



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

**EXTENSIÓN LATACUNGA**  
**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**AUTORES: LARA SÁNCHEZ ROBERTO CARLOS**

**QUISPE QUISPE PEDRO ALEXANDER**

**TEMA: REDISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA  
ELECTROEROSIONADORA CON INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA PARA  
EL LABORATORIO DE CNC DE LA ESPE-EL.**

**DIRECTOR: ING. TERÁN HÉCTOR**

**CODIRECTOR: ING. SALAZAR FREDDY**

**Latacunga, Mayo 2014**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
EXTENSIÓN LATACUNGA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA  
CERTIFICACIÓN**

ING. HÉCTOR TERÁN (DIRECTOR)

ING. FREDDY SALAZAR (CODIRECTOR)

**CERTIFICAN:**

Que el trabajo titulado **“Rediseño y automatización de una máquina electroerosionadora con interfaz hombre-máquina para el laboratorio de CNC de la ESPE-EL”** realizado por: LARA SÁNCHEZ ROBERTO CARLOS y QUISPE QUISPE PEDRO ALEXANDER ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que ayudará a la aplicación de conocimientos y desarrollo profesional, **SI** recomiendan su publicación

Latacunga, Mayo del 2014

-----

Ing. Héctor Terán

**DIRECTOR**

-----

Ing. Freddy Salazar

**CODIRECTOR**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
EXTENSIÓN LATACUNGA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros,

LARA SÁNCHEZ ROBERTO CARLOS

QUISPE QUISPE PEDRO ALEXANDER

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado **“Rediseño y automatización de una máquina electroerosionadora con interfaz hombre-máquina para el laboratorio de CNC de la ESPE-EL”** ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

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

Latacunga, Mayo del 2014

-----  
LARA SÁNCHEZ ROBERTO

CC: 180434467-7

-----  
QUISPE QUISPE ALEXANDER

CC: 050335562-0

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**

**EXTENSIÓN LATACUNGA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros,

LARA SÁNCHEZ ROBERTO CARLOS

QUISPE QUISPE PEDRO ALEXANDER

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual del trabajo “**Rediseño y automatización de una máquina electroerosionadora con interfaz hombre-máquina para el laboratorio de CNC de la ESPE-EL**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Latacunga, Mayo del 2014

-----  
LARA SANCHEZ ROBERTO

CC: 180434467-7

-----  
QUISPE QUISPE ALEXANDER

CC: 050335562-0

## DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional.

A Anita que me apoyado en todo momento

Alexander

A mis amados padres y hermano que supieron apoyarme y quererme en cada momento de mi vida, mi amor y mi eterno agradecimiento hacia ustedes.

Roberto

## AGRADECIMIENTO

*Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a los docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas Extensión Latacunga, que han sabido compartir su conocimiento para una eficiente formación profesional y de manera especial al Ing. Héctor Terán e Ing. Freddy Salazar por la acertada dirección en el proceso de este trabajo de investigación.*

Roberto Lara

Alexander Quispe

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
PRESENTACIÓN .....	xix
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1 PROCESOS NO TRADICIONALES DE MAQUINADO. ....	1
1.1.1 CLASIFICACIÓN. ....	1
1.2 MAQUINADO POR DESCARGA ELÉCTRICA (EDM).....	2
1.2.1 HISTORIA DE LA ELECTROEROSIÓN.....	3
1.2.2 TIPOS DE ELECTROEROSIÓN.....	8
1.2.3 EQUIPOS DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN.....	9
1.2.4 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN.....	10
1.2.5 TIPOS DE ELECTRODOS.....	15
1.2.6 AGITACIÓN DEL BAÑO (DIELÉCTRICO). ....	18
1.2.7 FACTORES QUE REPERCUTEN EN LA ELECTROEROSIÓN. ....	20
1.2.8 SUPERFICIE ELECTROEROSIONADA. ....	23
1.2.9 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS CHISPAS. ....	24
1.2.10 EJEMPLOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN.....	27
1.3 MECANISMOS DE TRANSFORMACIÓN DEL MOVIMIENTO.....	28
1.3.1 MECANISMO DE TORNILLO-TUERCA.....	28
1.3.2 TRANSMISIÓN POR TORNILLO POSICIONADOR. ....	28
1.4 GENERALIDADES DE SISTEMAS DE CONTROL.....	30
1.4.1 MOTORES ELÉCTRICOS. ....	30

1.4.2	MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA (AC).....	30
1.4.3	SERVOMOTOR.....	31
1.4.4	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.....	32
	CAPÍTULO II.....	38
2.	REDISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.....	38
2.1	LEVANTAMIENTO DEL ESTADO DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.....	38
2.2	CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA.....	39
2.3	PARÁMETROS DE REDISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO.....	40
2.3.1	MECANISMOS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO.....	40
2.3.2	CÁLCULO DE CARGAS ESTÁTICAS APLICADAS A LOS EJES DE MOVIMIENTO.....	42
2.3.3	REDISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PARA EL MOVIMIENTO LINEAL DE LOS EJES X, Y, Z.....	43
2.4	CÁLCULO DE LOS TORNILLOS DE POTENCIA.....	44
2.4.1	CÁLCULO DE LA FLEXIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA PARA EL EJE X.....	44
2.4.2	CÁLCULO DE LA FLEXIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA PARA EL EJE Y.....	47
2.5	SELECCIÓN DE LOS TORNILLOS DE POTENCIA.....	49
2.5.1	SELECCIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA PARA LOS EJES X, Y.....	49
2.5.2	SELECCIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA PARA EL EJE Z.....	50
2.6	CÁLCULO DEL PAR DE TORSIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA.....	50
2.6.1	CÁLCULO DEL TORQUE PARA EL EJE LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL.....	53
2.6.2	CÁLCULO DEL TORQUE PARA EL EJE VERTICAL.....	54
2.7	SELECCIÓN DE LOS SERVOMOTORES PARA LOS EJES X, Y, Z.....	55
2.7.1	SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR PARA EL EJE X, Y.....	55
2.7.2	SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR PARA EL EJE Z.....	56
2.8	DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO, ELECTRÓNICO Y CONTROL EN LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.....	56
2.8.1	DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL HARDWARE.....	57



2.8.2	PARÁMETROS DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC).....	58
2.8.3	SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE....	59
2.8.4	SELECCIÓN DE LOS SERVODRIVERS PARA EL CONTROL EN LOS SERVOMOTORES. ....	62
2.8.5	PARÁMETROS DEL MOTOR PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DEL FLUIDO DIELECTRICO. ....	64
2.8.6	DISEÑO DEL TABLERO ELÉCTRICO DE CONTROL PARA LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA. ....	65
2.8.7	DISEÑO DEL CIRCUITO DE MECANIZADO POR DESCARGA ELÉCTRICA.....	67
2.8.8	ELEMENTOS ELÉCTRICOS. ....	73
2.9	DISEÑO DE LA PROGRAMACIÓN DEL PLC PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.....	76
2.9.1	PROGRAMAR PLANO X, Y, Z (MANUAL - AUTOMÁTICO).....	76
2.9.2	EJECUTAR.....	79
2.9.3	HOME.....	80
CAPÍTULO III.....		81
3.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA. ....	81
3.1	IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA.....	81
3.1.1.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL EJE Z. ....	81
a.	TORNILLO DE POTENCIA EJE Z.....	81
b.	BASE DEL SERVOMOTOR EJE Z.....	82
c.	MATRIMONIO SERVOMOTOR EJE Z. ....	82
d.	CILINDRO DE BRONCE.....	83
e.	PLETINA PARA EL FINAL DE CARRERA EN EL EJE Z.....	83
e.	MONTAJE FINAL DEL EJE Z. ....	84
3.1.2	IMPLEMENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL EJE X E Y. ....	84
a.	TORNILLO DE POTENCIA EJE Z.....	84
b.	SOPORTE EJES X E Y. ....	85
c.	BASE PARA SERVOMOTOR EJES X E Y.....	85
f.	MATRIMONIO SERVOMOTOR EJES X E Y.....	86
g.	PLETINA PARA EL FINAL DE CARRERA EN EL EJE X. ....	86
3.2	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL. ....	87

3.2.1	IMPLEMENTACIÓN DEL TABLERO DE CONTROL.....	87
3.2.2	DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL PLC XINJE XCC-32T-E AL SERVODRIVER DS2-20P7-A.....	92
3.2.3	PARAMETRIZACIÓN DEL SERVODRIVER.....	93
3.3	IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ.....	95
CAPÍTULO IV.....		99
4	PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA.....	99
4.1	PRUEBAS A LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS.....	99
4.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PLC.....	100
4.3	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL HMI.....	100
4.4	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR DE PULSOS DEL PLC.....	101
4.5	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO DE POTENCIA. 101	
4.6	PRUEBAS DE POSICIONAMIENTO DE LA MESA DE TRABAJO....	102
4.7	PRUEBAS DEL MECANIZADO POR DESCARGA ELÉCTRICA. ....	103
4.8	RESULTADOS.....	107
4.8.1	ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE X.....	107
4.8.2	ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y.....	108
4.8.3	ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Z.....	109
4.8.4	ANÁLISIS DE LA RAPIDEZ DE REMOCIÓN DEL MECANIZADO POR DESCARGA ELÉCTRICA.....	111
4.8.5	VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	112
4.8.6	FACTIBILIDAD DEL PROYECTO.....	113
4.8.7	INVERSIÓN INICIAL DEL PROYECTO.....	113
4.8.7.1	INVERSIONES.....	113
4.8.7.2	PROYECCIÓN DE VENTAS.....	114
4.8.8	VALOR ACTUAL NETO (VAN).....	117
4.8.9	TAZA INTERNA DE RETORNO (TIR).....	117
CAPÍTULO V.....		118
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	118
CONCLUSIONES:.....		118
RECOMENDACIONES:.....		119
BIBLIOGRAFÍA:.....		120

