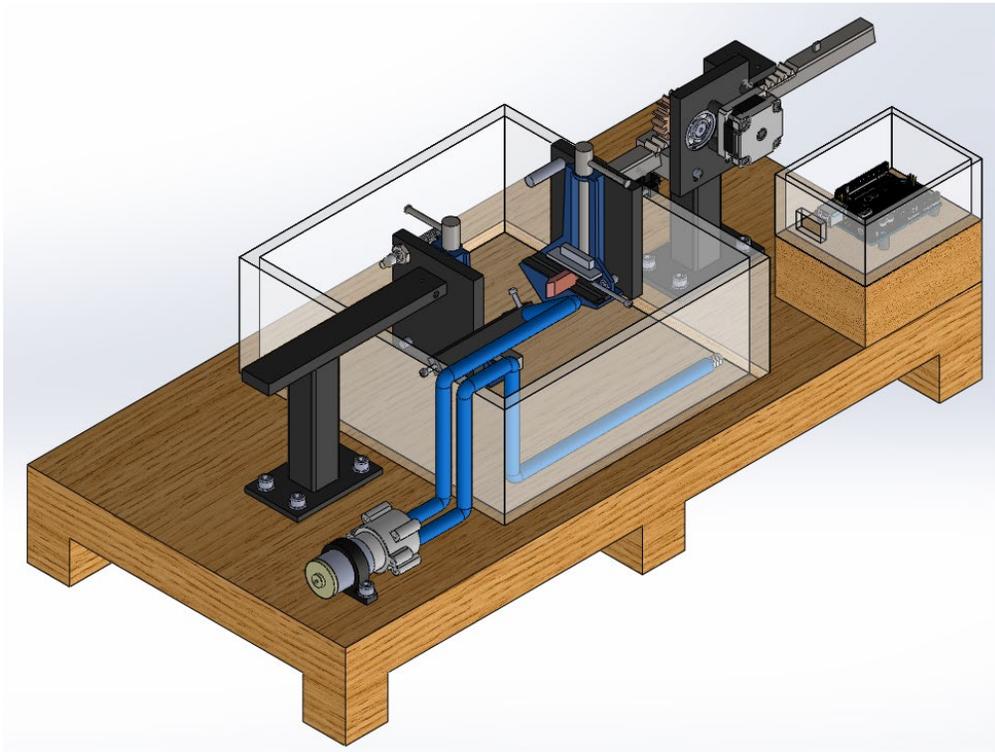


Fig. 2.14. Diseño del mecanismo el SolidWorks.

2.4.1. DETERMINACIÓN DEL MATERIAL DEL PIÑÓN

Para dar comienzo al análisis de esfuerzos es primordial llevar a cabo un cálculo con el objetivo de determinar si hay interferencia o no entre el piñón y el engrane conducido, como primer paso se obtienen los radios de adendum reales y teóricos, posteriormente se desarrolla el análisis de esfuerzos utilizando la ecuación AGMA, así:

A) Definición de los diámetros del piñón y del engrane.

Es necesario asumir los diámetros del piñón D_1 , y del engrane conducido D_2 para posteriormente verificar si se han asumido correctamente, entonces los diámetros son:

$$D_1 = 20mm$$

$$D_2 = 30mm.$$

Para determinar si existe interferencia en el acople piñón-engrane es necesario determinar los radios de adendum teóricos R_{aT} (ver, Ec. 2.9) y reales R_{aR} (ver, Ec. 2.10), y para que no exista interferencia los radios de adendum reales deben ser menores que los teóricos.

$$R_{aT} = [(R \cos \theta)^2 + (c \sin \theta)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

$$R_{aR} = R + \frac{1}{P} \quad (2.10)$$

donde: c es la distancia entre centros de los engranes,

R es el radio del engrane que se está analizando,

θ es el ángulo de presión, y

P es el paso diametral.

Para calcular los radios de adendum teóricos, se aplica la Ec. 2.9 con una distancia entre centros de $c = 25 \text{ mm}$ y $\theta = 20^\circ$:

$$R_{a_{1T}} = [(10 \cos 20)^2 + (25 \sin 20)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$R_{a_{1T}} = 12.7 \text{ mm}$$

$$R_{a_{2T}} = [(15 \cos 20)^2 + (25 \sin 20)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$R_{a_{2T}} = 16.5 \text{ mm}$$

Además, para los radios de adendum reales, se aplica la Ec. 2.10 con un paso diametral $P = 12$:

$$R_{a_{1R}} = 10 + \frac{1}{12}$$

$$R_{a_{1R}} = 10.1 \text{ mm}$$

$$R_{a_{2R}} = 15 + \frac{1}{12}$$

$$R_{a_{2R}} = 15.1 \text{ mm}$$

En base a los resultados se concluye que no hay interferencia ya que $R_{aT} > R_{aR}$, por lo tanto, el paso diametral es 12 y el módulo es de 2 (ver, Tabla 2.12).

Tabla 2.12. Módulos según paso diametral [50].

Módulo, mm	Pd equivalente	Pd normalizado más cercano, dientes/pulg
0.30	84.667	80.00
0.40	63.500	64.00
0.50	50.800	48.00
0.80	31.750	32.00
1.00	25.400	24.00
1.25	20.320	20.00
1.50	16.933	16.00
2.00	12.700	12.00
2.50	10.160	10.00
3.00	8.466	8.00
4.00	6.350	6.00
5.00	5.080	5.00
6.00	4.233	4.00
8.00	3.175	3.00
10.00	2.540	2.50
12.00	2.117	2.00
16.00	1.587	1.50
20.00	1.270	1.25
25.00	1.016	1.00

B) Análisis de esfuerzo en el piñón para determinar el material.

Para encontrar los esfuerzos a los que está sometido el piñón es necesario aplicar la Ecuación AGMA (ver, Ec. 2.11).

$$\frac{Z_N C_H S_{ac}}{K_T K_R S_H} = C_P \sqrt{\frac{F_T K_O K_S K_m K_V K_B C_F}{d_P B I}} \quad (2.11)$$

donde: Z_N es el factor de ciclos de esfuerzo,

C_H es el factor de relación de dureza,

S_{ac} es el esfuerzo a compresión,

K_T es el factor de temperatura,

K_R es el factor de confiabilidad,
 S_H es el factor de seguridad,
 C_P es el coeficiente elástico,
 F_T es la fuerza de corte,
 K_O es el factor de sobrecarga,
 K_S es el factor de tamaño,
 K_V es el factor dinámico,
 K_B es el factor de espesor del aro,
 K_m es el factor de distribución de carga,
 C_F es el factor de calidad de la superficie,
 d_p es el diámetro de paso,
 B es el espesor del engrane, e
 I es el factor geométrico a la picadura.

Determinación de las constantes:

- $Z_N = 1.0$ para $N = 10^7$ ciclos.
- $K_T = 0.88$ para $T = 85^\circ F$.
- $K_R = 0.85$ para una confiabilidad de 1 a 10.
- $C_H = 1.0$ para $e = 0.5$
- $S_H = 1.0$
- $K_O = 1.25$ para impacto moderado
- $K_S = 1.0$ para $P > 5$
- $K_m = 1.6$ para $B \leq 2$
- $B = 10$ mm es el ancho de cara
- $K_V = 1.05$ para $Q_V = 8$ y $v_T = 3 \frac{pie}{min}$
- $C_F = 1.0$ rectificado para engrane pequeño
- $K_B = 1.0$
- $I = 0.1002$
- $C_P = 2300$

- $F_{T(n_1, pot)} = ?$

La potencia es igual a la fuerza por la velocidad (ver, Ec. 2.12), y a su vez la potencia es igual al torque por la velocidad angular (ver. Ec. 2.14), además se sabe que la velocidad tangencial es igual a la velocidad angular por el radio (ver, Ec. 2.13). La fuerza tangencial se calcula en función de la potencia del motor, las revoluciones y el radio del piñón (ver, Ec. 2.15), entonces se debe sustituir la Ec. 2.13 en la Ec. 2.12 para obtener la Ec. 2.15 se sabe que el torque del motor NEMA 17 es de 0.5 N·m y que la velocidad angular máxima es de 100 rpm.

$$P = Fv \quad (2.12)$$

$$v = nR \quad (2.13)$$

$$P = Tn_1 \quad (2.14)$$

donde: P es la potencia del motor,

F es la fuerza tangencial,

v es la velocidad tangencial del engrane que se está analizando,

n es la velocidad angular, y

T es el torque del motor.

$$P = \frac{0.5(100)}{60}$$

$$P = 0.8W$$

Al sustituir la potencia obtenida en la Ec. 2.15, se obtiene la fuerza tangencial:

$$F_T = \frac{Pot}{n_1 R_1} \quad (2.15)$$

$$F_T = \frac{0.8}{\frac{100}{60} \times 0.015}$$

$$F_T = 32N$$

Con todas las constantes determinadas, se procede a calcular el esfuerzo S_{ac} utilizando la Ec. 2.11.

$$\frac{(1.0)(1.0)S_{ac}}{(0.88)(0.85)(1.0)} = 2300 \sqrt{\frac{(32)(1.25)(1.0)(1.6)(1.05)(1.0)(1.0)}{(10 \times 10^{-3})(19.05 \times 10^{-3})(0.1002)}}$$

$$S_{ac} = 3.1 \text{ MPa}$$

El esfuerzo a compresión S_{ac} cumple para bronce fundido en molde de arena o acero endurecido totalmente a grado Brinell 120 HB a 180 HB (ver, Tabla 2.13.).

Por lo tanto, se selecciona acero 1020 (dureza 120 HB) para el piñón y los dientes de la cremallera, para el engrane conducido se selecciona bronce con el objetivo de que sea el engrane quien sufra la deformación en sus dientes y de esta manera se reduzca el desgaste tanto en el piñón como en la cremallera.

Tabla 2.13. Materiales para fatiga en engranes, según AGMA, utilizando S_{ac} .

Material	Clase AGMA	Designación comercial	Tratamiento térmico	Dureza mínima en la superficie	Sc, MPa	
Acero	De A-1 a A-5		Templado completo y revenido	180 BHN y menor	590-660	
				240 BHN	720-790	
				300 BHN	830-930	
				360 BHN	1000-1100	
				400 BHN	1100-1200	
				Endurecido por flameo o inducción	50 HRC	1200-1300
					54 HRC	1200-1300
				Carburizado y endurecido en superficie	55 HRC	1250-1400
					60 HRC	1400-1550
			SAE 4140	Nitrurizado	48 HRC	1100-1250
SAE 4340			Nitrurizado	46 HRC	1050-1200	
Nitralloy135M			Nitrurizado	60 HRC	1170-1350	
2 ½% de Cr			Nitrurizado	54 HRC	1100-1200	
		2 ½% de Cr	Nitrurizado	60 HRC	1300-1500	

Continúa.

Continuación.- Tabla 2.13. Materiales para fatiga en engranes, según AGMA, utilizando Sac.

Material	Clase AGMA	Designación comercial	Tratamiento térmico	Dureza mínima en la superficie	Sc, MPa
Hierro Fundido	20		Según es fundido	-	340-410
	30		Según es fundido	175 BHN	450-520
	40		Según es fundido	200 BHN	520-590
Hierro nodular (dúctil)	A-7-a	60-14-18	{Recocido, templado y revenido}	140 BHN	517
	A-7-c	85-55-06		180 BHN	
	A-7-d	100-70-03		230 BHN	606
	A-7-e	120-90-02		270 BHN	648
Hierro maleable (perlítico)	A-8-c	45007	-	165 BHN	500
	A-8-e	50005	-	180 BHN	540
		53007	-	195 BHN	570
	A-8-i	80002	-	240 BHN	650
Bronce	Bronce 2	AGMA 2C	Fundido en molde de arena	Resistencia última a tensión 275 MPa (40000 lb/pulg ²)	205
	Al/Br 3	ASTM B-148-52 aleación 9C	Tratado térmicamente	Resistencia última a tensión 620 MPa (90000 lb/pulg ²)	450

2.4.2. DETERMINACIÓN DE MATERIAL DEL CUERPO DE LA CREMALLERA

Se conoce que los dientes son de acero 1020, sin embargo, es necesario determinar el material con que debe estar diseñado el cuerpo de la cremallera. Por consiguiente, se procede a determinar dicho material mediante el análisis de esfuerzos a flexión, en el momento en que la cremallera se encuentra totalmente extendida ya que es en ese punto que la cremallera se encuentra en su estado crítico. La masa de los componentes que intervienen en este análisis se obtiene a partir del asistente de medición en SolidWorks. La Ec. 2.16 sirve para calcular el peso (W) a partir de la masa (m) y la gravedad (g).

$$W = mg \quad (2.16)$$

Consideraciones:

- El material de la prensa es de aluminio, sin embargo, se asume de acero debido a que es más pesado comparado con el aluminio, y por lo tanto se diseña para un estado crítico en el que el peso de la prensa sea el máximo.
- La cremallera posee una sección transversal triangular (ver, Fig. 2.15), sin embargo, para simplificar cálculos se optó por aproximar dicha geometría a una rectangular (ver, Fig. 2.16).
- Debido a que la cremallera debe encajar en la ranura que posee el riel para que esta pueda deslizarse correctamente, el riel debe poseer una ranura con la misma sección transversal que la cremallera, entonces ya que la geometría de la cremallera se aproximó a una sección rectangular, la geometría de la ranura del riel también debe ser rectangular.

Datos: Masa de la prensa (acero) = 471 g

$$W_1 = 0.471 \times 9.81$$

$$W_1 = 33.35 \text{ N}$$

Masa de electrodo (Cobre electrolítico) = 33 g

$$W_2 = 0.33 \text{ N}$$

Masa de la cremallera (acero) = 250 g

$$W_3 = 0.250 (9.81)$$

$$W_3 = 2.45 \text{ N}$$

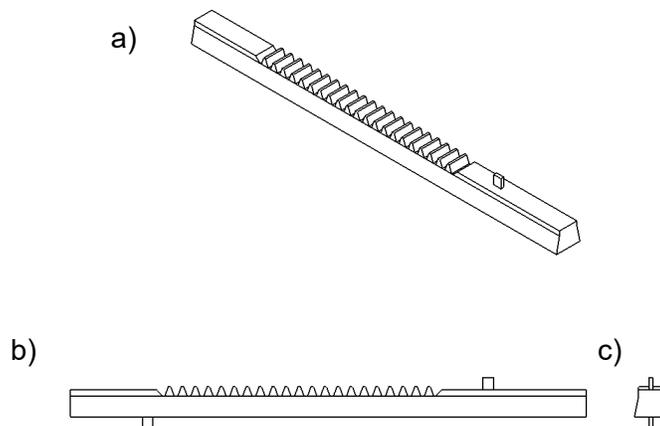


Fig. 2.15. Cremallera con sección transversal triangular: a) Isométrico real; b) vista frontal; y c) vista lateral.

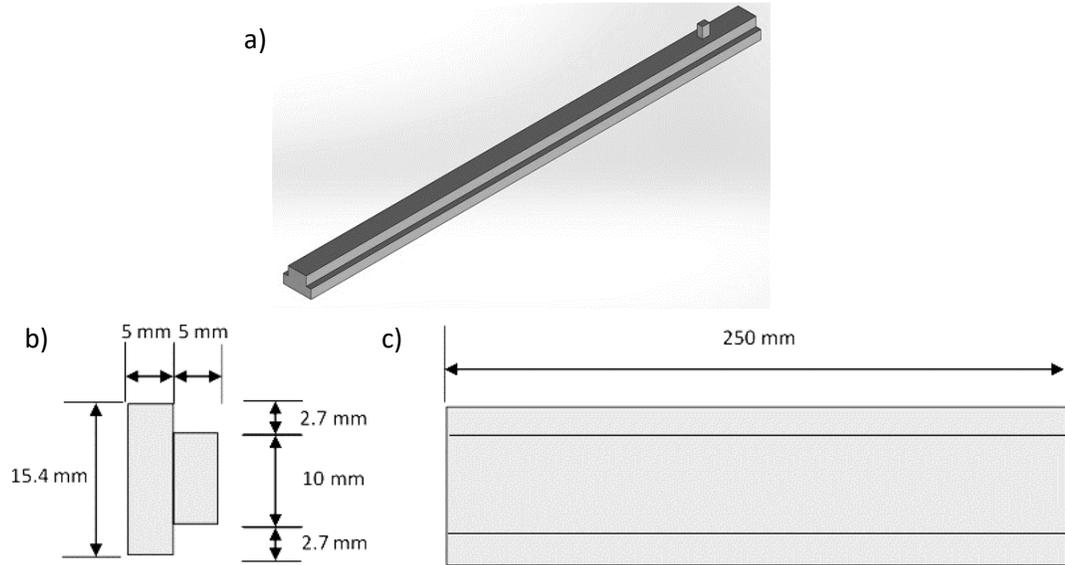


Fig. 2.16. Cremallera de sección transversal rectangular: a) Isométrico; b) vista frontal; y c) vista superior.

A continuación, se desarrollan los cálculos para determinar las reacciones, las áreas en función de x para la carga distribuida, la construcción del diagrama de fuerza cortante y momento flector, y el análisis de áreas para determinar la inercia, a partir de estos cálculos se determina el material de la cremallera, así:

A) Cálculo de las reacciones en la cremallera.

Para determinar las reacciones R_A y R_B es necesario hacer sumatoria de fuerzas y momento en equilibrio teniendo en cuenta que la reacción que recibe la cremallera por parte del riel se comporta como una carga distribuida de tipo triangular (ver, Fig. 2.17).

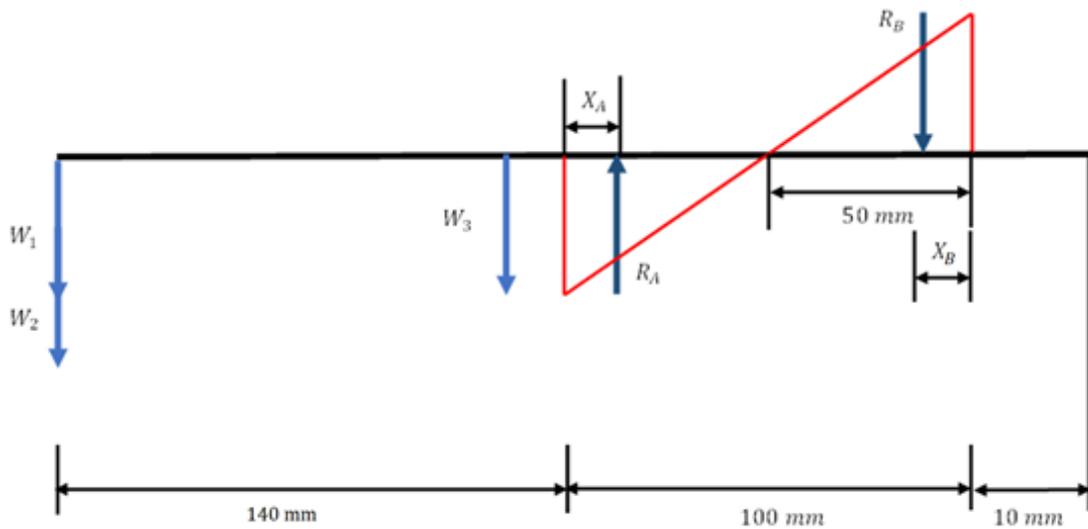


Fig. 2.17. Diagrama de cuerpo libre de la cremallera, la máxima abertura de la cremallera es de 140 mm.

La distancia en la que se ubica la carga puntual debido a la distribución de carga triangular se determina a partir de la Ec. 2.17, la cual sirve para encontrar el centroide de un triángulo y, por lo tanto, la fuerza puntual pasa por el centroide de este.

$$X_A = \frac{1}{3}b \quad (2.17)$$

$$X_A = \frac{1}{3}(50\text{mm})$$

$$X_A = 17 \text{ mm}$$

$$X_A = X_B$$

Se hace sumatoria de fuerzas en equilibrio:

$$+\uparrow \sum F_Y = 0$$

$$R_A = W_1 + W_2 + W_3 + R_B \quad (2.18)$$

Luego sumatoria de momentos, en el punto B:

$$\odot \sum M_B = 0$$

$$-R_A(0.1 - X_B - X_A) + W_3(0.115 - X_B) + (W_1 + W_2)(0.24 - X_B) = 0 \quad (2.19)$$

Al simultanear las Ec. 2.18 y 2.19 se obtienen las magnitudes de las reacciones:

$$-R_A(100 - 2(17)) + W_3(115 - 17) + (W_1 + W_2)(240 - 17) = 0$$

$$R_A(66) = 2.45(98) + (33.35 + 0.33)(223)$$

$$R_A = 116.45 \text{ N}$$

De la Ec. 2.18, despejando R_B y sustituyendo valores:

$$R_B = R_A - (W_1 + W_2 + W_3)$$

$$R_B = 116.45 - (33.35 + 0.33 + 2.45)$$

$$R_B = 80.32 \text{ N}$$

Una ecuación para expresar la carga puntual en función de x .

$$R = \frac{h \times d}{2}$$

$$h = \frac{2(R)}{d} \quad (2.20)$$

donde: R es la carga puntual,

h es la altura del triángulo y

d es la base del triángulo.

B) Cálculo del área en el punto A, en función de x .

Al aplicar la Ec. 2.20, para encontrar la altura en el lado A del triángulo (ver, Fig. 2.18) se obtiene:

$$h = \frac{2(116.45)}{0.050}$$

$$h = 4658$$

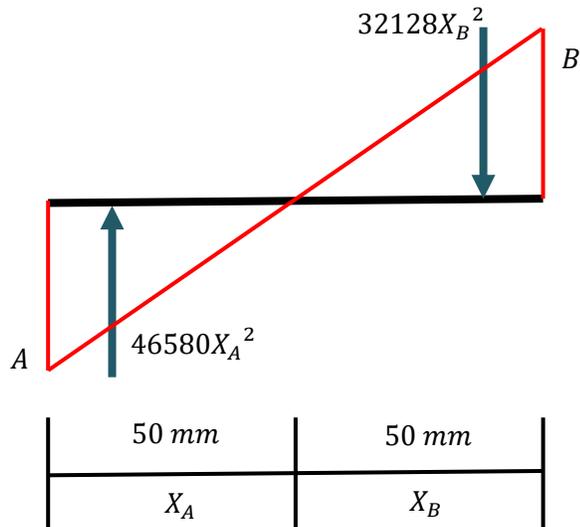


Fig. 2.18. Cargas puntuales en función de x , para la carga distribuida de tipo triangular, debido a la reacción que le provoca el riel a la cremallera.

Por medio de semejanza de triángulos se encuentra la relación:

$$\frac{h}{X} = \frac{4658}{0.05}$$

$$h = 93160 X_A \quad (2.21)$$

Se sabe que el área de un triángulo está determinada por:

$$\text{Área} = \frac{b h}{2} \quad (2.22)$$

Al sustituir la Ec. 2.21 en la Ec. 2.22 se obtiene la Ec. 2.23, así:

$$\text{Área}_A = \frac{X_A(93160X_A)}{2}$$

$$\text{Área}_A = 46580 X_A^2 \quad (2.23)$$

La Ec. 2.23 corresponde al área bajo la curva en función de x .

C) Cálculo del área en el punto B, en función de x.

Se procede a aplicar la Ec. 2.20, para hallar la altura en el lado B del triángulo (ver, Fig. 2.18):

$$h = \frac{2(80.32)}{0.050}$$

$$h = 3212.8$$

Luego con semejanza de triángulos:

$$h = \frac{3212.8}{0.05} X_B$$

$$h = 64256 X_B$$

Por último, con la Ec. 2.22 se halla el área de B en función de x.

$$\text{Área}_B = \frac{X_B(64256X_B)}{2}$$

$$\text{Área}_B = 32128 X_B^2 \quad (2.24)$$

D) Construcción del diagrama de cortante y momento flector.

Al construir el diagrama de cortante (ver, Fig. 2.19b) se puede observar que el diagrama corta una vez en el eje x, por lo tanto, el momento máximo se produce cuando la fuerza cortante es cero, es decir cuando $x = 41.5$ mm.

$$+\uparrow \sum F_Y = 0$$

$$-(W_1 + W_2) - W_3 + 46580(0.05^2 - X^2) - V = 0$$

$$V = -(W_1 + W_2) - W_3 + 46580(0.05^2 - X^2) \quad (2.25)$$

Con $V=0$ se encuentra el intercepto en el diagrama de cortante:

$$\text{Si } V = 0 \rightarrow X \approx 41 \text{ mm}$$

El momento máximo se obtiene de integrar la Ec. 2.25.

$$M = \int V \, dv$$

$$M = -(W_1 + W_2 + W_3)X + \frac{46580}{3} \left(0.05^2 X - \frac{X^3}{3} \right)$$

$$M = -(36.13)X + 46580 \left(0.05^2 X - \frac{X^3}{3} \right) \quad (2.26)$$

Se sabe que el momento máximo se produce donde el cortante es cero, es decir cuando $X = 0.04m$

Ahora se sustituye el valor de x en la Ec. 2.26:

$$M = -(36.13)X + 46580 \left(0.05^2(0.04) - \frac{0.04^3}{3} \right)$$

$$M = 2.22 \text{ N}\cdot\text{m} \quad \text{Momento máximo}$$

En la Fig. 2.19b se presenta el comportamiento del diagrama de momento sabiendo que el punto más alto de la curva tiene un valor de 2.22 N·m.

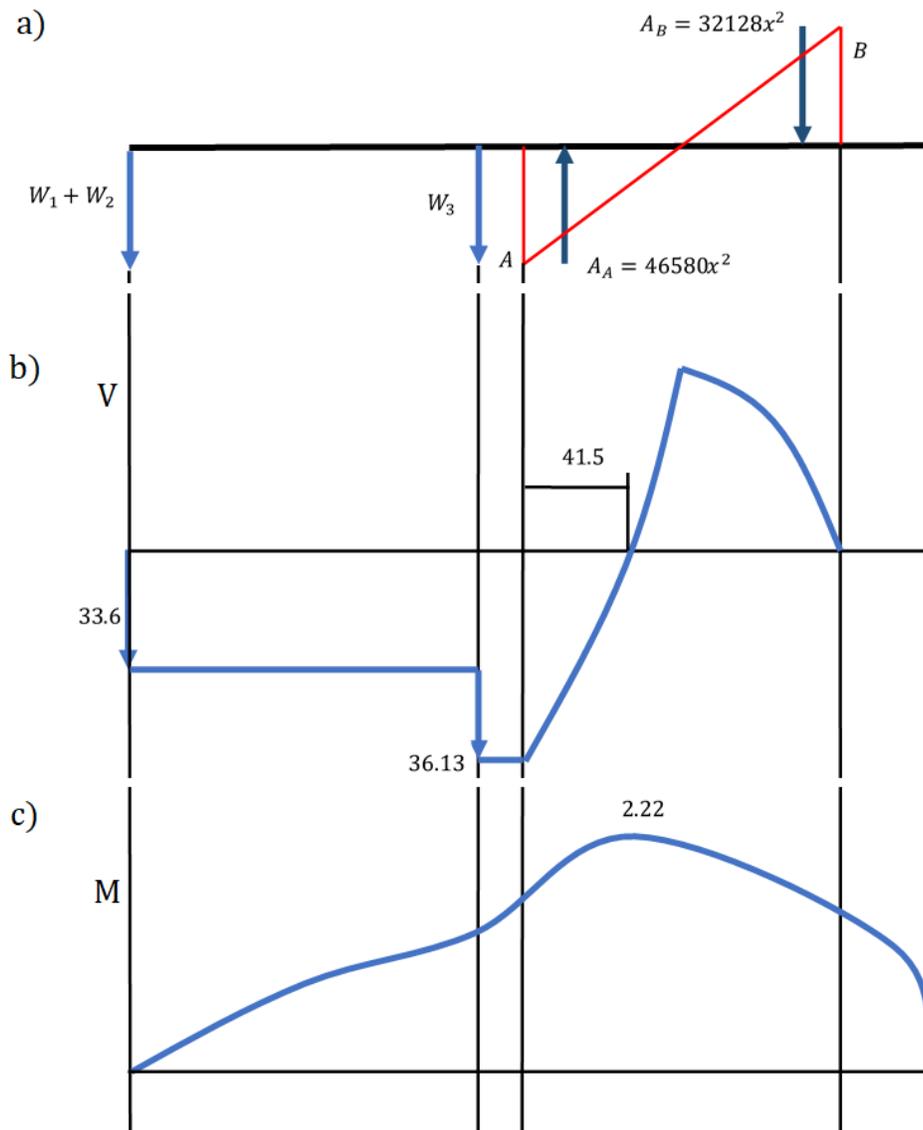


Fig. 2.19. Construcción del diagrama de cortante para la cremallera: a) Cargas que intervienen; b) Diagrama de cortante; y c) Diagrama de momento flector.

E) Análisis por el método de áreas para la determinación de la inercia.

Es necesario determinar el momento de inercia de la cremallera ya que se ocupará para calcular los esfuerzos, ahora bien, debido a que la cremallera posee una sección transversal irregular se ocupa el método de áreas para determinarla. (ver, Fig. 2.20).

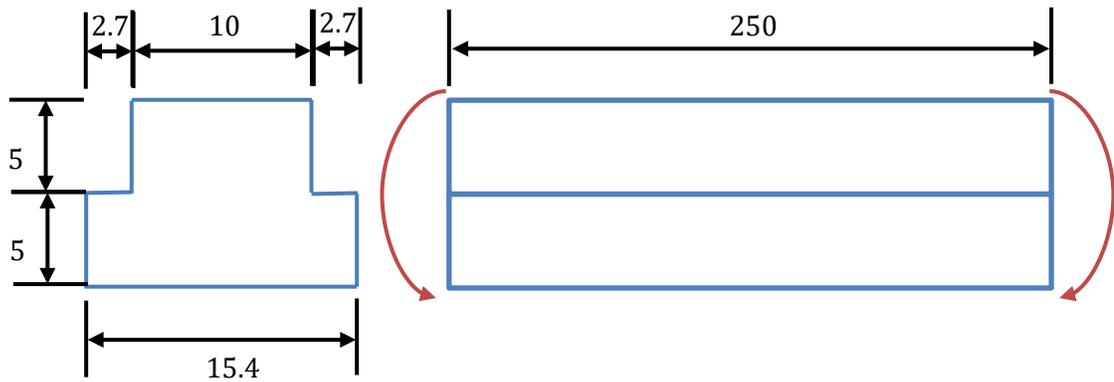


Fig. 2.20. Cremallera sometida a flexión pura, se presentan las dimensiones.

Se procede a calcular el centroide del área transversal de la cremallera para determinar el momento de inercia (ver, Fig. 2.21).

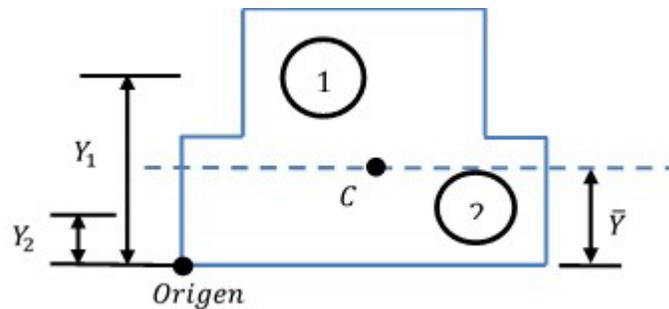


Fig. 2.21. Ubicación del eje x' el cual pasa por el centroide de la figura, también se observa los centroides de las secciones 1 y 2, denotados por Y_1 y Y_2 respectivamente.

La posición del centroide en el eje x a partir del origen es:

$$\bar{X} \sum A = \sum \bar{x} * A$$

$$\bar{X} = \frac{15.4}{2} \approx 8 \text{ mm}$$

Determinando la posición del centroide en el eje y a partir del origen:

$$\bar{Y} \sum A = \sum \bar{y} * A$$

Tabla 2.14. Recopilación los datos de área, de los centroides de cada figura y la multiplicación de las dos anteriores.

	A, mm^2	\bar{y}, mm	$\bar{y} A, mm^3$
1	$10 \times 5 = 50$	7.5	375
2	$15.4 \times 5 = 77$	2.5	192.5
Sumatoria	127		567.5

El centroide se encuentra de la figura a partir de la base

$$\bar{Y} = \frac{\sum \bar{y} * A}{\sum A} = \frac{567.5}{127} = 4.4685 \rightarrow \bar{Y} = 4.47$$

$$d_1 = y_1 - \bar{Y} = 7.5 - 4.47 \rightarrow d_1 \approx 3 \text{ mm}$$

$$d_2 = \bar{Y} - y_2 = 4.47 - 2.5 \rightarrow d_2 \approx 2 \text{ mm}$$

A continuación, se debe aplicar el Teorema de Steiner (ejes paralelos) para encontrar el momento de inercia en el eje X' (ver, Ec. 2.27).

$$I_{x'} = \sum (\bar{I} + Ad^2) \quad (2.27)$$

El momento de Inercia de un rectángulo respecto a un eje x está dado por la Ec. 2.28.

$$I_x = \frac{1}{12} bh^3 \quad (2.28)$$

Luego se simultanea la Ec. 2.27 en la Ec. 2.28 y sustituyendo valores:

$$I_{x'} = \frac{1}{12} (10)(5^3) + (5)(10)(3.03^2) + \frac{1}{12} (15.4)(5)(1.97^2)$$

$$I_{x'} = 1022.5 \text{ mm}^4$$

Entonces el momento de inercia respecto al eje X' es:

$$I_{x'} = 1022.5 \text{ mm}^4 \left(\frac{1 \text{ m}^4}{(1000)^4 \text{ mm}^4} \right)$$

$$I_{x'} = 1.022 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

La cremallera está sometida a esfuerzos de flexión debido a las cargas externas, por lo tanto, la parte superior está sometida a tracción y la parte inferior a compresión (ver, Fig. 2.22).

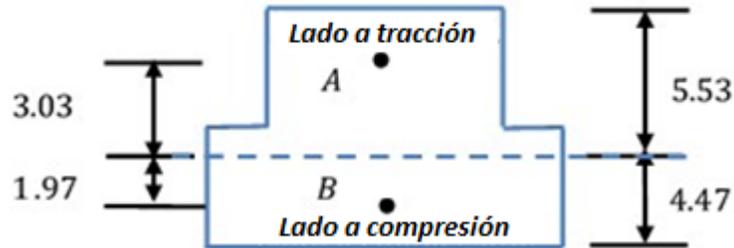


Fig. 2.22. Distancias d_1 y d_2 a partir del nuevo eje x' .

El cálculo del esfuerzo se realiza mediante la Ec. 2.29, donde M es el momento, c_A es el punto lejano a partir del centroide y $I_{x'}$ es el momento de inercia a partir del eje x' .

$$\sigma_A = \frac{Mc}{I_{x'}} \quad (2.29)$$

Para calcular el esfuerzo máximo, se hace uso de la Ec. 2.29.

$$\sigma_A = \frac{2.22(0.00553)}{1.022 \times 10^{-9}} = 12.01 \text{ MPa} \quad \text{Tracción máxima}$$

$$\sigma_B = \frac{2.22(0.00447)}{1.022 \times 10^{-9}} = -9.71 \text{ MPa} \quad \text{Compresión máxima}$$

Para poder determinar si el esfuerzo a la tracción de 12.01 MPa es adecuado, se ocupa la Ec. 2.30, la cual permite calcular el factor de seguridad (n).

$$\sigma_{per} = \frac{\sigma_{ult}}{n} \quad (2.30)$$

El esfuerzo último σ_{ult} y el esfuerzo de fluencia σ_y para el acero son:

$$\sigma_{ult} = 400 \text{ MPa} \text{ y } \sigma_y = 250 \text{ MPa}$$

Cálculo del esfuerzo permisible para un factor de seguridad de $n = 2.5$ aplicando la Ec. 2.30.

$$\sigma_{per} = \frac{400 \text{ MPa}}{2.5} \rightarrow \sigma_{per} = 160 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible para un factor de 2.5 es mucho menor que el esfuerzo de fluencia del material, por lo tanto, no hay ningún problema y se escoge acero SAE 1020.

$$\sigma_{per} = 160 \text{ MPa} < \sigma_y = 250 \text{ MPa}$$

2.4.3. ANÁLISIS DE ESFUERZO PARA EL RIEL DE LA CREMALLERA

La masa de los componentes se obtiene a partir del asistente de medición en SolidWorks y mediante ficha técnica.