|  
NETGRAFÍA:..... 120  
ANEXOS. .... 121

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Desgaste aproximado del electrodo.....	17
Tabla 2-1 Características generales de la máquina de electroerosión.....	39
Tabla 2-2 Roscas unificadas de paso fino estandar.....	49
Tabla 2-3 Roscas unificadas de paso fino estandar.....	50
Tabla 2-4 coeficientes de fricción de algunos materiales.....	53
Tabla 2-5 Especificaciones del servomotor para los ejes X, Y.....	55
Tabla 2-6 Especificaciones del servomotor para el eje Z.....	56
Tabla 2-7 Especificaciones técnicas del controlador.....	60
Tabla 2-8 Características de las entradas del PLC.....	61
Tabla 2-9 Características de las salidas de alta velocidad.....	61
Tabla 2-10 Características de la salida a transistor.....	62
Tabla 2-11 Datos de placa del motor.....	65
Tabla 2-12 Características de los servomotores de los ejes X, Y, Z.....	65
Tabla 2-13 Corrientes calculadas para los motores de los ejes X, Y, Z.....	66
Tabla 2-14 Corriente calculada para la selección del braker de protección.....	66
Tabla 3-1 Parametrización de los servodriver.....	95
Tabla 4-1 Parámetros de mecanizado con cobre electrolítico.....	104
Tabla 4-2 Parámetros de mecanizado con grafito.....	106
Tabla 4-3 Análisis de desplazamiento en modo manual eje X.....	108
Tabla 4-4 Análisis de desplazamiento en modo automático eje X.....	108
Tabla 4-5 Análisis de desplazamiento en modo manual eje Y.....	109
Tabla 4-6 Análisis de desplazamiento en modo automático eje Y.....	109
Tabla 4-7 Análisis de desplazamiento en modo manual eje Z.....	110
Tabla 4-8 Análisis de desplazamiento en modo automático eje Z.....	110
Tabla 4-9 Rapidez de remoción del cobre electrolítico.....	111
Tabla 4-10 Rapidez de remoción de grafito.....	112
Tabla 4-11 Implementos para la automatización de la máquina electroerosionadora.....	113
Tabla 4-12 Proyección de ventas de matrices.....	115
Tabla 4-13 VAN y TIR.....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Clasificación de los procesos no tradicionales de arranque de metal.....	2
Figura 1-2 Componentes básicos del EDM.....	2
Figura 1-3 Generación de las chispas entre el electrodo y la pieza de trabajo...3	3
Figura 1-4 Primera Máquina electroerosionadora, presentada en la exhibición en Milán Italia 1955.....	4
Figura 1-5 Máquina ONA de electroerosión (1956).....	5
Figura 1-6 Circuito de relajación. ....	6
Figura 1-7 Circuito generador con transistor. ....	6
Figura 1-8 Esquema de electroerosión por hilo.....	7
Figura 1-9 Tecnología CNC en las máquinas electroerosionadoras. ....	7
Figura 1-10 Electroerosión por penetración .....	8
Figura 1-11 Electroerosión por hilo .....	9
Figura 1-12 Maquina electroerosionadora tipo C. ....	10
Figura 1-13 Esquema de un equipo de electroerosión por penetración. ....	11
Figura 1-14 Cráter que se produce en el material durante la electroerosión. ...	12
Figura 1-15 Pasos para la ionización del material en la electroerosión .....	13
Figura 1-16 Conductividad eléctrica de las partículas en el circuito de EDM. ..	14
Figura 1-17 Flujo de electrones desde el circuito de EDM. ....	15
Figura 1-18 Mecanizado por electroerosión: a) Vaporización explosiva del metal fundido b) Formación de partículas diminutas esféricas.....	18
Figura 1-19 Medida del desgaste por desbaste electro erosivo a) desgaste frontal, b) desgaste lineal.....	20
Figura 1-20 Material arrancado de la preforma y desgaste del electrodo en función del flujo de dieléctrico a) grafito y b) cobre.....	21
Figura 1-21 Flujo $q = S \cdot v$ , donde S es a sección activa del electrodo y v la velocidad del líquido. ....	22
Figura 1-22 Definición de la sección activa de un electrodo mecanizado.....	22
Figura 1-23 Esquema del aspecto de la superficie de un acero electroerosionado. ....	23
Figura 1-24 Variación del arranque de material y del desgaste de pieza y electrodo respectivamente en función de la densidad de corriente. ....	24

Figura 1-25	Valores recomendados de densidad de corriente a utilizar en la electroerosión. .... 24
Figura 1-26	Circuito eléctrico para suministro de corriente directa para EDM. . 25
Figura 1-27	Forma de onda del arco eléctrico ON/OFF. .... 26
Figura 1-28	Ionización del fluido eléctrico determina la ocurrencia del arco eléctrico. .... 26
Figura 1-29	Ejemplos de mecanizado por penetración. .... 27
Figura 1-30	Mecanismo tornillo- tuerca..... 28
Figura 1-31	Transmisión por tornillo posicionador. .... 29
Figura 1-32	Mecanismo de etapa linear motorizada de eje único con transmisión de tornillo. .... 29
Figura 1-33	Servomotor..... 32
Figura 1-34	controlador lógico programable PLC..... 33
Figura 1-35	Estructura del PLC compacto y modular..... 33
Figura 1-36	Ejemplo de programación (ladder)..... 37
Figura 2-1	Máquina electroerosionadora: condiciones iniciales. .... 38
Figura 2-2	Máquina antes de su automatización..... 39
Figura 2-3	Mecanismo longitudinal. .... 41
Figura 2-4	Mecanismo transversal..... 41
Figura 2-5	Mecanismo recorrido vertical. .... 41
Figura 2-6	Guía prismática eje X. .... 43
Figura 2-7	Guía prismática del eje Y..... 44
Figura 2-8	Diagrama de carga aplicada al eje longitudinal..... 46
Figura 2-9	Diagrama de fuerza cortante. .... 46
Figura 2-10	Diagrama de momento flector..... 47
Figura 2-11	Diagrama de carga aplicada al eje transversal. .... 47
Figura 2-12	Diagrama de fuerza cortante. .... 48
Figura 2-13	Diagrama de momento flector..... 48
Figura 2-14	Partes de un tornillo..... 51
Figura 2-15	Análisis de fuerza en el tornillo. .... 51
Figura 2-16	Esquema del sistema de la máquina electroerosionadora ..... 57
Figura 2-17	Diagrama del sistema de control de la máquina electroerosionadora. .... 58

Figura 2-18 PLC Xinje XCC – 32T – E.....	60
Figura 2-19 Servodriver DS2-20P7-A. ....	63
Figura 2-20 Moto AC del bombeo del fluido dieléctrico. ....	64
Figura 2-21 Circuito del mecanizado por descarga eléctrica. ....	70
Figura 2-22 Circuito del mecanizado por descarga eléctrica con snubber. ....	71
Figura 2-23 Selector On / OFF.....	73
Figura 2-24 Paro de emergencia. ....	73
Figura 2-25 Breaker.....	74
Figura 2-26 Final de carrera. ....	74
Figura 2-27 Relé.....	75
Figura 2-28 Contactor.....	75
Figura 2-29 Touch Screen. ....	76
Figura 2-30 Diagrama de flujo de la programación en manual.....	77
Figura 2-31 Diagrama de flujo de la programación en automático. ....	78
Figura 2-32 Diagrama de flujo de la ejecución en manual – automático. ....	79
Figura 2-33 Diagrama de flujo de home en X, Y, Z. ....	80
Figura 3-1 Simulación 3D del diseño mecánico. ....	81
Figura 3-2 Tornillo de potencia eje Z. ....	81
Figura 3-3 Base para el servomotor eje Z.....	82
Figura 3-4 Matrimonio eje Z.....	82
Figura 3-5 Cilindro de broce eje Z.....	83
Figura 3-6 Pletina para alojar el final de carrera eje Z.....	83
Figura 3-7 Montaje final del eje Z.....	84
Figura 3-8 Construcción de los tornillos de potencia para los ejes X e Y. ....	84
Figura 3-9 Guías y tuercas ejes X e Y. ....	85
Figura 3-10 Anillo de bronce, soportes ejes X e Y. ....	85
Figura 3-11 Base para servomotor ejes X e Y. ....	86
Figura 3-12 Matrimonio ejes X e Y.....	86
Figura 3-13 Pletina para alojar el final de carrera eje X. ....	87
Figura 3-14 Pletina para alojar el final de carrera eje Y. ....	87
Figura 3-15 Distribución de elementos en el tablero de control.....	88
Figura 3-16 Conexión eléctrica de los elementos y equipos. ....	89
Figura 3-17 Esquema de conexión del PLC.....	90

Figura 3-18 Conexión del relé se salida hacia el contactor del motor. ....	91
Figura 3-19 Conexión del pulso hacia el opto acoplador.....	91
Figura 3-20 Conexión del PLC con los servodrivrs de los ejes X, Y, Z.....	92
Figura 3-21 Funciones generales del sistema de control. ....	95
Figura 3-22 Configuración de posiciones eje x, y, z modo manual.....	96
Figura 3-23 Pantalla configuración automática. ....	97
Figura 3-24 Ventana de ejecución del programa. ....	97
Figura 3-25 Ventana de parámetros a Home .....	98
Figura 4-1 Tablero de control de la maquia electroerosionadora. ....	99
Figura 4-2 Verificación del encendido del PLC. ....	100
Figura 4-3 Pruebas del funcionamiento de la comunicación HMI-PLC.....	100
Figura 4-4 Comprobación del generador de pulsos del plc. ....	101
Figura 4-5 Verificación del voltaje de la fuente de alimentación. ....	101
Figura 4-6 Verificación del desplazamiento de la mesa de trabajo eje Y.....	102
Figura 4-7 Verificación delo desplazamiento de la mesa de trabajo eje X.....	102
Figura 4-8 Verificación del desplazamiento del eje Z. ....	103
Figura 4-9 Electrodo de cobre electrolítico.....	104
Figura 4-10 Mecanizado de 3mm .....	105
Figura 4-11 Mecanizado de 4mm .....	105
Figura 4-12 Mecanizado de 4mm .....	105
Figura 4-13 Mecanizado de 6mm .....	105
Figura 4-14 Electrodo de grafito.....	106
Figura 4-15 Mecanizado de 9mm .....	107
Figura 4-16 Mecanizado de 10mm .....	107
Figura 4-17 Mecanizado de 9mm .....	107
Figura 4-18 Mecanizado de 9mm .....	107
Figura 4-19 Mecanizado de 7mm .....	107



## RESUMEN

Actualmente en nuestro país, la mayoría de pequeños y medianos empresarios de las industrias metalmecánicas, que se dedican a la fabricación de matrices y moldes, realizan el proceso en máquinas electroerosionadoras convencionales, limitando la producción en serie y el tiempo de operación.

El presente proyecto consiste en el “REDISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA CON INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA PARA EL LABORATORIO DE CNC DE LA ESPE-EL.”, cuya finalidad es integrar una interfaz hombre-máquina para supervisión y control del proceso amigable para los usuarios y con alta funcionalidad.

Este mecanizado por descarga eléctrica se realiza con un electrodo previamente fabricado, la característica más relevante de la electroerosión es la posibilidad de erosionar cualquier tipo de material conductor, independientemente de su dureza, ya que el desbaste en la pieza a mecanizar no se produce por arranque de viruta sino por eliminación de material mediante arcos eléctricos.

Las modificaciones requeridas en la parte mecánica fueron el rediseño del sistema de transmisión, para los movimientos de la mesa (eje X e Y) y el mecanismo de avance del electrodo hacia la pieza de trabajo (eje Z), mismos que serán adaptados a servomotores para ejecutar su desplazamiento y posicionamiento con exactitud, dentro del sistema eléctrico y electrónico se realizaron las conexiones necesarias para la calibración de los equipos y lograr su correcto funcionamiento.

De esta manera se obtuvo una máquina electroerosionadora capaz de realizar movimientos en tres ejes controlados desde una interfaz, logrando así obtener similares características a las existentes en el mercado para la fabricación de matrices.

**Palabras Clave:** Electroerosión, dieléctrico, automatización, electrodo, maquinado.

|

## ABSTRACT

Currently in our country, most of small and medium entrepreneurs of metalworking Industry engaged in the manufacture of dies and molds perform the process in conventional EDM machines, limiting mass production and operation time.

This project consists of: “REDESIGN AND AUTOMATION OF A ELECTROERODING MACHINE WITH HUMAN-MACHINE INTERFACE FOR THE CNC LABORATORY OF ESPE-L.”

The proposed project has as aim to integrate a human-machine interface to supervise and control the process, with high functionality for users.

The electrical discharge machining is carried out with an electrode previously manufactured; the most important feature of EDM is the ability to erode any conductive material, regardless of hardness, as the roughing in the work piece is not produced by the chip removal but rather by material removal by electrical arcs.

The required changes in the mechanical part were gotten through the redesign of the transmission system to the movements of the worktable (X and Y axis) and the advancing mechanism of the electrode to the work piece (Z axis), which will be adapted to the servo motors to perform their displacement and positioning with accuracy, inside of the electrical and electronic system the necessary connections were made to adjust the equipment and getting the correct performance.

In this way, an electro eroding machine was obtained which is capable of performing movements in three axes and it is controlled from an interface, achieving well characteristics similar to those existing on the market to manufacture any type of dies and molds.

**Keywords:** EDM, dielectric, automation, electrode, machining.

## PRESENTACIÓN

El presente proyecto describe el rediseño y automatización de una máquina electroerosionadora con interfaz hombre-máquina para el laboratorio de CNC de la ESPE-L.

En el capítulo I, contiene una descripción general de la electroerosión la cual permitirá tener una idea de este tipo de mecanizado, además la descripción de los elementos y componentes que forman parte del sistema.