Datos: Masa aproximada de un motor NEMA 17 ≈ 160 g

Soporte del motor (hierro dulce) ≈ 162 g

Soporte de sensor (hierro dulce) ≈ 79 g

A continuación, se desarrollan los cálculos para encontrar los pesos que se ejercen sobre el riel, el análisis de esfuerzos, obtención del diagrama de fuerza cortante y momento flector, y el cálculo de momento de inercia. Con estos cálculos se obtiene el material del riel de la cremallera, así:

A) Cálculo de los pesos que se ejercen sobre el riel

Aplicando ecuación 2.16 para encontrar los pesos de cada dispositivo:

$$W_m = (161.77 + 160) \frac{9.81}{1000} = 3.16 \text{ N} \quad \text{Motor y soporte del motor}$$

$$W_s = 79 \left(\frac{9.81}{1000} \right) = 0.78 \text{ N} \quad \text{Soporte del sensor y sensor}$$

Las reacciones debidas a la distribución de carga triangular son iguales y opuestas a las que se determinaron en el análisis de la cremallera. En otras palabras $R_A = 116.45 N$ y $R_B = 80.32 N$.

Consideraciones:

- Los esfuerzos debidos a la flexión son mucho mayores a los esfuerzos por torsión, por tal motivo no se consideran esfuerzos de torsión en el análisis, ya que son muy pequeños.
- El riel se considera como un elemento rígido, de lo contrario el riel provocaría que la cremallera se doble y entonces el ángulo de salida de la cremallera se vería afectado.
- Teniendo en cuenta que el riel va soldado con el tubo de perfil cuadrado, R_C y R_D son las reacciones debidas a la soldadura (ver, Fig. 2.23).

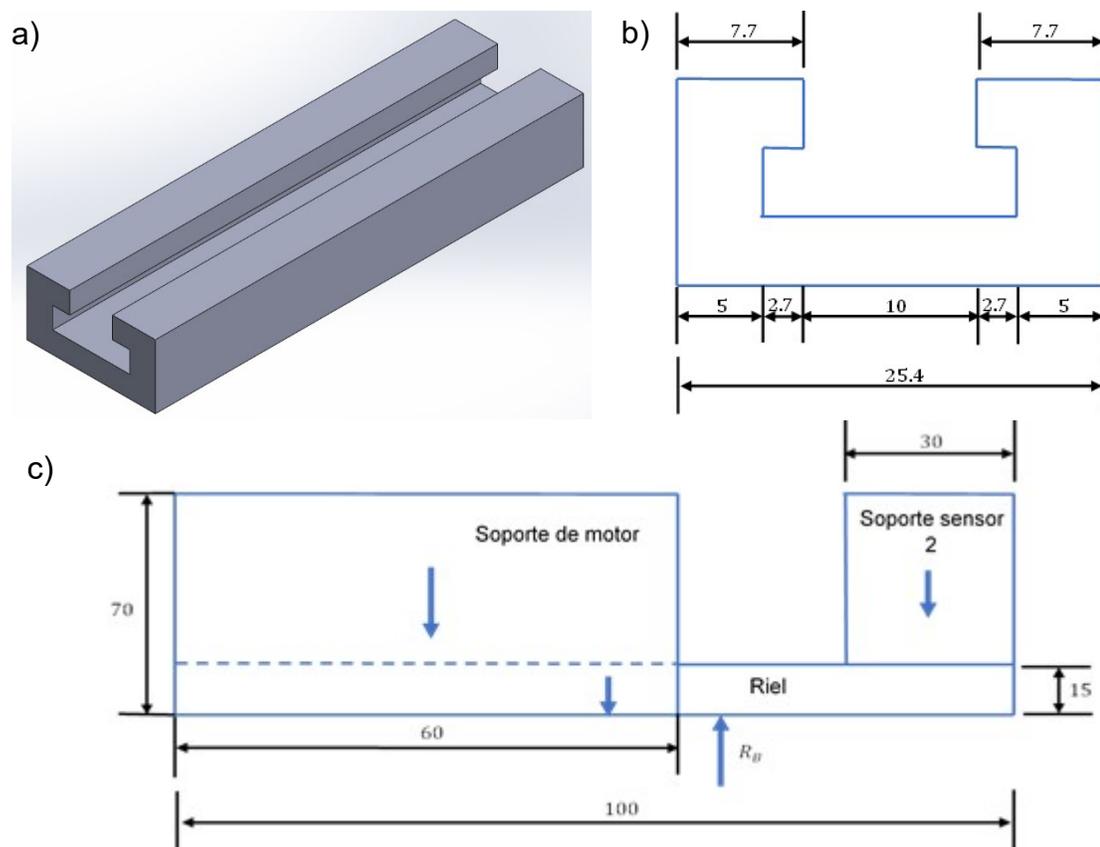


Fig. 2.23. Dimensiones del riel: a) Isométrico del riel; b) Sección transversal del riel; y c) Dimensiones de la vista de perfil del riel incluyendo los soportes para el motor y para el sensor 2. Cotas en mm.

El riel soporta una carga distribuida de tipo triangular que tiene la misma magnitud de la fuerza que soporta la cremallera, pero en sentido opuesto, a su vez se consideran todos los pesos que están conectados al riel, es decir, el soporte del motor, el soporte del sensor, y el motor (ver, Fig. 2.24).

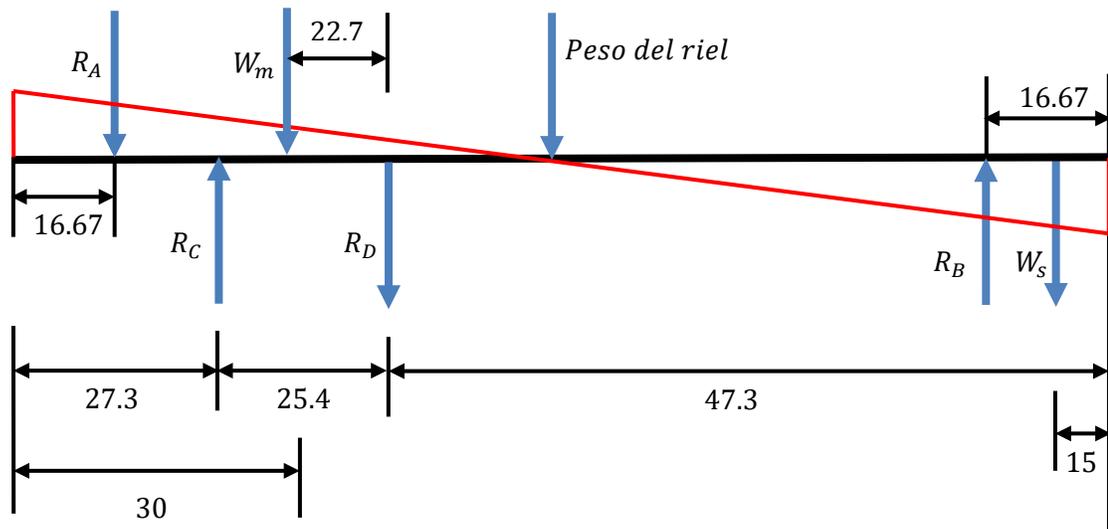


Fig. 2.24. Distribución de cargas sobre el riel, tomando en cuenta las cotas en que se ubican.

B) Análisis de esfuerzo para el riel

El análisis de esfuerzo tiene como primer paso llevar a cabo una sumatoria de fuerzas en el eje y:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_Y &= 0 \\
 -R_A + R_C - R_D + R_B - W_m - W_s &= 0 \quad (2.31)
 \end{aligned}$$

Luego se aplica la sumatoria de momentos en el punto D:

$$\begin{aligned}
 \oplus \sum M_D &= 0 \\
 \oplus R_A(36.0) - R_C(25.4) + R_B(30.6) + W_m(22.7) - W_s(32.3) &= 0 \quad (2.32)
 \end{aligned}$$

Sustituyendo valores en la Ec. 2.32:

$$R_C = \frac{36.0(116.45) + 30.6(80.32) + 22.7(3.16) - 0.78(32.3)}{25.4}$$

$$R_C = 263.88 \text{ N}$$

De la Ec. 2.31 se despeja R_D y se sustituyen las fuerzas.

$$R_D = -R_A + R_C + R_B - W_m - W_s$$

$$R_D = -116.45 + 263.88 + 80.32 - 3.16 - 0.78$$

$$R_D = 223.81 \text{ N}$$

C) Diagrama de la fuerza cortante y momento flector

Al desarrollar el diagrama de fuerza cortante, se observa que la curva corta dos veces el eje x , el primer corte sucede en 27.3 mm y el segundo en 52.7 mm (ver, Fig. 2.25b).

- Para $0 < x < 27.3 \text{ mm}$ (parte superior de la carga triangular)

Aplicando sumatoria de fuerzas:

$$+\uparrow \sum F_Y = 0$$

$$46580(0.05^2 - x^2) + 263.88 - V = 0 \quad (2.33)$$

Integrando la Ec. 2.33 con respecto a x , para obtener la ecuación del momento:

$$M = 46580 \left(0.05^2 x - \frac{x^3}{3} \right) + 263.88x \quad (2.34)$$

Sustituyendo $x = 0.0273 \text{ m}$ en la Ec. 2.34 para encontrar el momento:

$$M = 10.07 \text{ N.m}$$

- Para $0 < x < 53 \text{ mm}$ (parte inferior de la carga triangular)

Como la carga triangular de la parte inferior comienza a los 50 mm se va a tomar en consideración que la carga puntual, debida a la distribución de carga triangular de la parte superior, ya es conocida, y por lo tanto el valor de x para el segundo segmento es $x = 3 \text{ mm}$

Aplicando sumatoria de fuerzas:

$$\begin{aligned} +\uparrow \sum F_Y &= 0 \\ -R_A + R_C - W_m + 32128x^2 - R_D - V &= 0 \\ V &= 79.53 + 32128x^2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

Integrando la Ec. 2.35 con respecto a x , para obtener la ecuación del momento.

$$M = -79.53x + 32128 \frac{x^3}{3} \quad (2.36)$$

Sustituyendo $x = 0.0027m$ en la Ec. 2.36 para encontrar el momento:

$$\begin{aligned} M &= -79.53(0.003) + 32128 \frac{(0.003)^3}{3} \\ M &= -0.21 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el momento crítico es de 10.07 N·m, con este valor se procede a diseñar el riel. Sin embargo, con estos dos valores permiten construir el diagrama de momento flector para ver la tendencia de la curva (ver, Fig. 2.25c).

D) Cálculo del momento de inercia para el riel por el método de áreas.

Para determinar la inercia del riel es necesario separar en porciones rectangulares la sección transversal de la cremallera (ver, Fig. 2.26), de esta manera se facilita el cálculo del centroide (ver, Fig. 2.27) para finalmente obtener el momento de inercia alrededor del eje x' (ver, Fig. 2.28).

Se procede a calcular el área de cada segmento, y a cada uno se le coloca el centroide \bar{y} , posteriormente se multiplica el área por el centroide, estos datos se resumen en la Tabla 2.15.

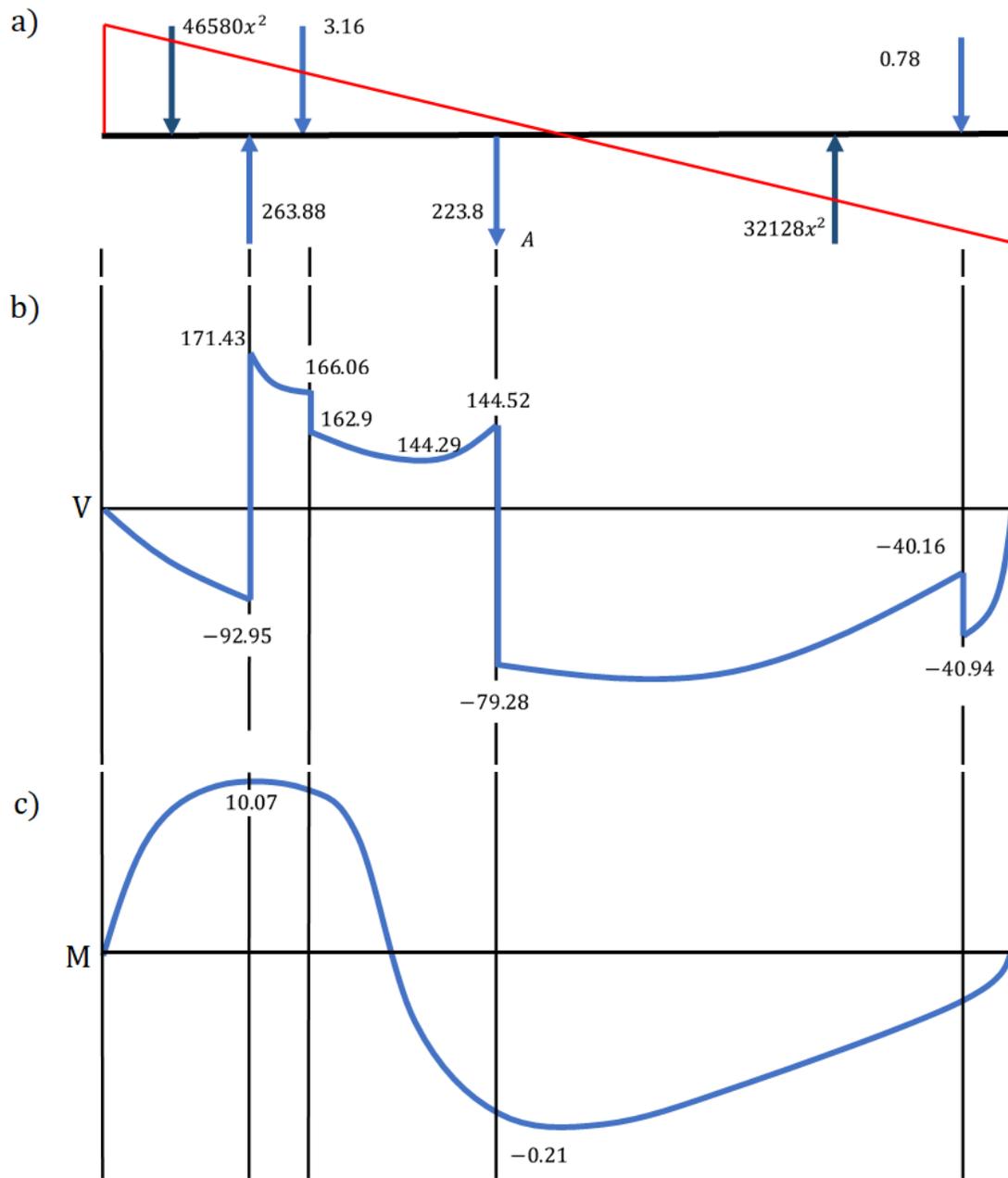


Fig. 2.25. Diagrama de fuerza cortante y momento flector para el riel: a) Cargas que intervienen; b) Diagrama de cortante; y c) Diagrama de momento flector.

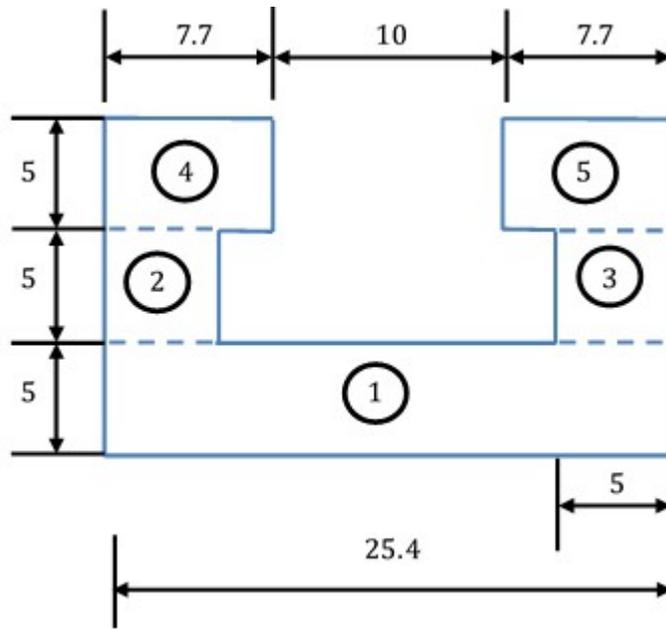


Fig. 2.26. Cotas de la sección transversal del riel, dicha sección se subdivide en segmentos que servirán para el análisis por el método de áreas.

Tabla 2.15. Recopilación los datos de área, de los centroides de cada figura y la multiplicación de las dos anteriores.

	$A \text{ mm}^2$	$\bar{y} \text{ mm}$	$\bar{y}A \text{ mm}^3$
1	127	2.5	317.5
2	25	7.5	187.5
3	25	7.5	187.5
4	38.5	12.5	481.25
5	38.5	12.5	481.25
Σ	254		Σ 1654.5

Para calcular el centroide se hace uso de la Ec. 2.37 y se retoman datos presentados en la Tabla 2.15 tales como la sumatoria de áreas y la sumatoria de la multiplicación de áreas por centroide:

$$\bar{y} = \frac{\Sigma \bar{y} \cdot A}{\Sigma A} \quad (2.37)$$

$$\bar{y} = \frac{1654.5}{254}$$

$$\bar{y} \approx 6.5$$

En la Fig. 2.27 se presenta la ubicación del eje x' , el cual pasa por el centroide C de la figura, también se observan los centroides de cada segmento, ubicados a una distancia d , a partir del eje x' .

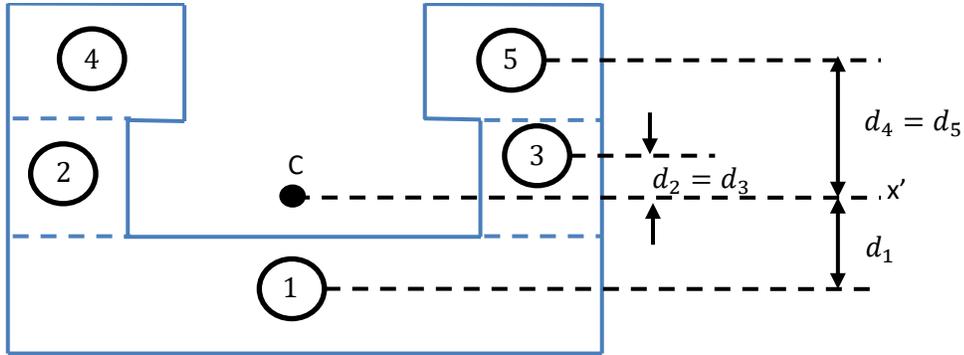


Fig. 2.27. Centroide de la sección transversal del riel.

Se necesitan conocer las distancias de los centroides de cada figura a partir del eje x'

$$d_1 = 6.5 - 2.5 \rightarrow d_1 = 4 \text{ mm}$$

$$d_2 = d_3 = 7.5 - 6.5 \rightarrow d_2 = d_3 = 1 \text{ mm}$$

$$d_4 = d_5 = 12.5 - 6.5 \rightarrow d_4 = d_5 = 6 \text{ mm}$$

Al aplicar el teorema de los Ejes Paralelos (ver, Ec. 2.27), se determina el momento de inercia respecto al eje x' .

$$I_{x'} = \frac{1}{12}(25.4)(5^3) + (25.4)(5)(4^2) + 2 \left[\frac{1}{12}(5)(5^3) + (5)(5)(1^2) \right] + 2 \left[\frac{1}{12}(7.7)(5^3) + (7)(5)(6^2) \right]$$

$$I_{x'} = 433.9167 + 154.1667 + 2680.4167$$

$$I_{x'} = 3268.5 \text{ mm}^4$$

$$I_{x'} = 3268.5 \text{ mm}^4 \left(\frac{1 \text{ m}^4}{(1000 \text{ mm})^4} \right)$$

$$I_{x'} = 3.2685 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

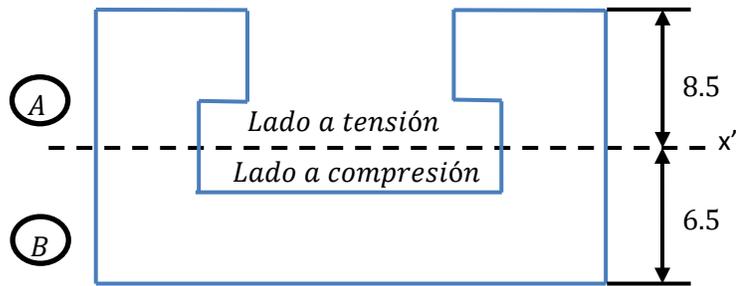


Fig. 2.28. Ubicación del eje x' .

Con el momento de inercia, el momento flector máximo y la distancia desde el eje x' hasta el borde de cada sección se procede a calcular los esfuerzos a la tracción y compresión aplicando la Ec. 2.29:

$$\sigma_A = \frac{10.07(0.0085)}{3.2685 \times 10^{-9}} \rightarrow \sigma_A = 26.19 \text{ MPa}$$

$$\sigma_B = \frac{-10.07(0.0065)}{3.2685 \times 10^{-9}} \rightarrow \sigma_B = -20.03 \text{ MPa}$$

Para determinar si el esfuerzo a la tracción de 26.19 MPa es adecuado, se ocupa la Ec. 2.38, la cual permite calcular el factor de seguridad (n).

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma} \quad (2.38)$$

Se calcula el factor de seguridad para acero, el cual tiene un esfuerzo de fluencia de $\sigma_y = 250 \text{ MPa}$

$$n = \frac{250}{26.19} \rightarrow n = 9.5$$

Un factor de seguridad por encima de 3 indica que las probabilidades de falla son mínimas. Por lo tanto, el material escogido es el correcto.

2.4.4. ANÁLISIS DE ESFUERZO DEL TUBO DE PERFIL CUADRADO

Para el cálculo de esfuerzos del tubo de perfil cuadrado se selecciona un hierro dulce el cual posee una resistencia a fluencia de 250 MPa.

La masa riel se obtiene a partir del asistente de medición en SolidWorks.

Datos: *Masa del riel* $\approx 200\text{ g} \rightarrow W = 1.96\text{ N}$

En la Fig. 2.29 se presenta los componentes que van acoplados sobre el tubo de perfil cuadrado por ende estos generan esfuerzos sobre dicho tubo. Las distancias para desarrollar los cálculos de la sumatoria de momentos se presentan en la Fig. 2.30, con estas se aplica sumatoria de momentos en O:

$$\oplus \sum M_o = 0$$

$$M_o + 10W_{riel} + 45W_s - 55W_{crem} - 180W_{prensa-elec.} - W_m(0.01) = 0 \quad (2.39)$$

$$M_o = 0.055(2.45) + 0.180(33.35) - 0.045(0.78) - 0.01(1.96) + 0.01(3.16)$$

$$M_o = 6.11\text{ N} \cdot m$$

Mo es el momento al que está sometido la sección transversal del tubo.

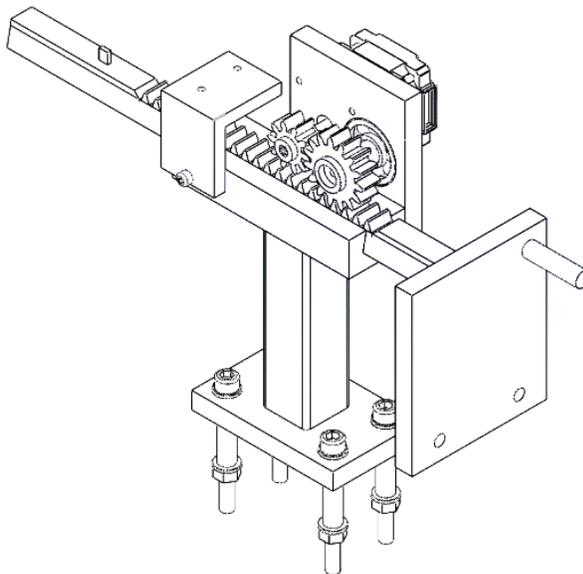


Fig. 2.29. Isométrico del bastidor porta electrodo.

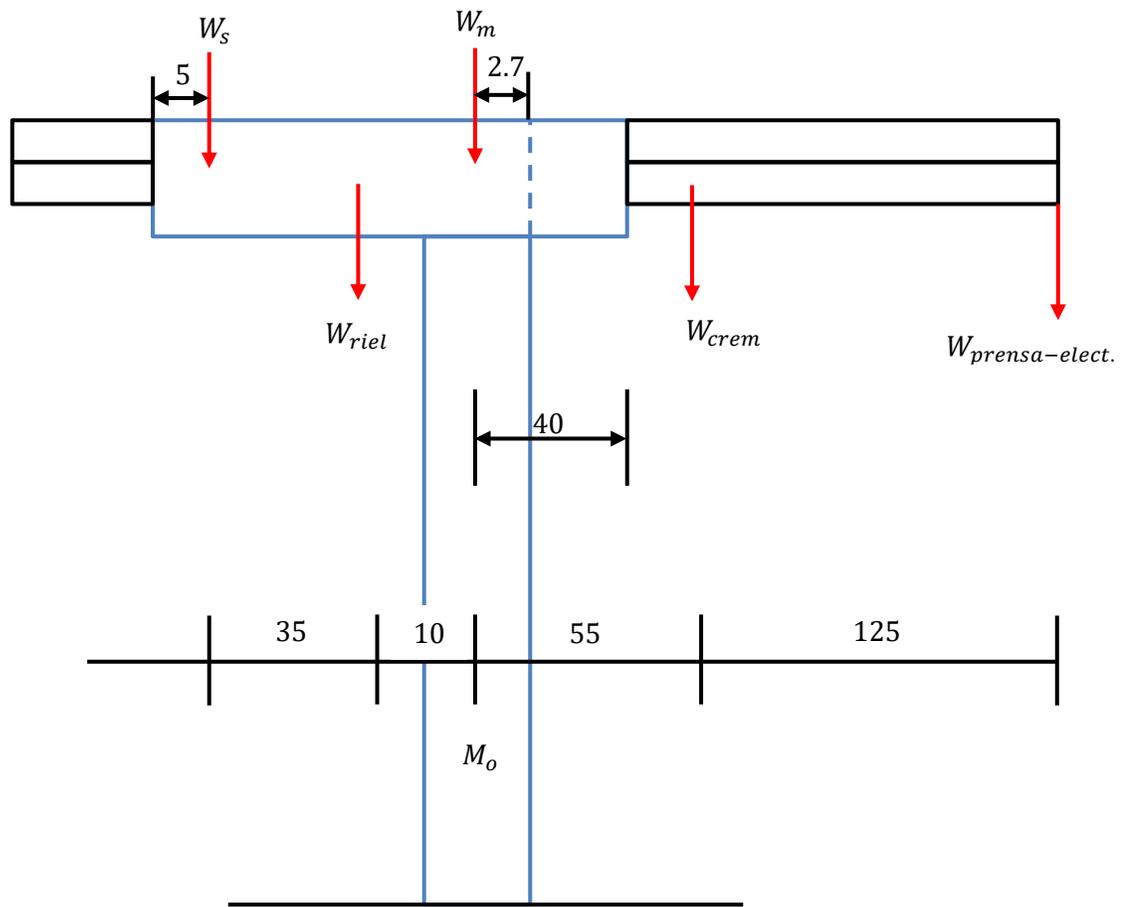


Fig. 2.30. Cargas a las que está sometido el tubo del perfil cuadrado.

La siguiente ecuación representa el momento de inercia para una sección cuadrada con un hueco en su interior (ver, Ec. 2.40). En la Fig. 2.31 se presenta las cotas para calcular el momento de inercia.

$$I = \frac{bd^3 - b_1d_1^3}{12} \quad (2.40)$$

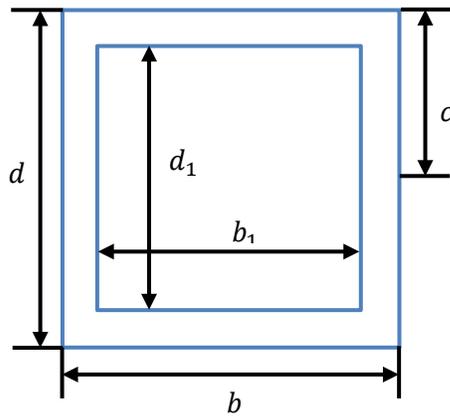


Fig. 2.31. Sección transversal de un tubo de perfil cuadrado de 1 pulg, chapa 16.

Se sustituyen las dimensiones en la Ec. 2.40 para obtener el momento de inercia del tubo con perfil cuadrado:

$$I = \frac{0.0254^4 - 0.0234^4}{12}$$

$$I = 9.7008 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Al ser una sección cuadrada la distancia C, que corresponde a la distancia del centroide del tubo de perfil cuadrado, es la división de la cota d (ver, Fig. 2.31) la cual corresponde a la longitud de la sección cuadrada, entre dos.

$$c = \frac{0.0254}{2} = 0.0127$$

Al retomar la Ec. 2.29 se calcula el esfuerzo de compresión

$$\sigma = \frac{6.11(0.0127)}{9.7008 \times 10^{-9}}$$

$$\sigma \approx 8 \text{ MPa}$$

Ahora se hace uso de la teoría del esfuerzo normal máximo (TENM) para calcular el factor de seguridad, n, (ver, Ec. 2.41).

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{S_y}{2n} \quad (2.41)$$

Debido a que sobre el tubo de perfil cuadrado no se ejercen esfuerzos a la tracción se deduce que:

$$\sigma_1 = \sigma \text{ y } \sigma_2 = 0$$

Por último, se despeja el valor n de la Ec. 2.41 y se sustituyen los valores de los esfuerzos para obtener el factor de seguridad:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_1} = \frac{250 \text{ MPa}}{8 \text{ MPa}}$$
$$n = 31.3$$

Un factor de seguridad por encima de 3 indica que las probabilidades de falla son mínimas. Por lo tanto, el material escogido es el correcto.

2.4.5. ANÁLISIS DE SOLDADURA

La unión entre el riel y el tubo de perfil cuadrado está realizada por medio de soldadura, y por lo tanto se procede con el análisis de esfuerzos en la junta soldada para encontrar el tamaño de la garganta.

- **Análisis por carga Transversal de la junta a soldar**

Se retoma la reacción Rc obtenida de la Ec. 2.32 para calcular el esfuerzo por medio de la Ec. 2.42, en este caso Rc se representa con la letra F.

$$Esfuerzo = \frac{F}{Lh} \tag{2.42}$$

donde: F es la fuerza a la que está sometida la soldadura,

L es la longitud de la soldadura y

h es la garganta de la soldadura.

La longitud a soldar coincide con las dimensiones del tubo de perfil cuadrado, el cual es de 0.0254 m. Al sustituir estos datos en la Ec. 2.42 se obtiene una relación entre los esfuerzos y la altura de la garganta de la soldadura.

$$\sigma = \frac{263.88}{(0.0254)h}$$

$$\sigma = \frac{10388.98}{h} \quad \text{Esfuerzo normal}$$

$$\tau = \frac{10388.98}{h} \quad \text{Esfuerzo cortante.}$$

A continuación, se aplica la ecuación del Círculo de Mohr (ver, Ec. 2.43), para encontrar el esfuerzo máximo y mínimo.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma}{2} \right)^2 + \tau^2 \right]^{1/2} \quad (2.43)$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{10388.98}{2h} \pm \left[\left(\frac{10388.98}{2h} \right)^2 + \left(\frac{10388.98}{h} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_1 = \frac{16809.72}{h} \text{ y } \sigma_2 = -\frac{6420.74}{h}$$

Al aplicar la teoría del esfuerzo cortante máximo TECM (ver, Ec. 2.44), se encuentra el valor de la altura de la garganta.

$$\frac{S_y}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (2.44)$$

$$250 \times 10^6 = \frac{16809.72 - (-6420.74)}{h}$$

$$h = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$h = 0.09 \text{ mm} \quad \text{Valor mínimo.}$$

El valor mínimo de la garganta es 0.09 mm, por lo tanto, entre mayor sea la altura de la garganta, la unión es más resistente.

2.5. MAQUINADO CNC DEL ELECTRODO

La fabricación del electrodo de cobre electrolítico será por medio de una máquina CNC, con la cual se dará la forma de la punta del electrodo.

La simulación del maquinado se realizó por medio del software WinUnisoft con el que se simula una máquina CNC de una fresadora, la fresa a utilizar es una de 3/16 pulg de diámetro por 3 pulg de largo (ver, Fig. 2.32).

Código de simulación

N010 F100 S100 (se define la velocidad de giro del husillo y velocidad de avance)

N020 M06 T0.0 (se selecciona la herramienta)

N030 G00 X-2.5 Y-5.73 Z5 (posicionamiento rápido a las coordenadas de inicio)

N040 G00 Z-12 (se defina la profundidad deseada)

N050 G01 X-0.125 Y-0.25 (interpolación lineal, inicio)

N060 G02 X0.125 R0.25 (interpolación circular en sentido antihorario)

N080 G01 X2.5 Y-5.73 (interpolación lineal, final)

N090 G00 Z10 (posicionamiento rápido elevando la herramienta)

N100 G00 X-2.5 Y0 (posicionamiento rápido a un punto alejado de la pieza)

N110 M30 (fin del programa)

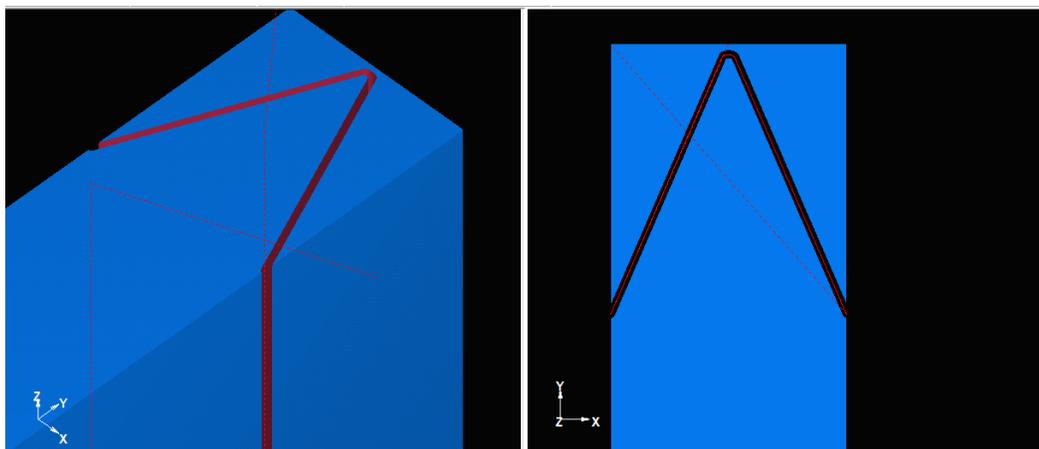


Fig. 2.32. Representación de la programación CNC para la punta del electrodo.

Con este programa se podrá afilar la punta del electrodo cuando esta se desgaste o se deforme por la acción del maquinado que se realiza.

3. SISTEMA DE CONTROL Y FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA EDM

En este capítulo se seleccionan los dispositivos electrónicos que conforman toda la etapa de control, es decir, dispositivos como el tipo de placa de control con la cual se logra manipular el movimiento del motor, los sensores, relés, la fuente que alimenta al motor, entre otros. Además, se hace una explicación del funcionamiento de la máquina y el funcionamiento del programa.

3.1. ELECCIÓN DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS

En esta sección se detallan y describen los elementos seleccionados, su funcionamiento y especificaciones, así:

A) Sensor de proximidad tipo inductivo:

Los sensores de proximidad inductivos detectan la presencia de objetos conductores (metálicos) y tienen un rango de detección que depende del tipo de metal detectado. Estos sensores funcionan con un campo magnético de alta frecuencia generado por una bobina en un circuito de oscilación. Un objetivo conductor que se acerca al campo magnético tiene una inducción o corriente de Foucault inducida en él, creando un campo magnético opuesto que reduce efectivamente la inductancia del sensor inductivo. El proyecto implementa un sensor inductivo ubicado en el soporte de la prensa porta electrodo.

Se escoge un sensor inductivo modelo LJ8A3-2-Z/BY (ver, Fig. 3.1) debido a su alta durabilidad y la capacidad de resistir a la influencia de líquidos, es importante tener en cuenta este aspecto ya que el líquido dieléctrico puede llegar a tener contacto con dicho sensor y de esta manera se va a evitar averías o cortos circuitos.