En el capítulo II, se detalla el rediseño de los elementos mecánicos, diseño del sistema eléctrico, electrónico y diseño del sistema de control.

En el capítulo III, se describe la implementación mecánica, eléctrica y de control con su interfaz hombre-máquina para controlar el proceso de electroerosión.

En el capítulo IV, se refiere la evaluación del proyecto y análisis de los resultados obtenidos, presentando las pruebas realizadas y verificando la hipótesis.

En el capítulo V, se presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

## CAPÍTULO I

### 1. GENERALIDADES.

#### 1.1 PROCESOS NO TRADICIONALES DE MAQUINADO<sup>1</sup>.

Aunque la mayor parte del maquinado se realiza eliminando material en forma de virutas más o menos definidas, existen otros métodos que ofrecen capacidades únicas que son muy utilizados a nivel industrial. Exploraremos los conceptos básicos de la remoción de material por medio de:

- Disolución química.
- Disolución química asistida por corriente eléctrica.
- Descarga eléctrica controlada.
- Haces de electrones y rayos láser de alta intensidad de energía.
- Otros procesos.

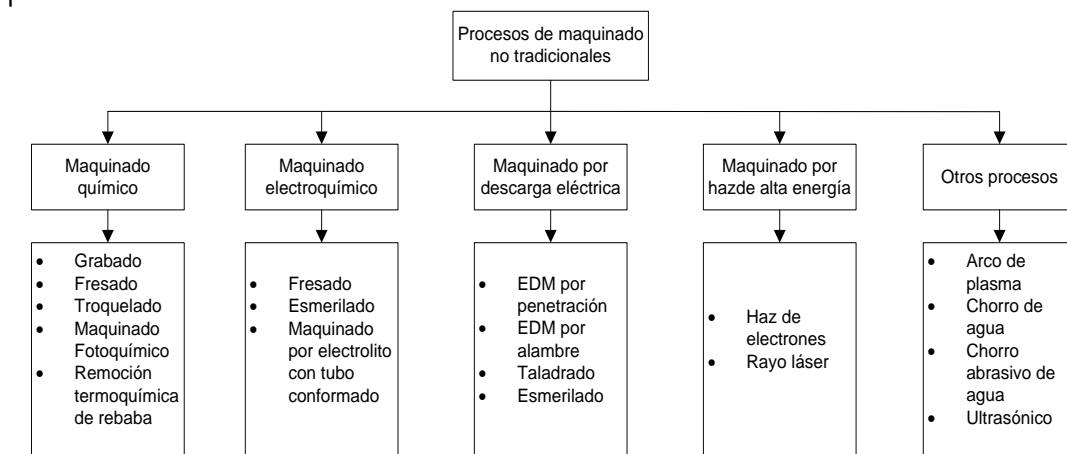
Existe una variedad de procesos para eliminar material por fusión, evaporación, o acción química y/o eléctrica; a menudo se les llama colectivamente procesos no convencionales o no tradicionales. Como grupo, se caracterizan por la insensibilidad a la dureza del material de la pieza de trabajo, de ahí 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.

##### 1.1.1 CLASIFICACIÓN.

En forma más conveniente, los procesos se clasifican de acuerdo con el modo de acción (figura 1-1). Algunos procesos son exclusivamente para la eliminación de material, pero los de haces de alta energía también se pueden usar para unir materiales.

---

<sup>1</sup> SCHEY, J. (2000). *Procesos no tradicionales de maquinado* (4ta ed.). Mexico: Mc Graw Hill.

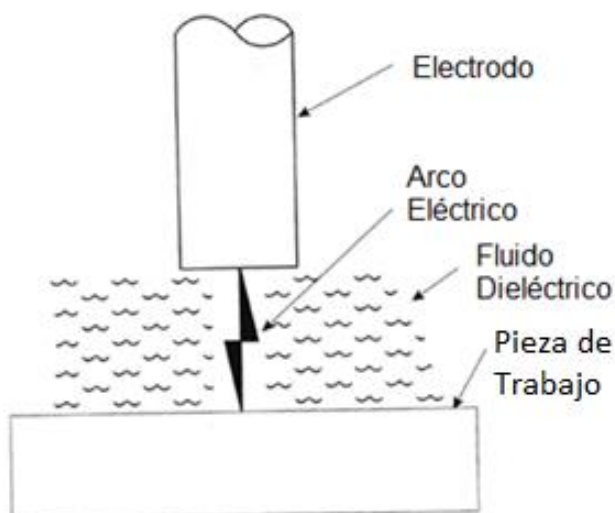


**Figura 1-1. Clasificación de los procesos no tradicionales de arranque de metal.**

## 1.2 MAQUINADO POR DESCARGA ELÉCTRICA (EDM)<sup>2</sup>.

Mecanizado por descarga eléctrica (EDM) es el proceso de mecanizado de materiales eléctricamente conductores mediante el uso de chispas controlada con precisión que se producen entre un electrodo y una pieza de trabajo en presencia de un fluido dieléctrico.

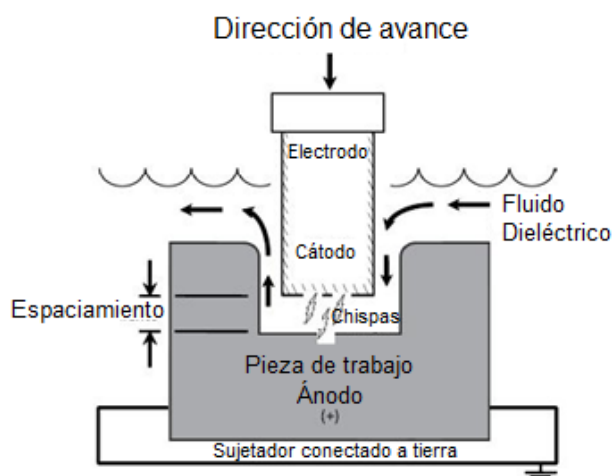
El electrodo puede considerarse como la herramienta de corte en la (figura 1-2) se ilustra los componentes básicos del proceso EDM.



**Figura 1-2 Componentes básicos del EDM.**

<sup>2</sup> Elman C., J. (2001). *Electrical Discharge Machining*. Estados Unidos: SME Society of Manufacturing Engineers.

El proceso de maquinado de descarga eléctrica se basa en la erosión de los metales mediante chispas de descargas eléctricas. Se sabe que cuando se deja que se toquen entre sí dos alambres conductores de corriente, se produce un arco. Si se examina con detalle el punto de contacto entre los dos conductores, se nota que una porción pequeña del metal se ha erosionado y desaparecido, dejando una pequeña oquedad. La (figura 1-3) ilustra que cada chispa se produce entre los puntos más cercanos del electrodo y la pieza de trabajo.



**Figura 1-3 Generación de las chispas entre el electrodo y la pieza de trabajo<sup>3</sup>.**

### 1.2.1 HISTORIA DE LA ELECTROEROSIÓN<sup>4</sup>.

Se argumenta que desde que la electricidad comenzó a dar sus primeros pasos se observó el efecto destructivo producido por la chispa eléctrica al saltar entre dos contactos en el momento de su separación.

Este efecto incitó a numerosos científicos a profundizar en su investigación, con el fin de evitarlo, y ello, unido a una necesidad de la época de buscar un método nuevo de mecanizado diferente a los convencionales

<sup>3</sup> Fuente: Diseño y prueba de un sistema de control de espaciamiento y potencia para Micro-EDM recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-3812009000100001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-3812009000100001&script=sci_arttext)

<sup>4</sup> C.I.P. ETI Tudela. (2014). *etitudela*. Recuperado de: <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/mipagina/downloads/electroerosiononamio.pdf>

|  
que utilizaban herramientas mecánicas, llevó a la idea de utilizar el citado efecto destructivo como método de reproducción de formas.



**Figura 1-4 Primera Máquina electroerosionadora, presentada en la exhibición en Milán Italia 1955<sup>5</sup>.**

Las primeras máquinas de electroerosión<sup>6</sup> que aparecieron hacia los años 1948-1950 (figura 1-4), eran básicamente máquinas-herramienta convencionales, tales como taladradoras, etc. que habían sido transformadas parcialmente para las necesidades de la electroerosión, adaptándoles un generador, un tanque de trabajo.

En 1943, en plena segunda guerra mundial, y dada la escasez de oro y cobre, los científicos soviéticos B.R. y N.I. LAZARENKO investigaban en la búsqueda de materiales que pudieran sustituirlos como contactos de potencia.

Si bien su mayor interés investigador era cómo minimizar el efecto de las descargas, se percataron de que bajo ciertas condiciones el desgaste se maximiza, lo que les llevó a pensar en utilizar esta técnica como una nueva

---

<sup>5</sup> Fuente: <http://www.pogc.ir/Portals/0/maghalat/891104.21.pdf>

<sup>6</sup> Helmi A., Y., & El-Hofy, H. (2008). *Machining Technology: Machine Tools and Operations*. Estados Unidos: CRC Press.

| tecnología para el arranque de material. Para ello, pusieron a punto el primer circuito generador de descargas erosivas, también conocido como "circuito Lazarenko" y desde entonces se ha denominado con la palabra "ELECTROEROSION" a esta nueva técnica de mecanización de los metales.

La característica más importante de la electroerosión es la posibilidad de erosionar cualquier tipo de material conductor, independientemente de su dureza, ya que los factores que influyen en los resultados no son los puramente mecánicos como dureza, tenacidad, etc. sino los térmicos como conductividad térmica, temperatura de fusión, etc. La historia de la electroerosión ha estado jalonada por una serie de avances que han ido desvelando como avances fundamentales que han permitido que el campo de aplicaciones haya ido aumentando fuertemente.

Dentro de este contexto, habría que situar el primer gran hito en el origen mismo de la electroerosión, ya que supuso el poder mecanizar materiales duros como los aceros templados o los carburos de tungsteno. Pero fue a mediados de la década de los 50 (figura 1-5) cuando aparecieron en el mercado las primeras máquinas de electroerosión concebidas como tales, siendo alguna de sus aplicaciones iniciales la destrucción de brocas y machos rotos en piezas.



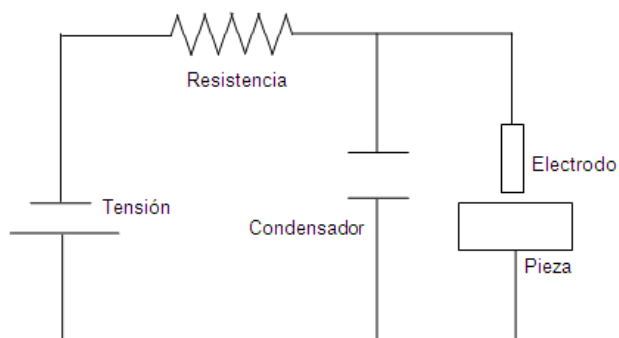
**Figura 1-5 Máquina ONA de electroerosión (1956)<sup>7</sup>.**

---

<sup>7</sup> Fuente: Ona Recuperado en:<http://www.interempresas.net/MetalMecanica-ONA.html>

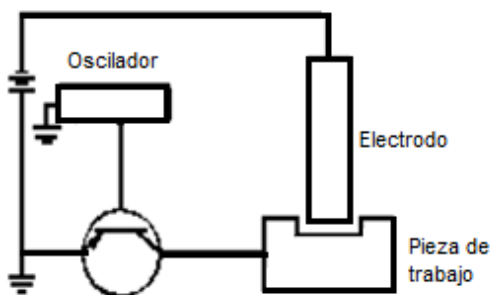


Los primeros generadores que existieron, denominados de relajación (Figura 1-6), producían un gran desgaste de los electrodos, del orden del 100% en volumen, pero esto no fue impedimento para que los sectores industriales se fijasen en la naciente tecnología.



**Figura 1-6 Circuito de relajación.**

Al igual que los avances de la electrónica tuvieron su influencia en otras áreas de la tecnología, el poder sustituir los generadores de relajación por los transistorizados (figura 1-7), supuso para la electroerosión el segundo gran hito, cosa que ocurrió hacia inicios de los 60.

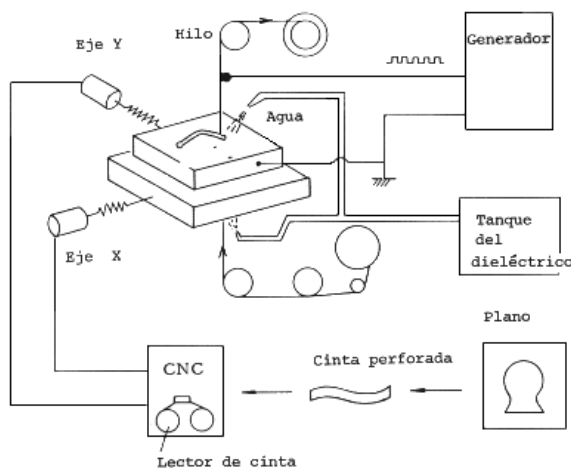


**Figura 1-7 Circuito generador con transistor.**

De hecho, la reducción de los índices de desgaste de los electrodos a niveles del 0,5% en volumen, consecuencia directa del uso de los generadores transistorizados, abrió las grandes puertas de la industria del molde, matricería, forja, etc.

Hasta esas épocas, la única electroerosión conocida era la penetración, y su aplicabilidad en el mercado era un hecho real y ampliamente aceptado. Es entonces, hacia finales de los 60 y comienzos de los 70, cuando surge la

idea de desarrollar la tecnología de las máquinas de electroerosión por hilo (figura 1-8), hecho que debería ser considerado como el tercer gran hito de la electroerosión.



**Figura 1-8 Esquema de electroerosión por hilo<sup>8</sup>**

Si bien la electroerosión por hilo se ha desarrollado gracias a la evolución de la electrónica y, más concretamente, a los controles numéricos, estos desarrollos tecnológicos también han tenido su influencia en la electroerosión por penetración. En efecto, puede cifrarse en los inicios de la década de los 80 el comienzo del cuarto gran hito de la electroerosión que es el que liga a la tecnología de los CNC con la electroerosión por penetración (figura 1-9).



**Figura 1-9 Tecnología CNC en las máquinas electroerosionadoras<sup>9</sup>.**

<sup>8</sup> Fuente: EDM Hilo-Introducción. Recuperado de: <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/edm/Hilo01.htm>

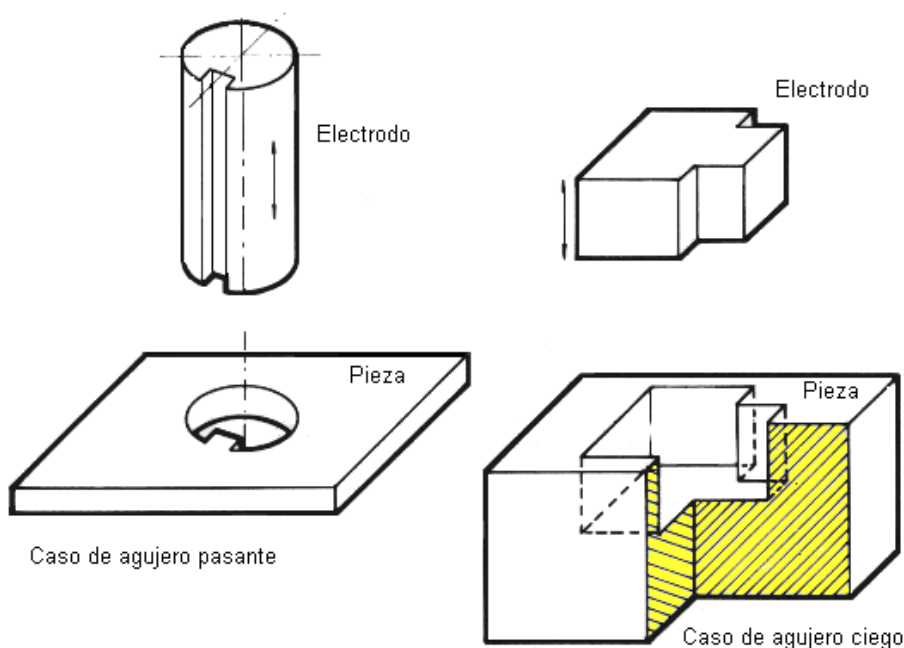
Pero, por otra parte, la evolución tecnológica ha aportado nuevos materiales, tales como los diamantes policristalinos, las cerámicas, los composites de matriz metálica, etc., cuyo mecanizado por electroerosión puede abrir nuevos e interesantes campos de aplicación.

Por último, no conviene olvidar la evidentemente previsible progresiva implantación, desde finales de los 90, de las microtecnologías, en las cuales la electroerosión jugará un papel de gran importancia.

## 1.2.2 TIPOS DE ELECTROEROSIÓN.

### 1.2.2.1 ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN<sup>10</sup>.

Se define el mecanizado de agujeros y formas ciegas (figura 1-10), en las que el electrodo tiene la forma que se desea mecanizar. Debe existir un movimiento relativo vertical entre electrodo y pieza, moviéndose el electrodo y manteniéndose fija la pieza.



**Figura 1-10 Electroerosión por penetración**

9 Fuente: L&C Matricería. Recuperado de: <http://matricerialyc.com.ar/equipamiento.html>

10 C.I.P ETI Tudela. (2013). etitudela. Recuperado de: <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/edm/Cap1.htm>

### 1.2.2.2 ELECTROEROSIÓN POR HILO.

Mecanizado de agujeros pasantes y contornos de formas muy complejas. El electrodo es un hilo continuo, con movimiento en los tres ejes del espacio, que va cortando la pieza (figura 1-11).

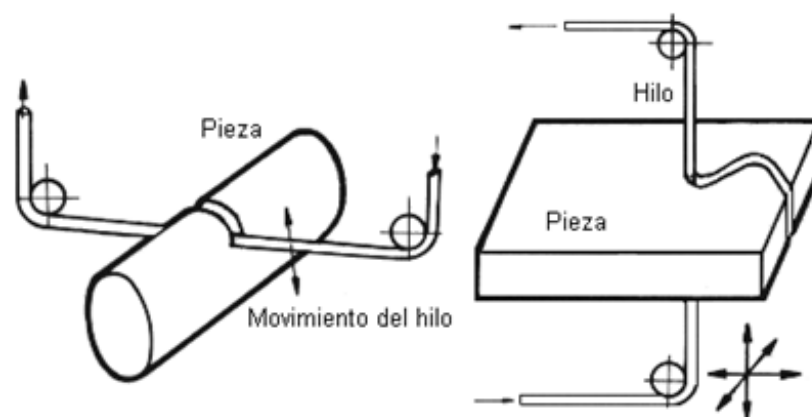


Figura 1-11 Electroerosión por hilo<sup>11</sup>

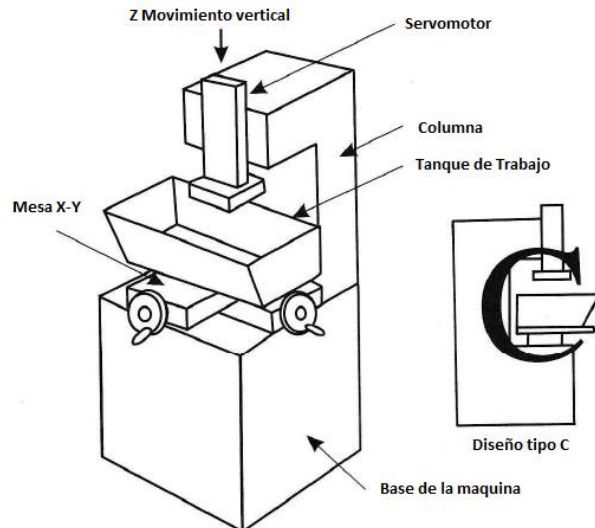
### 1.2.3 EQUIPOS DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN.

Los equipos de electroerosión tienen una serie de componentes básicos como los reflejados en la (figura 1-12) y que, a grandes rasgos, podrían generalizarse en:

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

Existen varios diseños de máquinas, en cada diseño existen diferentes formas de mover el electrodo en relación con la pieza de trabajo, y para hacerlo de manera que el mecanizado se realice de forma adecuada, la máquina electroerosionadora pertenece al modelo tipo C (figura 1-12), ya que la forma de la estructura es similar a una C.

<sup>11</sup> Fuente: La Electroerosión. Recuperado de: <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/edm/Cap1>.



**Figura 1-12 Máquina electroerosionadora tipo C<sup>12</sup>.**

Mesa XY, es similar en diseño a otras máquinas de fabricación como fresadoras verticales. El tanque de trabajo normalmente incluye un extraíble frontal que proporciona acceso a la mesa de la máquina para el montaje y la inspección de la pieza de trabajo.

Un punto muy importante es posicionar el electrodo y la pieza de trabajo, la estructura debe estar rígida para mantener un control muy preciso sobre la pieza de trabajo y el electrodo cuando se produce la chispa. Si la máquina es grande o pequeña, la brecha de chispa siempre estará en un rango aproximado de .0010-0040 pulgadas (0,025 a 0,102 mm). Cualquier movimiento que cambia la brecha provocará un funcionamiento errático del sistema. El movimiento del servo debe siempre moverse con precisión.

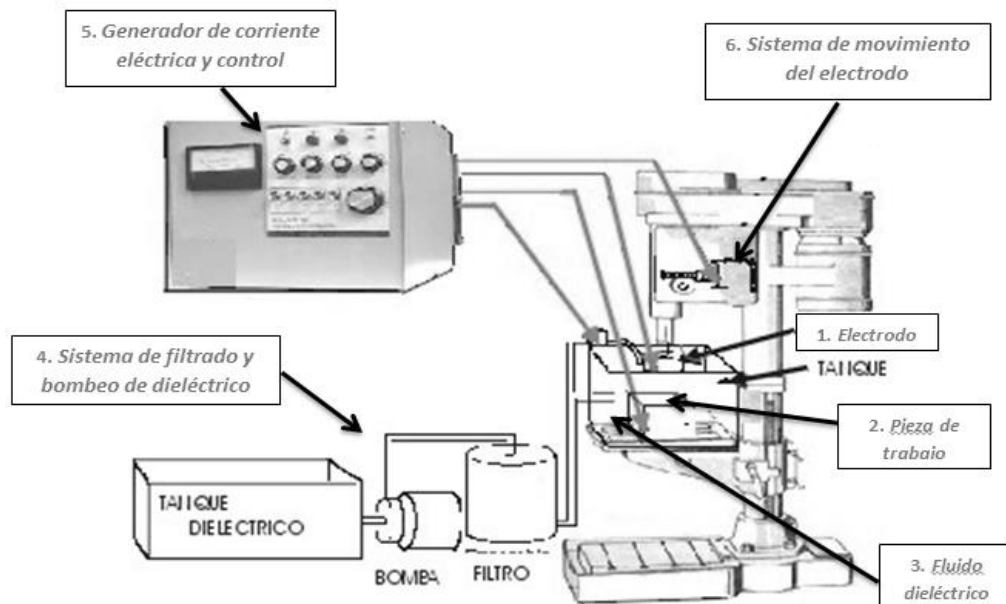
#### **1.2.4 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN<sup>13</sup>.**

El sistema EDM básico consiste en una herramienta (electrodo) y la pieza de trabajo, conectadas a una fuente de poder de DC y colocadas en un

<sup>12</sup> Fuente: Manual de técnicas para la conformación mecánica. Recuperado de: mecanizado por arranque de material sin contacto directo (pág. 129) <http://es.scribd.com/doc/150889564/LIBRO-pdf>.