Las especificaciones del sensor LJ8A3-2-Z/BY son:

- Rosca: M8;
- Paso de la rosca 1 mm;

- Distancia detección: 2 mm;
- Voltaje: 6-36 VDC;
- Cableado: (Alimentación o positivo (marrón), tierra o negativo (azul) y señal (negro));
- Cantidad de pines: 3;
- Longitud total de la rosca: 40 mm; y
- Configuración de salida: PNP (normalmente abierto) [33].



Fig. 3.1. Sensor inductivo tipo PNP, cable marrón positivo, azul negativo y negro señal [33].

B) Sensor óptico

Un sensor fotoeléctrico emite un haz de luz (visible o infrarrojo) desde su elemento emisor de luz. Existen dos tipos el sensor fotoeléctrico de tipo reflectivo, que se utiliza para detectar el haz de luz reflejado desde el objeto (ver, Fig. 3.2), y el sensor de tipo haz de barrera, que se utiliza para medir el cambio en la cantidad de luz causado por el objeto al cruzar el eje óptico (ver, Fig. 3.3), el proyecto implementa dos sensores de tipo haz de barrera, uno se ubica en el reservorio y el otro sobre la cremallera.

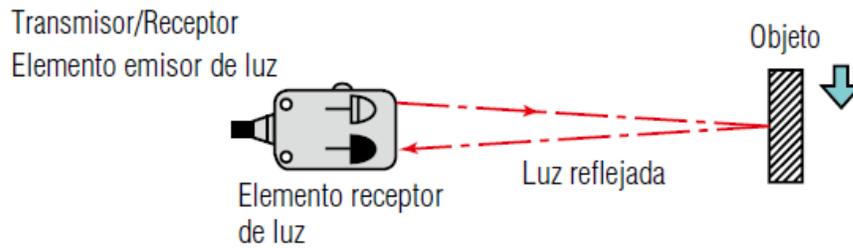


Fig. 3.2. Modelo reflectivo: Tanto el emisor de luz como los elementos receptores están contenidos en una sola carcasa. El sensor recibe la luz reflejada desde el objeto [34].

Se elige un sensor H21A1 (ver, Fig. 3.4) el cual consiste en un diodo emisor de infrarrojos de arseniuro de galio acoplado con un fototransistor de silicio en una carcasa de plástico. El sistema de embalaje es diseñado para optimizar la mecánica resolución, eficiencia de acoplamiento, luz ambiental rechazo, costo y confiabilidad. La brecha que proporciona la camisa del sensor sirve como un medio para interrumpir la señal con un material opaco, cambiando la salida de un estado "ENCENDIDO" a un estado "APAGADO". El diseño del sensor permite ser colocado tanto en el reservorio como en el riel de manera que permita detectar las pestañas dispuestas en la cremallera [35].

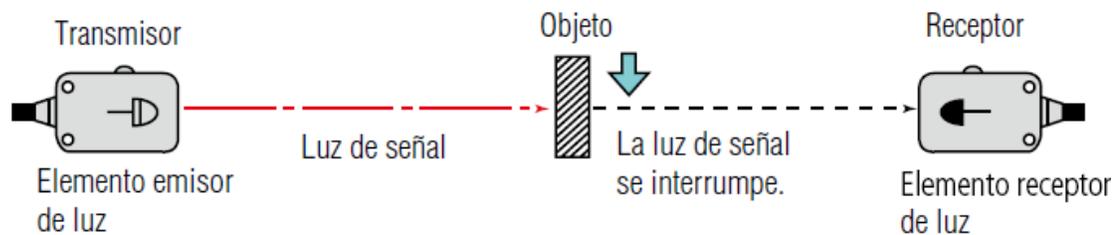


Fig. 3.3. Modelo tipo barrera: el transmisor y el receptor están separados. Cuando el objeto se encuentra entre el transmisor y el receptor, se interrumpe la luz [34].

Características principales del sensor H21A1:

- Voltaje de activación: 5 – 24 V DC.
- Conector: 4 líneas
- Distancia de detección: 3 mm
- Peso: 16.5 g
- Configuración: PNP (ver, Tabla 3.1) [35].

Tabla 3.1. Configuración de pines del sensor óptico H21A1 [35].

Número de pin	Función
1	Ánodo
2	Cátodo
3	Colector
4	Emisor

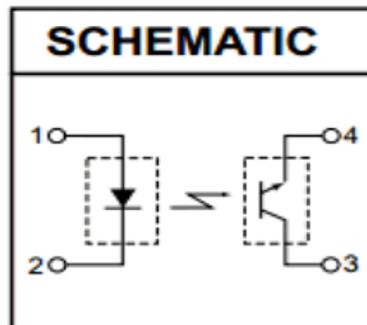
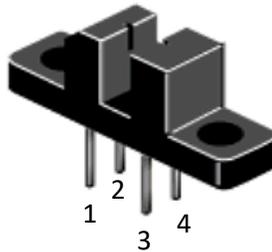


Fig. 3.4. Sensor H21A1 con su esquema electrónico [35].

C) Módulo

El módulo permite controlar el sentido y velocidad de giro de motores mediante señales TTL que se pueden obtener de microcontroladores y tarjetas de desarrollo como Arduino, Raspberry Pi o Launchpads de Texas Instruments. El control de las rpm de un motor paso a paso se realiza mediante la librería <Stepper.h> la cual tiene incorporado el comando motor.step (206), en este caso tiene programado 206 pasos de motor, el cual sirve para indicar la cantidad de pasos que se debe mover el motor y el comando motor.setSpeed (80), que sirve para programar las rpm del motor, en este caso gira a 80 rpm.

Se selecciona un módulo L298N o mejor llamado puente H (ver, Fig. 3.5), el driver L298N es un puente H Dual, permite controlar el giro y la velocidad de 2 motores DC de hasta 2 A o un Motor paso a paso bipolar [36].

Tiene integrado un regulador de voltaje LM7805 de 5 V encargado de alimentar la parte lógica del L298N, el uso de este regulador se hace a través de un Jumper y se puede usar para alimentar la etapa de control.

Especificaciones técnicas:

- Chip: L298N
- Canales: 2 (soporta 2 motores DC o 1 motor PAP)
- Voltaje lógico: 5 V
- Voltaje de potencia (V motor): 5 V – 35 V DC
- Consumo de corriente (lógico): 0 a 36 mA
- Capacidad de corriente: 2 A (picos de hasta 3 A)
- Potencia máxima: 25 W
- Dimensiones: 43 x 43 x 27 mm
- Peso: 30 g [36].

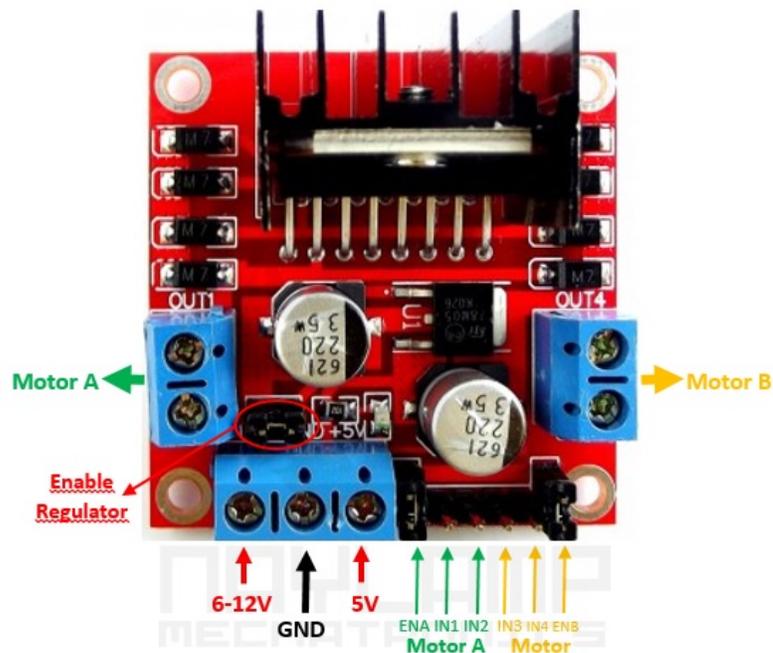


Fig. 3.5. Definición de pines del driver para controlar un motor paso a paso NEMA 14 o NEMA 17 [36].

D) Motor

Se selecciona un motor paso a paso NEMA 17 (ver, Fig. 3.6), tiene un buen torque para aplicaciones de movimiento preciso, posee 6 pines y un gran tamaño capaz de mover cargas axiales grandes. Un motor paso a paso puede movilizar cargas con alta precisión y de tamaño considerablemente grande con acoples axiales. Los motores NEMA 17 son altamente utilizados en máquinas de control numérico por computadora (CNC) o impresoras 3D que requieran el desplazamiento preciso de sus respectivos ejes [38].

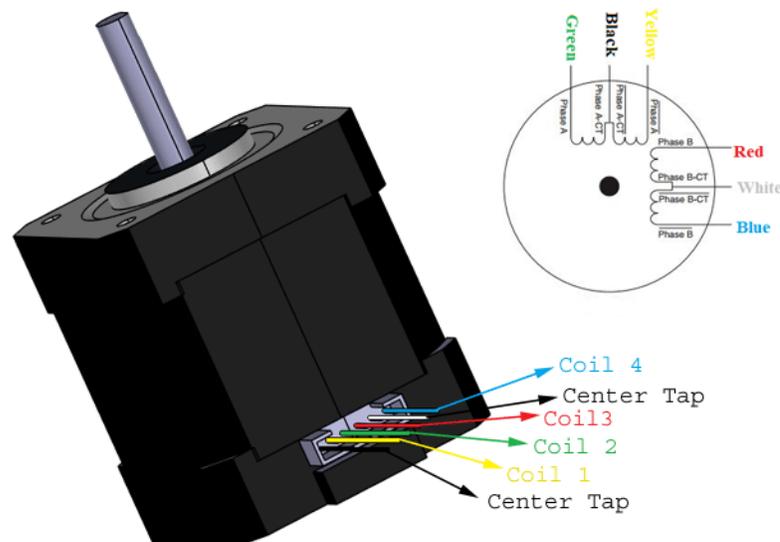


Fig. 3.6. Pines de motor NEMA 17 monofásico [38].

Para el caso del proyecto las líneas negra y blanca quedan sueltas, debido a que se utiliza la bobina completa, para el motor NEMA 17, una bobina se conforma por los cables amarillo y verde, y la segunda bobina se conforma por los cables azul y rojo.

Especificaciones del motor paso a paso NEMA 17

- Voltaje de trabajo: 12 V
- Corriente por fase: 0.67 A ~ 2 A
- Torque: 0.3 N·m ~ 0.77 N·m
- Ángulo de paso: 1.8° [38].

E) Relé

Se define como un interruptor eléctrico que permite el paso de la corriente eléctrica cuando está cerrado e interrumpirla cuando está abierto, pero que es accionado eléctricamente, no manualmente.

El relé está compuesto de una bobina conectada a una corriente. Cuando la bobina se activa produce un campo electromagnético que hace que el contacto del relé que está normalmente abierto se cierre y permita el paso de la corriente por un circuito, por ejemplo, encender una lámpara o arrancar un motor. Cuando no se suministra corriente a la bobina, el campo electromagnético desaparece y el contacto del relé se vuelve a abrir, dejando sin corriente el circuito eléctrico que iba a esa lámpara o motor [37].

El proyecto emplea un relé de 3 amperios y 30 voltios de corriente directa a la entrada (ver, Fig. 3.7), es decir que la bobina se activa con cualquier valor entre ese rango, como la tarjeta de Arduino entrega 5 V no hay ningún problema, el interruptor que incorpora el relé permite manipular el voltaje proveniente de la fuente de laboratorio de 60 V, la cual se conecta con el electrodo y la pieza, el relé es controlado por medio del pin 13 del Arduino (ver, Fig. 3.8).



Fig. 3.7. Relé de 5 A y 125 V.

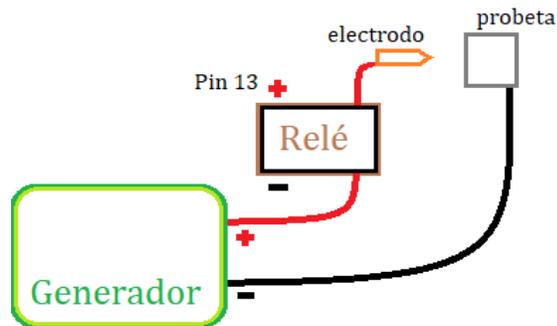


Fig. 3.8. Configuración del relé que controla el paso de corriente hacia el electrodo.

3.2. SISTEMA DE CONTROL

Este se encarga de controlar los movimientos de la máquina por medio de una placa de Arduino, que mandará señales al motor por medio de la programación y los sensores conectados.

3.2.1. CONFIGURACIÓN ELECTRÓNICA DE LA ETAPA DE CONTROL

La programación en Arduino anaranjado (ver, Fig. 3.9) cuenta con un relé encargado de permitir el paso de corriente desde el generador hacia el electrodo, la chispa producida mediante el proceso electroerosivo se representa mediante la activación del led pulsadores los cuales simulan a los sensores (ópticos e inductivos), esto debido al hecho que un sensor es un dispositivo electrónico que se encarga de enviar una señal, por lo tanto, la señal puede ser enviada a través de un pulsador, el cual es mecánico, ya que Arduino solo detecta un 1 lógico o un cero lógico. También cuenta con un botón de paro de emergencia, servirá para apagar el motor y a su vez apagar el relé, esto con el fin de evitar algún accidente, Se ocupa un circuito integrado L298N el cual se llama puente H, su función es simple pero primordial, se encarga de permitir el intercambio de voltaje en su interior de esa manera es posible controlar la dirección en que gira el motor.

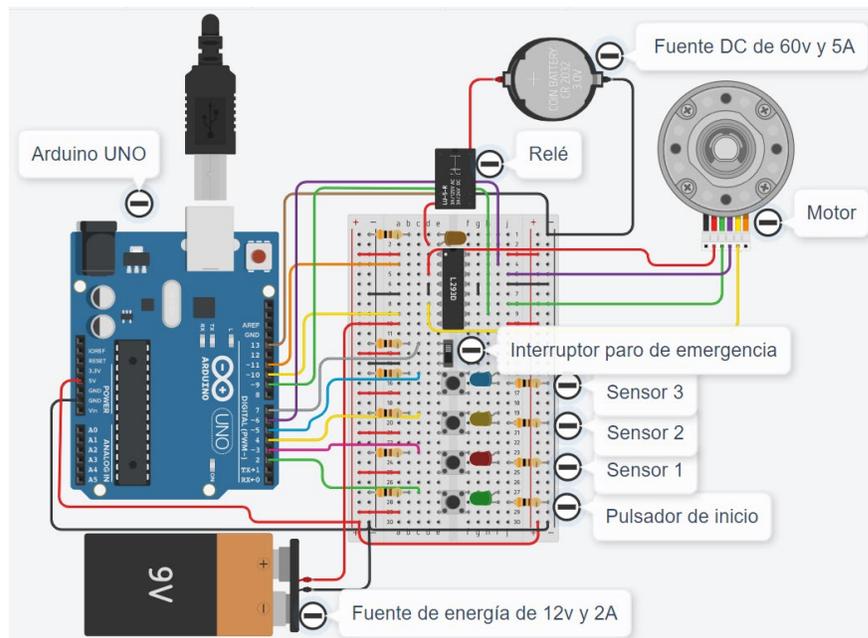


Fig. 3.9. Configuración de los componentes controlados por el Arduino.

Los diagramas electrónicos de la etapa de control se observan en la Fig. 3.10 y la descripción de cada elemento que aparece en dicha figura se pueden observar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Componentes implicados en el diagrama electrónico.

Nombre	Componente	Descripción
U1	Arduino Uno R3	Placa que almacena las ordenes previamente programadas.
U2	H-bridge Motor Driver L293D	Controla la dirección de giro del motor.
SPUSH START	Botón de pulso	Botón de inicio.
SSENSOR A	Botón de pulso	Botón que simula el sensor 1.
SSENSOR B	Botón de pulso	Botón que simula el sensor 2.
SSENSOR C	Botón de pulso	Botón que simula el sensor 3.
R1 a R10	resistencias	Elemento electrónico.
D1 a D5	Diodos LED	Diodos para controlar visualmente las etapas.
SSTOP	Interruptor	Botón de paro de emergencia.
BATGENERATOR	Batería de 3V	Simula el generador que provoca la chispa del proceso electro-erosivo.
KRELE	Relé SPDT	Permite controlar el paso de energía hacia la chispa.
BAT1	12 V Batería	Simula la fuente de poder que energiza al motor.
MMOTOR	Step Motor	Motor paso a paso de 12 V.

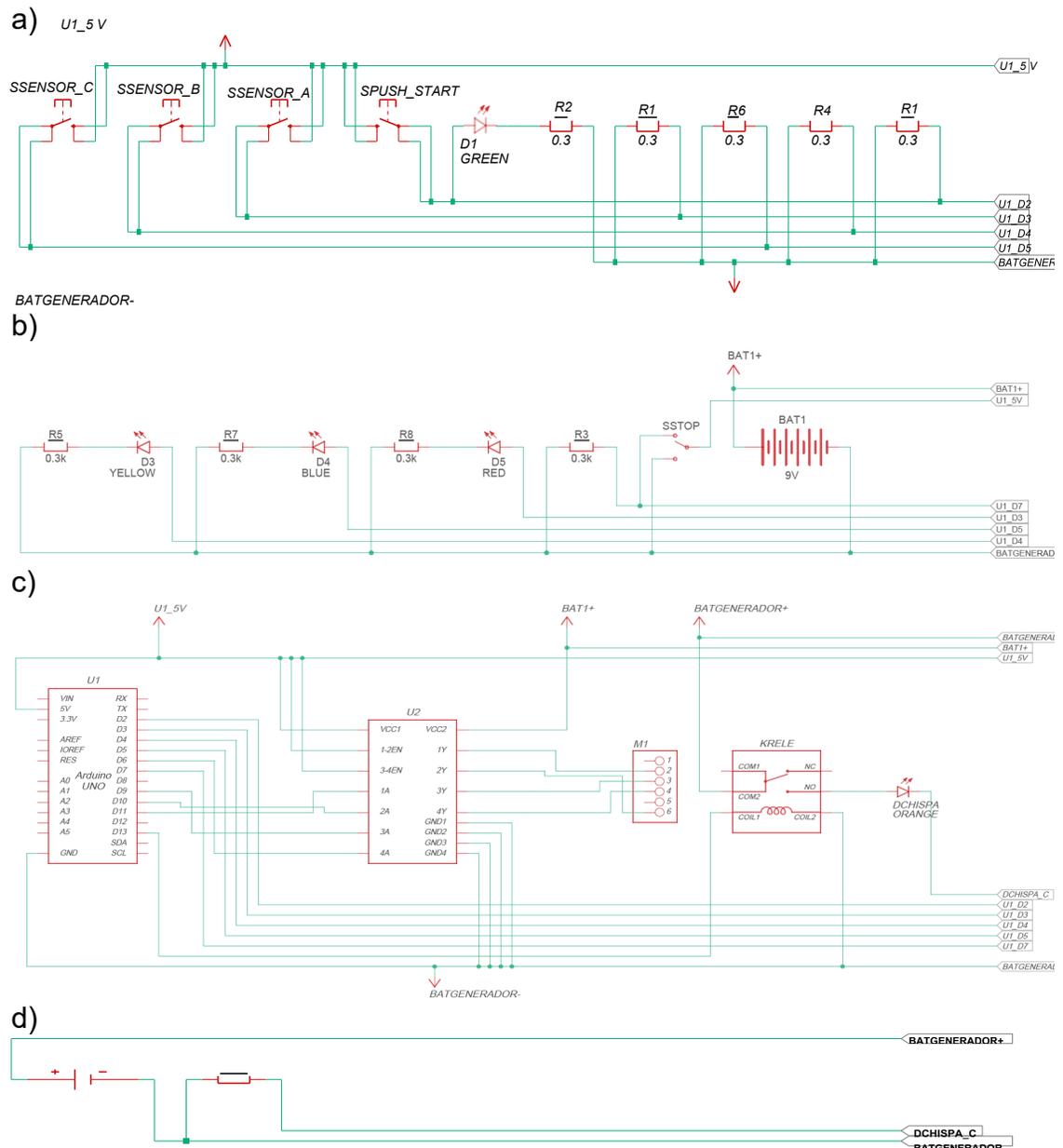


Fig. 3.10. Diagramas electrónicos de la etapa de control: a) diagrama de sensores y botón de inicio; b) diagrama de botón de paro de emergencia; c) diagrama del Arduino, motor paso a paso, relé y puente H; y d) diagrama de la fuente de 60 V.

3.2.2. CANTIDAD DE PASOS DEL MOTOR

El motor paso a paso es NEMA 17 el cual tiene un ángulo de paso de 1.8° , lo que quiere decir que para realizar una vuelta completa de 360° son necesarios 200 pasos, sin embargo, para programar la cantidad de pasos que debe dar el motor es necesario revisar el recorrido (ver, Fig. 3.11).

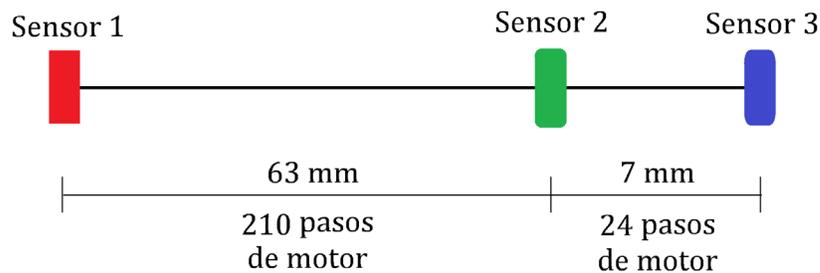


Fig. 3.11. Distancias de separación entre cada tramo de sensores.

- Cálculo de la cantidad de pasos que debe girar el motor:

Para un diámetro de piñón de 20 mm, se calcula el perímetro por medio de la Ec. 3.1.

$$P = \pi d \quad (3.1)$$

donde: d es el diámetro de paso del piñón.

$$P = \pi(20)$$

$$P = 63mm.$$

Para dar una vuelta de 360° es necesario recorrer todo el perímetro es decir los 63 mm, entonces para saber cuánto recorre un paso de 1.8° en milímetros, se hace una regla de tres, usando la Ec. 3.2.

$$\frac{\text{Perimetro}_{\text{piñón}}}{x} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} \quad (3.2)$$

$$\frac{63mm}{x} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ}$$

$$x = 0.3 \text{ mm}$$

Entonces para conocer la cantidad de pasos que se debe girar el motor para recorrer la distancia entre el sensor 1 y el sensor 2 se calcula por medio de la Ec. 3.3.

$$\text{Cantidad de pasos}_{1,2} = \frac{d_1}{x} \quad (3.3)$$

donde, d_1 es la distancia entre el sensor 1 y el sensor 2, y

x es la distancia que corresponde a los 1.8° del motor

$$\text{Cantidad de pasos}_{1,2} = \frac{63mm}{0.3 \frac{mm}{\text{paso}}}$$

$$\text{Cantidad de pasos}_{1,2} \approx 210 \text{ pasos}$$

El recorrido entre el sensor 2 y el sensor 3 se calcula mediante la Ec. 3.4

$$\text{Cantidad de pasos}_{2,3} = \frac{d_2}{x} \quad (3.4)$$

donde, d_2 es la distancia entre el sensor 2 y el sensor 3, y

x es la distancia que corresponde a los 1.8° del motor

$$\text{Cantidad de pasos}_{2,3} = \frac{7 \text{ mm}}{0.3 \frac{mm}{\text{paso}}}$$

$$\text{Cantidad de pasos}_{2,3} \approx 24 \text{ pasos}$$

Con los valores obtenidos en Ec. 3.3 y Ec. 3.4 se programa la cantidad de pasos que debe dar el motor para realizar el recorrido, de este modo el movimiento de la cremallera va a estar restringido por la cantidad de pasos y por la activación de los sensores.

3.2.3. PROGRAMACIÓN DE LA PLACA ARDUINO UNO

En esta sección se presenta el código a utilizar en la placa de Arduino para controlar el movimiento del motor a partir de las señales que reciba de cada sensor.

```
// C++ code
#include<Stepper.h>//Librería del motor paso a paso
#define STEPS 200//Número de pasos para dar una vuelta
//ponemos nombre al motor, el número de pasos y los pins de control
Stepper motor (STEPS, 11, 9, 10, 6);

//DEFINICION DE BOTON START (PUSH), BOTON STOP Y DEFINICION DE
//SENSORES
#define push 2
#define sena 3
#define senb 4
#define senc 5
#define stop 7
#define Rele 13

int statusPush;//GUARDA EL VALOR QUE LEE EL BOTON DE START
int statusSena;//GUARDA EL VALOR QUE LEE EL SENSOR 1
int statusSenb;//GUARDA EL VALOR QUE LEE EL SENSOR 2
int statusSenc;//GUARDA EL VALOR QUE LEE EL SENSOR 3
int status=0;//PERMITE QUE LA PROGRAMACION SEA SISTEMATICO
int statusStop;//GUARDA EL VALOR DEL BOTON DE PARO DE EMERGENCIA
int estado=1;
int activated=1;
```

```

void setup()
{
//DECLARACION DE VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA
Serial.begin(9600);//INICIALIZACION DEL PUERTO SERIAL
pinMode(push, INPUT);
pinMode(sena, INPUT);
pinMode(senb, INPUT);
pinMode(senc, INPUT);
pinMode(Rele, OUTPUT);
}
void loop()
{
//AVANCE DE LA CREMALLERA EN SENTIDO POSITIVO
Serial.println(digitalRead(push));
statusPush=digitalRead(push);
if(statusPush==HIGH){
if(status==0){
motor.step(199);//Cantidad de pasos para llegar al sensor 2
motor.setSpeed(80);//rpm en 80
delay(100);//pequeña pausa
status=1;
estado=1;
activated=0;
}
}
Serial.println(digitalRead(senb));
statusSenb=digitalRead(senb);
if(statusSenb==HIGH){
if(status==1){
if(estado==1){
motor.step(21);// cantidad de pasos para llegar a sensor 3

```

```

motor.setSpeed(1);//rpm en 5
delay(100);//pequeña pausa
digitalWrite(Rele, HIGH);//Se activa la chispa
status=2;
estado=1;
activated=0;
}
}
}
//SE DETIENE EL MOTOR Y AVANCE DE LA CREMALLERA EN SENTIDO
NEGATIVO
Serial.println(digitalRead(senc));
statusSenc=digitalRead(senc);
if(statusSenc==HIGH){
if(status==2){
motor.step(0);// cantidad de pasos
motor.setSpeed(0);//rpm en 0
delay(100);//pequeña pausa
digitalWrite(Rele, HIGH);
status=3;
estado=1;
activated=0;
delay(2000);
digitalWrite(Rele, LOW);
motor.step(-21);// cantidad de pasos para volver al sensor 2
motor.setSpeed(50);//rpm en 50 (sentido contrario)
delay(100);//pequeña pausa
status=3;
estado=1;
activated=0;
}
}
}

```

```

}
Serial.println(digitalRead(senb));
statusSenb=digitalRead(senb);
if(statusSenb==HIGH){
if(status==3){
motor.step(-199);//Cantidad de pasos para llegar al sensor 1
motor.setSpeed(80);//rpm en 80 (sentido contrario)
delay(100);//pequeña pausa
status=4;
estado=1;
activated=0;
}
}
Serial.println(digitalRead(sena));
statusSena=digitalRead(sena);
if(statusSena==HIGH){
if(status==4){
if(estado==1){
motor.step(0);// cantidad de pasos
motor.setSpeed(0);//rpm en 0
delay(100);//pequeña pausa
status=0;
estado=0;
activated=1;
}
}
}
Serial.println(digitalRead(stop));
statusStop=digitalRead(stop);
if(statusStop==HIGH){
if(estado==1){

```

```

motor.step(0);// cantidad de pasos
motor.setSpeed(0);//rpm en 0
delay(500);//pequeña pausa
digitalWrite(Rele, LOW);
estado=2;
}
}
Serial.println(digitalRead(stop));
statusStop=digitalRead(stop);
if(statusStop==LOW){
if(estado==2){
if(activated==0){//sensor a no ha sido activado
motor.step(-220);// cantidad de pasos
motor.setSpeed(80);//rpm en 80
delay(100);//pequeña pausa
digitalWrite(Rele, LOW);
estado=1;
status=4;
activated=1;
}
}
}
Serial.println(digitalRead(stop));
statusStop=digitalRead(stop);
if(statusStop==LOW){
if(estado==2){
if(activated==1){//sensor a si ha sido activado
motor.step(0);// cantidad de pasos
motor.setSpeed(0);//rpm en 80
delay(100);//pequeña pausa
digitalWrite(Rele, LOW);

```

```
estado=1;
status=0;
}
}
}
delay(150);
}
```

3.3. FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN

El funcionamiento es relativamente simple, la máquina se constituye básicamente por dispositivos electrónicos, tales como, sensores, motores y la placa de Arduino UNO, con la programación adecuada del Arduino, la máquina será capaz de realizar el proceso de electroerosión de manera controlada.

El funcionamiento de la máquina por electroerosión se divide en dos etapas las cuales son: el avance de la cremallera en sentido positivo y el avance de la cremallera en sentido negativo.

A) Avance de la cremallera en sentido positivo.

El carnero encuentra su posición inicial cuando el sensor 1 está detectando a la pestaña inferior que posee la cremallera, luego de eso cuando el operario presione el pulsador de inicio, este envía la señal al Arduino UNO para que el motor comience a girar transmitiendo su torque a través de un piñón, el cual está conectado directamente con un engrane conducido, dicho engrane se encarga de reducir las revoluciones en un 30%, y sus dientes transmiten la potencia directamente a la cremallera, de esta manera se convierte el movimiento rotacional del motor a movimiento traslacional, la cremallera recorre una distancia de 62.5 mm (ver, Fig. 3.11) con una velocidad en el eje del motor de 80 rpm,

hasta encontrar el sensor 2 (el cual se encuentra colocado en el ángulo chapa $\frac{1}{4}$ pulg), en ese momento cuando el sensor 2 detecte la pestaña superior dispuesta sobre la cremallera, el motor reducirá sus revoluciones hasta 1 rpm porque el proceso de electroerosión está a punto de suceder, además el Arduino se encarga de enviar la señal para activar la bobina del relé, dicho relé se encarga de permitir el paso de corriente del generador al electrodo, luego la cremallera continua avanzando lentamente una distancia de 6.5 mm (ver, Fig. 3.11) hasta alcanzar el sensor 3 (el cual se encuentra dispuesto en la prensa del porta probeta), el sensor 3 se encarga de enviar la señal al Arduino para que el motor detenga su movimiento y este a su vez, se encarga de mandar la señal al relé para que desactive la energía en la bobina (el relé se pone en estado normalmente abierto), de esta manera se desconecta la energía que llega al electrodo, finalmente la programación en Arduino hace que el motor comience a girar en sentido opuesto con una velocidad de rotación en el eje del motor de 25 rpm, con el fin de retirar la presencia del electrodo sobre la probeta.

B) Avance de la cremallera en sentido negativo.

Una vez q el sensor 3 ha enviado la señal al Arduino UNO, este detiene la revolución del motor, dejando así que el electrodo se mantenga en su posición final por alrededor de 2 s (tiempo de retraso programado en el Arduino), pasado este tiempo el Arduino envía la señal al relé para que desconecte la bobina y de esta manera cortar el paso de energía hacia el electrodo, finalizando con esto el proceso electroerosivo, ahora el motor comienza a girar en sentido opuesto, luego el sensor 2 detecta a la pestaña superior de la cremallera enviando la señal al Arduino para que sea este quien aumente las revoluciones del motor hasta 80 rpm, con el propósito de que la cremallera terminé de regresar más rápido a su posición inicial (que es cuando el sensor 1 se encuentra detectando la presencia de la pestaña inferior de la cremallera), ahora la cremallera se encuentra en su posición inicial, y se encuentra lista para iniciar un nuevo ciclo de electroerosión, en este momento la máquina se encuentra a la espera de que el operario vuelva

a pulsar el botón de inicio y así enviar nuevamente la señal para volver a realizar todo el proceso antes descrito (ver, Fig. 3.12).

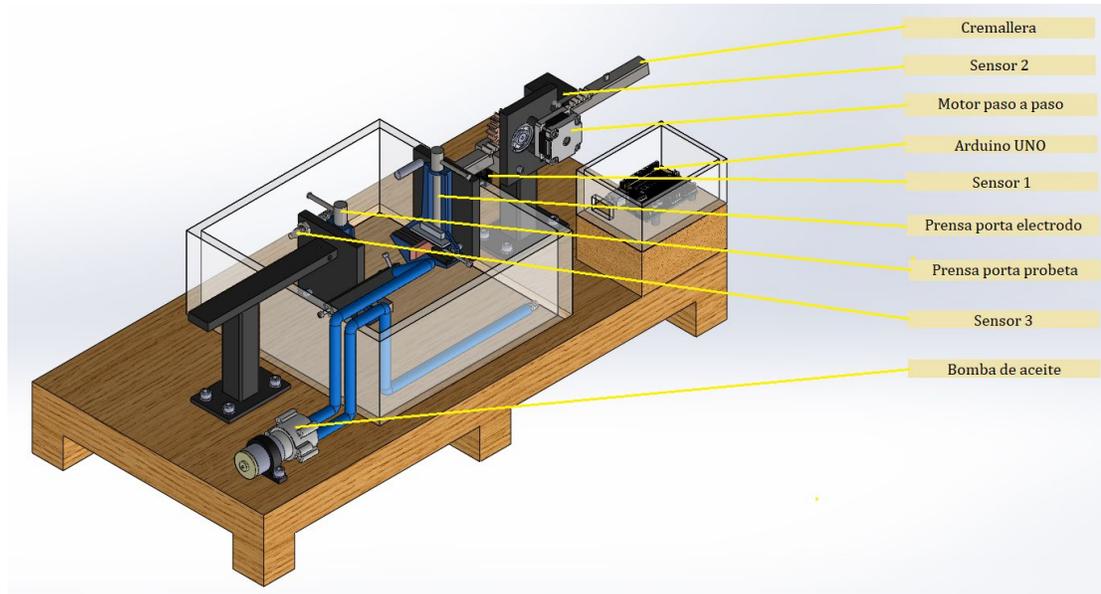


Fig. 3.12. Ubicación física de los componentes principales de la máquina. El sensor 1 es fotoeléctrico, el sensor 2 es fotoeléctrico, el sensor 3 es inductivo.

C) Interruptor de paro de emergencia.

La máquina de electroerosión cuenta con la programación de un interruptor de pánico o de paro de emergencia, el cual se encarga de cortar el paso de energía a todos los activadores electrónicos, evitando así cualquier clase de accidente, posteriormente al desactivar el interruptor, la cremallera busca su posición inicial.

4. FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

El estudio de factibilidad es un instrumento que sirve para orientar la toma de decisiones en la evaluación de un proyecto y corresponde a la última fase de la etapa preoperativa o de formulación dentro del ciclo del proyecto. Se formula con base en información que tiene la menor incertidumbre posible para medir las posibilidades de éxito o fracaso de un proyecto de inversión, apoyándose en él se tomará la decisión de proceder o no con su implementación [43].

El estudio de factibilidad puede concluir en uno de dos resultados posibles: el abandonar el proyecto por no encontrarlo suficientemente viable, conveniente u oportuno; o el mejorarlo, elaborando un diseño definitivo, teniendo en cuenta las sugerencias y modificaciones que surgirán debido a estudios posteriores ya que la base de este trabajos de graduación es puramente investigativa. En consecuencia, los objetivos de cualquier estudio de factibilidad se pueden resumir en los siguientes términos:

- Verificación de la existencia de una necesidad no satisfecha.
- Demostración de la viabilidad técnica y la disponibilidad de los recursos humanos, materiales, y financieros.
- Corroboración de las ventajas desde el punto de vista financiero, económico, social o ambiental de asignar recursos hacia la producción de un bien [43].

Todo proyecto por desarrollar requiere de un previo estudio para determinar si el mismo es factible o no. En la actualidad se realizan diversos estudios que posibilitan tomar las decisiones acertadas sobre si una actividad se debe realizar. El estudio de factibilidad se realiza generalmente al inicio de un proyecto de desarrollo, durante el análisis específicamente. Lo más común es realizarlo una vez que se conoce el problema a resolver, medir el tamaño de este, saber con qué recursos se disponen: personal, tiempo y dinero [42].

Una vez que se tiene la información económica necesaria para evaluar los proyectos de una empresa, es preciso decidir por uno de los tantos que se pueden llevar a cabo al mismo tiempo, y para esto es necesario una forma de evaluar financieramente cada proyecto que se pretende realizar. La evaluación

de un proyecto busca presentar un ordenamiento de preferencias entre las distintas alternativas sobre la base de conceptos financieros por la importancia indiscutible del dinero hoy y siempre.

Desde hace ya muchos años la evaluación económica financiera se ha convertido en un análisis fundamental a la hora de evaluar la conveniencia o no de ejecutar cualquier proyecto.

El presente capítulo tiene por propósito principal el determinar la factibilidad técnica y económica, la factibilidad técnica se refiere a la viabilidad del diseño y materiales que han sido seleccionados en el capítulo anterior, con el fin de justificar la selección de estos, por otra parte, la factibilidad económica se refiere a la viabilidad de poner en marcha el proyecto, es decir analizar si resulta económicamente viable la construcción la máquina.

4.1. FACTIBILIDAD TÉCNICA

Antes de abordar de lleno el capítulo se va a dar una pequeña descripción de lo que es la factibilidad técnica, la cual determina si se dispone de los conocimientos, habilidades, equipos o herramientas necesarios para llevar a cabo los procedimientos, funciones o métodos involucrados en un proyecto. De esta forma, permite conocer si es factible (realizable) un proyecto con los recursos técnicos existentes o ampliando estos si fuera necesario [39].

En lo que respecta a este trabajo de graduación, se evalúa la construcción o fabricación de piezas que serán de importancia para la máquina, dentro de las múltiples posibilidades y características con la que puede contar una máquina inyectora de plásticos que se ofrecen en el mercado. Existen características con el rotulo de “requerimiento”, es decir que son completamente necesarios y no son negociables. Y otras características con el rotulo de “deseable”, es decir que no son indispensables, pero serian un valor agregado adicional a lo esperado y podría influir positivamente en la evaluación del equipo y en las tomas de decisiones (ver, Tabla 4.1).

Entre los objetivos de la factibilidad técnica están: saber si se cuenta con las herramientas necesarias para la fabricación de la máquina, si los materiales a utilizar se consiguen en el mercado nacional o se tienen que exportar y si se cuentan con los conocimientos y habilidades técnicas para la fabricación de la máquina.

Tabla 4.1. Elementos que comprenden la máquina.

Elemento	Características	Requerimiento	Deseable
Mesa	Madera		x
Electrodo	Cobre electrolítico	x	
Reservorio	Acrílico		x
Bastidor Porta probeta	Hierro dulce		x
Bastidor Porta electrodo	Hierro dulce		x
Cremallera	Acero SAE 1020		x
Piñón	Acero SAE 1045		x
Engrane conducido	Bronce fosfórico		x
Prensas	Aluminio	x	
Motor	Paso a paso	x	
Bomba	Externa		x
Filtro	Aceite	x	

Ya teniendo definido esos parámetros se evalúa si la fabricación de la máquina es factible y también se podrá evaluar si vale la pena la inversión para realizar las muescas sobre la probeta con la máquina a construir o si sigue siendo mejor utilizar la manera actual de realizarlas.

A continuación, se describen los elementos más importantes que componen la máquina de electroerosión, en cada apartado se justifica el diseño, la selección del material y las herramientas a usar para la fabricación del elemento son:

A) Mesa

La mesa tiene como propósito principal sostener todo el equipo, es decir sobre ella descansa la etapa de control, el reservorio, la bomba de aceite, el bastidor porta probeta y el bastidor porta carnero. Sin embargo la razón principal de ocupar una mesa de madera es que se debe aislar el porta probetas del porta electrodo, debido al hecho que la madera es un excelente aislante de la corriente,

y para que el proceso de electroerosión se produzca de manera efectiva es necesario que la corriente que pasa entre el electrodo y la pieza no se disipe en calor ni mucho menos por la producción de un corto circuito, ya que si la mesa fuera de acero, las probabilidades de provocar un corto circuito se ven incrementadas y esto puede no solo provocar el fallo de todo el mecanismo dejándolo obsoleto sino que también puede provocar un accidente en el que puede involucrar incluso vidas humanas, ya que solo hacen falta 75 mA para causar fibrilación ventricular (el generador produce hasta 5 A) por lo tanto una mesa de madera al tener una alta resistencia al paso de la corriente, la probabilidad de generar un corto circuito se reduce al mínimo. Ahora bien, desde el punto de vista económico es mucho más barato producir una mesa de madera que una mesa de acero, en términos de diseño la madera posee una cuna que se encarga de acomodar perfectamente el reservorio, esto con el fin de evitar que el reservorio se pueda mover accidentalmente y así evitar que se derrame el líquido dieléctrico o incluso la interrupción abrupta del proceso, a su vez la base de los bastidores también poseerá su propia cuna respectivamente, además la mesa posee un alza que sirve para elevar el sistema de control, de esta manera se evita que la placa de Arduino pueda tener contacto con el líquido dieléctrico en caso de derrame (ver, Fig. 4.1). Las dimensiones de la mesa se pueden corroborar en el plano de detalle C4.

Para la fabricación de la mesa de madera es necesario contar con una sierra de calar para cortar la mesa a la medida, un taladro eléctrico y una broca para madera de diferentes diámetros para generar los agujeros pasados, dos sargentos que servirán para sujetar la mesa, formón y maza, un metro para tomar medidas, tornillos para sujetar las patas de la mesa, pegamento para madera para pegar las patas, lijadora para pulir la superficie, formica, pegamento de contacto y un tablero de madera maciza [41].

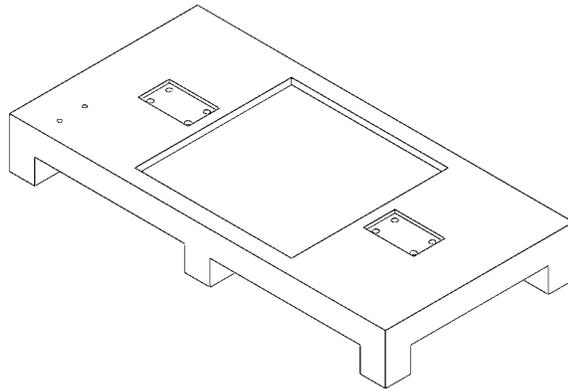


Fig. 4.1. Isométrico de la mesa de madera.

B) Reservorio

El reservorio se encarga de almacenar el líquido dieléctrico y de permitir que el fenómeno de electroerosión ocurra adentro de él, el material del reservorio es de acrílico debido a que las temperaturas en el reservorio no serán tan altas ya que parte de la temperatura se disipa en el fluido dieléctrico y además el punto de fusión del acrílico es alrededor de $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, su diseño es de $20\text{ x }20\text{ cm}$ lo que permite manipular el electrodo y la pieza con las manos del operario. En una de las paredes descansa el sensor óptico 1, encargado de la posición inicial del movimiento de la cremallera. En la pared opuesta se sujeta el soporte de la manguera de la bomba (ver, Fig. 4.2), la cual reinyecta el fluido en el proceso electro-erosivo. Las dimensiones del reservorio se pueden verificar en el plano de detalle C3.

Las herramientas a utilizar para la fabricación del reservorio de acrílico son: sierra y marco de sierra, lijas al agua para metal de diferentes medidas de granulado con el fin de conseguir un buen acabado superficial, taladro eléctrico, para unir las caras del reservorio se va a utilizar tornillos autorroscantes, también se debe colocar sellador de poliuretano para las juntas de las caras y garantizar con eso que el fluido dieléctrico no se escape del reservorio.

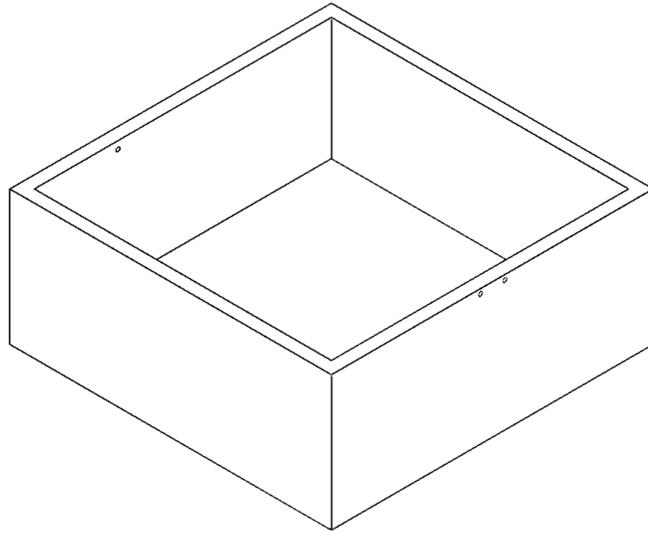


Fig. 4.2. Isométrico del reservorio de acrílico.

C) Electrodo

El electrodo está diseñado con la forma negativa de la muesca que se desea producir sobre la probeta, en este sentido el electrodo posee un diseño minimalista debido a su forma geométrica simple pero efectiva, ya que, al ser prácticamente una barra, permite sacarle punta, como si de un lápiz se tratara, es decir luego que el desgaste en el electrodo por el constante uso sea notorio, se debe de maquinar la punta para obtener las medidas requeridas iniciales para el proceso de electroerosión. El material del electrodo es de cobre electrolítico debido a su alta conductividad lo que permite asegurar la generación de chispa entre el material base y el electrodo, el electrodo cuenta con un agujero pasado que atraviesa toda su sección transversal, en el agujero se acopla un pin de cobre el cual se fija mediante presión, a dicho pin se conecta la mordaza proveniente del polo positivo de la fuente de 60 V (ver, Fig. 4.3). Las dimensiones del electrodo se pueden verificar en el plano de detalle C5.

Para la fabricación del electrodo de cobre electrolítico se va a hacer uso de una máquina tipo CNC para darle la forma deseada a un extremo de la barra de cobre con el fin de generar la punta con las medidas adecuadas (ver, Fig. 4.3).

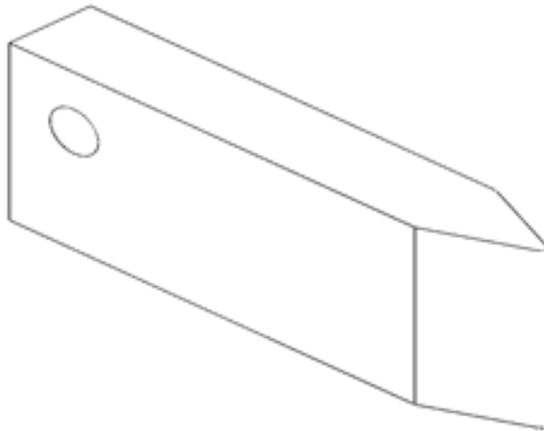


Fig. 4.3. Isométrico del electrodo de cobre, el agujero pasado del electrodo permite conectar un pin de cobre.

D) Bastidor porta probeta.

Toda la estructura del bastidor porta probeta es de hierro dulce por su alta resistencia mecánica, lo que permite asegurar que no habrá pandeos tanto en el tubo de perfil cuadrado como en el brazo, sus dimensiones han sido seleccionadas de tal manera que permita mantener fija a la prensa, la cual se encarga a su vez de sostener la probeta entre sus dientes, el tubo de sección cuadrada se encuentra soldado tanto a la base como al brazo, además la carga que se va manipular es pequeña por lo tanto no hay probabilidad de que falle debido a su sobredimensionamiento. Tanto la base, el brazo como el soporte de la prensa están hechos de chapa de hierro dulce de 3/8 pulg. En un extremo del brazo se sujeta mediante soldadura una placa de 3/8 pulg, con dos perforaciones, las cuales sirven para sujetar la prensa de aluminio, además la chapa de 3/8 cuenta con una perforación de 8 mm para colocar el sensor M8 (ver, Fig. 4.4). Las dimensiones del bastidor porta probeta se pueden verificar en el plano de subconjunto B2.

Para la fabricación del bastidor porta probeta se va a utilizar, sierra y marco de sierra para realizar los cortes del tubo de perfil cuadrado y de la chapa metálica de 3/8 pulg, taladro de banco para realizar los agujeros de las chapas, brocas para metal de diferentes medidas (6 y 8 mm), una máquina de soldadura eléctrica

para realizar las uniones entre las piezas con electrodo revestido AWS E6013, lijas al agua para metal de diferentes medidas de granulado.

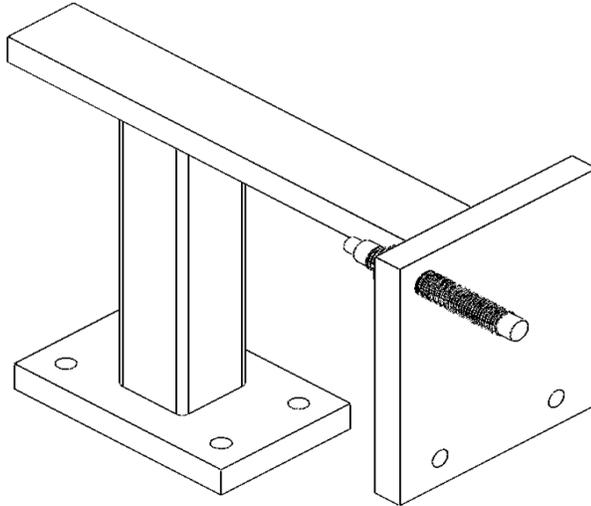


Fig. 4.4. Isométrico del bastidor porta probeta.

E) Bastidor de la cremallera

El material del bastidor de la cremallera es de hierro dulce debido a su alta resistencia mecánica, lo que garantiza que no habrá pandeos, debido al peso de la prensa ni por las vibraciones mecánicas producidas por el movimiento de la cremallera y la rotación del motor, estas últimas serán mínimas ya que el motor descansa sobre amortiguadores que se encargan de reducir las vibraciones que este puede producir a la hora de estar operando, el bastidor está constituido básicamente por un tubo de perfil cuadrado soldado a un riel de acero 1020 en su extremo superior y a una base de hierro dulce chapa 3/8 pulg, en su extremo inferior, las dimensiones han sido seleccionadas con la intención de que el riel sea capaz de sostener correctamente a la cremallera y permitir que esta deslice sobre él. A ambos costados del riel se sujetan una placa y un ángulo de hierro dulce, una sirve para sostener al motor y el ángulo sirve para sostener al sensor óptico número 2 el cual se encarga de reducir las rpm del motor (ver, Fig. 4.5). Las dimensiones del bastidor porta electrodo se pueden verificar en el plano de subconjunto B1.

Para la fabricación del bastidor de la cremallera se va a utilizar, sierra y marco de sierra para realizar los cortes de los tubos de perfil cuadrado, taladro de banco para realizar los agujeros de las piezas, brocas para metal de diferentes medidas (6 mm y 4 mm), una máquina de soldadura eléctrica para realizar las uniones entre las piezas con electrodo revestido AWS E6013, lijas al agua para metal de diferentes medidas de granulada. La ranura con sección transversal triangular del bloque de acero SAE 1020 se produce mediante maquinado por fresado utilizando fresas rectas.

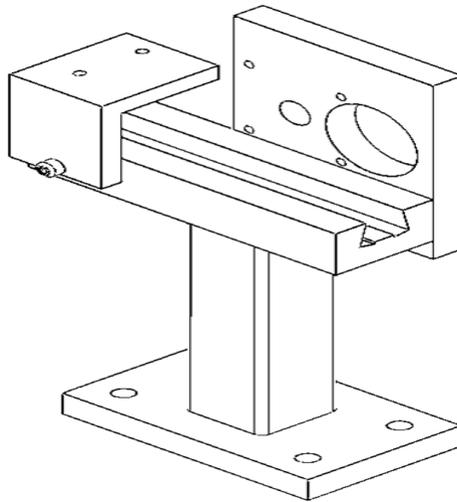


Fig. 4.5. Isométrico del bastidor porta probeta con el soporte para motor y sensor.

F) Cremallera

El material de la cremallera es acero SAE 1020 debido a su alta resistencia mecánica, lo que garantiza que no habrá pandeos debido al peso de la prensa en uno de sus extremos, el diseño del mismo se ve influenciado por las dimensiones del reservorio, es decir que, el reservorio se encarga de intermediar y separar al porta probetas del porta electrodo, entonces la distancia que debe recorrer la cremallera será la necesaria para que el electrodo alcance a la probeta, esa distancia es la longitud efectiva de la cremallera, la cual se mide desde el extremo que sostiene a la prensa hasta el borde del riel, en un extremo

de la cremallera se suelda una chapa 3/8 pulg, de hierro dulce en la cual se generan 2 agujeros para sostener a la prensa de aluminio y un agujero de 8 mm para colocar un perno de 30 mm de longitud, el cual será detectado por el sensor inductivo M8 (ver, Fig. 4.6). Las dimensiones de la cremallera se pueden verificar en el plano de detalle C2.

Para la fabricación de la cremallera, las herramientas a utilizar son: una máquina fresadora con un juego de fresas modulares (módulo 2), también se necesita una máquina de soldadura eléctrica para realizar las uniones con electrodo revestido AWS E6013. Marco de sierra con sierra para realizar el corte de la barra de acero y de la chapa, taladro con broca de 8 mm y 6 mm de diámetro.

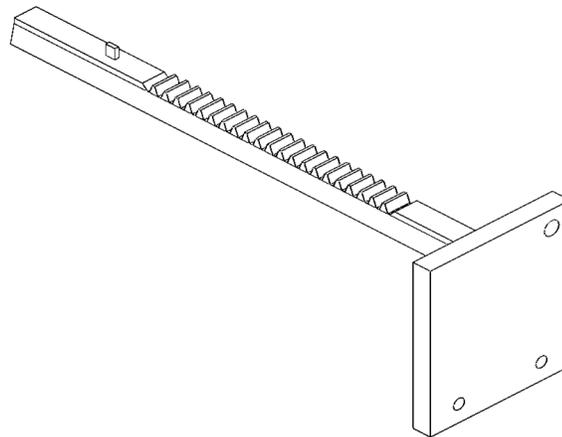


Fig. 4.6. Isométrico de la cremallera con el soporte de prensa soldado.

G)Engranajes

Los engranajes son los encargados de reducir la velocidad de salida del motor y con ellos lograr el moviendo longitudinal de la cremallera sobre el riel, el material de los engranajes es de bronce fosfórico para el engranaje conductor y de acero SAE 1045 para el piñón, ver Fig. 4.7.

Para la fabricación de los engranajes se hará uso de una fresadora convencional, utilizando un juego de fresas modulares módulo 2, debido a que

no se encontraron los engranajes de los materiales y medidas requeridas para el diseño se optó por fabricarlas.

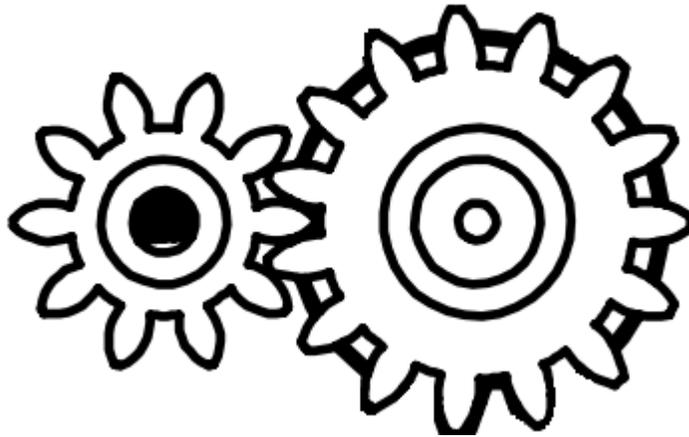


Fig. 4.7. Piñón y Engrane conductor.

H) Prensas para el electrodo y la probeta

La prensa es la misma para el electrodo y para la probeta, esto permite uniformizar el diseño. Las prensas se encontrarán todo el tiempo parcialmente sumergidas bajo un líquido dieléctrico el cual puede actuar como agente corrosivo, por tal motivo el material de las prensas es de aluminio, ya que este material tiene la presencia permanente de una capa de óxido natural constituido por alúmina (Al_2O_3) lo cual le hace pasivo a la acción del medio ambiente. La prensa que se seleccionó en el diseño es una prensa de esquinera (ver, Fig. 4.8), es necesario separarlas mediante un corte con sierra, y a su vez es necesario generar un segundo agujero de 6 mm para poder sujetar la prensa al soporte para prensa tanto del porta probeta como del porta electrodo (ver, Fig. 4.9).

Datos técnicos de la prensa:

- Fabricada en aluminio;
- Fuerza de sujeción: 400 lb;
- Ideal para trabajos en madera, aluminio y metal; y
- Apertura: 76 mm (3 pulg) [44].



Fig. 4.8. Prensa de esquinera, de aluminio [44].

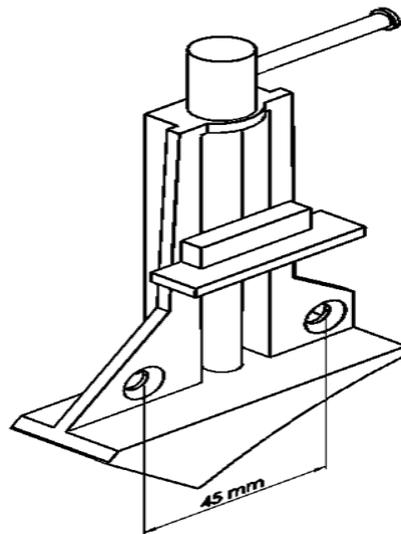


Fig. 4.9. Isométrico de la prensa de aluminio.

4.2. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

El estudio de la factibilidad económica ayuda a realizar el análisis costo-beneficio del sistema, el mismo que permitirá determinar si es factible desarrollar económicamente el proyecto.

Se refiere a los recursos económicos y financieros necesarios para desarrollar o llevar a cabo las actividades o procesos y/o para obtener los

recursos básicos que se deben considerar, por ejemplo, el costo del tiempo, el costo de la realización y el costo de adquirir nuevos recursos [42].

El análisis de factibilidad económica también conocido como viabilidad económica es el método más utilizado para determinar la eficiencia de un nuevo proyecto y poder así identificar la ganancia esperada contra la inversión de un proyecto.

El costo y el tiempo son los factores esenciales involucrados en este campo de estudio. Se evalúa el costo de desarrollo y el costo de operación. También se calcula el marco de tiempo aproximado para recibir los retornos contra la inversión, tomando en cuenta el valor futuro del proyecto.

Durante el proceso de estudio de factibilidad económica se siguen ciertas prácticas recomendadas para obtener el resultado deseado. Igualmente, se hacen ciertos supuestos sobre la base de los cuales se puede brindar un plan de inversión sólido.

El estudio o análisis de la factibilidad económica se constituye con la realización de análisis en particular, uno de estos es el análisis de mercado el cual consiste en un conjunto de actividades que tienen como objetivo crear premisas racionales para tomar decisiones por medio de datos obtenidos a través de estudios de mercado los cuales se definen como un registro momentáneo de la estructura de comportamiento del mercado en un momento y lugar específicos [40].

4.2.1. COSTOS FIJOS

El sistema de contabilidad financiera incluye cuentas de gastos que son usadas para registrar cada gasto realizado para un proyecto específico.

Los costos del proyecto relativos a materiales, subcontratos y gastos generales son de naturaleza bastante fija y el control de costos de estos tipos de gastos es llevado a cabo principalmente por el control de desembolsos relativos a las órdenes de compra y a los subcontratos.

Generalmente, estos tipos de costos son determinados con razonable exactitud durante la preparación del presupuesto y raramente tienden a variar de manera sustancial. Sin embargo, los costos de mano de obra y equipo son un asunto diferente. Estas dos categorías de gastos están caracterizadas por una incertidumbre considerable y pueden fluctuar sustancialmente durante el periodo de construcción [46].

Es imperante que se consideren todas y cada una de las partes de los sistemas que componen la máquina, ya que así se puede establecer con mayor exactitud un valor total del costo de fabricación del equipo.

Para comenzar, se presenta el listado de materias primas y piezas individuales seccionados según el sistema al que pertenecen, junto con el precio unitario de mercado correspondiente, en la cotización se agregó un porcentaje de imprevistos por los posibles cambios de precio o la no disponibilidad del producto por parte del vendedor al momento de su compra o por algún material o consumible que no haya considerado, el porcentaje de imprevisto lo a utilizar será de un 20% (ver, Tabla 4.2). Todas las cotizaciones obtenidas se adjuntan en el apartado de anexos al final del documento.

Tabla 4.2. Costos de materias primas y equipos necesarios para la construcción de una máquina electroerosión.

Descripción	Unidad	Cant.	P/U, \$	P/T, \$
Prensa esquinera 3 pulg	Unidad	1	6.15	6.15
Perno hexagonal 5/8 pulg x 3 pulg	Unidad	1	1.15	1.15
Perno hexagonal 5/8 pulg x 4 pulg	Unidad	1	1.33	1.33
Perno hexagonal 5/8 pulg x 5 pulg	Unidad	1	1.68	1.68
Perno hexagonal 5/8 pulg x 6 pulg	Unidad	1	0.35	0.35
Platina 3/8 pulg x 3 pulg	Unidad	1	57.75	57.75
Ángulo de 1/4 pulg x 1 1/2 pulg	Unidad	1	35.00	35.00
Tornillo galvanizado 5/32 pulg x 3/4 pulg	Unidad	6	0.05	0.30
Tornillo galvanizado 1/4 pulg x 2 1/2 pulg	Unidad	8	0.33	2.64
Tornillo galvanizado 3/16 pulg x 1/2 pulg	Unidad	4	0.07	0.28

Continúa.

Continuación.- Tabla 4.2. Costos de materias primas y equipos necesarios para la construcción de una máquina electroerosión.

Descripción	Unidad	Cant.	P/U, \$	P/T, \$
Platina 3/8 pulg x 2 pulg	Unidad	1	38.50	38.50
Platina 1/4 pulg x 3 pulg	Unidad	1	39.50	39.50
Tubo estructural cuadrado de 1 pulg chapa 16	Unidad	1	14.35	14.35
Platina 1/4 pulg x 2 pulg	Unidad	1	3.00	3.00
Platina 3/8 pulg x 4 pulg	Unidad	1	82.00	82.00
Platina 1/4 pulg x 1 1/2 pulg	Unidad	1	31.90	31.90
Tornillo para madera 5 mm Ø x 40 mm	Unidad	20	0.06	1.20
Arandela plana zincada 1/4 pulg	Unidad	8	0.05	0.40
Rodamiento rígido de bola 30 mm	Unidad	1	3.50	3.50
Perno cabeza plana 1/4 pulg x 1 1/4 pulg	Unidad	1	0.15	0.15
Perno zincado 4 mm x 20 mm	Unidad	4	0.10	0.40
Perno zincado 8 mm x 30 mm	Unidad	3	0.30	0.90
Perno zincado 6 x 60 mm	Unidad	4	0.28	1.12
Tuerca zinc 6 mm	Unidad	4	0.06	0.24
Tuerca zinc 8 mm	Unidad	4	0.08	0.32
Bomba de agua	Unidad	1	27.99	27.99
Plancha de acrílico 3/8 pulg	Unidad	1	238.00	238.00
Acero SAE 1020 1 pulg Ø x 1 m	Unidad	1	39.79	39.79
Acero SAE 1045 cuad 3/4 pulg x 1 m	Unidad	1	25.43	25.43
Acero SAE 1020 cuad 1 1/2 pulg x 1 m	Unidad	1	199.33	199.33
Tablón madera caoba 16 1/2 pulg x 2 1/2 pulg x 33 pulg	Unidad	1	18.50	18.50
Tabloncillo madera caoba 8 x 2 x 33 pulg	Unidad	1	15.00	15.00
Fórmica 4x8' 0.80 Blanco mate	Unidad	1	25.50	25.50
Pegamento de contacto 1/4 gal	Unidad	1	7.80	7.80
Bronce fosfórico 1 1/2 pulg Ø x 1 m	Unidad	1	674.61	674.61
Hierro plano 3/8 pulg x 3 pulg	Unidad	1	62.00	62.00
Fuente de alimentación 60 V 5 A	Unidad	1	110.59	110.59
Módulo controlador de motor	Unidad	1	5.95	5.95
Motor paso a paso bipolar 12-24 V DC 1.7 A	Unidad	1	15.95	15.95
Adaptador 12 V DC 3 A 100-240 VAC	Unidad	1	13.30	13.30

Continúa.

Continuación.- Tabla 4.2. Costos de materias primas y equipos necesarios para la construcción de una máquina electroerosión.

Descripción	Unidad	Cant.	P/U, \$	P/T, \$
Arduino uno R3	Unidad	1	27.95	27.95
Switch 3 A 125 V NO	Unidad	1	0.75	0.75
Switch a prueba de agua 3 a 250 AC	Unidad	1	19.94	19.94
Resistencia 300 ohm x ½ W	Unidad	10	0.30	3.00
Sensor de proximidad 8 mm	Unidad	1	7.50	7.50
Transistor + led infrarrojo	Unidad	1	3.50	3.50
filtro de aceite de motocicleta	Unidad	1	2.00	2.00
Termómetro digital de bolsillo	Unidad	1	10.50	10.50
Relé 10 A 5 pines	Unidad	1	0.89	0.89
Imprevistos (20%)	Porcentaje	1	367.22	367.22
			Sub-total, \$	2,247.10

4.2.2. COSTO DE MANO DE OBRA

Para el siguiente cálculo se va a dividir la mano de obra del proceso en directa e indirecta. La mano de obra directa es aquella que interviene personalmente en el proceso de fabricación de piezas, se refiere en específico a los trabajos de talleres independientes. La mano de obra indirecta se refiere a quienes aun estando en contacto con la máquina no llevan a cabo procesos de fabricación, tales como personal de ensamble, operarios de la máquina, encargados de mantenimiento preventivo y correctivo, etc.

El costo por mano de obra directa se atribuye a un estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, como instructor de la cátedra debido a los conocimientos adquiridos durante su etapa de formación, está capacitado para la manipulación de las herramientas y equipo necesario para la fabricación de la máquina. Esta persona, según la Ley Orgánica de la Universidad de El Salvador, es remunerada con \$ 300.00 mensuales [48].

Para determinar el precio de la mano de obra se asume que debe cumplir con 1 hora y 40 minutos por día (tiempo que dura una clase teórica y de discusión de la cátedra) con asesorías que tengan que ver con la materia, por 22 días (30

días calendario menos fines de semana), esto representa un total de 36.67 horas al mes. Por lo tanto, el precio de la hora es de \$8.18 para un instructor de cátedra.

El costo por mano de obra indirecta corresponde a un docente, quien funge la función de supervisor. En este caso el docente a cargo pertenece a la categoría III, según lo establecido en el artículo N° 47 del Reglamento General del Sistema de Escalafón del personal de la Universidad de El Salvador, Acuerdo N° 72/2002-2003 (V). De la tabla 4.3 se extrae que el salario es de \$2,000.00, con esta información se procede a calcular el valor de la hora de trabajo [49].

Tabla 4.3. Escala de salarios según el art. N° 47 del Reglamento General del Sistema Escalafón del personal de la Universidad de El Salvador [49].

Clase	Categoría	Salario, \$
Profesor Universitario	I	1,300.00
Profesor Universitario	II	1,600.00
Profesor Universitario	III	2,000.00
Profesor Universitario	IV	2,400.00

Según el Reglamento General del Sistema Escalafonario del Personal de la Universidad de El Salvador publicado en el Diario Oficial N° 88, tomo N° 353, del 16 de mayo de 2003, quien, si está contratado por tiempo completo, debe cumplir un total de 8 horas diarias, por 22 días (30 días calendario menos fines de semana) da un total de 176 horas al mes, por lo tanto, el valor unitario de la hora es de \$11.36 (ver, Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Costos de mano de obra directa e indirecta según el precio y número de horas trabajadas.

Ocupación del trabajador	Personas	Horas	P/U, \$	P/T, \$
Docente Supervisor	1	40.00	11.36	454.40
Instructor de cátedra	3	40.00	8.18	981.60
			Sub-total, \$	1,436.00

4.2.3. COSTO DEL LOCAL

También, el costo del local se clasifica como un costo fijo, dentro del cual se encuentran los equipos necesarios para la fabricación de la máquina. En el municipio de San Salvador en los alrededores de la Universidad de El Salvador, un local de 150 m² tiene un costo de renta mensual de entre \$2,000.00 a \$ 2,300.00. Con el supuesto de que el local cuesta \$2,300.00 y que este sea utilizado durante 8 h al día, por 22 días al mes (30 días menos fines de semana), el total de horas al mes es de 176. Al dividir el valor de la renta entre el número de horas utilizadas se obtiene el costo por hora de la renta del local, es decir \$13.06 (ver, Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Costos de local.

Costo del local	Horas	P/U, \$	P/T, \$
Costo del local	40.00	13.06	522.40
Sub-total, \$			522.40

4.3. COSTOS VARIABLES

Los costos variables son aquellos que no son fluctúan en función al volumen de producción, en este caso como costos variables se tienen los costos de energía, los costos de depreciación de los equipos y costos de consumibles

4.3.1. COSTO DE CONSUMO ELÉCTRICO

Para determinar el consumo de energía eléctrica se debe considerar que el principal gasto por este insumo se debe a los motores eléctricos que se utilizan durante el funcionamiento de la máquina. Para su cálculo se toma en cuenta la potencia de cada uno de los equipos que intervienen en las operaciones del

proceso de electroerosión y el tiempo que permanecen en operación por día (ver, Tabla 4.6).

Tabla 4.6. Listado de equipos y potencias.

Equipo	Potencia (kW)
Máquina fresadora CNC	1.60
Fresadora	4.00
Taladro de banco	0.50
Esmeriladora angular	2.45
Equipo de soldadura eléctrica	12.00

Por otra parte, para determinar el costo de consumo eléctrico \$/kWh es necesario obtener un precio de consumo de energía eléctrica correspondiente al municipio de San Salvador del departamento de San Salvador, donde se encuentra ubicada la Universidad de El Salvador (ver, Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Pliego tarifario de electricidad para media tensión con medición de potencia de CAESS [47].

Cargo de energía	US\$/kWh
Cargo variable	0.149416

Este costo se obtuvo por medio de los pliegos tarifarios publicados por la superintendencia general de electricidad y comunicaciones vigentes del 15 de julio al 14 de octubre del 2022 [47], la distribuidora para la universidad de El Salvador es CAEES cayendo en la categoría de media tensión con medición de potencia, el costo por consumo por kilovatios/hora (kWh) es de catorce centavos (US\$ 0.149416). Estos valores serán empleados para los equipos que lo requieran.

El consumo de energía por hora se obtiene de la multiplicación de la tarifa de consumo eléctrico por hora, el tiempo de uso de la máquina y la potencia que consume el equipo (ver, Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Precio de electricidad por equipo y tiempo de uso.

Equipo	Potencia, kW	Tiempo de uso, h	Tarifa eléctrica, \$/kWh	P/T, \$
Máquina fresadora CNC	1.60	1.0	0.15	0.24
Fresadora	4.00	6.0	0.15	3.59
Taladro de banco	0.50	4.0	0.15	0.30
Esmeriladora angular	2.45	1.5	0.15	0.55
Equipo de soldadura eléctrica	12.00	2.0	0.15	3.59
Luminarias (20 unidades)	0.80	10.0	0.15	1.20
Sub-total, \$				9.45

4.3.2. COSTO DE DEPRECIACIÓN DE EQUIPOS

Para calcular el costo de depreciación de la maquinaria (D_p) se tomó como base el artículo 30 de la ley de impuesto sobre la renta de El Salvador [45], el cual establece el valor residual de la maquinaria luego de su uso o explotación según se presenta en la Tabla 4.9, y se utilizó el método de línea recta para el cálculo de su depreciación. Se hizo uso de la Ec. 4.1 para el cálculo de la depreciación del equipo D_p .

$$D_p = \frac{P - L}{n} \quad (4.1)$$

donde: D_p es la depreciación del equipo,

P es el costo inicial,

L es el valor residual, y

n es la vida útil de la máquina.

Tabla 4.9. Valor de la maquinaria luego de su uso o explotación [45].

Años de vida	Valor de la maquinaria o bienes muebles usados, %
1	80
2	60
3	40
4 o más	20

A continuación, se presentan los cálculos de la depreciación de los equipos a utilizar para la fabricación de la máquina de electroerosión (ver, Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Cálculo de depreciación de los equipos.