<sup>13</sup> Rodríguez, F. D. (2007). *Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán*. Recuperado de: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m2/electroerosion.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m2/electroerosion.pdf)

fluido dieléctrico (no conductor de electricidad). Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza es suficientemente alta, se descarga una chispa transitoria que atraviesa el fluido y quita una cantidad muy pequeña de metal de la superficie de la pieza, véase (figura 1-13).



**Figura 1-13 Esquema de un equipo de electroerosión por penetración<sup>14</sup>.**

El electrodo se hace avanzar hacia la pieza de trabajo hasta un punto cercano ellos igual a 0,001 pulgadas (0,025 mm). El espacio entre el electrodo y la pieza de trabajo se llena con fluido dieléctrico. Durante el tiempo de avance del electrodo, se aplica 170 V DC entre el electrodo y la pieza de trabajo. Esta tensión se denomina tensión de circuito abierto, ya que no hay electricidad que fluye entre el electrodo y la pieza de trabajo. Con la tensión igual a 170 V DC y el espaciamiento igual a 0,001 pulgadas (0,025 mm), el fluido dieléctrico se ioniza formando un canal conductor que cambia su esquema de fluido aislante eléctrico a un conductor eléctrico.

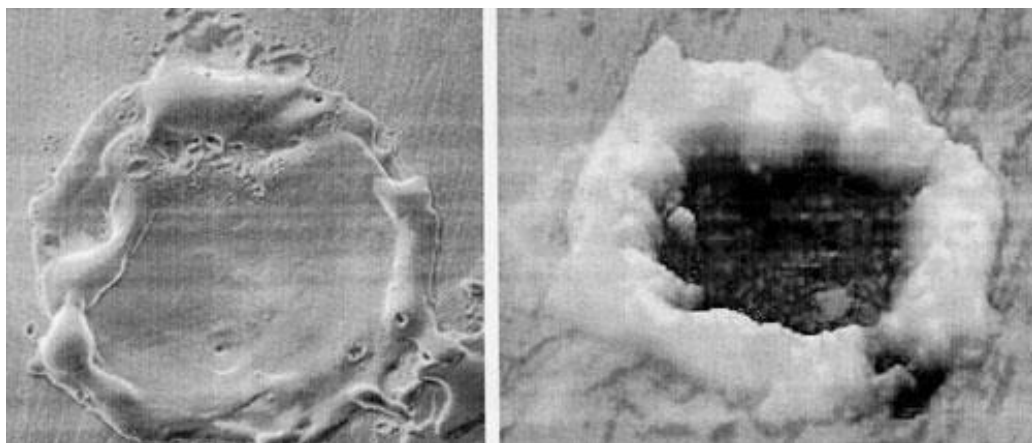
La electricidad fluye entre el electrodo y la pieza de trabajo a través del dieléctrico ionizado. Después de la ionización del fluido dieléctrico, la electricidad continúa fluyendo a través del fluido hasta que se apaga. Una

<sup>14</sup> Fuente: Rincón del vago. Electroerosión. Recuperado de: <http://html.rinconelvago.com/electroerosion.html>

vez desactivado, el dieléctrico se desioniza y el fluido se convierte en aislante eléctrico.

La duración de la chispa es muy corta, pues suele variar desde 1 o 2 microsegundos a 2 milisegundos, según los regímenes de mecanizado, y va acompañada de un gran aumento de temperatura, que suele alcanzar hasta decenas de miles de grados centígrados. Esto supone una concentración del efecto térmico en un volumen muy reducido de material, ya que la rapidez de la chispa no es favorable a la propagación del calor por conducción a través de todo el volumen de la pieza, dando como resultado la fusión e incluso evaporación de dicho volumen de material.

Al añadir a esto los efectos dinámicos de la propia descarga y del medio dieléctrico, se obtiene en la pieza un cráter de forma semiesférica (figura 1-14), cuyo volumen depende de factores tan diversos como la energía y la duración de la descarga, la naturaleza del dieléctrico y, las propiedades físicas, la polaridad y la naturaleza del material del electrodo y de la pieza. Experiencias prácticas han demostrado, desde los orígenes, que los efectos de la chispa cuando el dieléctrico es líquido (aceites) son mayores que cuando las descargas se producen en un medio gaseoso.

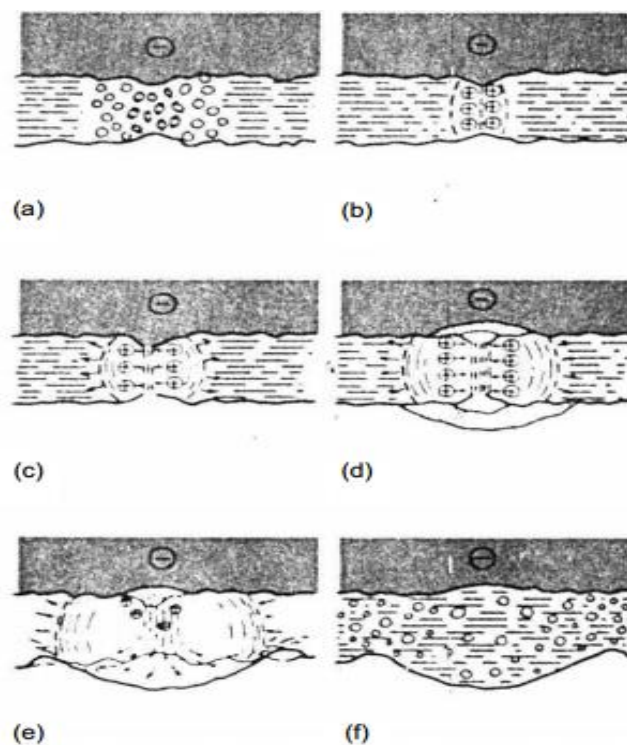


**Figura 1-14 Cráter que se produce en el material durante la electroerosión<sup>15</sup>.**

---

<sup>15</sup> Fuente: Interempresas. Mecanizado por electroerosión. Recuperado de: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/102921-Mecanizado-por-electroerosion.html>

La descarga ocurre en varios pasos como se ilustra en la (figura 1-15), primero, el estado de ionización mostrado en la (figura 1-15(a)), la carga inducida en los dos electrodos por la fuente genera un fuerte campo eléctrico, que es más fuerte mientras más se acercan hasta casi tocarse, y es ahí cuando la descarga tiene lugar. Iones y moléculas del líquido dieléctrico están polarizados y orientados entre estos dos picos formando un estrecho canal de baja resistencia, por el cual se inicia el flujo de corriente lo cual abrirá el camino para el flujo de corriente principal. La ionización continúa en la siguiente etapa (figura 1-15(b)) aun la corriente continua fluyendo entre los electrodos. En la (figura 1-15(c)), la resistencia en el canal empieza a decrecer mientras que se incrementa la corriente. En este punto el canal se ha ionizado por completo y consiste en plasma formado por iones positivos y electrones libres, mezclados con gas formado por la descomposición química del líquido dieléctrico, el vapor de metal es expelido por ambos electrodos.



**Figura 1-15 Pasos para la ionización del material en la electroerosión<sup>16</sup>.**

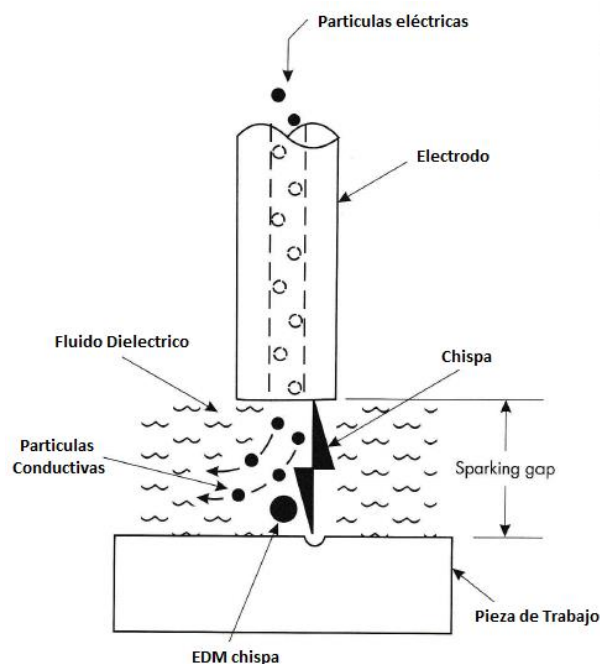
<sup>16</sup> Fuente: Interempresas. Mecanizado por electroerosión. Recuperado de: <http://www.interempresas.net/Mecanizado-por-electroerosion.html>



Los iones atraídos magnéticamente comprimen el canal de corriente e incrementan la temperatura hasta llegar a decenas de miles de grados Celsius, lo cual funde una porción de metal de la pieza de trabajo y la vaporiza (figura 1-15(d)). El vapor provee algo de la fuerza que expelle el metal fundido de la pieza de trabajo y ayuda además a que se colapse el canal ionizado (figura 1-15(e)). Otro efecto, el impacto mecánico de la descarga en sí, contribuye a su expulsión. La trayectoria de expulsión deja marcas en el filo de los cráteres como se muestra en la (figura 1-15(f)).

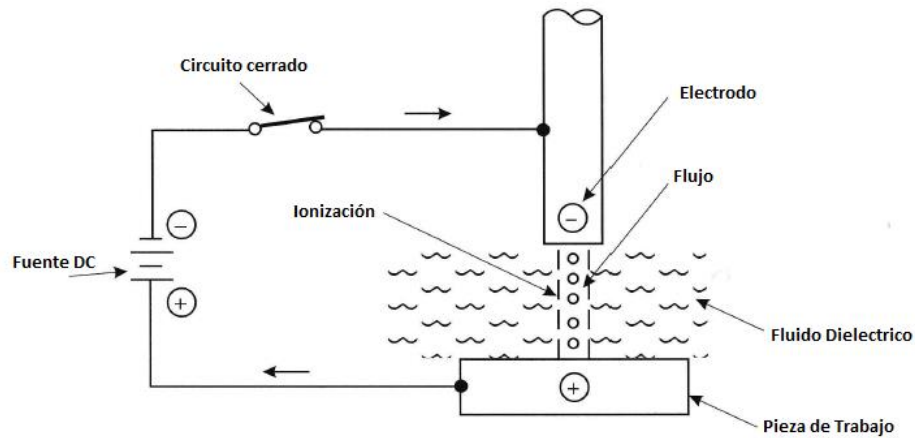
La descarga del capacitor se repite a frecuencias entre 50 y 500 KHz, con voltajes que van de 50 a 380 V CD, y a corrientes de 0.1 y 500 A. La EDM se diferencia de la mayoría de las operaciones de porque el electrodo no tiene contacto físico con la pieza de trabajo para la eliminación de material.

El electrodo debe estar siempre separado de la pieza de trabajo por la distancia (Gap) requerida para la descarga eléctrica (figura 1-16).



**Figura 1-16 Conductividad eléctrica de las partículas en el circuito de EDM.**

En la (figura 1-17) podemos observar el flujo de electrones que van desde el circuito de EDM hasta la pieza de trabajo.



**Figura 1-17 Flujo de electrones desde el circuito de EDM<sup>17</sup>.**

### 1.2.5 TIPOS DE ELECTRODOS

Por necesidad los materiales de los electrodos deben ser eléctricamente conductores, pero debe tener las siguientes características:

- Un alto punto de fusión.
- Capacidad de ser fácilmente mecanizadas.
- Un bajo costo.

Ningún material de electrodo único ofrece todas las características deseadas para cualquier aplicación particular. La siguiente lista de materiales está pensada como una guía para selección del material para el electrodo en la electroerosión.

### LATÓN

El 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

<sup>17</sup> Fuente: tipos de mecanizado por electroerosión. Recuperado de : <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/tipos-de-mecanizado-por-electroerosion>

|  
relación muy alta al desgaste en el mecanizado de carburo de tungsteno.

Latón no se recomienda para su uso con fuentes de alimentación EDM RC (Resistencia y Capacitor).