Equipo	Costo inicial, \$	Depreciación, %	Valor residual, \$	Vida útil, años	Depreciación, \$
Máquina fresadora CNC	19,775.00	20%	3,955.00	15	1,054.67
Fresadora	6,500.00	20%	1,300.00	20	260.00
Taladro de banco	800.00	20%	160.00	20	32.00
Esmeriladora angular	130.00	20%	26.00	5	20.80
Equipo de soldadura eléctrica	180.00	20%	36.00	7	20.57
Sub-total, \$					1,388.04

4.3.3. COSTO DE CONSUMIBLES

Otros costos por considerar para la fabricación de la máquina es el valor que representa los consumibles, el cual se considera un costo variable. Se utilizan para llevar a cabo el proceso del maquinado tales como el aceite lubricante para proteger las guías del CNC, brocas, juego de fresas modulares, electrodos, aceite dieléctrico y demás (ver, Tabla 4.11).

Tabla 4.11. Precio de consumibles.

Consumibles	Unidad	Cant.	P/U, \$	P/T, \$
Juego de fresas modulares (Módulo 2)	Unidad	1	715.19	715.19
Broca titanio 3 mm	Unidad	1	0.80	0.80
Broca titanio 5 mm	Unidad	1	1.05	1.05
Broca titanio 6 mm	Unidad	1	1.30	1.30
Broca titanio 8 mm	Unidad	1	3.10	3.10
Brochas 2 pulg	Unidad	2	1.99	3.98
Aceite dieléctrico	Galón	1	492.20	492.20
Electrodos	Libra	1	1.25	1.25
Sierra para marco	Unidad	1	1.25	1.25

Continúa.

Continuación.- Tabla 4.11. Precio de consumibles.

Consumibles	Unidad	Cant.	P/U, \$	P/T, \$
Disco de corte 9 x 1/8 x 7/8 pulg	Unidad	1	3.10	3.10
Machuelo 3 mm	Unidad	1	4.25	4.25
Machuelo 4 mm	Unidad	1	4.25	4.25
Fresa recta titanio 3/16 x 3 pulg	Unidad	1	10.22	10.22
Fresa recta titanio 1/8 x 3 pulg	Unidad	1	10.79	10.79
Fresa recta titanio 1/4 x 3 pulg	Unidad	1	10.79	10.79
Fresa recta titanio 1/2 x 1/2 pulg	Unidad	1	12.85	12.85
Lija madera 60	Unidad	1	0.65	0.65
Lija madera 180	Unidad	1	0.65	0.65
Lija agua 100	Unidad	1	0.90	0.90
Lija agua 180	Unidad	1	0.85	0.85
Lija agua 400	Unidad	1	0.75	0.75
Pegamento madera (1/4)	Galón	2	13.50	27.00
Machuelo 5 mm	Unidad	1	4.75	4.75
Machuelo 6 mm	Unidad	1	4.25	4.25
Machuelo 8 mm	Unidad	1	7.95	7.95
Lima plana	Unidad	1	4.40	4.40
Pintura anticorrosiva negra (1/2)	Galón	1	16.77	16.77
Sierra de calar	Unidad	2	5.00	10.00
Sub-subtotal, \$				1,355.29
Imprevistos, 20%				271.06
Sub-total, \$				1,626.35

4.4. RESUMEN DE COSTOS

En esta sección se presenta el resumen de los costos agrupados con el valor real que conllevaría la construcción de la máquina (ver, Tabla 4.12).

El costo estimado para la fabricación de la máquina es de \$7,229.34, tomando en consideración los materiales, mano de obras, consumibles e imprevistos.

Tabla 4.12. Resumen de costos.

Descripción	Sub-totales, \$
Materiales	2,247.10
Mano de obra	1,436.00
Costo del local	522.40
Costo eléctrico	9.45
Depreciación	1,388.04
Consumibles	1,626.35
Total =	7,229.34

Dentro del valor obtenido total se debe mencionar que el costo del proyecto asciende a este precio por lo siguiente:

- Materiales como el bronce fosfórico, entre otros al no ser materiales de alta demanda en el mercado nacional no se vende a la medida exacta de material que se prevé utilizar para la elaboración del proyecto, es por ello que se opta por comprar la pieza completa a las menores dimensiones que los proveedores venden.
- Al costo total de los materiales se agrega un valor porcentual de imprevistos con el objetivo de tener cubierto cualquier posible modificación en el diseño o cubrir un posible costo sin reflejar en la lista de materiales, este valor es completamente subjetivo por lo que si no se considera necesario se puede hacer caso omiso.
- Dentro de los consumibles se tuvo que cotizar un juego completo de fresas modulares, estas para la elaboración de los engranajes, la razón de cotizar el juego completo es que no se venden las fresas individuales por lo que se debe incurrir el en gasto directo del juego completo.
- Otro caso similar es el aceite dieléctrico específico para procesos de electroerosión, este al no haber disponibilidad en el mercado nacional, es necesario importarlo, por lo que hay que incurrir en gastos como los impuestos aduanales y costos de transporte, también se depende de las cantidades que venden en el mercado exterior y la menor cantidad que se vende es por cubeta de 5 galones.

- Si bien todos estos sobrantes de material se pueden apreciar como un gasto innecesario, estos se pueden ocupar para la fabricación de piezas que se dañen de la máquina o bien para otros proyectos en los que se necesite este tipo de material.

CONCLUSIONES

- ✓ Es de recalcar que el tema o la propuesta de diseño de la máquina es un tema demasiado extenso que puede dar paso o hincapié para futuras trabajos de graduación de ingeniería, por la complejidad y profundidad del tema.
- ✓ El trabajo tiene como objetivo principal proponer el diseño de una máquina de electroerosión. El primer capítulo consiste en el desarrollo histórico de las diversas máquinas de electroerosión que existen y se recolecto la información necesaria para conocer el funcionamiento de la máquina, sobre la base de investigaciones previas, libros, revistas científicas y demás materiales didácticos que sirvieron de ayuda para obtener una mejor comprensión de lo que significaba e implicaban en si las máquinas de electroerosión; luego teniendo ya una idea formada acerca del funcionamiento se procedió a la selección de los parámetros, al ser el propósito de la máquina crear muescas sobre probetas para el ensayo Charpy, es decir que la cantidad de masa a remover o a maquinar sobre dichas probetas es pequeña a comparación de lo que las maquinas convencionales de electroerosión están diseñadas para remover es por ello que los parámetros de diseño para la máquina se tuvieron que ajustar para poder maquinar las probetas conforme a las dimensiones requeridas por la norma ASTM E23 la cual está dedicada para los métodos de prueba estándar para prueba de impacto de barra con muesca de materiales metálicos.
- ✓ Parte de estos ajustes y para tener una mejor facilidad en la maquinación sobre las probetas se optó por que la posición del carnero porta electrodo estuviera en forma horizontal en vez de forma vertical. El electrodo se ha diseñado con la forma negativa de la muesca que se debe de realizar sobre las probetas, al poseer el electrodo dimensiones muy precisas se tomó la decisión de que el electrodo se maquinara por medio de una máquina CNC.

- ✓ Tomando estas y más consideraciones en cuenta para el diseño, se concluye que esta propuesta cumple con los requerimientos que se consideraron pertinentes para el diseño de la máquina de electroerosión.

RECOMENDACIONES

- Al haber obtenido factores de seguridad altos con respecto al análisis de esfuerzos, se pueden proponer materiales diferentes a los seleccionados, ya que se tuvo como propósito el proponer materiales que circularan en el mercado nacional y por su puesto con respecto al tema de costos, para que fuera más accesible la fabricación de la máquina.
- Al ser un trabajo puramente diseño, es decir que no se realizó un prototipo de la máquina propuesta, no se pudo comprobar que la selección de parámetros eléctricos sean exactamente los suficientes para la realización de las muescas o si la velocidad de avance del electrodo sea la adecuada para obtener el mejor acabado superficial posible.
- El filtro seleccionado no es diseñado especialmente para la aplicación de máquinas de electroerosión, debido a que estos filtros especiales sobrepasaban en gran medida las dimensiones del reservorio de la máquina, por lo que se optó por otro tipo de filtro que cumpliera con los requerimientos mínimos de filtrado para las partículas de viruta que se desprenderán durante el proceso.

REFERENCIAS

- [1] Schey, J. (2000). Procesos no tradicionales de maquinado (4ta Ed.). México: Mc Graw Hill.
- [2] Tecnología del mecanizado por electroerosión. | DPMCM02.- Procesos de mecanizado por abrasión, electroerosión y especiales. (2016). BIRTLH. https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM02/es_PPFM_DPMCM02_Contenidos/website_2_tecnologia_del_mecanizado_por_electroerosin.html
- [3] Proceso de electroerosión - Procesos de Manufactura. (2015). Procesos de Manufactura. <https://sites.google.com/site/procesosdemanufacturaetito/tipos-de-procesos/proceso-de-electroerosion#:~:text=Definici%C3%B3n%3A,ambos%20deben%20ser%20materiales%20conductores>
- [4] Introducción a la electroerosión. Recuperado de <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/mipagina/downloads/electroerosionamio.pdf>
- [5] Juez Gil, J. M., & Cambrero Rivero, I. (2013). MANUAL DE TÉCNICAS PARA LA CONFORMACIÓN MECÁNICA.
- [6] Pérez Blanco, L. (2014) Optimización del proceso de electroerosión [Proyecto/Trabajo Fin de Carrera, Universidad de Cantabria].
- [7] D. (2014, 23 octubre). Tipos de Mecanizado por Electroerosión. De Máquinas y Herramientas. <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/tipos-de-mecanizado-por-electroerosion>
- [8] Máquina de electroerosión por penetración. | DPMCM02.- Procesos de mecanizado por abrasión, electroerosión y especiales. (2016). BIRTLH. https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM02/es_PPFM_DPMCM02_Contenidos/website_21_mquina_de_electroerosin_por_penetracin.html
- [9] Lara Sánchez, R. & Quispe Quispe, P. (2014) Rediseño y Automatización de una Máquina Electroerosionadora con interfaz hombre-máquina para el laboratorio de CNC de la ESPE-EL. Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de ingeniero en mecatrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, extensión Latacunga.

- [10] Proceso de electroerosión - Procesos de Manufactura. (2015). Procesos de Manufactura. <https://sites.google.com/site/procesosdemanufacturaetito/tipos-de-procesos/proceso-de-electroerosion>.
- [11] Molera Solá, P. (1989) Electromecanizado, Electroerosión y Mecanizado Electroquímico. Marcombo Boixareu Editores.
- [12] Tecnología EDM en la fabricación de moldes de mejor desempeño. (2017). Internacional Metalmeccanica. <https://www.metalmeccanica.com/temas/Tecnologia-EDM-mejora-desempeno-en-moldes-de-inyeccion+114435#:~:text=Dependiendo%20de%20los%20requerimientos%20%20est%C3%A9ticos,%20por%20procesos%20de%20pulido%20manua>
- [13] Vásquez Torres, E. L. (2007). SAE 1020 y SAE 1045 Aceros Ingeniería al Carbono. Cia. General de aceros S.A. 5(1), 1–6.
- [14] *Cobre - Metales Marina*. (2015). Metales marina SL. <https://metalesmarina.es/14-cobre>
- [15] Fernández, Y. (2020, 3 agosto). Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno. Xataka. <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>
- [16] Aguayo, P. (2019, 23 septiembre). Arduino UNO. Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea. <https://arduino.cl/arduino-uno/>
- [17] NEMA 17 stepper motor. (2018). COMPONENTS 101. <https://components101.com/motors/nema17-stepper-motor>
- [18] Wikipedia. (2021, 5 diciembre). Rigidez dieléctrica. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Rigidez_diel%C3%A9ctrica
- [19] Colaboradores de Belherr Lubricante. (2010). Aceite Dieléctrico. Ingeniería Belherr S.A. de C. V. 1(1).
- [20] DC 12 V Mini bomba de succión de agua Diafragma eléctrico de bajo ruido para la máquina de té Depósito de agua Dispensador de agua: Amazon.es: Industria, empresas y ciencia. (2018). Amazon. <https://www.amazon.es/succi%C3%B3n-Diafragma-el%C3%A9ctrico-Dep%C3%B3sito-Dispensador/dp/B07PH6V22J>
- [21] Baugger Wanptek Nps605W 0–60 V 0–5 A Fuente de Alimentación de CC de Conmutación 3 Dígitos Pantalla Led Alta Precisión Mini Fuente de Alimentación Ajustable CA115/230 V 50/60 Hz Voltaje y Corriente: Amazon.es: Informática.

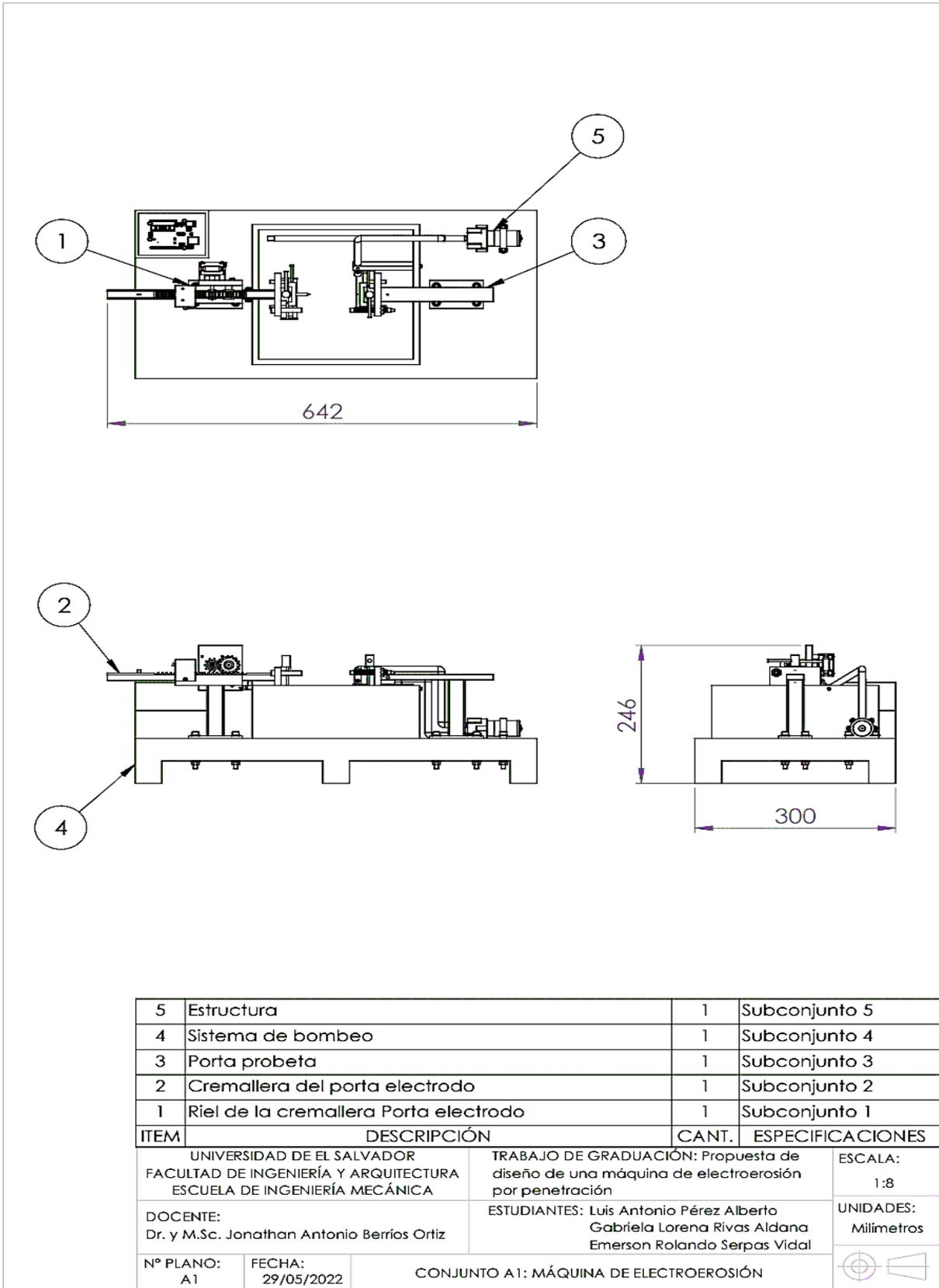
- (2018). Amazon. <https://www.amazon.es/Baugger-Alimentaci%C3%B3n-Conmutaci%C3%B3n-Precisi%C3%B3n-Ajustable/dp/B082WB4SRG>
- [22] Margüello Juaristi, I. (2015). Caracterización del desgaste de electrodos de grafito en electroerosión por penetración [Trabajo de Grado en Ingeniería Mecánica, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao], España.
- [23] Nadeem Faisal y Kaushik Kumar. (2018). Optimization of Machine Process Parameters in EDM for EN 31 Using Evolutionary Optimization Techniques. *Technologies*, Vol.6 (54), páginas 1-16.
- [24] José William Moreno Portillo. (1987). Electroerosión 1ª. Parte. Ingeniería e Investigación, Vol. 4 (2), páginas 54-59.
- [25] Ramiro Rúa, J. (2003). Proceso de mecanizado por electroerosión. *Informador técnico*, 1(66), 10–20.
- [26] American Society for Testing and Materials (2001). A Standard Test Methods for Notched bar impact testing of metallic materials (ASTM E 23 – 02).
- [27] Núñez Vaca, D. R. (2017) Análisis del desgaste de electrodos de grafito y cobre en el proceso de electroerosión con el electrodo de forma para el mecanizado por penetración en micro fundición de aluminio [Trabajo experimental previo a la obtención del título de ingeniero mecánico, Universidad Técnica de Ambato - Ecuador].
- [28] Budynas, Richard G. Nisbett, J. Keith. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, 8ª edición, McGraw – Hill interamericana, México.
- [29] Joshi, A. Y., & Joshi, A. Y. (2019). Una revisión sistemática sobre el mecanizado de descarga eléctrica mixta en polvo. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019366228>
- [30] Chaidez Zúñiga, O. (2008) Sistema de posicionamiento y potencia para máquina de μ EDM [Trabajo de Grado para Maestría en Ciencias, Especialidad en Sistemas de Manufactura, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México]
- [31] Rusnac, V., Topala, P., Guzman, D., & Poperecinii, A. (2017). Auto-adjusting of the gap at electro erosion processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 227(1), 1–2.

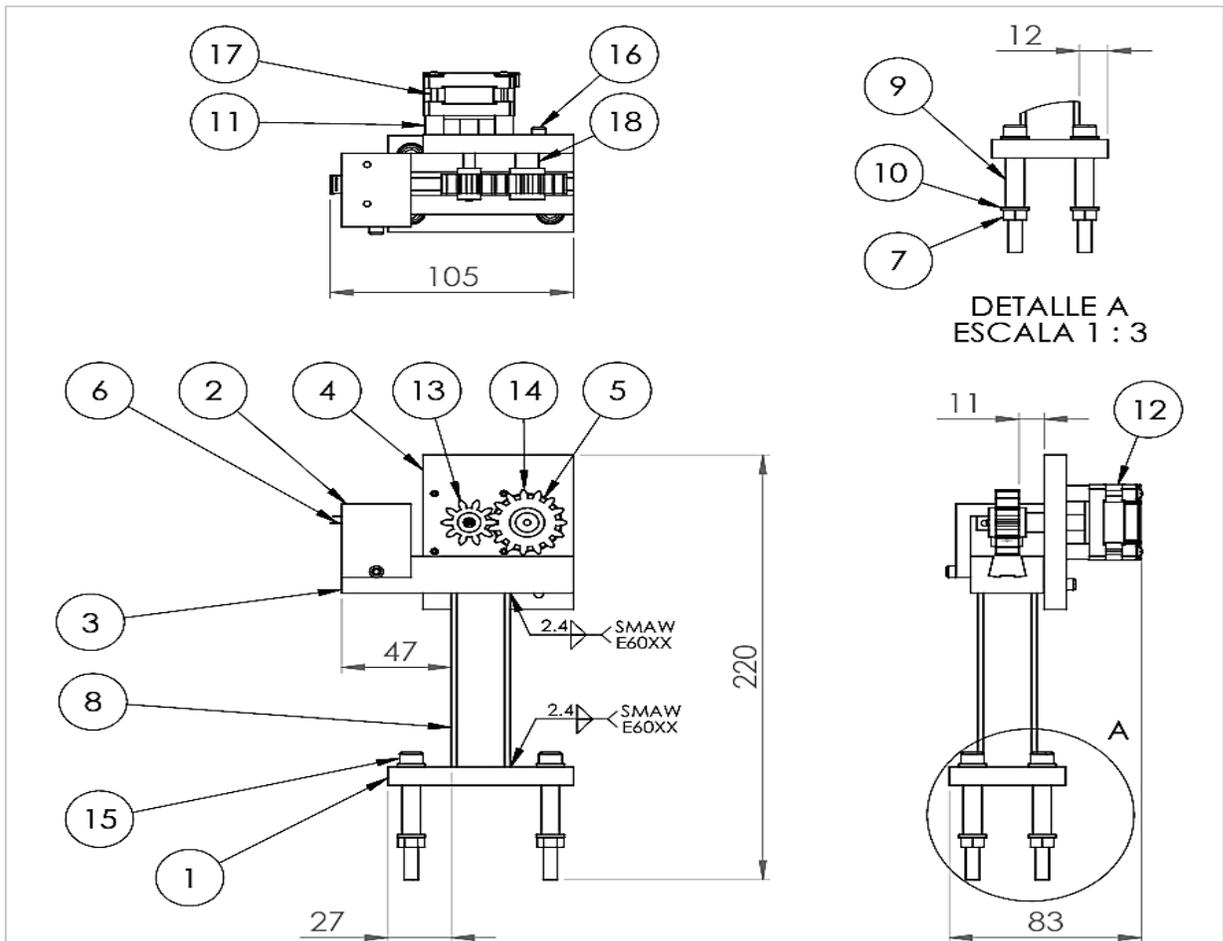
- [32] Filtro de aceite de motor de motocicleta, piezas de repuesto para Haojue Suzuki HJ125K GN125 EN125 GS125 HJ GN EN 125 125cc|oil filter|motorcycle oil filtersuzuki motorcycle oil filters - AliExpress. (2016). aliexpress.com. <https://es.aliexpress.com/item/32858153498.html>
- [33] EKT electronics katrangi trading. (2008). Proximity inductive 8AX. https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/14_PROXIMITY_INDUCTIVE__8AX.pdf
- [34] Keyence. (2015). Qué es un sensor fotoeléctrico. Fundamentos del sensor: Guía de sensores para fábricas clasificados por principios | KEYENCE. Keyence.com. <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/photoelectric/info/>
- [35] Fairchild semiconductor. (2001, Mayo). Phototransistor optical interrupter switch <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Fairchild%20PDFs/H21A1,2,3.pdf>
- [36] Driver Puente H L298N 2A. (2018). Naylamp Mechatronics. <https://naylampmechatronics.com/drivers/11-driver-puente-h-l298n.html>
- [37] Rele 60 VDC 10A 1C (OMRON G2R-1) > releas > componentes electronicos > rele 60v. (2020). Planeta electronico. <https://www.planetaelectronico.com/rele-60vdc-10a-1c-omron-g2r-p-7989.html>
- [38] Avalon Tech. (2021, 11 febrero). Motor NEMA 17 para Arduino - Avalon Tech El Salvador. <https://avalontechsv.com/producto/motor-nema-17/>
- [39] Arias, E. R. (2021, 19 febrero). Factibilidad técnica. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/factibilidadtecnica.html#:~:text=La%20factibilidad%20t%C3%A9cnica%20determina%20si,m%C3%A9todos%20involucrados%20en%20un%20proyecto>
- [40] Corvo, H. S. (2019, 5 agosto). Factibilidad técnica: Criterios y análisis. Lifeder. <https://www.lifeder.com/factibilidadtecnica/#:~:text=La%20factibilidad%20t%C3%A9cnica%20es%20un%20estudio%20que%20eval%C3%BAa,y%20la%20tecnolog%C3%ADa%20necesaria%20para%20reunir%20todo%20esto.>
- [41] Lavín, I. (2020, 27 agosto). Cómo hacer una mesa de madera. www.elmueble.com. https://www.elmueble.com/decoracion/brico-diy/como-hacer-mesa-madera_45658

- [42] Duvergel, Y., & Argota, L. E. (2018). Estudio de la factibilidad económica del producto sistema automatizado cubano para el control de equipos médicos. *3C tecnología*, 6(24), 46–63. <https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2017/12/Art4-1.pdf>
- [43] Experto Gestipolis.com. (2001, 8 abril). ¿Qué es el estudio de factibilidad en un proyecto? Gestipolis.Com. <https://www.gestipolis.com/que-es-el-estudio-de-factibilidad-en-un-proyecto/>
- [44] Prensa esquinera 3. (s. f.). El Gran Tlapalero. Recuperado 2019, de <https://www.elgrantlapalero.com/prensa-esquinera-3-tc5301-toolcraft.html>
- [45] Asamblea legislativa de la república de El Salvador. (1963, Diciembre). Ley de impuesto sobre la renta (decreto N° 134). Diario oficial N° 241. <https://pdba.georgetown.edu/Parties/ElSalvador/Leyes/LeyRenta.pdf>
- [46] Baca Urbina, G. (2001). Evaluación de proyectos (4° ed., Vol. 1). McGraw-Hill Education. <https://econforesyproyec.files.wordpress.com/2014/11/evaluacion-deproyectosgabriel-baca-urbina-corregido.pdf>
- [47] Superintendencia general de electricidad y telecomunicaciones. (2022, Julio). Pliegos tarifarios del suministro de energía eléctrica (N° 3). <https://www.siget.gob.sv/wp-content/plugins/download-manager/viewer/viewer.php?dl=https://www.siget.gob.sv/wp-content/uploads/download-manager-files/Index%20Pliegos%20julio%20-%20octubre%202022.pdf>
- [48] Asamblea legislativa de la república de El Salvador. (1999, Mayo). Ley orgánica de la universidad de El Salvador (N° 96). Diario Oficial N° 343. <http://www.jurisprudencia.ues.edu.sv/academica/documentos/legislacion/Ley-Organica-de-la-UES.pdf>
- [49] Asamblea general universitaria de la universidad de El Salvador. (2003, Mayo). Reglamento general del sistema de escalafón del personal de la universidad de El Salvador (N° 72). Diario oficial N° 88. <http://www.transparencia.fce.ues.edu.sv/uploads/pdf/reglamento-escalafon.pdf>
- [50] Mott, R. L. (2006). Diseño de elementos de máquinas (4° edición ed.). Pearson Education.
- [51] Termómetro digital de bolsillo. (2022). Vidrí. <https://www.vidri.com.sv/producto/72590/Termometro-digital-de-bolsillo.html>

ANEXOS

ANEXO A: PLANOS DE FABRICACIÓN





18	Eje para rodamiento	1	Acero SAE 1020	Ø10 x 30
17	Perno standard M3	4		M3 x 40
16	Perno standard M4	3		M4 x 12
15	Perno standard M6	4		M6 x 60
14	Engrane	1	Bronce fosforado	20°, Z=15 y m= 2
13	Piñón	1	Acero SAE 1020	20°, Z=10 y m= 2
12	Motor paso a paso	1		NEMA 14 paso 1.8°
11	Amortiguador para motor	4	Neopreno	M4 x 10
10	Arandela	8		M6
9	Bushing	4		M6 x 40
8	Tubo cuadrado 1x1 pulg	1	Acero SAE 1008	Chapa 16 x 90mm
7	Tuerca	4		M6
6	Sensor fototransistor	1		H21A1
5	Rodamiento rígido de bola	1		6200
4	Soporte de motor chapa 3/8 pulg	1	Acero SAE 1008	Detalle 1.4
3	Riel de cremallera 1 1/2 x 3/4 pulg	1	Acero SAE 1020	Detalle 1.3
2	Ángulo chapa 1/4 x 1 1/2 pulg	1	Acero SAE 1008	Detalle 1.2
1	Base chapa 3/8 pulg	1	Acero SAE 1008	Detalle 1.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

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

DOCENTE:
Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz

Nº PLANO:
B1

FECHA:
29/05/2022

SUBCONJUNTO 1: RIEL DE LA CREMALLERA PORTA ELECTRODO

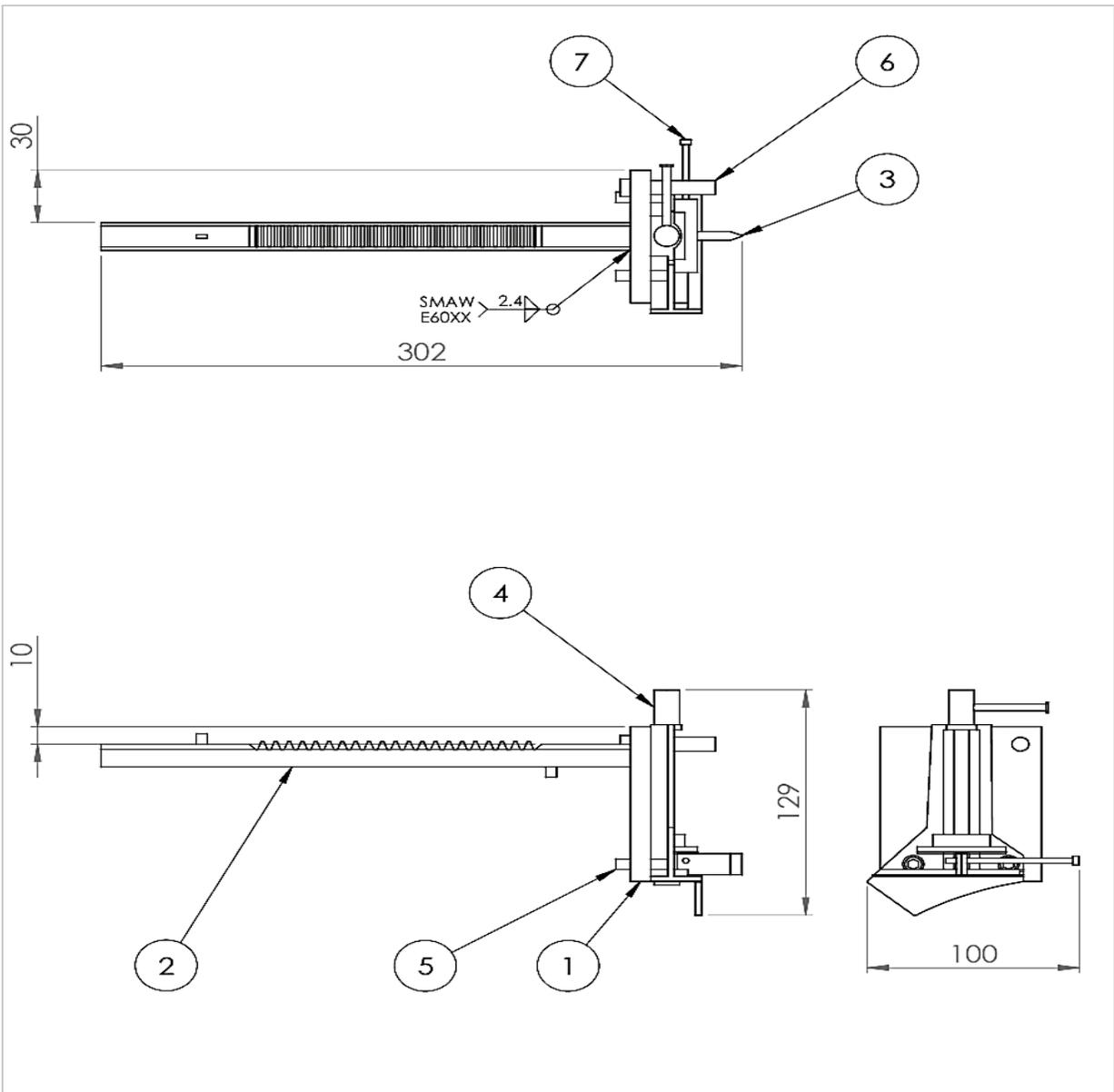
TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de
diseño de una máquina de electroerosión
por penetración

ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto
Gabriela Lorena Rivas Aldana
Emerson Rolando Serpas Vidal

ESCALA:
1:3

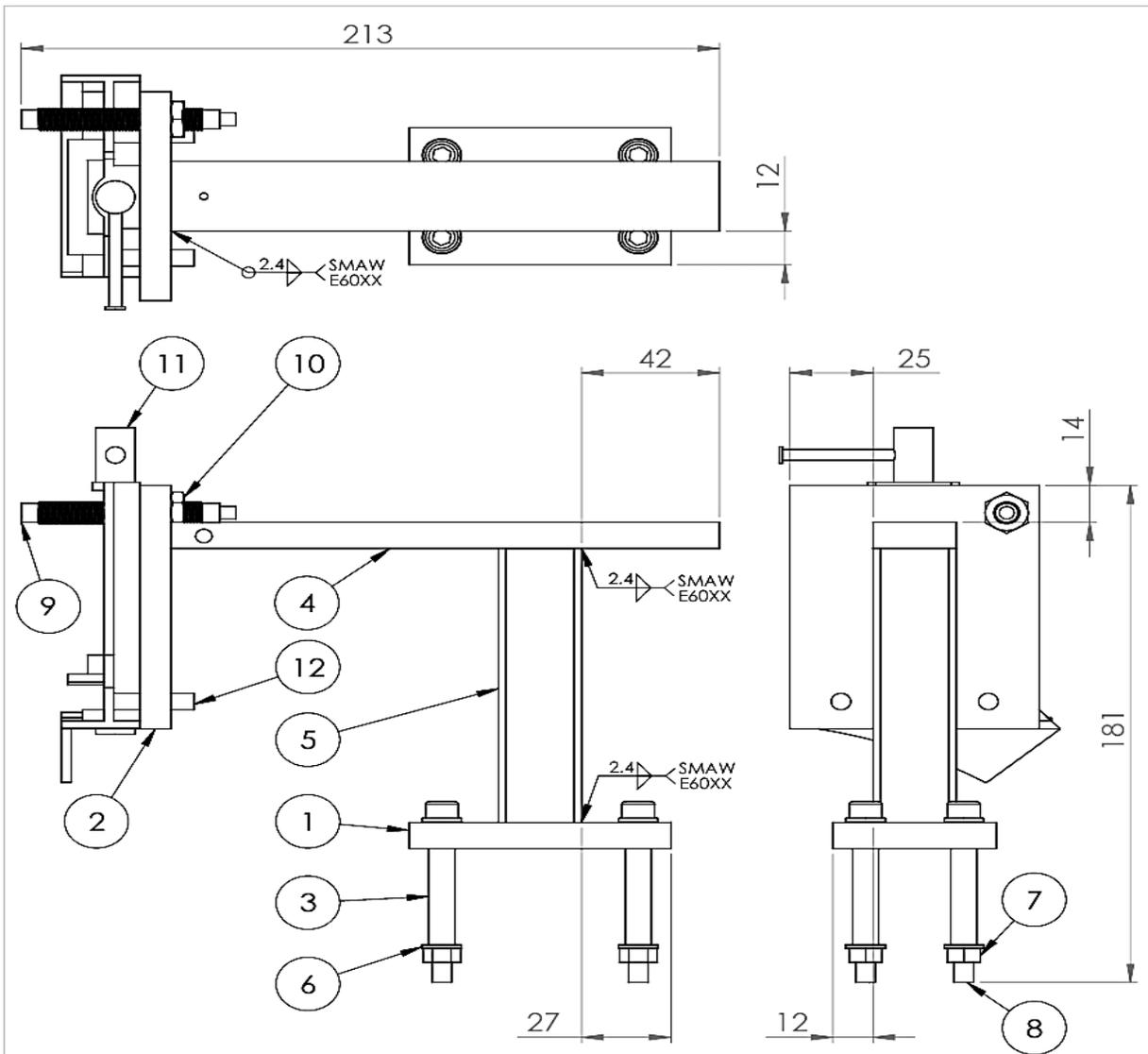
UNIDADES:
Milímetros





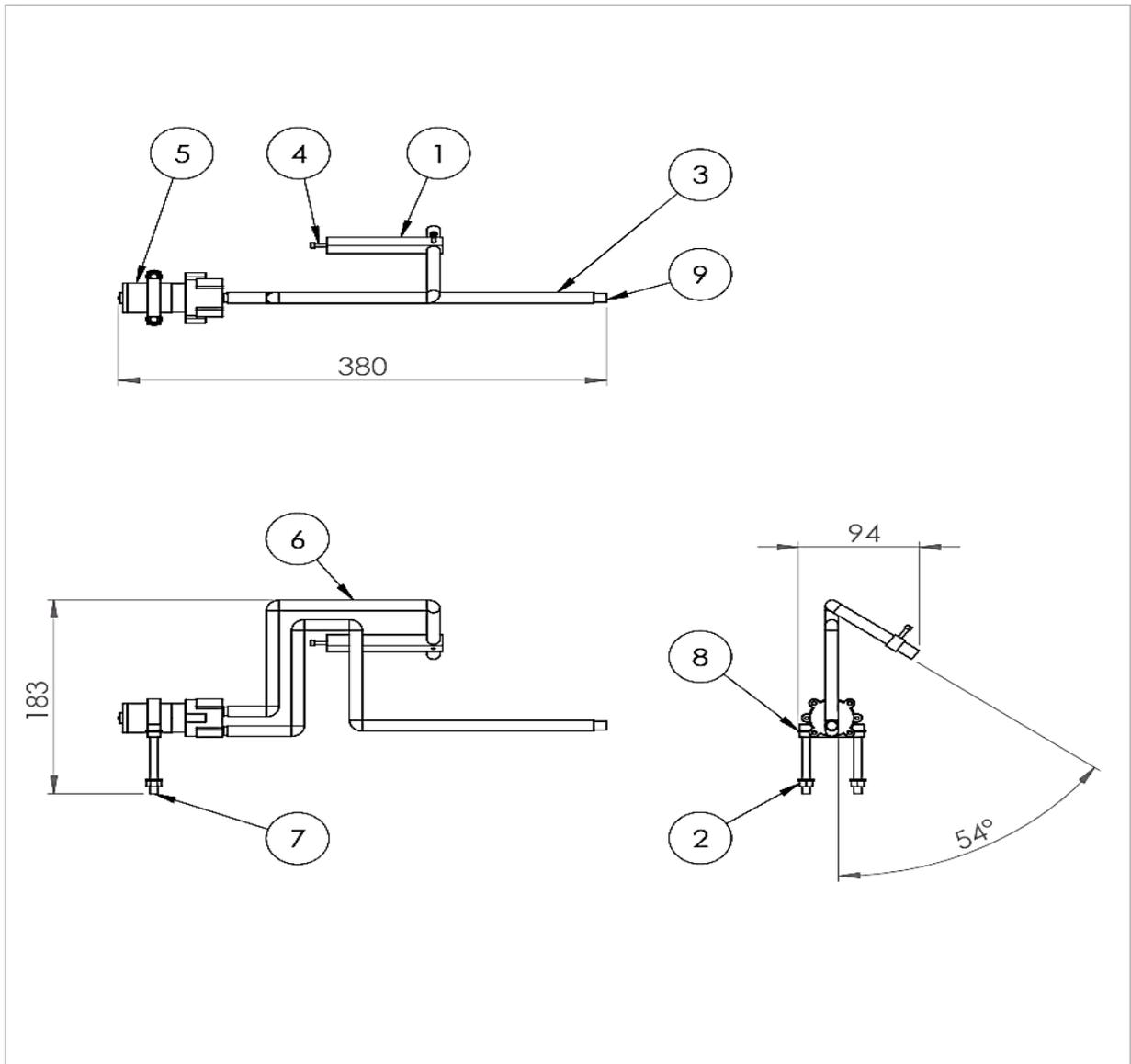
7	Perno standard M3	1		M3x60
6	Perno standard M8	1		M8x40
5	Perno conico M6	2		M6x30
4	Prensa	1	Aluminio	Prensa esquinera 3"
3	Electrodo	1	Cobre	Detalle 2.3
2	Soporte de prensa chapa 3/8 x 3 pulg	1	Acero SAE 1008	Detalle 2.2
1	Cremallera	1	Acero SAE 1020	Detalle 2.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración		ESCALA: 1:3
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: B2	FECHA: 29/05/2022	SUBCONJUNTO 2: CREMALLERA DEL PORTA ELECTRODO		

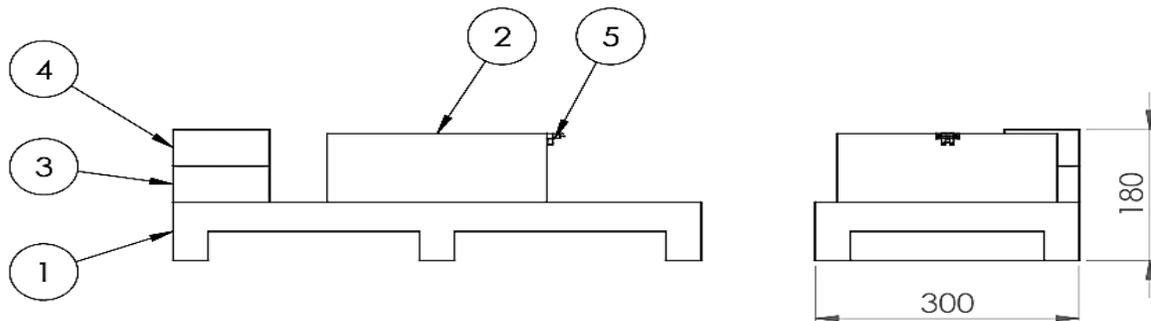
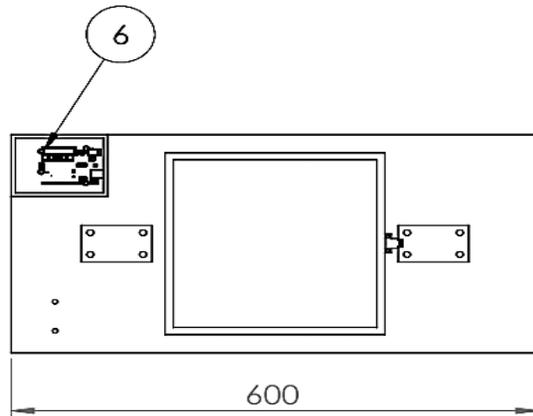


12	Perno conico M6	2		M6x30
11	Prensa	1	Aluminio	Prensa esquinera 3"
10	Tuerca	1		M8
9	Sensor de proximidad inductivo M8	1		LJ8A3-2-Z/BY
8	Perno M6	4		M6 x 60
7	Tuerca M6	4		M6
6	Arandela	8		M6
5	Tubo cuadrado 1x1 pulg	1	Acero SAE 1008	Chapa 16 x 100mm
4	Brazo chapa 3/8 x 1 pulg	1	Acero SAE 1008	168 mm de largo
3	Bushing	4		M6 x 40
2	SopORTE de prensa chapa 3/8 x 3 pulg	1	Acero SAE 1008	Detalle 2.2
1	Base chapa 3/8 pulg	1	Acero SAE 1008	Detalle 1.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

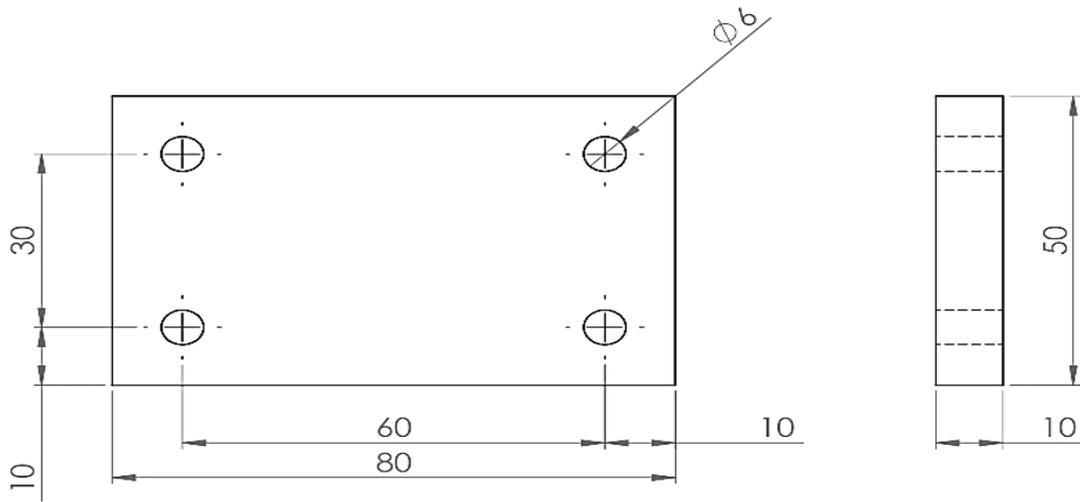
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración		ESCALA: 1:2
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: B3	FECHA: 29/05/2022	SUBCONJUNTO 3: PORTA PROBETA		



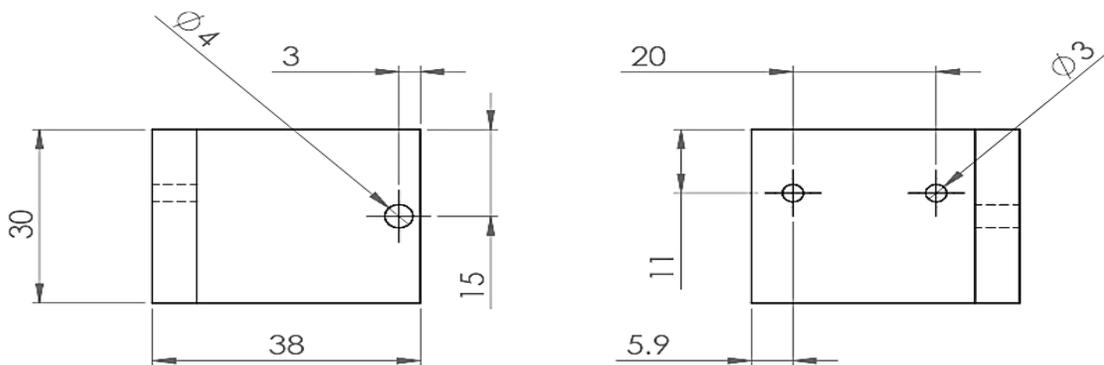
9	Filtro de partículas	1		
8	Arandela	4		M6
7	Perno standard M6	2		M6x60
6	Manguera de alimentación	1	Silicon	M10
5	Bomba	1		YX DC12V 385
4	Perno standard M3	2		M3x15
3	Manguera de aspiración	1	Silicon	M10
2	Tuerca M6	2		M6
1	Soporte para manguera chapa 3/8 x 1/2 pulg	1	Acero SAE 1008	Detalle 4.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración		ESCALA: 1:5
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: B4	FECHA: 29/05/2022	SUBCONJUNTO 4: SISTEMA DE BOMBEO		



6	Tarjeta de Arduino	1		Arduino UNO R3
5	Sensor fototransistor	2		H21A1
4	Protector de Arduino	1	Acrílico	Detalle 5.4
3	Alza para sistema de control	1	Madera	Detalle 5.3
2	Mesa	1	Madera	Detalle 5.2
1	Reservorio	1	Acrílico	Detalle 5.1
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración		ESCALA: 1:8
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: B5	FECHA: 29/05/2022	SUBCONJUNTO 5: ESTRUCTURA		

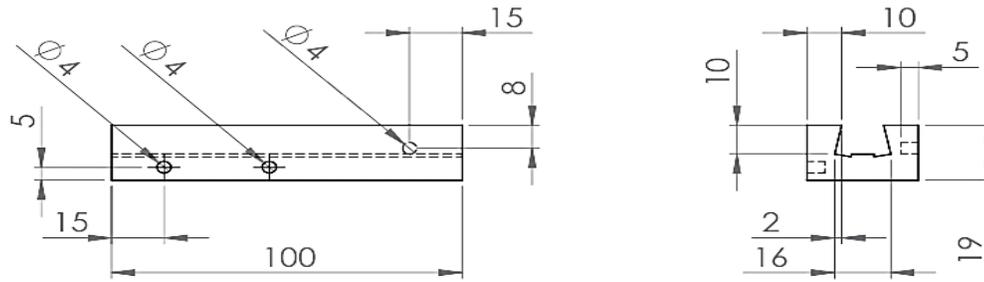



Detalle 1.1.: Base chapa 3/8 pulg

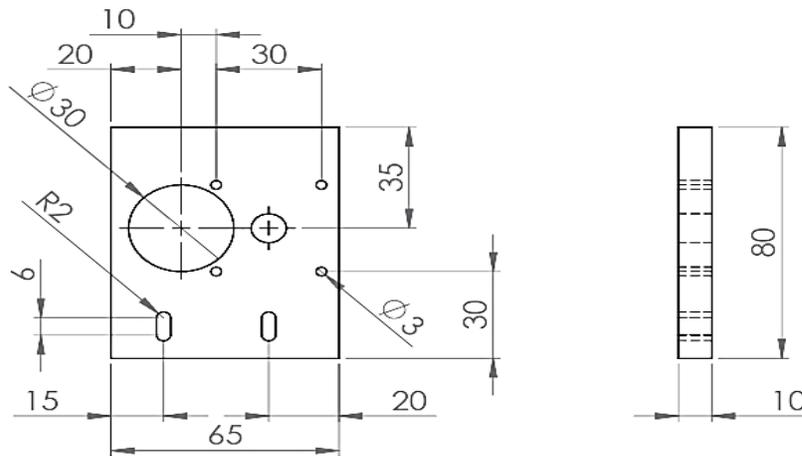



Detalle 1.2.: Ángulo chapa 1/4 x 1 1/2 pulg

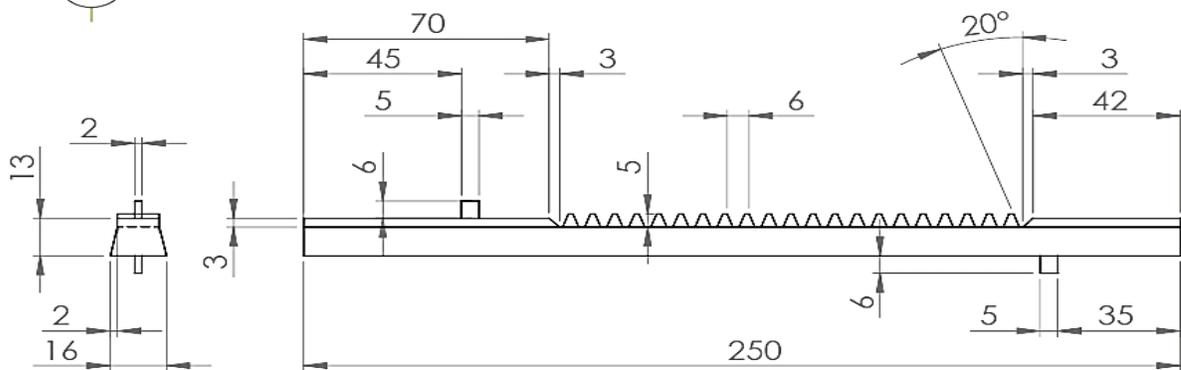
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración	ESCALA: 1:1
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: C1	FECHA: 29/05/2022	DETALLE 1.1.: BASE CHAPA 3/8 PULG DETALLE 1.2.: ÁNGULO CHAPA 1/4 PULG	 



Detalle 1.3.: Riel de cremallera 1 1/2 x 3/4 pulg

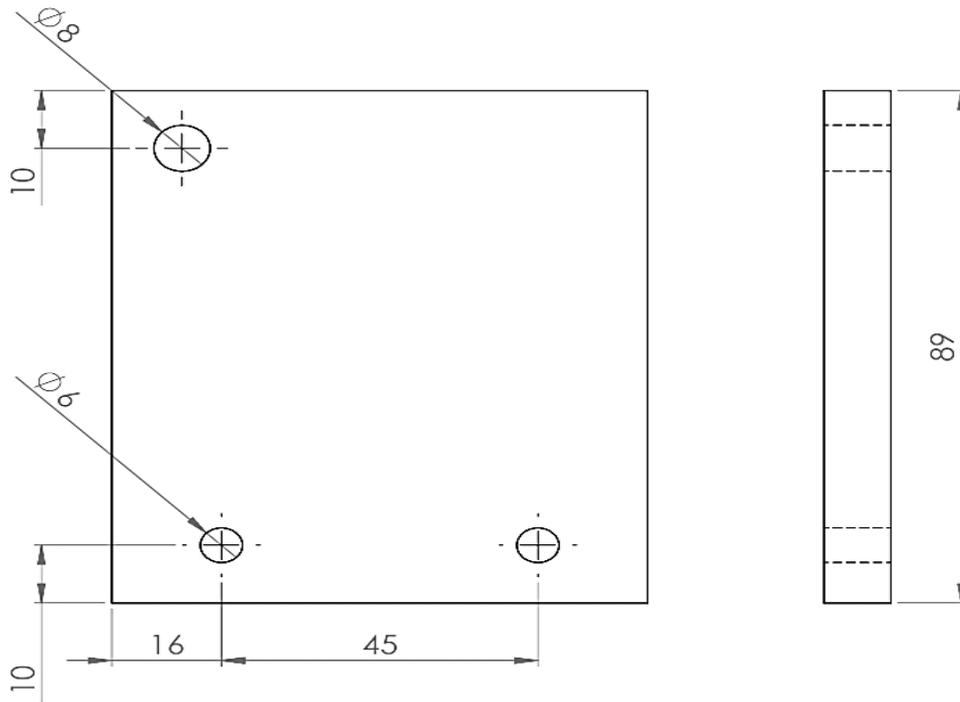


Detalle 1.4.: Soporte de motor chapa 3/8 pulg

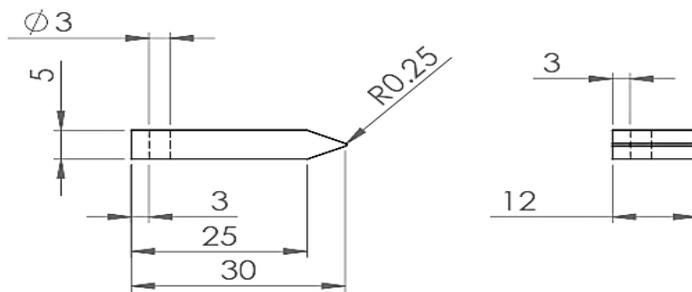


Detalle 2.1.: Cremallera

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración	ESCALA: 1:2
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: C2	FECHA: 29/05/2022	DETALLE 1.3.: RIEL DE CREMALLERA DETALLE 1.4.: SOPORTE DE MOTOR DETALLE 2.1.: CREMALLERA	

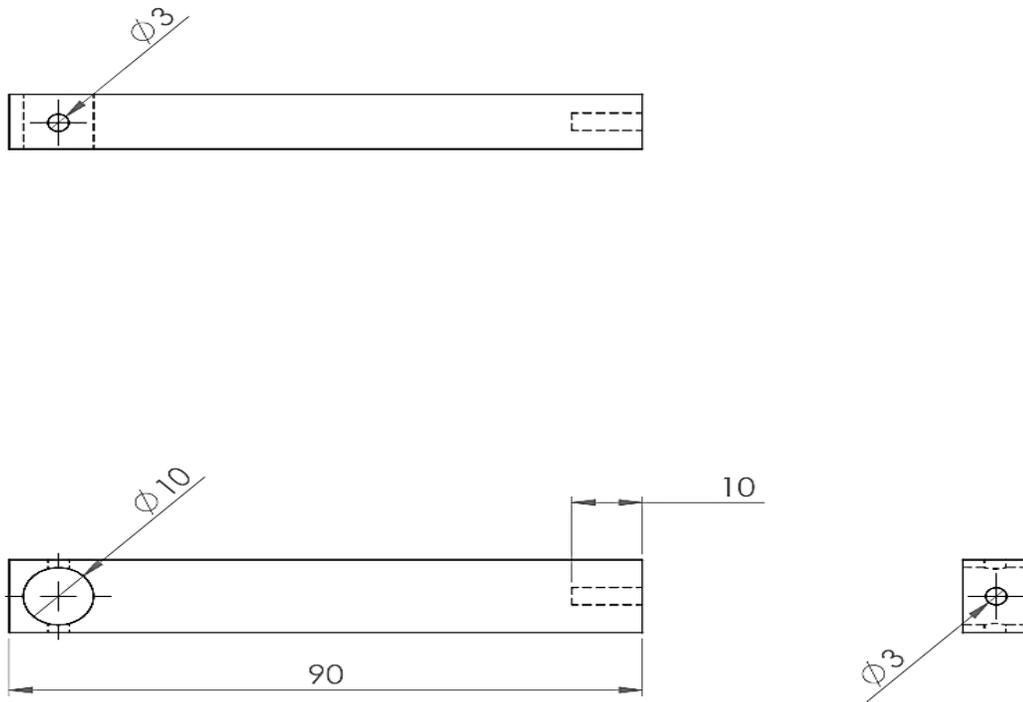


 Detalle 2.2.: Soporte de prensa chapa 3/8 x 3 pulg

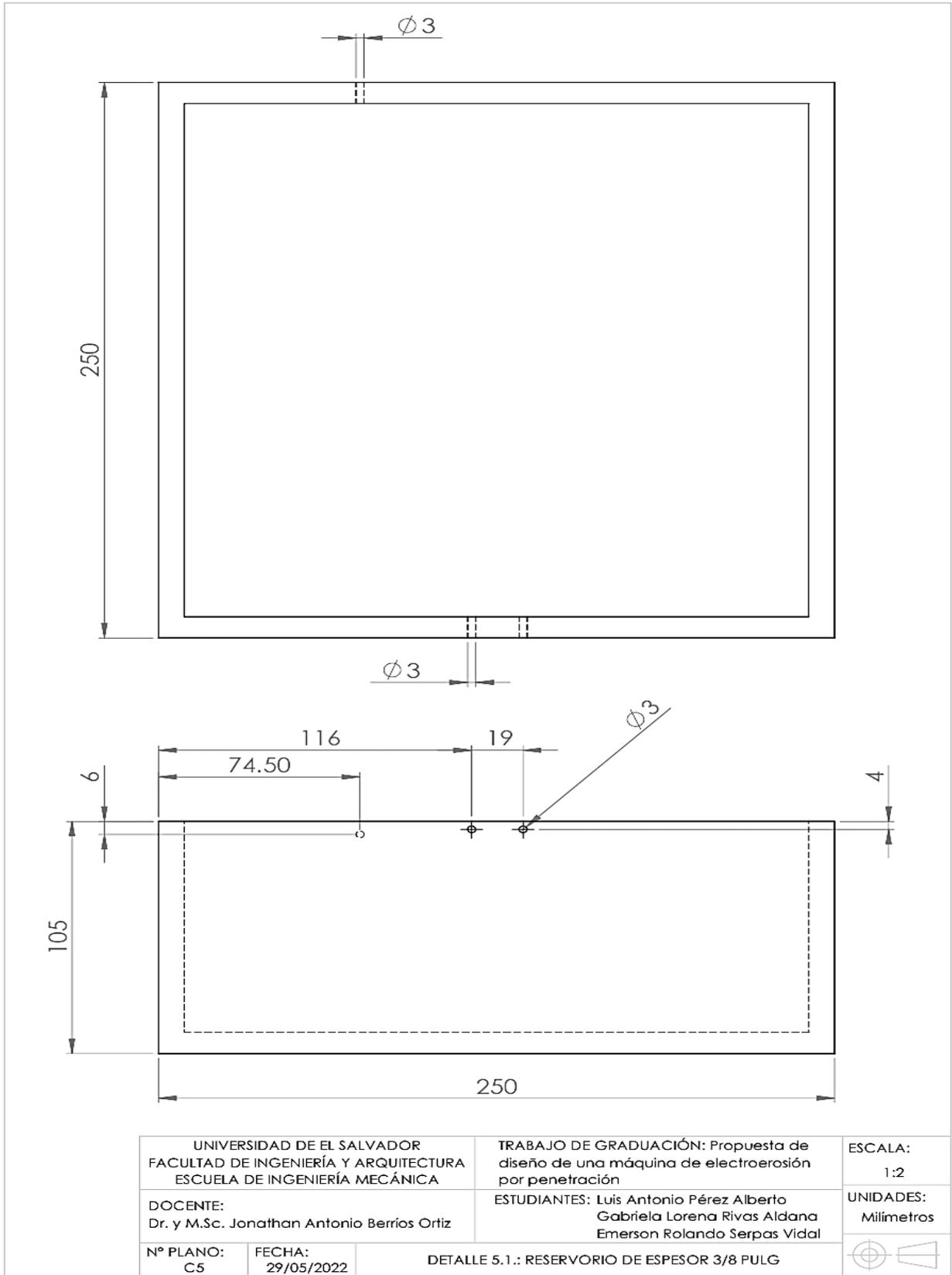


 Detalle 2.3.: Electrodo

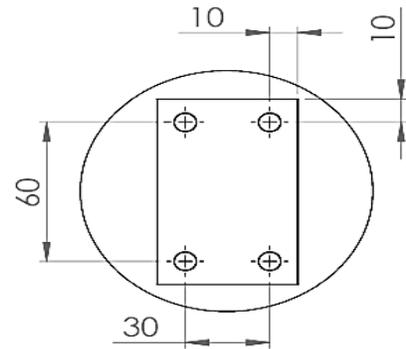
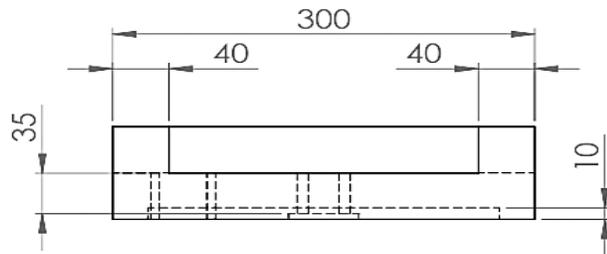
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración	ESCALA: 1:1
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: C3	FECHA: 29/05/2022	DETALLE 2.2.: SOPORTE DE PRENSA DETALLE 2.3.: ELECTRODO	 



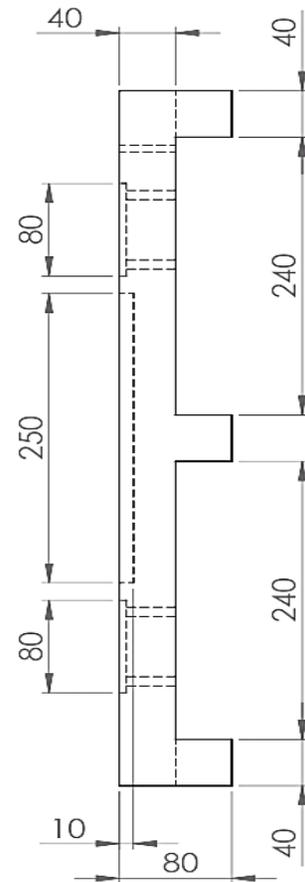
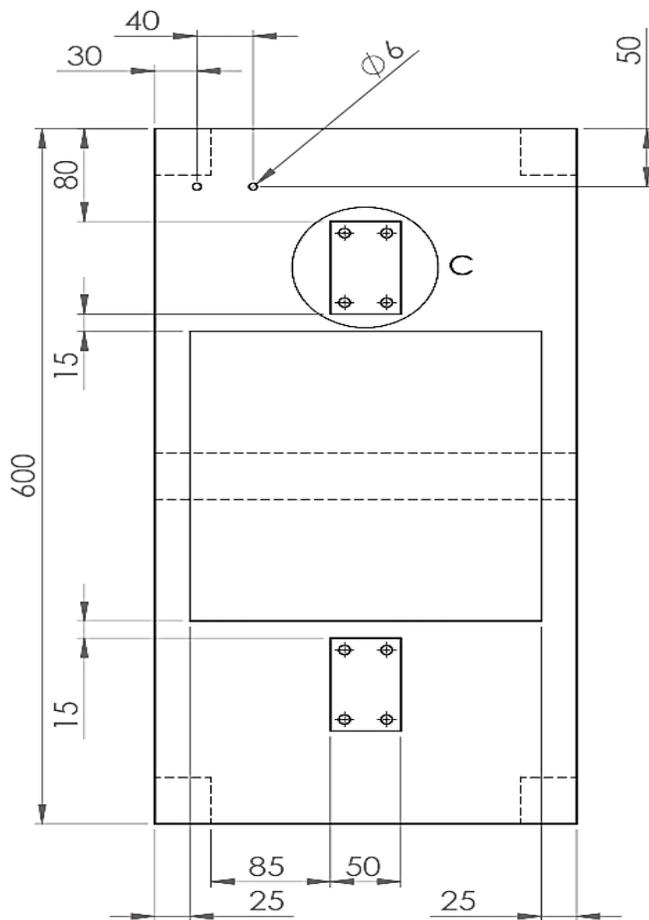
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración	ESCALA: 1:1
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: C4	FECHA: 29/05/2022	DETALLE 4.1: SOPORTE PARA MANGUERA CHAPA 3/8 X 1/2 PULG	



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración	ESCALA: 1:2
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: C5	FECHA: 29/05/2022	DETALLE 5.1.: RESERVORIO DE ESPESOR 3/8 PULG	



DETALLE C
ESCALA 2 : 5



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

DOCENTE:
Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz

Nº PLANO:
C6

FECHA:
29/05/2022

TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de
diseño de una máquina de electroerosión
por penetración

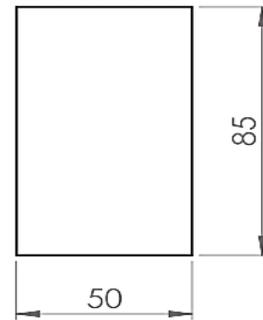
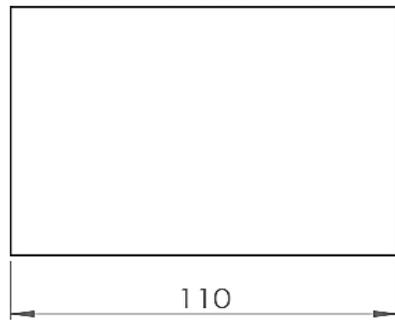
ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto
Gabriela Lorena Rivas Aldana
Emerson Rolando Serpas Vidal

DETALLE 5.2.: MESA

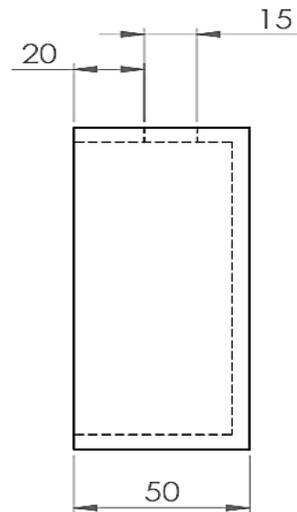
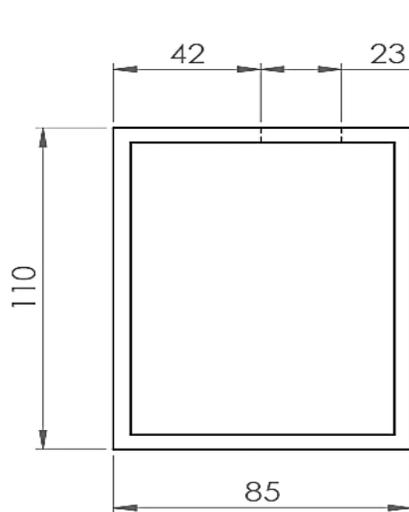
ESCALA:
1:5

UNIDADES:
Milímetros





Detalle 5.3.: Alza para sistema de control

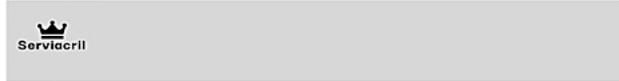


Detalle 5.4.: Protector de Arduino espesor 3/8 pulg

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de diseño de una máquina de electroerosión por penetración	ESCALA: 1:2
DOCENTE: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Luis Antonio Pérez Alberto Gabriela Lorena Rivas Aldana Emerson Rolando Serpas Vidal	UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: C7	FECHA: 29/05/2022	DETALLE 5.3.: ALZA PARA SISTEMA DE CONTROL DETALLE 5.4.: PROTECTOR DEL SISTEMA DE CONTROL	

ANEXO B: COTIZACIONES

Cotización A.B.C1. Acrílico para reservorio.



Sitio Web: serviacril.com
 Dirección: Kilometro 3,5 CA-4, #7
 Teléfono: 26690069 - 70463893
 Correo: infojsacril@gmail.com
 Asesor de venta: Sonia Canales

COTIZACIÓN

FECHA	28/7/2022
COTIZACIÓN #	22174LM
CLIENTE ID	
VALIDO HASTA	30/7/2022

CUENTAS BANCARIAS PARA DEPOSITOS

Banco Industrial # 01-007-000259-0
 Banco Promerica # 30000010001670
 Banco SCOTIABANK # 18574406

A NOMBRE DE: José Jaime Quintanilla Sánchez

CLIENTE

EMPRESA:
 ATENCIÓN: Gabriela Lorena Rivas Aldana
 DIRECCION: Polígono 15, #3. El plantel 1, Nejapa San Salv.
 NIT:
 Celular : 7063-6852

COD.	DESCRIPCIÓN DE MEDIDAS Y ESPESOR	PRECIO UNIT.	CANT.	TOTAL
10-00	Láminas Acrílicas de 1.22 X 2.00 X 10mm	\$ 238,84	1	\$ 238,84
				\$ -
				\$ -
				\$ -
	PRECIO YA INCLUYE IVA			-
				-
				-
				-
				-

TÉRMINOS Y CONDICIONES

- El pago es 50% anticipado, Y/O contra entrega.
- La entrega es de 2 A 3 DIAS hábiles
- Se hacen entregas a domicilio dentro de San Salvador, FUERA CON RECARGO.
- Empaque Fils adhesivo como protector para el traslado.
- Favor enviar cotización firmada a email indicado anteriormente o bien adjuntando orden de compra con términos y condiciones aceptadas.

x _____

NOMBRE Y FIRMA

SELLO:

Subtotal \$ 238,84

Otros \$ -

TOTAL \$ 238,84

Dudas o preguntas sobre cotización, por favor, póngase en contacto con nosotros.

Cotización A.B.C2. Barra de cobre electrolítico para electrodo.



PROFORMA No. 11921

CLIENTE: ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 DIRECCION: SAN SALVADOR

NIT: CF2

VENDEDOR: 3 Luis Ernesto Palma

El Salvador 27 JULIO 2,022

CANTIDAD	CODIGO	DESCRIPCION	PRECIO	SUBTOTAL
1.00	BARCO25X3	Barra de cobre electrolítico de 25mm x 3mm, por METRO. Capacidad de corriente alterna 60 hZ (amperios): 245	15.49	15.49
1.00	BARCO30X5	Barra de cobre electrolítico de 30mm x 5mm, por METRO. Capacidad de corriente alterna 60 hZ (amperios): 379	31.06	31.06
-----ULTIMA LINEA-----				
			IVA	6.05
			TOTAL	52.60
** CINCUENTA Y DOS CON 60/100 **				

Esta cotizacion fue hecha bajo nuestra interpretacion de la informacion suministrada; sirvase verificar que cumple con su requerimiento.

TIEMPO DE ENTREGA: Inmediata

FORMA DE PAGO Contado

VALIDEZ DE OFERTA 15 días

El Salvador
 Urbanización Sta. Mónica 5a. calle Oriente
 Blis Block 1, Casa #2, Santa Teda
 PBX: + 503 2288-8994

Guatemala
 14 Av. 7-12 zona 14 Interior No.19,
 Ciudad de Guatemala
 PBX: + 502 2378-8383

Cotización A.B.C3. Consumibles.