## **COBRE**

El cobre es fácilmente disponible y normalmente especifica como cobre electrolítico, o de aleación de telurio - cobre. El cobre de grado electrolítico puede considerarse 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.

## **COBRE - TUNGSTENO**

El cobre tungsteno es un material sinterizado hecho de cobre y tungsteno con una relación común de 70 % de tungsteno y 30 % de cobre, tiene muy buenas características de desgaste. Difícil de maquinar.

## **.GRAFITO**

El grafito está disponible en diferentes densidades, la densidad depende del grano o tamaño de partícula (se especifica en micras) del polvo utilizado para producir el producto. El grafito tiene muy buenas cualidades de desgaste y es muy mecanizable.

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.

## **GRAFITO DE COBRE**

Es el grafito de grano fino que se infiltra con cobre. Tiene las cualidades de grafito, además de la conductividad eléctrica de del cobre.

## 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 enumera el 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 aparece se basa en un espesor de la pieza de 1 pulgada (25.4 mm).

**Tabla 1-1 Desgaste aproximado del electrodo.**

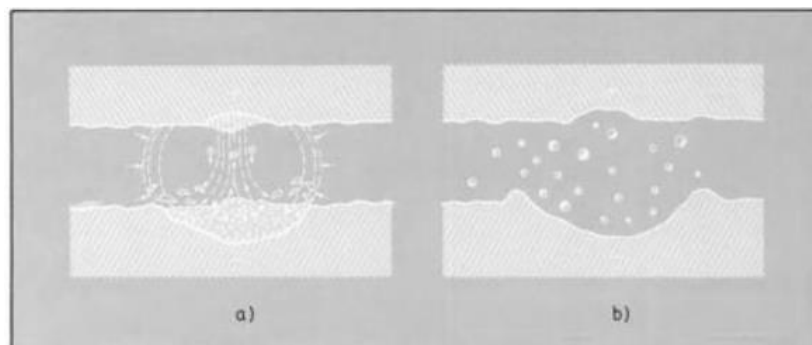
ELECTRODO	PIEZA DE TRABAJO	POLARIDAD	DESGASTE	
			in	mm
<b>Latón</b>	Acero	Negativa	1.5	38.1
<b>Latón</b>	Carburo Tungsteno	de Negativa	4	101.6
<b>Cobre</b>	Acero	Positiva	0.1	2.54
<b>Cobre</b>	Acero	Negativa	1	25.4
<b>Cobre</b>	Carburo Tungsteno	de Negativa	0.6	15.24
<b>Cobre tungsteno</b>	Acero	Positiva	0.4	10.16
<b>Cobre tungsteno</b>	Carburo Tungsteno	de Negativa	0.7	17.78
<b>Grafito</b>	Acero	Positiva	0.01	0.254
<b>Grafito</b>	Acero	Negativa	0.4	10.16

El electrodo debe pasar a través de la pieza de trabajo de tal forma que el desgaste de la esquina muestra 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 de más material de electrodo que es necesario para la operación de mecanizado.

### 1.2.6 AGITACIÓN DEL BAÑO (DIELÉCTRICO)<sup>18</sup>.

Las partículas líquidas que se solidifican prácticamente al instante y las partes interiores de la pieza a mecanizar se calientan (figura 1-18). Estas partículas deben eliminarse rápidamente de la zona de chispeo, pues modifican la conductividad del líquido. Generalmente se eliminan por la agitación del baño.



**Figura 1-18 Mecanizado por electroerosión<sup>19</sup>: a) Vaporización explosiva del metal fundido b) Formación de partículas diminutas esféricas.**

La agitación del baño dieléctrico se obtiene:

- a) Por las descargas que dilatan la burbuja de gas, creada en el canal de descarga, que actúa como una verdadera bomba.
- b) Por la acción de una bomba auxiliar que obliga al dieléctrico a circular.

Este movimiento del líquido dieléctrico es de gran importancia puesto que la estabilidad del proceso electro erosivo viene regido por la relación existente entre la producción de partículas en el espacio pieza-electrodo, denominada también zona de chispeo o GAP, y su evacuación. De lo

<sup>18</sup> Solá, P. M. (1989). Electromecanizado: electroerosión y mecanizado electroquímico. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.

<sup>19</sup> Fuente: Electromecanizado: electroerosión y mecanizado electroquímico. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.

contrario, es decir, sino se elimina el material arrancado, por este motivo conviene asegurar una velocidad constante de eliminación de partículas metálicas, así pues la energía que produce la descarga en el espacio pieza-electrodo, se consume en la producción de partículas y en la eliminación de las mismas.

La velocidad de eliminación de metal del mecanizado por electroerosión ( $V_w$ ) tiene el siguiente valor:

$$G(V_w) = \frac{\text{Volumen de material eliminado en la pieza}}{\text{tiempo de mecanizado}}$$

En este desgaste de material en el espacio electrodo-pieza también se produce eliminación de material del electrodo, que actúa como útil de mecanizado. Los tres criterios más extendidos para valorar este desgaste son, el desgaste de volumen, desgaste frontal y el desgaste lineal. El desgaste de volumen caracteriza la disminución de longitud del electrodo durante el mecanizado por electroerosión.

$$V_v(\%) = \frac{\text{Volumen de materia arrancada en el electrodo}}{\text{Volumne de materia arrancada en la pieza}} \times 100$$

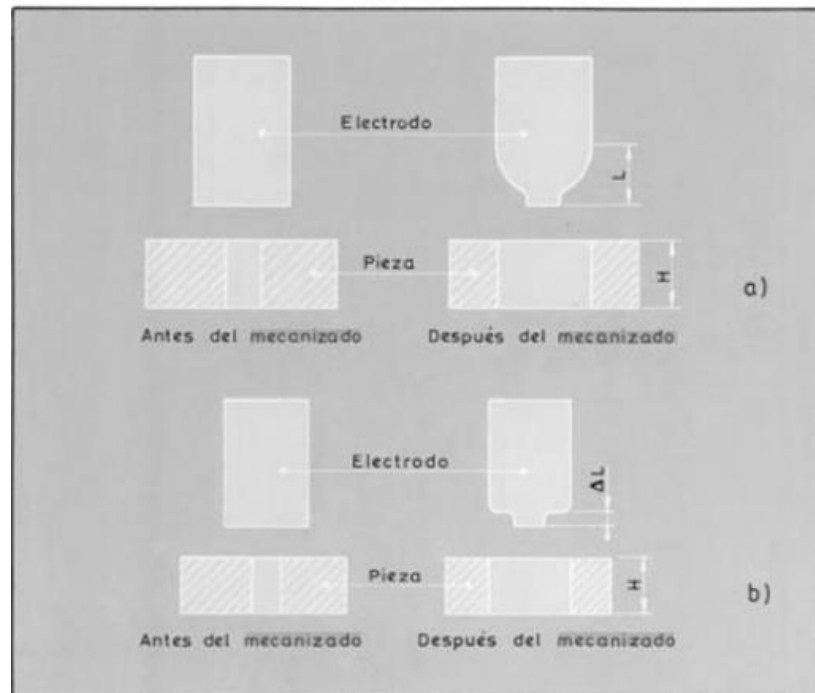
El desgaste frontal en la (figura 1-19(a)), que caracteriza la disminución de la longitud del electrodo durante el citado mecanizado, tiene el siguiente valor:

$$V_f(\%) = \frac{\Delta l}{H} \times 100$$

El desgaste lineal caracteriza la parte lineal del electrodo, que presenta conicidad: (figura 1-19(b)).

$$V_l(\%) = \frac{L'}{H} \times 100$$

Los volúmenes de los cráteres formados en las piezas a mecanizar y en el electrodo-útil son función de la energía de las chispas



**Figura 1-19 Medida del desgaste por desbaste electro erosivo<sup>20</sup> a) desgaste frontal, b) desgaste lineal.**

### 1.2.7 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.

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:

- Potencia de la máquina. El voltaje aplicado y la intensidad de la corriente que circula por los electrodos, definen la energía de la

<sup>20</sup> Fuente: Electromecanizado: electroerosión y mecanizado electroquímico. Recuperado de Pag. 26 .Barcelona: Marcombo Boixareu Editores

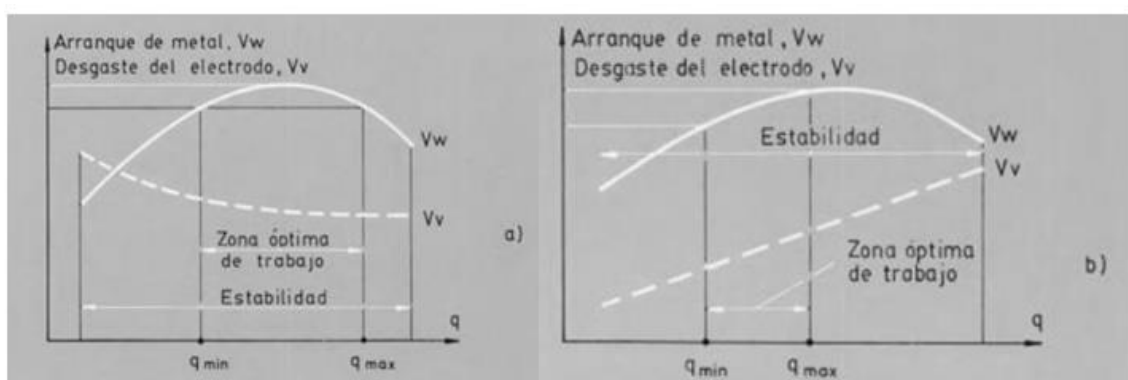
máquina que incide en las chispas a producir, que son las causantes de la electroerosión.

- b) La distancia entre 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 de la reforma y el desgaste del electrodo en el proceso electroerosivo.

### GRÁFICAS CARACTERÍSTICAS<sup>21</sup>.

La capacidad de arranque de material o desgaste de la pieza a electroerosionar ( $V_w$ ), y el desgaste del electrodo son, también, función del flujo del dieléctrico, como se indica en la (figura 1-20) En esta figura se aprecia también que el desgaste del electrodo depende de la naturaleza del metal que constituye el electrodo: grafito o cobre. En la práctica, se utiliza un intervalo de trabajo (flujo dieléctrico) en el cual las condiciones de mecanizado y de desgaste son óptimas.

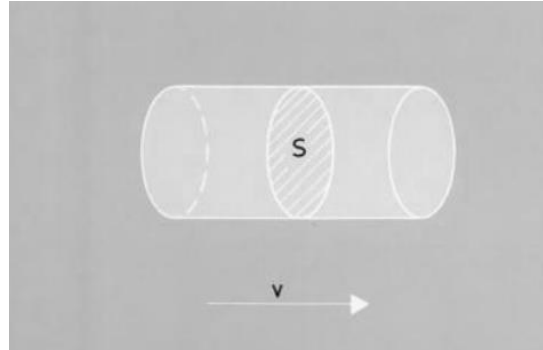


**Figura 1-20 Material arrancado de la preforma y desgaste del electrodo en función del flujo de dieléctrico a) grafito y b) cobre.**

<sup>21</sup> Fuente: Electromecanizado: electroerosión y mecanizado electroquímico. Recuperado de Pag. 25 .Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.

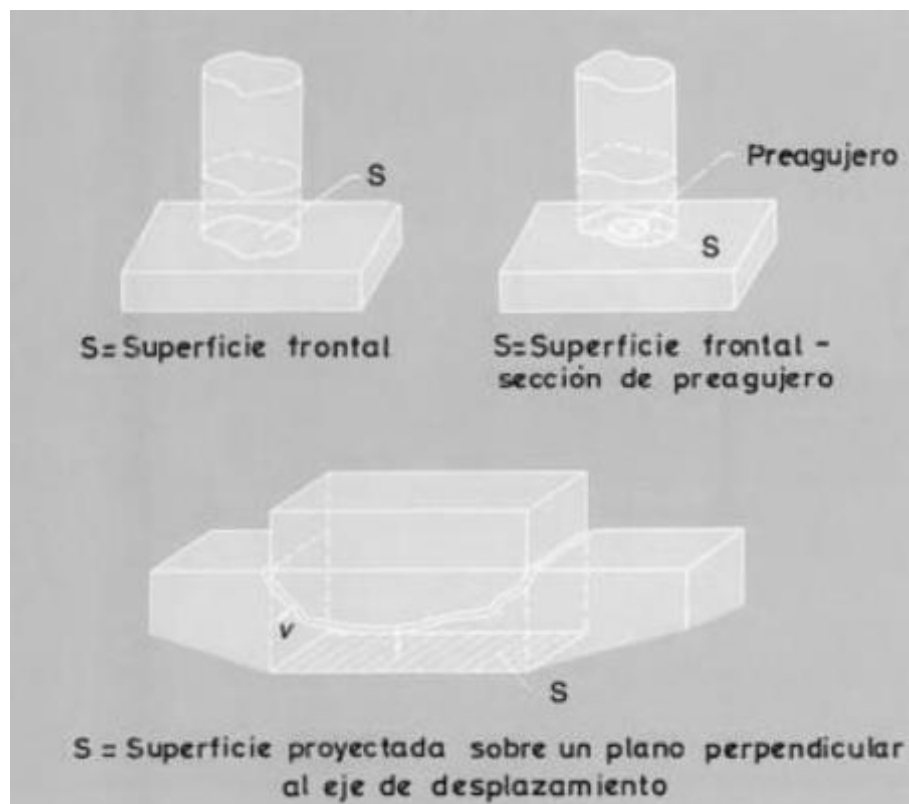


Aquí se toma el concepto de flujo como el gasto dieléctrico: la velocidad del fluido ( $v$ ) en la sección de la zona de chispeo o gap ( $S$ ):  $q=v.S$  (figura 1-21).



**Figura 1-21 Flujo  $q = S.v$ , donde  $S$  es a sección activa del electrodo y  $v$  la velocidad del líquido.**

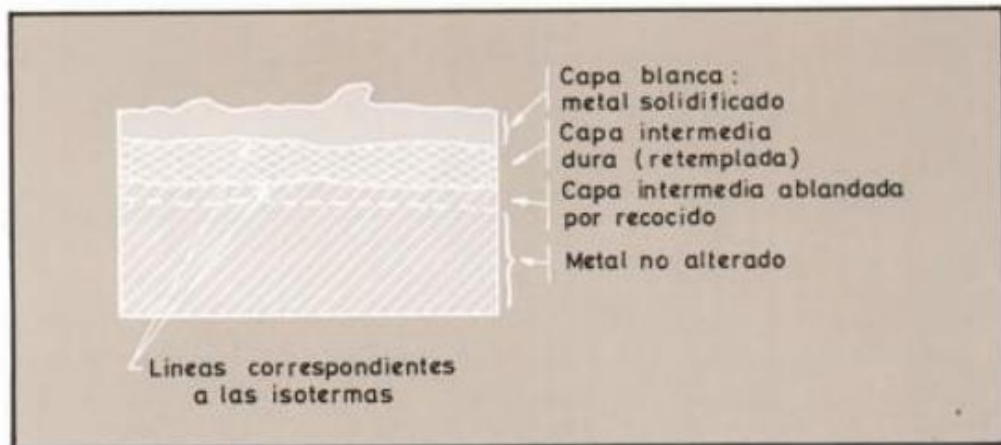
En la (figura 1-22) se han representado las secciones o superficies activas del electrodo.



**Figura 1-22 Definición de la sección activa de un electrodo mecanizado.**

### 1.2.8 SUPERFICIE ELECTROEROSIONADA.

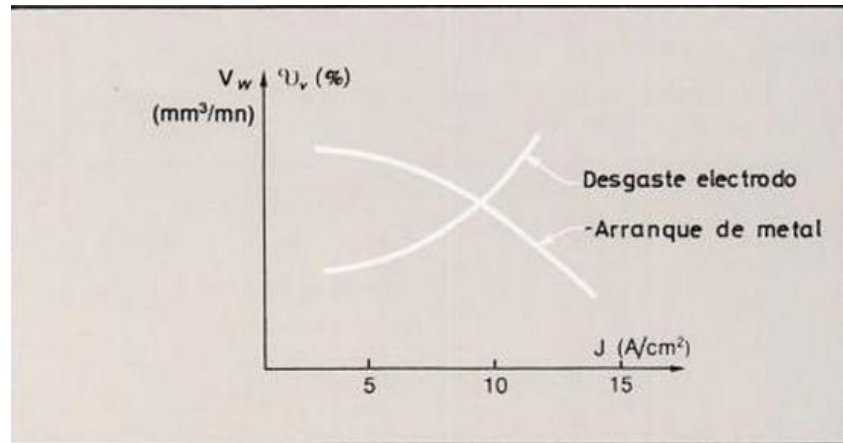
La superficie de las piezas electroerosionadas queda con un aspecto ligeramente mate, aspecto parecido al que ofrecen las piezas chorreadas (figura 1-23). Esta característica es debida al singular procedimiento que utiliza la electroerosión para eliminar el metal en la pieza a mecanizar donde quedan como diminutos cráteres.



**Figura 1-23 Esquema del aspecto de la superficie de un acero electroerosionado.**

La velocidad de eliminación de materia de la pieza crece a medida que aumenta el valor de la intensidad media. Pero para una sección activa definida del electrodo, aquella velocidad no crece 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, en la (figura1-24) se han representado valores de desgaste de la pieza a mecanizar y del electrodo en función de la densidad de corriente en esta figura se aprecia que existe una solución de compromiso para evitar un excesivo desgaste del electrodo a la vez que se logra un aceptable mecanizado de la pieza electroerosionar y en la tabla de la (figura 1-25) .

Se exponen algunos valores recomendados de densidad de corriente.



**Figura 1-24 Variación del arranque de material y del desgaste de pieza y electrodo respectivamente en función de la densidad de corriente.**

Material		Densidad de corriente A/cm <sup>2</sup>
Electrodo	Pieza	Superficie activa electrodo < 15 cm <sup>2</sup>
Cobre +	Acero	8 + 15
Grafito +	Acero	8 + 12
Grafito -	Acero	6 + 8
Tungsteno-cobre +	Acero	5 + 7
Tungsteno-cobre -	Carburo de tungsteno	15

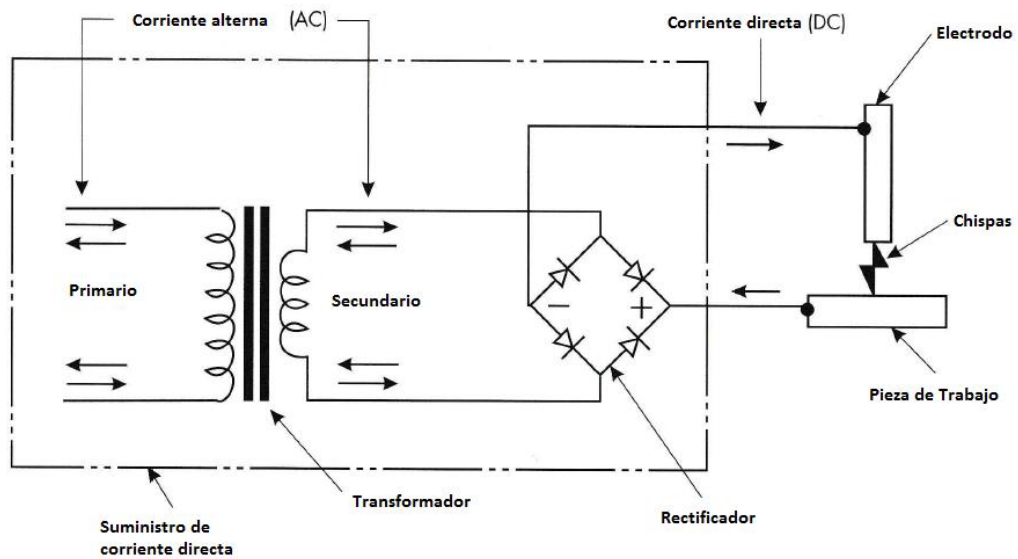
**Figura 1-25 Valores recomendados de densidad de corriente a utilizar en la electroerosión.**

## 1.2.9 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS CHISPAS<sup>22</sup>.

### 1.2.9.1 SUMINISTRO DE POTENCIA PARA CIRCUITO DE EDM.

La fuente de alimentación de corriente continua es un conjunto de componentes eléctricos y electrónicos que cambia la electricidad de corriente alterna CA a corriente continua DC. La electricidad de corriente continua se utiliza entonces para producir la chispa de EDM, como se muestra en la (figura 1-26).

<sup>22</sup> Elman C., J. (2001). *Electrical Discharge Machining*. Estados Unidos: SME Society of Manufacturing Engineers.



**Figura 1-26 Circuito eléctrico para suministro de corriente directa para EDM.**

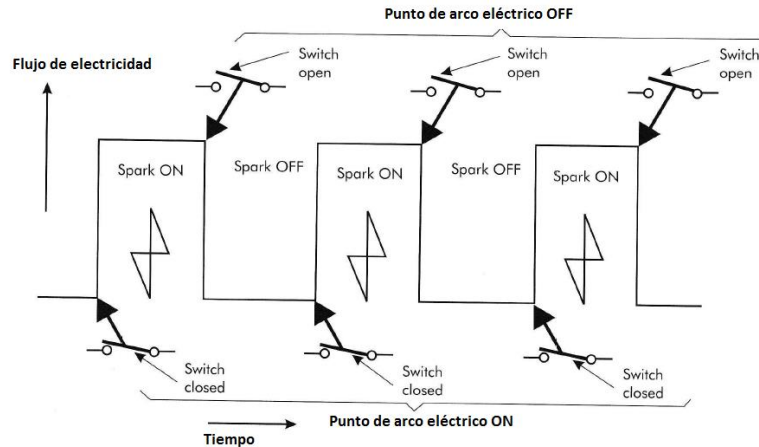
El esquema eléctrico simplificado de la fuente de alimentación DC no ilustra todos los componentes eléctricos y electrónicos necesarios para producir la electricidad de corriente continua para la chispa. Sólo los componentes muy básicos.

### 1.2.9.2 FORMA DE ONDA ARCO ELÉCTRICO ON/OFF.

Es posible ilustrar gráficamente la salida eléctrica de la fuente EDM cuando se enciende y se apaga la chispa, la forma de onda es cuadrada y característica en los pulsos de EDM (figura 1-27).

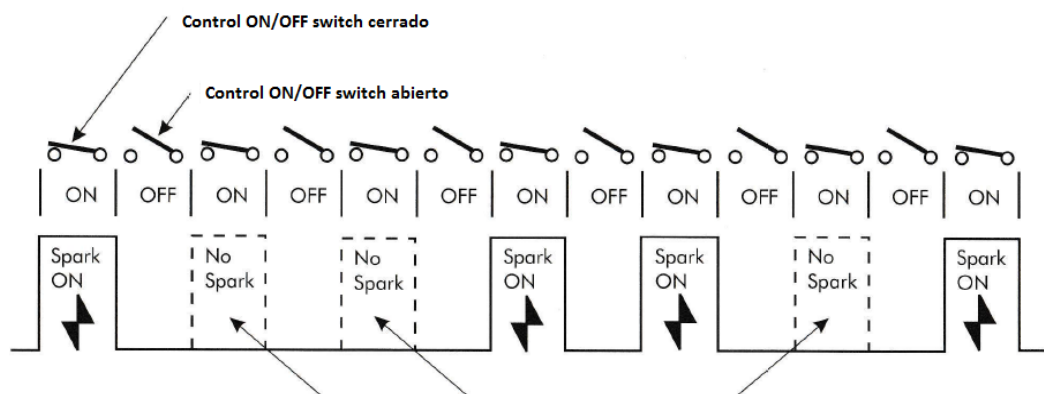
El interruptor enciende y apaga el arco eléctrico de forma muy precisa, este tiempo está dado en microsegundos. Como muestra en la figura, el conmutador electrónico activa la formación de pulsos eléctricos.