F.F. ESCALON

NRC : 41-8 NIT: 0614-010858-001-7
 Giro : Venta Art. Ferrería, Materiales Construcción, Pinturas Y Arts.
 paseo general escalón y 81 av. norte n.205 san salvador, el salvador
 e-mail: escalon@freundsa.com TEL : 22634500 FAX: 22635474

Página 1 de 3 28/07/2022 04:19
COTIZACIÓN

 24809920

Fecha : 28/Jul/ 2022
 Cliente : 0-ROO
 Vendedor : 20026 - *****0

Facturar : TIENDA
 Registro :
 Pago : CONTADO
 Reg. Cuenta : 0
 Documento : FACTURA CONSUMIDOR
 Impuesto : GRAVADO
 No. Carnet :
 No. Dui :
 No. Nit :

0

DATOS COMPLEMENTO	SIN DESPACHO
Dirección : ND Notas : PEDIDO A TRAVES DE WHATSAPP 7788-2622	

Linea	Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio Cotizado	Total
01	1851853	C/U	DISCO CORTE METAL 9 X 1/8 X 7/8 P EMB 	1.00	\$3.10	\$ 3.10
02	2727616	LBA	ELECTRODO HO DULCE B3/32P PRMNNT	1.00	\$1.25	\$ 1.25
03	1679809	C/U	TORNILLO MADERA C/PH 5.0MM X C 40MM 	20.00	\$0.06	\$ 1.20
04	9898378	1/4GLN	PEGAMENTO P/MADERA RESISTOL 850 	2.00	\$6.75	\$ 13.50
05	580661	C/U	LIJA MADERA 60 STARCKE 	1.00	\$0.65	\$ 0.65
06	580666	C/U	LIJA MADERA 180 STARCKE 	1.00	\$0.65	\$ 0.65



F.F. ESCALON

NRC : 41-8 NIT: 0614-010858-001-7
 Giro : Venta Art. Ferreteria, Materiales Construccion, Pinturas Y Arts.
 paseo general escalon y 81 av. norte n.205 san salvador, el salvador
 e-mail: escalon@freundsa.com TEL : 22634500 FAX: 22635474

Página 2 de 3 28/07/2022 04:19
COTIZACIÓN

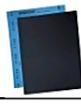
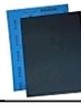
 24809920

Fecha : 28/Jul/ 2022
 Cliente : 0-ROO
 Vendedor : 20026 - *****0

Facturar : TIENDA
 Registro :
 Pago : CONTADO
 Reg. Cuenta : 0
 Documento : FACTURA CONSUMIDOR
 Impuesto : GRAVADO
 No. Carnet :
 No. Dui :
 No. Nit :

0

DATOS COMPLEMENTO	SIN DESPACHO
Dirección : ND Notas : PEDIDO A TRAVES DE WHATSASPP 7788-2622	

Linea	Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio Cotizado	Total
07	12602871	1/2GLN	BARNIZ MARINO	1.00	\$25.74	\$ 25.74
08	580687	C/U	LJA AGUA STARCKE PREMIUM 100	1.00	\$0.90	\$ 0.90
						
09	581246	C/U	LJA AGUA STARCKE PREMIUM 180	1.00	\$0.85	\$ 0.85
						
10	581252	C/U	LJA AGUA STARCKE PREMIUM 400	1.00	\$0.75	\$ 0.75
						
11	12785571	1/2GLN	ANTICORROSIVO 4000 COLONIAL NEGRO	1.00	\$16.77	\$ 16.77
12	1939880	C/U	BROCHA CERDA PRO 2"	1.00	\$1.99	\$ 1.99
						

Autorizado _____ Aceptado Cliente _____
 **** PRECIOS EN DOLARES INCLUYEN IVA ****
 **** COTIZACIÓN VALIDA POR UN DIA ****
 **** PRECIOS SUJETOS A CAMBIOS SIN PREVIO AVISO ****
 **** EMITIR CHEQUE A NOMBRE DE: FREUND S.A. DE C.V. ****

Sub-Total :	\$67.35
(-) Promoción / MRO	\$0.00
Sub-Total :	\$67.35
CESC 5% :	\$0.00
IVA :	\$0.00
IVA Retención 1%:	\$0.00
IVA Percepción 1%:	\$0.00
TOTAL :	\$67.35

Cotización A.B.C4. Madera para la base de la máquina.



ASERRADERO KEVEN S.A. DE C.V.

- DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MUEBLES.
- VENTA AL POR MAYOR Y MENOR DE MADERA.

POLÍGONO 15, #3. EL JABALÍ 1, NEJAPA, SAN SALVADOR
 aserraderokeven@gmail.com
<https://aserraderokeven.wordpress.com/>

TEL: +503 2310-0023

CLIENTE:	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR	COTIZACIÓN N° 22.000.38
DIRECCIÓN:	FINAL 25 AV. NORTE., SAN SALVADOR	
TELÉFONO:	7096-7453	
CORREO:	ra15003@gmail.com	

FECHA EMISIÓN: 26/07/2022

FECHA DE VIGENCIA: 26/08/2022

CANT	U/V	DETALLE	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL
1	PZA	TABLÓN MADERA / CAOBA DE 16 ½" X 2 ½" X 33"	\$18.50	\$18.50
1	PZA	TABLONCILLO MADERA / CAOBA DE 8" X 2" X 33"	\$15.00	\$15.00
4	-	CEPILLADO POR LADO	\$3.75	\$15.00
6	-	CORTE CON INGLETADORA (CORTE MÁXIMO 33")	\$1.25	\$7.50
			IVA	\$0.00
			DESCUENTO%	0
			TOTAL	\$56.00

Observaciones:

Cotización válida hasta la fecha indicada en vigente.
 No aplica a: promociones u ofertas, descuentos acumulables.
 Válido hasta agotar existencias.
 Precio incluye IVA.
 La empresa se reserva el derecho de cambiar la disponibilidad sin previo aviso.

Cotización A.B.C5. Aceros para engranajes, cremallera y riel.



20/07/2022

- ALUMINIO 6061 T6
- REDONDO
- PLETINA
- CUADRADO
- LAMINA
- VCN 150 VEW 155
- ACERO AMUTITS
- ACERO PLATA
- ACERO INOXIDABLE
- ACERO 1045
- ACERO PARA CEMENTAR
- EJE DE TRANSMISION 1020
- BARRA PERFORADA
- HIERRO FUNDIDO (EXTRANJERO)
- BRONCE FOSFORICO
- BRONCE GRAFITADO
- POLVO PARA CEMENTAR
- FIBRA FENOLITICA
- NYLON
- TEFLON VIRGEN
- POLEAS DE ALUMINIO
- LAMINA DE HIERRO
- ANGULO DE HIERRO
- PLASTICOS DE INGENIERIA
- NYLAMID M
- NYLAMID SL
- NYLAMID XL
- NYLAMID 901
- NYLAMID RA
- REPUESTOS Y SERVICIOS

SEÑORES: ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
Teléfono:

ATENCION: ROLANS VIDAL

POR ESTE MEDIO LE ESTAMOS SALUDANDO Y DESEANDOLE QUE TENGAN.
EXITOS EN SUS LABORES COTIDIANAS, Y A LA VEZ LE ESTAMOS ENVIANDO
LA SIGUIENTE OFERTA,

ITEM	CTDAD.	DESCRIPCION	PRECIO UNIT.	PRECIO TOTAL
1	1	ACERO 1020 RED. 1" X 1 MT	\$ 39.79	\$ 39.79
2	1	ACERO 1045 RED. 3/4" X 1 MT	\$ 25.43	\$ 25.43
3	1	ACERO 1020 CUAD. 1 1/2" X 1 MT	\$ 199.33	\$ 199.33
4	1	BRONCE FOSF.REDON. 1 1/2" X 1 MT	\$ 674.61	\$ 674.61
5	1	LATON RED. 1 1/2 X 1 MT	\$ 558.22	\$ 558.22
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18		VALIDES DE OFERTA 8 DIAS		
19				
20				
				\$ 1,497.38

VALIDEZ DE OFERTA 8 DIAS

CONDICIONES.

A- SERVICIO A DOMICILIO PUESTO EN ABASTEINSA
B- ENTREGA INMEDIATA 1/2 HORA
C- FORMA DE PAGO: CONTADO

ME SUSCRIBO DE USTEDES.
ATENTAMENTE .

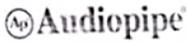
MORENA HENRIQUEZ.
JEFE DPTO VENTAS.



PBX: 2271-0999 Fax: 2222-0682 e-mail: abasteinsa@intrega.com.sv
CALLE GERARDO BARRIOS Nº 1230 SAN SALV.
FRENTE A FABRICA DELICIA Y TALLERES SARTI.

Cotización A.B.C6. Elementos para el sistema de control.

CASA RIVAS, S.A. DE C.V.
Vendedor: Elizabeth Nohemy Mejía Díaz - Sucursal Las Terrazas
REPUESTOS Y ACCESORIOS ELECTRONICOS






Cotización de Vendedor: Elizabeth Nohemy Mejía Díaz - Sucursal Las Terrazas para: na -- na

Casa Metro: Sucursal La Previsora Freije 8 Ex Lateral Nacional 2a. Avenida Norte # 312 San Salvador Tel: 2222-0964, 2222-1718 Fax: 7741-6556 Email: previsora@casarivas.com.sv Lunes A Viernes 8:00 am 6:00 pm Sabado 8:00 am 5:00 pm	Sucursal Metrosur Local C-03, Contiguo a Pollo Campero, Metrosur Centro 12va Etapa San Salvador Tel: 2260-3438, 2260-4840 Fax: 7741-4465 Email: metro@casarivas.com.sv Lunes A Viernes 9:00 am 6:00 pm Sabado 9:00 am 5:00 pm	Sucursal Venezuela Carrique #2187 Venezuela 12 Calle Pte. y 21 Av. Sur # 1150 San Salvador Tel: 2222-0551, 2222-0525 Fax: 7741-8736 Email: venec@casarivas.com.sv Lunes A Viernes 8:00 am 5:00 pm Sabado 8:00 am 3:00 pm	Sucursal Las Terrazas Centro Comercial Terrazas de Don Juan 29 Calle Oro, y 12 Av. Nte. San Salvador Tel: 2235-1870, 2235-2870 Fax: 7986-5284 Email: terrazas@casarivas.com.sv Lunes A Viernes 8:00 am 5:30 pm Sabado 8:00 am 5:00 pm	Sucursal Santa Tecla 4a Calle Ote #2527 Local 7 Atras de Pollo Campero Santa Tecla Tel: 2228-5306, 2228-5258 Fax: 7747-4379 Email: tecla@casarivas.com.sv Lunes A Viernes 8:00 am 6:00 pm Sabado 8:00 am 5:00 pm
--	--	---	---	---

FECHA: 08/07/2022 HORA: 2:39:44PM Categoría del Cliente en el Ministerio de Hacienda: **Pequeño** Referencia: **11083136**

Vendedor: Elizabeth Nohemy Mejía Díaz - Sucursal Las Terrazas
 NOMBRE: **UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

Cantidad Cotizada	BC	SG	Código	Descripción	Precio Lista	Desc %	con IVA	
							Unitario con descuento	Unitario por Cantidad
1	27966	COM	AR-L298MOTDRIVE	COM (puente H) I298 modulo de controlador de motor(p	5.95	20.00	4.7600	4.7600
1	28509	COM	25-NEMA17	MOT motor paso a paso bipolar 12-24v dc 1.7A torque 3	15.95	20.00	12.7600	12.7600
1	19868	TF	CA-AD1233	TF ADAPT 12VDC * 3A 100-240VAC IN 2.1mm * 5.5mm	13.30	20.00	10.6400	10.6400
1	27140	IC	ARDUINO-UNO/O	IC ARDUINO UNO R3 20%=22.35 M9	27.95	20.00	22.3600	22.3600
1	17878	SW	13-1160WHA	SW 3A 125v PUSH ON BLANCO normal abierto 2=\$	0.75	20.00	0.6000	0.6000
1	28012	SW	IS-EP-WB123BL	SW azul a prueba de agua 3a 250ac -10%=\$17.95	19.94	20.00	15.9520	15.9520
10	2892	RE	H300N0.5	RES resistencia 300 ohm x 1/2W 2x\$0.50	0.30	20.00	0.2400	2.4000
1	29083	COM	AR-INDUCTIVE-PNP	COM L18A3-S-Z/BY PNP 8mm switch de proximidad, sens	7.50	20.00	6.0000	6.0000
1	24698	TR	H-21A1jap	TR fototransistor+led infrarojo OPTICAL INTERRUPTER	3.50	20.00	2.8000	2.8000
1	15724	REL	13-RH005C	RELAY Y3F-SS-105D/JQC-3F-1C DC 5V 10A 5PIN 1	0.89	20.00	0.7120	0.7100

**** Total Descuento ****
\$ 19.75

Total a Pagar: --> \$78.98

Atentamente,
 Elizabeth Nohemy Mejía Díaz - Sucursal Las Terrazas

Si la forma de pago será con cheque, por favor hacerlo a nombre de:

CASA RIVAS, S.A. de C.V.
NRC: 4202-1
NIT: 0614-010769-002-2

1. Términos y Condiciones: Esta Solicitud de Cotización ha sido elaborada como «Factura Consumidor Final» para un contribuyente del Ministerio de Hacienda que no es categorizado como «Pequeño Contribuyente». 2. Contribuyentes que necesitan Crédito Fiscal: Si no están en nuestra base de datos, al efectuar compra tendrán que presentar tarjeta de IVA o puelen enviarnos por email. 3. Casa Rivas, S.A. de C.V. actua como mediano contribuyente, si usted es Gran Contribuyente que requiere Factura de Consumidor Final ó Comprobante de Crédito Fiscal, y la venta es mayor o igual a \$100.00 netos, nos aplicará la Retención del 1% con su respectivo Comprobante de Retención. Así lo establece el Artículo #162 del Código Tributario. 4. Forma de Pago: Contado. 5. Cotización valida por cinco días. 6. Las existencias están sujetas a variar. 7. Precios están sujetos a variar.

BCID 11083136 | Imreso: 08/04/2022 2:39:41PM
F:\sistemas\caso\rep\cot1.rpt
Page 1 of 1

Cotización A.B.C7. Elementos para el sistema de control.



CORPORACION AMSI, S.A. DE C.V.
 ALAMEDA JUAN PABLO SEGUNDO, CONDOMINIO METRO
 115-116C, SAN SALVADOR, SAN SALVADOR TEL 2261-1232

Pág. 1 de 1

COTIZACION

Cot. No.00006225

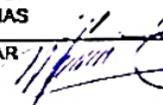
Cliente: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR	Fecha: 7/13/2022
Atte.: TEL 7167-7938	

Código	Descripción	Cantidad	Prec/Unl.	Total
PBARDUINO	ARDUINO UNO REV.3 BOARD /ATMEGA 328 NO-R	1.00	28.9900	28.99
PBARDKYL29	ARDUINO MOTOR DRIVER MODULE	1.00	6.9900	6.99
AC12V1500M	12VDC ADAPTADOR 35W	1.00	7.9900	7.99
SSPBS11B	SPST OFF(ON) PUSH BUTTON SW (ROUND)	1.00	0.6800	0.68
SS110P	3A-125V SWITCH ON-OFF CUADRADO	1.00	0.9800	0.98
RE300-1/2W	RESISTENCIA DE PRECION	10.00	0.2100	2.10
RLYRH012	SPDT MINI RELAY 12VDC	1.00	0.8900	0.89
ECGPRX800	ECG D:8MM INDUCT., DC, PNP, N.O., PROX	1.00	61.0000	61.00
H21A1	=ECG 3100 OPTP-INTERRUPTOR	2.00	2.9900	5.98
MOTNEMA17	NEMA 17 BIPOLAR 200 PASOS/REV 3.7KG-CM 2	1.00	60.0000	60.00

25% SIN TOMARN EN CUENTA EL NEMA

Total \$ 175.60

Condiciones de pago: **CONTADO**
 Tiempo de entrega: **MEDIATA**
 Validez de la oferta: **5 DIAS**
 PRECIO INCLUYE IVA

<p>Asesor IRMA ESCOBAR </p> <p>Tel. 2261-1232</p>	<p>Aceptado cliente</p> <p>Firma y sello:</p> <p>Nombre:</p>
--	--

Cotización A.B.C8. Bomba de agua



CORPORACION AMSI, S.A. DE C.V.
ALAMEDA JUAN PABLO SEGUNDO, CONDOMINIO METRO
115-116C, SAN SALVADOR, SAN SALVADOR TEL 2261-1232

Pág. 1 de 1

COTIZACION

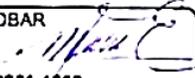
Cot. No.00006226

Cilente: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR	Fecha: 7/13/2022
Atte.: TEL 71677938	

Código	Descripción	Cantidad	Prec/Unl.	Total
MOTRS360SH KIT	BOMBA DE AGUA/FUENTE/SOPORTES/MANGUERA 25% SIN TOMAR EN CUENTA EL NEMA	1.00	27.9900	27.99
Total \$				27.99

Condiciones de pago:CONTADO
Tiempo de entrega:MEDIATA
Validez de la oferta:15 DIAS

PRECIO INCLUYE IVA

Aesor: IRMA ESCOBAR  Tel. 2261-1232	Aceptado cliente Firma y sello: Nombre:
---	--

Cotización A.B.C9. Elementos de para construcción de brazos de soporte



F.F. METROCENTRO
 NRC : 41-8 NIT 0614-010858-001-7
 Giro : Venta Art. Ferretería, Materiales Construcción, Pinturas Y Arts. Conexos
 local 20 y 22 metrocentro, san salvador
 e-mail metrocentro@freunds.com TEL : 22607733 FAX : 22606170

Página 1 de 1 13/07/2022 03:16 PM
COTIZACIÓN

 24670843

Fecha : 13/JUL/2022
 Cliente : 0 - UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 Vendedor : 11375 - *****

Facturar TIENDA
 Registro :
 Pago : CONTADO

Documento : FACTURA CONSUM.DGR
 Impuesto GRAVADO
 No. Carnet :
 No Nit :
 No Du :

DATOS COMPLEMENTO		SIN DESPACHO				
Dirección : ND						
Linea	Código	Unidad	Descripción artículo	Cantidad	Precio Cotizado	Total
01	10531011	C/U	TUBO ESTRUCT CUAD 1P CHAPAT6(1.5MM)	1.00	\$ 14.3500	\$ 14.35
02	1205712	C/U	PLATINA D3/8XD3PLG	1.00	\$ 57.7500	\$ 57.75
03	1698512	C/U	ANGULO N 1/4XC1-1/2PX6MT (6.00MM)	1.00	\$ 31.9000	\$ 31.90
04	2035809	C/U	TORNILLO EST C/R GALV b 5/32 x b 3/4 CT	6.00	\$ 0.0500	\$ 0.30
05	2035609	C/U	TORNILLO EST C/R GALV D 1/4 X G 2-1/2 CT	8.00	\$ 0.3300	\$ 2.64
06	2036409	C/U	TORNILLO EST C/R GALV C 3/16 x b 1/2 CT	4.00	\$ 0.0700	\$ 0.28

AutORIZADO Aceptado cliente
 ***** PRECIOS EN DOLARES INCLUYEN IVA *****
 ***** COTIZACION VALIDA POR UN DIA *****
 ***** PRECIOS SUJETOS A CAMBIOS SIN PREVIO AVISO *****
 ***** EMITIR CHEQUE A NOMBRE DE: FREUND S.A. DE C.V. *****

Sub-Total :	\$ 107.22
IVA :	\$ 0.00
IVA Retención 1% :	\$ 0.00
IVA Percepción 1% :	\$ 0.00
TOTAL :	\$ 107.22

Cotización A.B.C10. Fresas cilíndricas

		COTIZACION DE CLIENTE		SUCURSAI			
				1892			
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR						0	
				CONTADO		23/07/21	
						2-C	
1	CAJ	1420-4903	ZZW FRESA HSS C/TITANIO 3x5x52	\$1.100	\$1.00	\$	6.10
1	CAJ	1420-3301	ZZW FRESA HSS C/TITANIO 1/8"x3/4"	\$1.790	\$1.00	\$	10.79
1	CAJ	1420-3204	ZZW FRESA HSS C/TITANIO 1/4"x3/4"	\$1.790	\$1.00	\$	16.79
1	CAJ	1420-3211	ZZW FRESA HSS C/TITANIO 1/2"x1/2"	\$1.850	\$1.00	\$	12.83
1	CAJ	1420-3203	ZZW FRESA HSS C/TITANIO 3/16"x3"	\$1.220	\$1.00	\$	10.22
1	CAJ	BJT-110-12"	BLACK J/FARGO P/SIERRA C/MANGO PL	\$1.900	\$1.00	\$	3.90
1	CAJ	EA00-1208	ZZW LIMA PLANA FINA DE 8"	\$1.430	\$1.00	\$	2.43
						\$ 57.03	
						\$ 0.00	
CINCUENTA Y SIETE 08/100 DOLARE						\$ 57.03	
						\$ 0.00	
JOSUE						\$ 0.00	
						\$ 57.03	

LA CASA DEL SOLDADOR, S.A. DE C.V.
 SUCURSAL NO. 2, 20 C. PTE.
 NO. 1011 COLONIA LAYCO, TELEFONOS
 2225-4088 / 2225-0981
 TELEFAX: 2225-0988

Cotización A.B.C11. Consumibles

COTIZACION DE CLIENTE SUCURSAI
1893

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

CONTADOR

23/07/21
2-C

1	CAJ	RS-1218-12"	STARRETSIERRA MANUAL HSS "REDSI	\$ 250	\$ 00	\$ 1.25
1	CAJ	1183030	ZZW BROCA HSS C/TITANIO 3.0 MM	\$ 350	\$ 00	\$ 0.35
1	CAJ	1183040	ZZW BROCA HSS C/TITANIO 4.0 MM	\$ 470	\$ 00	\$ 0.47
1	CAJ	1183050	ZZW BROCA HSS C/TITANIO 5.0 MM	\$ 630	\$ 00	\$ 0.63
1	CAJ	1183060	ZZW BROCA HSS C/TITANIO 6.0 MM	\$ 200	\$ 00	\$ 1.20
1	CAJ	1183080	ZZW BROCA HSS C/TITANIO 8.0 MM	\$ 660	\$ 00	\$ 1.66

\$ 5.56

CINCO 56/100 DOLARES

\$ 0.00

\$ 5.56

JOSUE

\$ 0.00

\$ 0.00

\$ 5.56

LA CASA DEL SOLDADOR, S.A. DE C.V.
SUCURSAI NO. 1011, PUE.
NO. 1011, COLONIA JARDINES, TELEFONO:
2225-4650 / 2225-0991
TELEFAX: 2225-0991

Cotización A.B.C12. Elementos para la construcción de la máquina



ALMACENES VIDRI, S.A. DE C.V.
SUCURSAL : SAN MIGUELITO
 N.R.F. : 2-7 N.L.T. : 0210-191171-001-6
 GIRO : FERRETERIA
 DIRECCION : 29 C. PTE. Y 1A. AVE. NTE. No. 207, BARRIO SAN MIGUELITO, SAN SALVADOR
 EMAIL : avisa060@vidri.com.sv TELEFONO : 2225-9500

COTIZACION No. 60200048956



Fecha 23/7/2022 10:26:41
 Cliente UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR NRF Cliente
 Direccion CF
 Atención a CONSUMIDOR FINAL
 Vendedor 0000560 - SAN MIGUELITO Validez Oferta
 Observaciones Condición de pago CONTADO

Código	Descripción	U.M.	Cantidad	Precio	Total
97873	TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO 1" CHAPA 16 (1.50MM)	PZA	1.00	\$14.350000	\$14.35
7578	HIERRO ANGULO 1/4X1.1/2" (6.35MM)	PZA	1.00	\$35.000000	\$35.00
7622	HIERRO PLANO 3/8X3" (9.52MM)	PZA	1.00	\$62.000000	\$62.00
19441	LIMA PLANA BASTA 8" BELLOTA 4001	PZA	1.00	\$4.400000	\$4.40
45518	MARCO CON SIERRA 12" FLJO STANLEY 20-206	PZA	1.00	\$4.590000	\$4.59
112877	SIERRA PARA MARCO BIMETAL DIENTE ORDINARIO BELLOTA 1812	PZA	1.00	\$1.250000	\$1.25
104795	BROCA DE TITANIO 6MM TACTIX 410135BM	PZA	1.00	\$3.100000	\$3.10
104793	BROCA DE TITANIO 6MM TACTIX 410127BM	PZA	1.00	\$1.300000	\$1.30
104787	BROCA DE TITANIO 3MM TACTIX 410109BM	PZA	1.00	\$0.800000	\$0.80
104791	BROCA DE TITANIO 5MM TACTIX 410123BM	PZA	1.00	\$1.050000	\$1.05
9550	MACHUELO 8MM-1.25 SKC	JGO	1.00	\$7.950000	\$7.95
9549	MACHUELO 6MM-1.0 SKC	JGO	1.00	\$4.250000	\$4.25
9548	MACHUELO 5MM-0.8 SKC	JGO	1.00	\$4.750000	\$4.75
9547	MACHUELO 4MM-0.7 SKC	JGO	1.00	\$4.250000	\$4.25
20051	MACHUELO 3MM-0.50 SKC	JGO	1.00	\$4.250000	\$4.25
66237	PERNO HEX ZINCADO 6X60MM	PZA	1.00	\$0.280000	\$0.28
31955	PERNO HEX ZINCADO 8X30MM	PZA	1.00	\$0.300000	\$0.30
11538	PERNO ESTUFA CABEZA PLANA 1/4X1.1/4"	PZA	1.00	\$0.150000	\$0.15
66294	PERNO ESTUFA CABEZA RED ZINC 4X20MM	PZA	1.00	\$0.100000	\$0.10
31941	TUERCA HEXAGONAL ZINC 6MM	PZA	1.00	\$0.060000	\$0.06
31942	TUERCA HEXAGONAL ZINC 8MM	PZA	1.00	\$0.080000	\$0.08
29934	ARANDELA PLANA ZINCADA 1/4"	PZA	1.00	\$0.050000	\$0.05

Cotización A.B.C13. Fuente de alimentación

PRODUCTO	CANTIDAD	TOTAL
 <p>Baugger Wanptek Nps605W 060V 05A Fuente de Alimentación de Cc de Conmutación 3 Dgitos Pantalla Led Alta... ⚠ Requiere revisión Producto ingresado manualmente</p>	-	1
		\$110.59

Ahorra con PriceSmart

PRECIOS EXCLUSIVOS PARA SOCIOS
Activa precios PriceSmart aquí

RESUMEN DE LA ORDEN

Subtotal: \$ 78.97
 Cargos administrativos: \$2
 Impuestos del país: \$11.09
 Costo de envío al país de destino*: \$ 18.53

PRECIO TOTAL \$110.59

Precio incluye envío y cargos relacionados.

Cotización A.B.C14. Fresas modulares.

PRODUCTO	CANTIDAD	TOTAL
 <p>Fresa Modulo 2 ⚠ Requiere revisión Producto ingresado manualmente</p>	-	1
		\$715.19

Ahorra con PriceSmart

PRECIOS EXCLUSIVOS PARA SOCIOS
Activa precios PriceSmart aquí

RESUMEN DE LA ORDEN

Subtotal: \$ 492
 Cargos administrativos: \$2
 Impuestos del país: \$141.55
 Costo de envío al país de destino*: \$ 79.64

PRECIO TOTAL \$715.19

Precio incluye envío y cargos relacionados.

Cotización A.B.C15. Aceite dieléctrico.

PRODUCTO	CANTIDAD	TOTAL
 <p>Dielectric Fluid, Pail, Clear, 5 gal. ⚠ Requiere revisión</p>	-	1
		\$492.20

Ahorra con PriceSmart

PRECIOS EXCLUSIVOS PARA SOCIOS
Activa precios PriceSmart aquí

RESUMEN DE LA ORDEN

Subtotal: \$ 332.14
 Cargos administrativos: \$2
 Impuestos del país: \$98.02
 Costo de envío al país de destino*: \$ 60.04

PRECIO TOTAL \$492.2

Precio incluye envío y cargos relacionados.

CUPÓN:

Ingresar tu cupón

Continuar comprando

CONTINUAR CON EL PAGO

Cotización A.B.C16. Revestimiento de mesa y termómetro



ALMACENES VIDRI, S.A. DE C.V.

SUCURSAL : SAN BENITO

N.R.F. : 2-7

N.I.T. : 0210-191171-001-6

GIRO : FERRETERIA

DIRECCION : SAN BENITO

EMAIL : alvisa064@vidri.com.sv

TELEFONO : 22643033

COTIZACION No. 641700065099



Fecha 26/9/2022 14:01:01
 Cliente GABRIELA RIVAS ALDANA NRF Cliente
 Dirección CF
 Atención a CONSUMIDOR FINAL
 Vendedor 0004805 - DANIEL ALBERTO CAMPOS NAVARRO Validez Oferta
 Observaciones 70967453 Condición de pago CONTADO

Código	Descripción	U.M.	Cantidad	Precio	Total
34406	PEGAMENTO DE CONTACTO FORMICA 1/4GAL TORO VERDE	QTO	1.00	\$7.800000	\$7.80
6421	FORMICA 4X8' 0.80 BLANCO MATE LW-045	PLG	1.00	\$25.500000	\$25.50
72590	TERMOMETRO DIGITAL BOLSILLO 9840N	PZA	1.00	\$10.500000	\$10.50

Datos Adicionales:

Sub Total	\$43.80
IVA	\$0.00
TOTAL	\$43.80

Precios incluyen IVA

** Precios sujetos a cambio sin previo aviso **

 VENDEDOR

 AUTORIZADO

 ACEPTADO

ANEXO C: MANUAL DE MONTAJE DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN

MANUAL DE MONTAJE DE LA MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN

Se describe la serie de pasos para instalar la máquina, partiendo del hecho que las piezas ya están soldadas y maquinadas a la medida. El diseño de la máquina está desarrollado con el fin de que sea fácil de instalar (ver, Fig. C.1). El proyecto incluye un aproximado de 40 piezas de las cuales algunas van soldadas y otras van empernadas, el manual corresponde a una serie de pasos que se recomienda seguir para armar el prototipo.

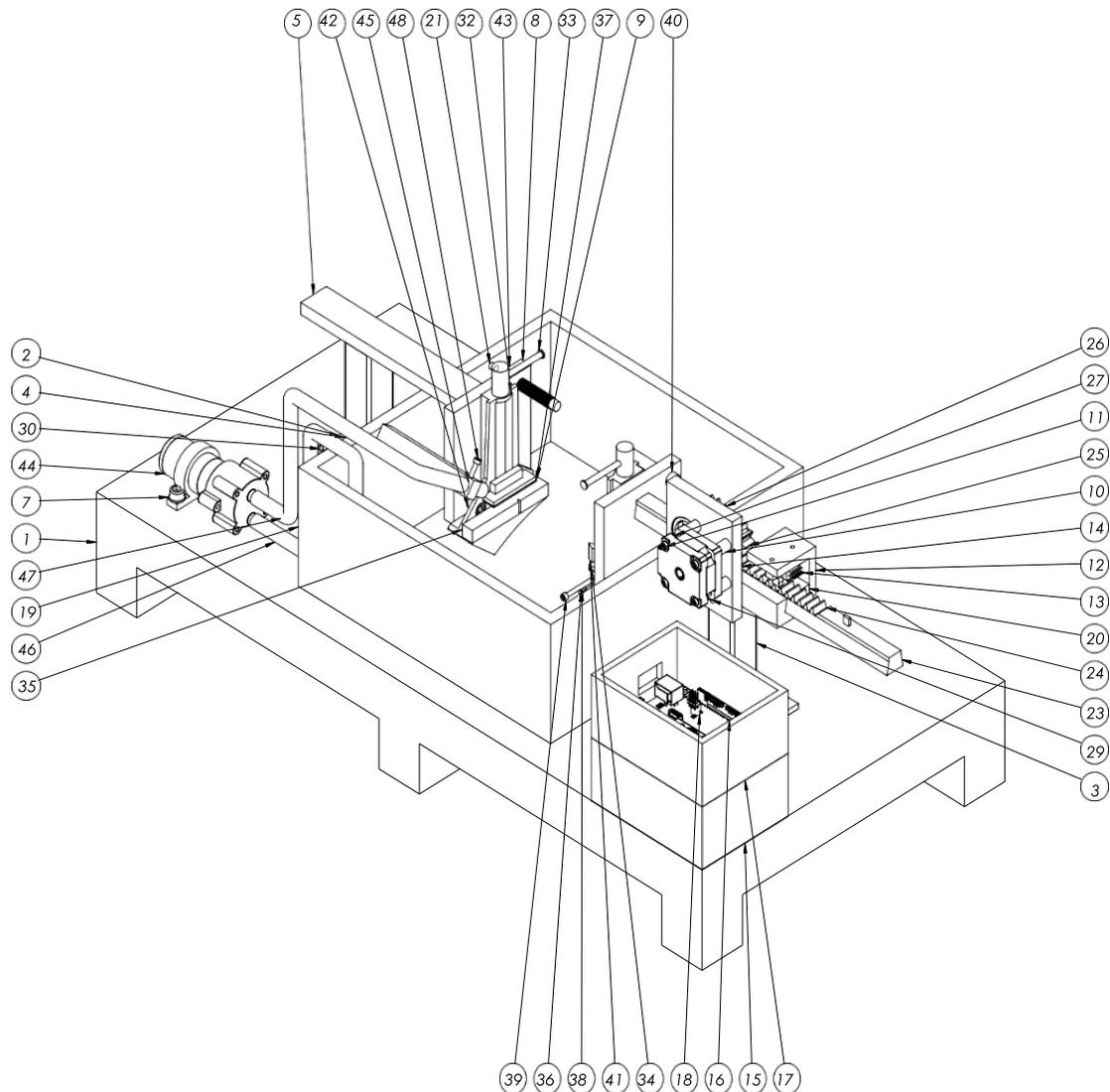


Fig. C.1. Partes de la máquina de maquinado por electroerosión. Los números que aquí se indican se pueden cotejar con los de la Tabla C.1.

Tabla C.1. Listado de materiales para la construcción de la máquina por electroerosión.

Nº	Elemento	Material	Cantidad
1	Mesa	Madera	1
2	Base para perfil cuadrado	Hierro dulce	2
3	Tubo cuadrado longitud de 100 mm	Hierro dulce	1
4	Tubo cuadrado longitud de 90 mm	Hierro dulce	1
5	Brazo porta probeta	Hierro dulce	1
6	Bushing M6x35		8
7	arandela M6		20
8	soporte de prensa	Hierro dulce	2
9	Probeta normalizada	Acero	1
10	amortiguador	Neopreno	4
11	Motor paso a paso NEMA 17		1
12	Soporte de sensor	Hierro dulce	1
13	Sensor H21A1		2
14	Soporte de motor	Hierro dulce	
15	Alza para sistema de control	Madera	1
16	Arduino UNO		1
17	Protección para Arduino	Acrílico	1
18	Bushing M4		4
19	Reservorio	Acrílico	1
20	Riel de cremallera	Acero 1020	1
21	Sensor inductivo LJ8A3		1
22	Eje de motor		1
23	Cremallera	Acero 1020	1
24	Dientes de la cremallera	Acero 1020	1
25	Piñón	Acero 1020	1
26	Engrane conducido	Bronce	1
27	Rodamiento 6200		1
28	Eje para engrane conducido	Acero 1020	1
29	Perno M4		3
30	Perno M6		10
31	Tuerca M6		10
32	Mandíbula fija de la prensa	Aluminio	2
33	Tornillo sinfín de la prensa	Aluminio	2
34	Mandíbula móvil de la prensa	Aluminio	2
35	Neopreno para mandíbula fija	Neopreno	2
36	Neopreno para mandíbula fija	Neopreno	2
37	Neopreno para mandíbula móvil	Neopreno	2
38	Tope para probeta	Neopreno	2
39	Pin de Ø3 x 60 mm para electrodo	Cobre	1
40	Tornillo M8		1
41	Electrodo	Cobre	1
42	Tornillo M6 cónico		4
43	Tuerca M8 para sensor inductivo		1
44	Bomba de aceite		1

Continúa.

Continuación.- Tabla C.1. Listado de materiales para la construcción de la máquina por electroerosión.

45	Soporte para manguera	Hierro dulce	1
46	Manguera de aspiración	Silicon	1
47	Manguera de inyección	Silicon	1
48	Tornillo M3x15		4
49	Filtro de partículas		1

PASOS PARA ARMADO DE LA MAQUINA

- 1) Primero se debe colocar la mesa de madera (ver, Fig. C.2) encima de un lugar seguro, es decir sobre una mesa que sea rígidamente estable.

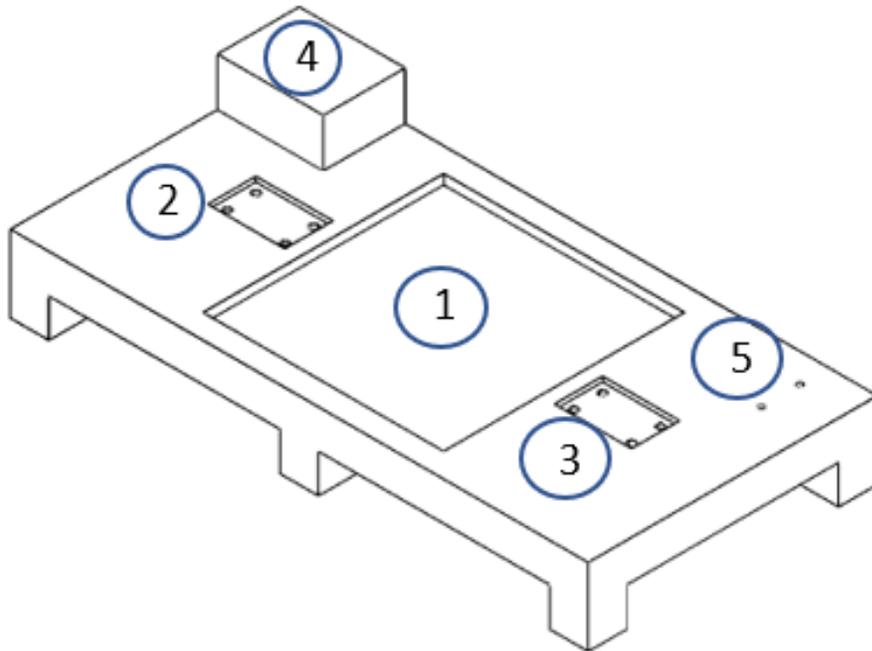


Fig. C.2. Sobre la mesa descansan: 1) el reservorio, 2) el bastidor de la cremallera, 3) el bastidor del porta probeta, 4) la tarjeta de Arduino y 5) la bomba.

- 2) Se procede a colocar el reservorio (ver, Fig. C.3) sobre la hendidura número 1 de la mesa, que se encuentra ubicada al centro de esta (ver, Fig. C.2).

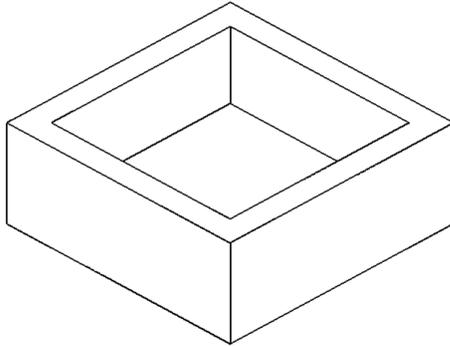


Fig. C.3. Reservorio en el cual se encuentra contenido el líquido dieléctrico.

- 3) Para instalar el bastidor porta probeta (ver, Fig. C.4), es necesario, colocar primero los bushings M6 en cada agujero pasado de la mesa, ahora se coloca la base del bastidor sobre la hendidura número 3 de la mesa (ver, Fig. C.2), con la posición del brazo viendo hacia el reservorio, de manera que el brazo quede por encima del reservorio. Luego de eso, se colocan las arandelas encima de la base, cerciorándose que estén coincidentes con cada agujero, después de eso se procede a colocar los 4 pernos M6 de 60 mm de largo y en el extremo de cada tornillo se coloca una tuerca con su respectiva arandela, se debe apretar la tuerca con una fuerza suficiente para que el bastidor quede sujetado fijamente.

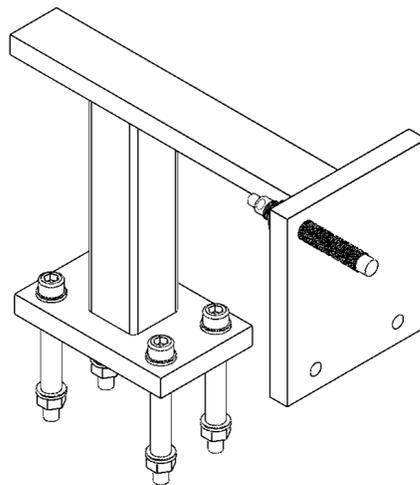


Fig. C.4. Bastidor porta probeta, con su sistema de sujeción, además en el soporte de la prensa se coloca el sensor inductivo.

- 4) Para instalar el bastidor porta electrodo, se procede a colocar los bushings M6 en los agujeros pasados de la mesa, correspondientes a la hendidura número 2 de la mesa (ver, Fig. C.2), ahora se coloca la base del bastidor sobre dicha hendidura, teniendo en cuenta que la porción corta que sobre sale del riel debe estar viendo hacia el reservorio. Luego de eso, se colocan las arandelas encima de la base, cerciorándose que estén coincidentes con cada agujero, después de eso se procede a colocar los 4 pernos M6 de 60 mm de largo y en el extremo de cada tornillo se coloca una tuerca con su respectiva arandela, se debe apretar la tuerca con una fuerza suficiente para que el bastidor quede sujetado fijamente.
- 5) Ahora se procede a colocar la cremallera en el riel (ver, Fig. C.5), debido a que el riel posee la misma forma de sección transversal que tiene la cremallera, solo es necesario deslizar la cremallera a través de la hendidura del riel (ver, Fig. C.6). Tomar en cuenta que el lado de la platina de 3/8 pulg, debe quedar viendo hacia el reservorio. En el agujero de 8 mm se coloca un perno de 30 mm de longitud (ver, Fig. C.7).

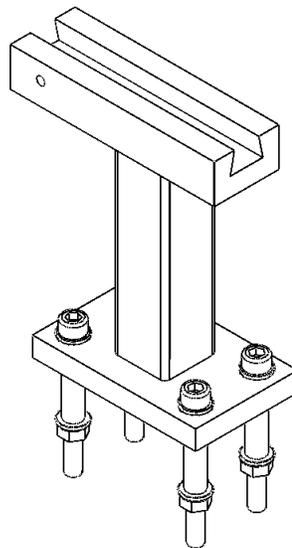


Fig. C.5. Bastidor de la cremallera, con su sistema de sujeción.

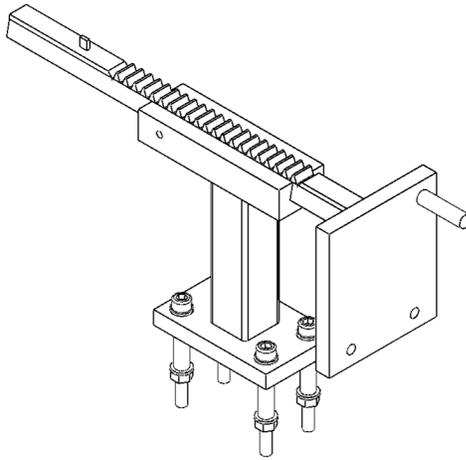


Fig. C.6. Colocación de la cremallera sobre el riel

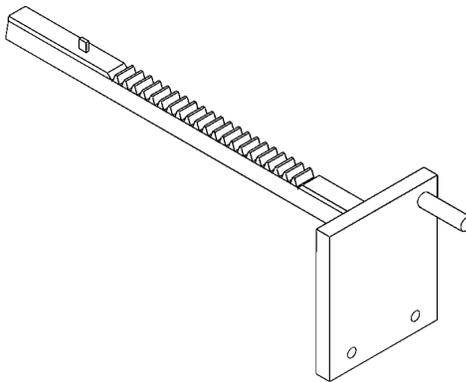


Fig. C.7. Cremallera con soporte para prensa.

- 6) Se procede a colocar los amortiguadores del motor coincidentes con los agujeros dispuestos en el soporte que sirven para sujetar al motor (ver, Fig. C.8a), se debe enroscar cada amortiguador y apretar hasta que estén firmes, ahora se coloca el motor con sus agujeros coincidiendo con los agujeros de los amortiguadores, luego de eso se coloca cada tornillo M3 en los agujeros del motor y se aprieta para que el motor quede sujetado con los amortiguadores, posteriormente se coloca el balero en la hendidura, gracias al ajuste fijo es posible mantener en su lugar al balero debido a la presión que se genera en las paredes externas del mismo, ahora se debe introducir el eje en la cavidad del engrane conducido, la sujeción se debe a la presión que se

genera entre el balero y el engrane (ver, Fig. C.8b), además se debe colocar mediante presión el piñón en el eje del motor. Finalmente, para sujetar el soporte del motor (ver, Fig. C.8a) se ocupan tornillos M4, los cuales se enroscan en el riel del bastidor de la cremallera (ver, Fig. C.5).

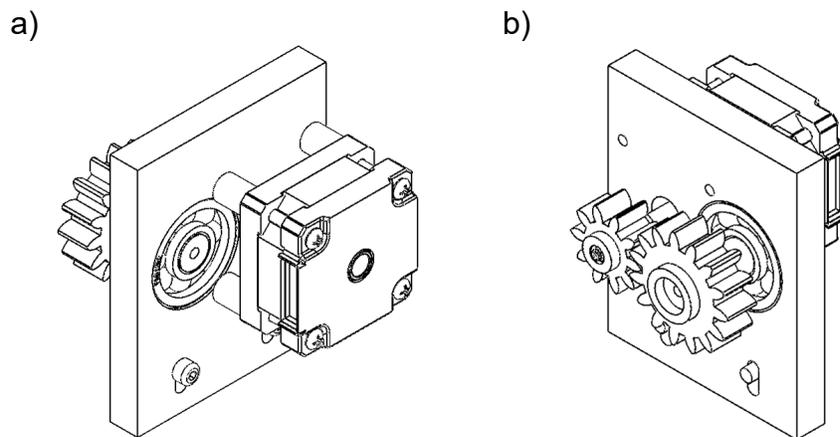


Fig. C.8. Soporte del motor a) amortiguadores y el motor; y b) engrane conducido.

- 7) Se procede a colocar el soporte del sensor (ver, Fig. C.9) en el riel, se ocupa un tornillo M4 para mantener sujetado el soporte en su posición. En él se va a colocar un sensor H21-A1 sujetado mediante 2 tornillos M3. El sensor debe quedar sobre el riel a modo que este detecte la pestaña superior de la cremallera.

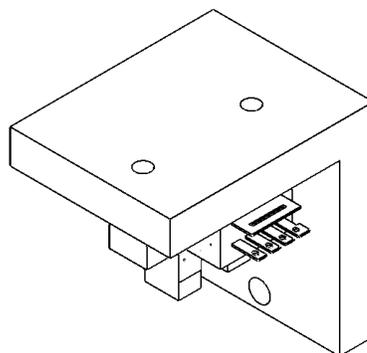


Fig. C.9. Soporte del sensor fotoeléctrico.

- 8) La prensa cuenta con aislante en cada mandíbula (ver, Fig. C.10), en cuanto a su instalación, se debe mencionar que, la prensa se sujeta a la platina de la cremallera mediante dos tornillos cónicos (ver, Fig. C.11), así mismo, la prensa se sujeta a la platina del brazo del bastidor del porta probeta mediante dos tornillos cónicos (ver, Fig. C.12). Se sugiere ocupar un calibrador de nivel para que la prensa quede horizontalmente luego de apretar los pernos cónicos que la sostienen.

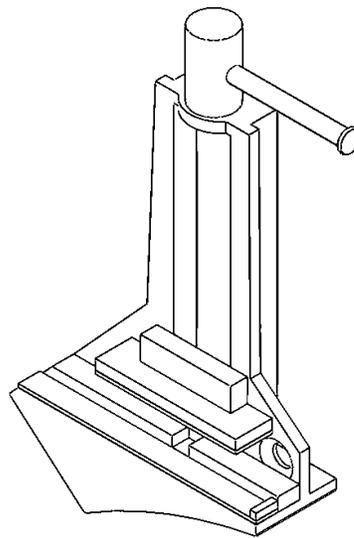


Fig. C.10. Prensa universal de aluminio.

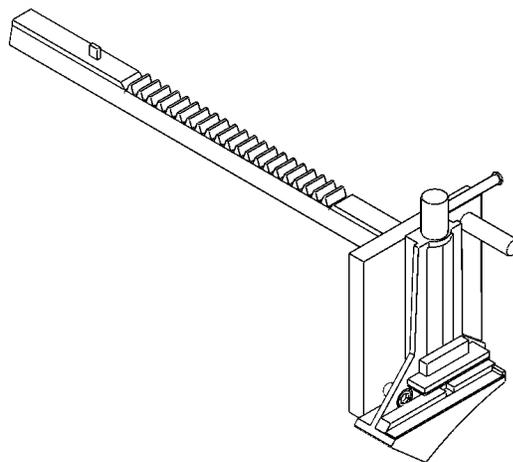


Fig. C.11. Prensa sujeta mediante la platina que esta soldada a la cremallera.

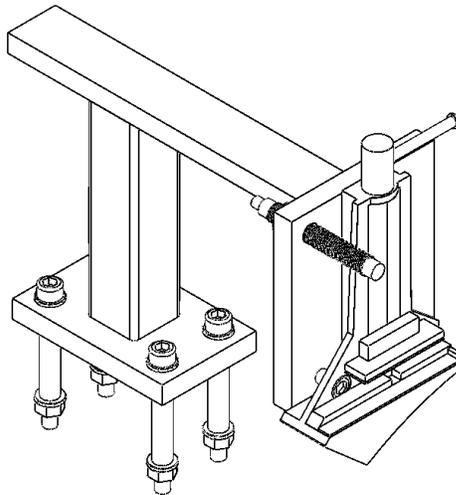


Fig. C.12. Prensa sujeta mediante la platina que esta soldada al brazo porta probeta.

- 9) Se procede a sujetar el soporte del motor al riel mediante 2 tornillos M4, debido a que el soporte del motor tiene agujeros de tipo ojo de pescado, entonces se recomienda verificar que el engrane conducido haga contacto con la cremallera, a su vez se sujeta el soporte del sensor al riel mediante un tornillo M4 (ver, Fig. C.13).

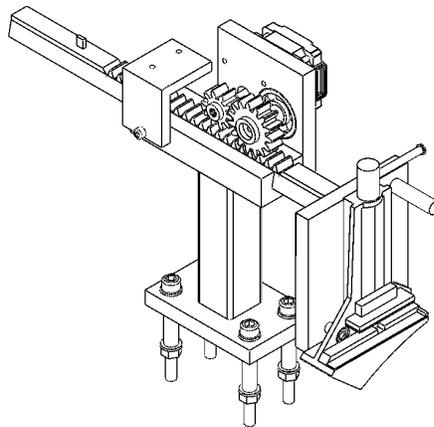


Fig. C.13. soporte de sensor y motor instalados en el riel de la cremallera.

- 10) Se procede a colocar el acrílico protector para la placa de Arduino sobre la posición 4 de la mesa (ver, Fig. C.2), dicho acrílico posee 4 agujeros, en cada agujero se pondrá un bushing de madera y finalmente sobre los bushing se

va a colocar la placa de Arduino Uno, para mantener la placa de Arduino en su posición, se va a sujetar con tornillos M3 en cada agujero, asegurando de apretar debidamente los tornillos (ver, Fig. C.14).

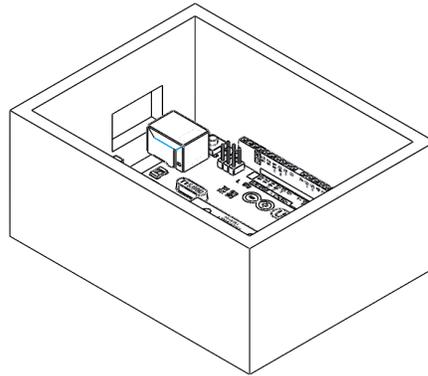


Fig. C.14. Protector de acrílico para la placa de Arduino.

11) Sujetar la bomba mediante 2 tornillos M6 en la posición número 5 de la mesa (ver, Fig. C.2). Conectar la manguera de aspiración en el conector de aspiración de la bomba, conectar la manguera de alimentación en el conector de alimentación de la bomba (ver, Fig. C.15). La manguera de aspiración descansa en el fondo del reservorio mientras que la manguera de alimentación se sujeta a través de un bloque, el cual está sujeto al reservorio (ver, Fig. C.16).

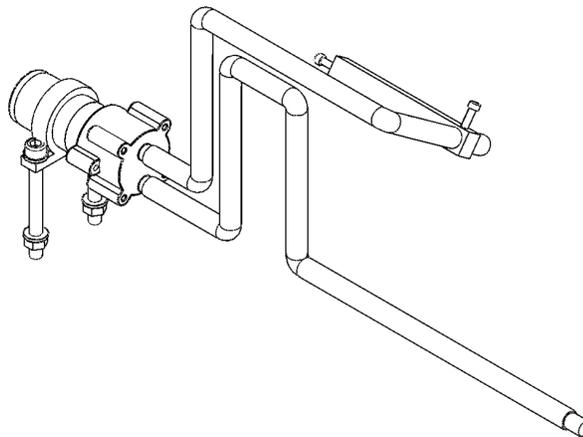


Fig. C.15. Sistema de bombeo.

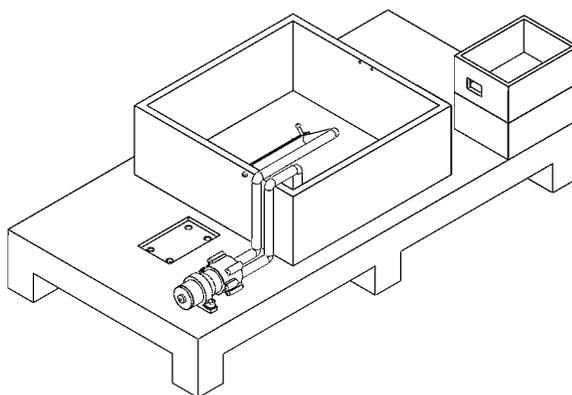


Fig. C.16. Ubicación de la bomba y del soporte para la manguera

ANEXO D: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

MANUAL DE OPERACIÓN – MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN



Todas las advertencias están marcadas con este símbolo y deben ser estrictamente respetadas.

INTRODUCCIÓN

Antes de trabajar con este equipo, este manual debe ser leído cuidadosa y claramente entendido. La operación de este equipo se debe realizar bajo ciertas precauciones para evitar ocasionar problemas o daños en el mismo, u ocasionar accidentes en las personas que lo manipulan. Con el adecuado cuidado y su respectivo mantenimiento se garantiza el correcto funcionamiento de dicho equipo. Este es una máquina de electroerosión por penetración, por lo tanto, para mantener el correcto funcionamiento no olvide seguir las indicaciones estipuladas en el Manual de Mantenimiento.

NORMAS DE SEGURIDAD

- 1) La máquina sólo deberá ser utilizada según lo establecido en este manual de operaciones.
- 2) El mantenimiento, limpieza y ajuste, sólo se deberá llevar a cabo una vez que el equipo operativo se encuentre parado.
- 3) Antes de poner la probeta en la máquina, se debe verificar que la probeta está limpia y sin golpes y que el electrodo no posee rayaduras, golpes o desgaste apreciable.
- 4) Después de un trabajo de reparación o de mantenimiento, asegúrese de que todos los elementos están en su sitio.
- 5) El operario de la máquina es responsable de que no haya terceras personas o animales en las áreas de operación o de riesgo.
- 6) La máquina de electroerosión por penetración sólo puede ser usada por personas mayores de 18 años.

- 7) Además de gafas de protección, es obligatorio el uso de calzado de seguridad, gabacha y guantes de hule resistentes a descargas eléctricas.
- 8) Antes de empezar a usar la máquina de electroerosión asegúrese de que la estructura está firme y estable.
- 9) No introduzca las manos adentro del reservorio cuando los mecanismos están en movimiento o incluso cuando la máquina está encendida.
- 10) Manténgase atento al funcionamiento correcto de la máquina cuando esta se encuentra en operación, en caso de que la máquina presente anomalías o desperfectos, presione inmediatamente el botón de paro de emergencia y llame al técnico.
- 11) No introducir objetos de ningún tipo adentro del reservorio.
- 12) No comer en la zona de trabajo y evitar distracciones mientras se opera la máquina.

PICTOGRAMAS

¡Use gafas protectoras!	
¡Use guantes protectores!	
¡Use calzado de protección!	
Lea el manual de instrucciones antes de empezar a usar la máquina.	
No manipule ninguna de las partes de la máquina hasta que esté completamente parada.	
No se acerque a las partes de la máquina que estén en movimiento.	

DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES

Elemento	Descripción
Porta probeta	Dispositivo provisto de una prensa la cual se encarga de sostener y mantener en su sitio a la probeta.
Porta electrodo	Dispositivo provisto de una prensa la cual se encarga de sostener y mantener en su sitio al electrodo.
Sistema de control	Está provisto de la programación adecuada para controlar al motor dependiendo de las señales que reciba.
Sistema de bombeo	Sistema provisto de una bomba la cual se encarga de recircular el líquido dieléctrico y a su vez limpia la zona de electroerosión.

OPERACIÓN

A. Procedimientos y lista de verificación previos a la puesta en servicio.	
<p>Antes de poner en marcha la máquina de electroerosión, es necesario verificar que se ha cumplido los siguientes pasos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Vestir equipo de protección 2) Inspeccionar el conjunto porta electrodo 3) Inspeccionar el sistema porta probeta 4) Inspeccionar el sistema de bombeo 5) Verificar que el líquido dieléctrico se encuentra en óptimas condiciones 6) Despejar el área de trabajo tanto de personas como también de objetos 7) Trabajar en una zona perfectamente iluminada 	
Use ropa de protección aprobada y equipos de protección personal cuando la máquina esté en funcionamiento:	<ul style="list-style-type: none"> • Usar en todo momento gafas de seguridad aprobadas por la ANSI, que cuenten con defensas laterales. • Use gabacha para evitar machar ropa con el líquido dieléctrico. • No use nunca joyas ni ropa holgada cuando ponga en marcha o usa el molino triturador. La ropa holgada o colgante, las joyas y el cabello se puede enredar en las piezas móviles.
Inspeccionar el conjunto porta electrodo y la posición inicial de la cremallera.	Verificar que la cremallera se encuentra en su posición inicial, es decir, que la pestaña inferior de la cremallera se encuentra en el campo de detección del sensor óptico 1. Así mismo verificar que los dientes del sistema engrane-piñón se encuentran en perfecto estado, comprobar que todos los pernos estén apretados, revisar que el motor se encuentra energizado, revisar que el electrodo se encuentre colocado correctamente en la prensa, revisar que la cremallera se encuentra lubricada, corroborar que el rodamiento se encuentra en óptimas condiciones.
Inspeccionar el sistema porta probeta	Verificar que todos los pernos estén correctamente apretados, revisar que la probeta se encuentra sujeta

	correctamente y en la posición requerida para desarrollar la muesca en el punto requerido.
Inspeccionar el sistema de bombeo	Revisar que la manguera de alimentación se encuentra apuntando a la probeta, corroborar que la bomba no posee obstrucción, tanto en mangueras como también en el eje de esta debido a viruta suelta.
Verificación de la posición del sensor inductivo M8	Para verificar que el sensor M8 se encuentra en la posición correcta, será necesario quitar el engrane conducido y dejar que la cremallera se mueva libremente, debe verificar que el electrodo y la probeta estén colocados correctamente, de no ser así por favor hacerlo, mover la cremallera hasta que el electrodo coincida con la probeta y mantener la posición, luego hacer que el sensor M8 toque al perno M8, después de esto debe hacer girar el sensor de modo que se separe del perno M8 con el propósito de ubicar el sensor en su posición correcta, para conseguirlo debe hacer que gire 4 vueltas completas. Ahora coloque la cremallera en su posición inicial y vuelva a colocar el engrane conducido en su eje.
Verificar que el líquido dieléctrico se encuentra en óptimas condiciones	Revisar que el líquido dieléctrico presenta buen aspecto, olor y textura. En caso de no ser así, proceder a cambiarlo.
Despejar el área de trabajo tanto de personas como también de objetos	Despeje el área operativa e informe a las personas de su entorno a fin de evitar accidentes. Señalice la zona cuando la máquina se encuentra en funcionamiento.
Trabajar en una zona perfectamente iluminada	Use la máquina solamente en horas de luz del día o en condiciones de iluminación adecuada.

B. Accionamiento de la máquina	
Una vez completados los procedimientos y la lista de verificación previos al arranque, usted está listo para operar la máquina de electroerosión.	
 ADVERTENCIA:	
No ocupar la máquina sin el equipo de seguridad adecuado, si encuentra algún elemento en mal estado después de la verificación, favor notificar inmediatamente al técnico.	
Para accionar la cremallera:	
<ol style="list-style-type: none"> 1) El operario de la máquina debe corroborar que el electrodo se encuentra ubicado correctamente, en posición perpendicular a la probeta que se desea maquinar. 2) Corroborar que la probeta se encuentra situada correctamente, es decir que la punta del electrodo coincide con el punto que se desea maquinar en la probeta. 3) El operario debe presionar el botón de inicio, de esta manera la cremallera se activa. 	

- 4) El operario debe revisar que el recorrido de la cremallera se está llevando a cabo de manera correcta, sin anomalías en su movimiento.
- 5) Cuando comience el proceso de electroerosión, el operario debe estar pendiente de que no exista “chisporroteos” o un olor a quemado desagradable, de ser así se recomienda apretar el botón de paro de emergencia.
- 6) El operario debe revisar que el recorrido de retorno de la cremallera se lleva a cabo sin interrupciones y con una velocidad constante.
- 7) Finalmente, el operario remueve la probeta de la prensa y revisa que el acabado y las dimensiones de la muesca sean las correctas.

En caso de accidente o imprevisto presionar el botón de paro de emergencia (dicho botón se encuentra a un lado del botón de inicio), se encarga de detener la marcha de la cremallera y desconectar la energía que alimenta al electrodo, tener en cuenta que cuando se desactiva el paro de emergencia, la cremallera tiende a buscar su posición inicial.



ADVERTENCIA:

Si observa anomalías en el movimiento o proceso electroerosivo, apretar inmediatamente el botón de paro de emergencia y llamar inmediatamente al técnico.

C. Limpieza e inspección final

Luego de haber finalizado el proceso electroerosivo siga los siguientes pasos:

- a) Inspeccionar el acabado de la probeta y las dimensiones de la muesca.
- b) Revisar el estado del electrodo e inspeccionar el estado general de la máquina, en busca de piezas dañadas o desgastadas.
- c) Revisar que la bomba no tenga viruta atascada en su eje, de ser así destaparla y remover la viruta.
- d) Revisar que el estado de los dientes de los engranes y cremallera estén en buenas condiciones.



ADVERTENCIA:

Preste especial cuidado al estado del electrodo.

D. Disposiciones finales

Si la máquina no se usara de forma cotidiana, es necesario accionar el botón de inicio (sin colocar probeta ni electrodo) a intervalos regulares cada cierto tiempo, como

mínimo cada 2 semanas, y por lo menos 10 minutos. Hay que tener en cuenta que intervalos de uso mensuales ayuda a secar la humedad acumulada y lubrica las partes esenciales de la máquina, si la máquina no se va a usar recurrentemente, se recomienda almacenar el líquido dieléctrico en un depósito hermético, de esta manera se evita que pierda sus propiedades o se contamine.

Recuerde almacenar la máquina en un lugar:

- Limpio, seco y seguro.
- Alejado de fuentes de calor, llamas abiertas, chispas.
- Cubierto 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, lea detenidamente el “MANUAL DE MANTENIMIENTO” y siga sus instrucciones

MANUAL DE MANTENIMIENTO – MÁQUINA DE ELECTROEROSIÓN

INTRODUCCIÓN

En la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador se encuentran laboratorios específicos que ayudan a comprender conceptos y a dinamizar el aprendizaje por medio de equipos especiales, al ser una entidad de educación será de consecuencias graves tener accidentes que pongan en riesgo la salud de los estudiantes y también se evita degradar los equipos para que su nivel de alcance sea mayor. Por lo tanto, las causas pueden ser múltiples y diversas, entre las principales están los malos usos de los equipos, las condiciones de trabajo a las que están sometidas, fallas técnicas o bien la finalización de la vida útil del equipo. Antes de que la seguridad de las personas y de los equipos se vean comprometidas es necesario llevar a cabo

mantenimiento de los mismo. Es en este punto donde cabe mencionar la importancia de realizar un programa de mantenimiento efectivo y confiable para los equipos de los laboratorios. Entonces será necesario llevar un control periódico y ordenado de los trabajos de mantenimiento para reducir al máximo los posibles problemas que puedan surgir en los equipos de laboratorio.

El objetivo de este manual de mantenimiento es proporcionar un protocolo que brinde la oportunidad de centrar la atención en la periodicidad de actividades que se deben ejecutar, para garantizar la mantenibilidad del equipo. De esta manera se darán pautas necesarias sobre las formas de realización, medición y distribución de los tiempos de mantenimiento, seguridad de los trabajos y aspectos para tener en cuenta para facilitar el mantenimiento.

BENEFICIO DEL MANTENIMIENTO

Es importante conocer el ensamble de la máquina (ver, Fig. A.C.1), esto es útil a la hora de dar el mantenimiento requerido. Entre los beneficios alcanzados al desarrollar un programa de mantenimiento efectivo se encuentran:

- a) Reducción de fallas inesperadas de los equipos.
- b) Aumento de tiempo medio de funcionamiento de la maquinaria sin paradas.
- c) Reducción de la cantidad de repuestos de reserva.
- d) El buen estado de los equipos durante su vida útil.

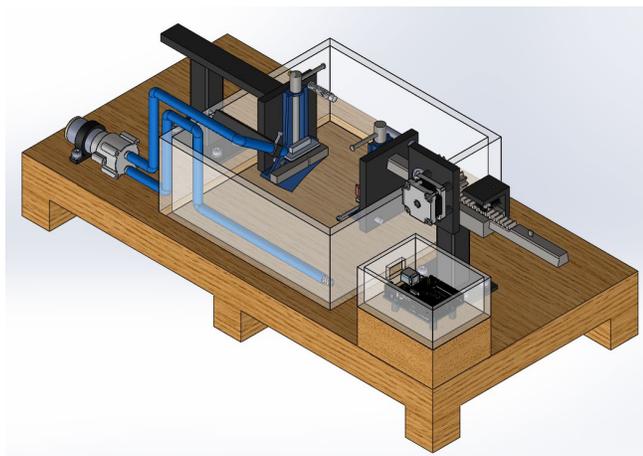


Fig. A.C.1. Dibujo de ensamble de la máquina de electroerosión.

RUTINAS DE MANTENIMIENTO											
Realice las tareas de mantenimiento regular	Realice las tareas de mantenimiento periódico según se indica en el manual para mantener la máquina en condiciones seguras de trabajo.										
Respete las reglas de seguridad	<p>Lea y respete estas reglas de seguridad cuando realiza tareas de servicio a la máquina de electroerosión:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ocupe todas las medidas de seguridad ocupacional vertidas en el manual de operaciones. • Piezas de repuesto. Si hay que cambiar una pieza, use solamente piezas de reparación acordes al diseño de la máquina. Las piezas de repuesto que no responden a las especificaciones pueden resultar peligrosas para la seguridad o provocar el funcionamiento deficiente de la electroerosionadora. 										
Engranajes rectos	Hay que realizar una inspección frecuente del estado de los dientes de los engranes rectos, a fin de controlar su correcto funcionamiento.										
Lubricación	<p>Hay que engrasar el riel de la cremallera. Aplique un film lubricante, también llamado película de aceite, entre los cuerpos que están en contacto de la cremallera y el riel.</p> <table border="1" data-bbox="553 1073 1414 1262"> <thead> <tr> <th colspan="2">Especificaciones del lubricante</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tipo de grasa</td> <td>Grado NLGI #2</td> </tr> <tr> <td>Espesante</td> <td>Litio</td> </tr> <tr> <td>Tipo de aceite base</td> <td>Mineral</td> </tr> <tr> <td>Temperatura de trabajo</td> <td>-30 a 120 °C</td> </tr> </tbody> </table> <p>Protección contra la corrosión, resistente al agua y excelente capacidad de lubricación.</p>	Especificaciones del lubricante		Tipo de grasa	Grado NLGI #2	Espesante	Litio	Tipo de aceite base	Mineral	Temperatura de trabajo	-30 a 120 °C
Especificaciones del lubricante											
Tipo de grasa	Grado NLGI #2										
Espesante	Litio										
Tipo de aceite base	Mineral										
Temperatura de trabajo	-30 a 120 °C										
Ajuste del electrodo de cobre	Cuando el desgaste del electrodo de cobre sea notorio, se recomienda cambiarlo por otro o rectificar la punta con las dimensiones indicadas en los planos.										
Líquido dieléctrico	Revisar que el color, textura y olor del líquido dieléctrico siga siendo adecuada, de lo contrario se sugiere recargar el reservorio con líquido dieléctrico inmaculado.										
Revisión de sensores	Comprobar que cada sensor envía la señal al Arduino, esto se hace mediante la conmutación manual de cada sensor.										
Revisión del sistema de bombeo	Comprobar que no existe viruta entorpeciendo el flujo de líquido a través de la bomba, de ser así removerlo.										

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO				
 ADVERTENCIA: Antes de intentar realizar las tareas de mantenimiento, ¡asegúrese de que tiene todo el equipo de seguridad adecuado y que la máquina este totalmente detenida, identifique las labores de mantenimiento, colocando un cono y un rotulo.				
Elemento a verificar	Cada uso	Diariamente	Mensualmente	Cada 6 meses
Rodamientos, cremallera - engrase		X		
Pernos - apriete			X	
Calcomanías de advertencia - legibilidad		X		
Electrodo – rectificación o cambio			X	
Engranajes rectos				X
Limpieza externa	X			
Revisión del aspecto físico de toda la máquina en general			X	
Sistema de bombeo	X			
Líquido dieléctrico - cambio			X	
Revisión eléctrica – sensores, señales.				X
NOTA: Si es necesario cambiar una pieza, use solamente piezas que responden a las especificaciones por la cual fueron diseñadas. Las piezas de repuesto que no responden a las especificaciones pueden resultar peligrosas para la seguridad o provocar el funcionamiento deficiente de la máquina electroerosionadora.				

INSTRUCTIVO DE USO DEL FORMATO DE CALENDARIZACIÓN DE MANTENIMIENTO A EQUIPOS

Con este formato se pretende programar los mantenimientos de acuerdo con su uso y necesidades de la máquina, considerando también las actividades del laboratorio y días festivos, Por lo tanto, su llenado es de la siguiente manera:

- 1) Período: Anotar el período actual en base a la clase.
- 2) Mes: Se anota el mes a efectuar el mantenimiento.
- 3) Área: Especificar el área que recibirá el mantenimiento.
- 4) Responsable: Nombre de la persona responsable del área.
- 5) Cantidad: Especificar el número de equipos.

6) Descripción del equipo: Indicar una breve descripción del equipo.

7) Fecha: Anotar el período en que se realizará el mantenimiento.

Período (1):

Mes (2)	Área (3)	Responsable (4)	Cantidad (5)	Descripción del equipo (6)	Fecha (7)

Con el programa ya establecido se pretende hacer el mantenimiento a los equipos en tiempo y forma.

FORMATO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO O CORRECTIVO

Llene el presente formulario cada vez que se realicen tareas de mantenimiento en la máquina. Sea claro y breve. Garantizar que todos los campos estén llenos al final de cada mantenimiento. Llene con una X los campos que así lo requieran.

1)	N° de mantenimiento:	Indicar el número de servicio.
2)	Tipo de mantenimiento:	Especificar el tipo de mantenimiento correctivo o preventivo.
3)	Fecha de inicio:	Especificar la fecha de inicio del mantenimiento.
4)	Fecha de finalización:	Especificar la fecha de finalización del mantenimiento.
5)	Nombre del encargado:	Escribir el nombre del encargado de realizar el mantenimiento.
6)	Traslado:	Indicar con un "SI", si el bien será reparado fuera de la escuela de Ingeniería mecánica o con un "NO" de no ser así.
7)	Lugar de traslado:	Indicar si es el caso, el lugar de traslado de la máquina.

8)	Descripción del servicio o falla:	Describir la falla o el servicio a realizar.
9)	Diagnóstico de la falla:	Describir el diagnóstico de la falla.
10)	Elementos a realizar mantenimiento:	Elementos que se verán afectados por el mantenimiento.
11)	Descripción del mantenimiento:	Descripción del proceso desarrollado en el mantenimiento.
12)	Firma responsable:	El responsable de dar mantenimiento firmará el documento.
13)	Observaciones:	Cualquier imprevisto que surgiera en la realización del mantenimiento.

A continuación, se presenta el formato que se usa para el mantenimiento preventivo o correctivo según sea el caso.

Nº de mantenimiento (1): _____

Tipo de mantenimiento (2): Preventivo: _____ Correctivo: _____

Fecha de inicio (3): _____ Fecha de finalización (4): _____

Nombre del encargado (5): _____

Traslado (6): _____ Lugar de traslado (7): _____

Descripción del servicio o falla (8): _____

Diagnóstico de la falla (9): _____

Elementos a realizar mantenimiento (10): _____

Descripción del mantenimiento (11): _____

Firma del responsable (12): _____

Observaciones (13): _____