En el punto de desvío, la electricidad reduce muy rápidamente a cero y la chispa se termina. Durante el momento en que se encuentra el arco en OFF, no hay flujo de electricidad. La forma de onda de la chispa entonces toma la forma de un rectángulo y da el aspecto de una onda cuadrada. Hay una diferencia muy importante cuando se compara el circuito eléctrico de la linterna al circuito EDM de generación de chispas.



**Figura 1-27 Forma de onda del arco eléctrico ON/OFF.**

En caso de que la separación entre el electrodo y la pieza de trabajo sea más grande que la normal brecha entre chispas, la ionización del fluido dieléctrico no se llevará a cabo, y no se producirían chispas como se muestra en la siguiente (figura1-28) ilustra chispas que faltan causadas por la ausencia de ionización del fluido dieléctrico.



**Perdidas de arco eléctrico por falta de ionización del fluido dieléctrico**

**Figura 1-28 Ionización del fluido eléctrico determina la ocurrencia del arco eléctrico.**

Esta tensión suele ser del orden de los 80 a 160 V DC, aunque puede alcanzar los 270 V DC para algunas aplicaciones específicas. Un ciclo completo dura el periodo ( $t_p$ ) y comprende el tiempo que dura un impulso ( $t_i$ ) o tiempo durante el cual se aplica una fuerza electromotriz entre el electrodo y pieza, y el tiempo en bajo ( $t_o$ ) o tiempo de separación de los impulsos. Se cumple por lo tanto:

|

$$t_p = t_i + t_o$$

- La frecuencia de la chispa ( $f_p$ ) es la inversa del periodo:

$$f_p = \frac{1}{t_p}$$

- La relación cíclica  $\tau$  es la relación entre la duración del impulso y del periodo.

$$\tau = \frac{t_i}{t_p} = \frac{t_i}{t_o + t_i}$$

- La amplitud máxima de la corriente de descarga ( $\hat{I}_e$ ) es el valor de cresta de corriente cuando ocurre la descarga.

La corriente de trabajo ( $I$ ) es la media aritmética de la corriente correspondiente a un gran número de ciclos. Prácticamente es el valor indicado por el amperímetro de la máquina. La polaridad es positiva cuando el electrodo está unido al polo positivo del generador negativa en caso contrario.

### 1.2.10 EJEMPLOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN.

Existen múltiples aplicaciones de 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 moldeo o deformación plástica (figura 1-29).

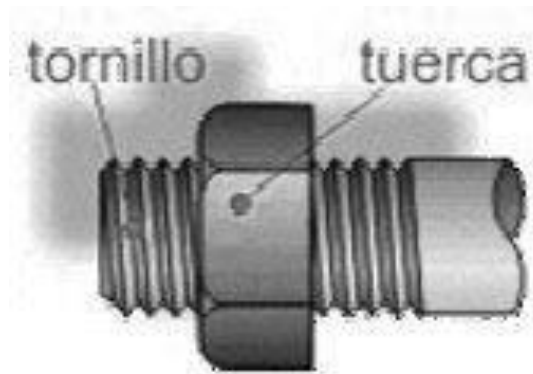


**Figura 1-29 Ejemplos de mecanizado por penetración<sup>23</sup>.**

<sup>23</sup> Fuente: Electrical Discharge Machining. EDM Mecanizado Metalistería Ejemplos. Recuperado de: <http://www.edmmachining.com/>

## 1.3 MECANISMOS DE TRANSFORMACIÓN DEL MOVIMIENTO.

### 1.3.1 MECANISMO DE TORNILLO-TUERCA<sup>24</sup>.



**Figura 1-30 Mecanismo tornillo- tuerca.**

El mecanismo tornillo-tuerca (figura 1-30), conocido también como husillo-tuerca es un mecanismo de transformación de movimiento circular a lineal compuesto por una tuerca alojada en un eje roscado (tornillo).

Si el tornillo gira y se mantiene fija la orientación de la tuerca, el tornillo avanza con movimiento rectilíneo dentro de ella. Por otra parte, si se hace girar la tuerca, manteniendo fija la orientación del tornillo, aquella avanzará por fuera de ésta.

El avance depende de dos factores:

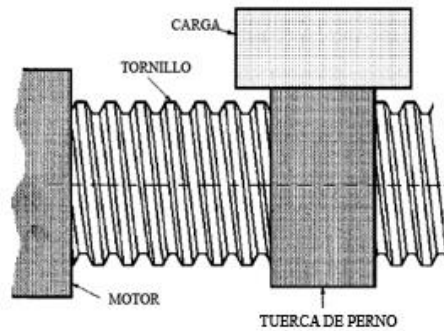
- La velocidad de giro del elemento motriz.
- El paso de la rosca del tornillo, es decir, la distancia que existe entre dos crestas de la rosca del tornillo. Cuando mayor sea el paso, mayor será la velocidad de avance.

### 1.3.2 TRANSMISIÓN POR TORNILLO POSICIONADOR.

A medida que el tornillo posicionador gira, la carga es trasladada en la dirección axial del tornillo.

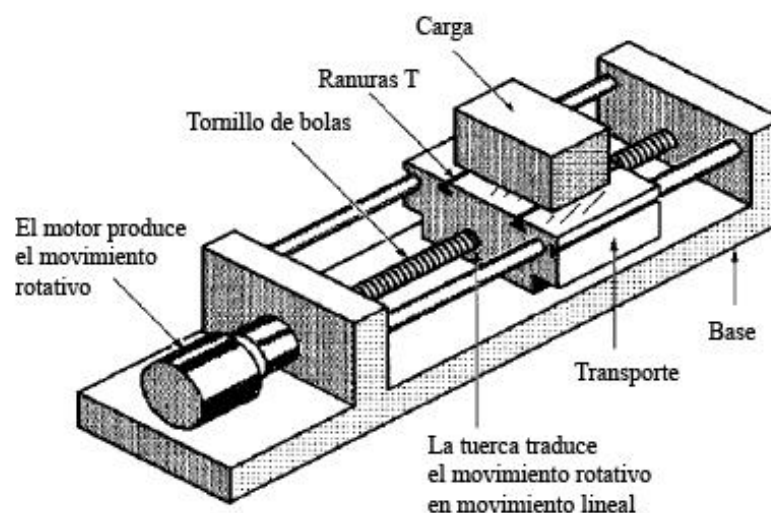
---

<sup>24</sup> Aprendamos Tecnología. (2008). *aprendamostecnologia.org*. Recuperado el 15 de Marzo de 2014, de <http://aprendamostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/mecanismos-de-transformacion-del-movimiento/>



**Figura 1-31 Transmisión por tornillo posicionador.**

Las guías lineales o etapas lineales motorizadas, reducen el movimiento de translación de la carga a un solo grado de libertad. La guía lineal soporta la masa de la carga a ser accionada y asegura un movimiento suave y en línea recta a la vez que minimiza la fricción. Un ejemplo común de una guía lineal es un dispositivo impulsado por tornillo de bolas de eje único, ilustrado en la (figura 1-31). El motor gira el tornillo, y su movimiento rotativo es traducido en movimiento lineal que mueve la mesa de transporte y la carga mediante la tuerca de perno en la mesa. Las correderas actúan como guías lineales. Como se muestra en la (figura 1-32), estas mesas pueden ser equipadas con sensores de tipo rotativo, codificadores lineales o interferómetros de láser como transmisores de señal de retorno de posición.



**Figura 1-32 Mecanismo de etapa lineal motorizada de eje único con transmisión de tornillo.**



## 1.4 GENERALIDADES DE SISTEMAS DE CONTROL.

### 1.4.1 MOTORES ELÉCTRICOS<sup>25</sup>.

Un motor eléctrico es un dispositivo que funciona con corriente alterna o directa y que se encarga de convertir la energía eléctrica en movimiento o energía mecánica.

Desde su invención, los motores eléctricos han pasado a ser herramientas muy útiles que sirven para realizar múltiples trabajos, y se les encuentra en diversas aplicaciones, tales como: ventiladores, bombas, equipos electrodomésticos, automóviles, etc.

### 1.4.2 MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA (AC).

Bajo el título de motores de corriente alterna se reúne a los siguientes tipos de motor.

**Motor Sincrónico**, este motor tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Por ejemplo si la fuente es de 60Hz, si el motor es de dos polos, gira a 3600 RPM; si es de cuatro polos gira a 1800 RPM y así sucesivamente. Este motor o gira a la velocidad constante dada por la fuente o, si la carga es excesiva, se detiene.

El motor sincrónico es utilizado en aquellos casos en que los que se desea velocidad constante. En nuestro medio sus aplicaciones son mínimas y casi siempre están en relacionadas con sistemas de regulación y control mas no con la transmisión de potencias elevadas.

**El Motor Asíncronico o de Inducción**, si se realizara a nivel industrial una encuesta de consumo de la energía eléctrica utilizada en alimentar motores, se daría que casi la totalidad del consumo estaría dedicado a los motores asíncronicos. Estos motores tienen la peculiaridad de que no precisan de un campo magnético alimentado con corriente continua como en

---

<sup>25</sup> Mena, A. (Diciembre de 2013). *Repositorio Virtual ESPE LATACUNGA*. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7204/1/T-ESPEL-MEC-0014.pdf>

|  
los casos del motor de corriente directa o del motor sincrónico.

Una fuente de corriente alterna (trifásica o monofásica) alimenta a un estator. La corriente en las bobinas del estator induce corriente alterna en el circuito eléctrico del rotor (de manera algo similar a un transformador) y el rotor es obligado a girar.

### **1.4.3 SERVOMOTOR.**

Un Servomotor (figura 1-33), podría definirse genéricamente, como un motor utilizado para obtener una salida precisa y exacta en función del tiempo. Dicha salida esta 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.

Además; los servomotores, tienen un ciclo de vida más prolongado, que los típicos motores síncronos o asíncronos, a la hora de soportar el constante cambio de velocidad. Los servomotores también pueden actuar como un freno, por derivación de la electricidad generada, a partir del propio motor.

Es así que los servomotores están ganando un lugar de privilegio en muy diversos ámbitos de la industria, en los cuales se valora sus extraordinarios desempeños, cuando se busca implementar soluciones de automatización de gran confiabilidad. Se emplean en la potenciación de máquinas herramientas CNC, así como también en la automatización de plantas industriales y robóticas en general.

Las características que presentan estos servomotores son:



**Figura 1-33 Servomotor<sup>26</sup>.**

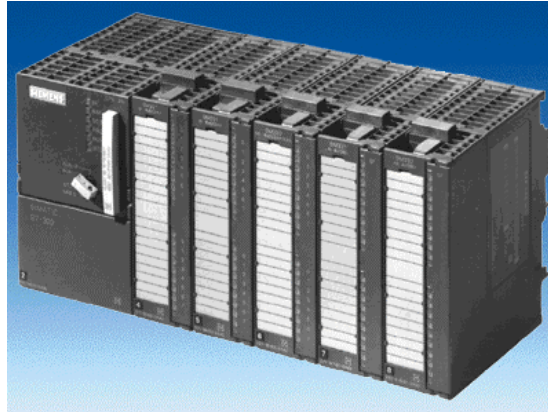
- Diseño óptimo, prolijo y compacto, larga vida útil en el modo de trabajo nominal.
- Material magnético permanente de tierra rara de alta performance alta potencia, y gran capacidad de carga
- Inercia de motor acorde a la carga.
- Material aislante de nivel F para prolongar vida útil del motor.
- Componentes de realimentación importados, rodamientos de bajo ruido originales importados para reducir las vibraciones y el ruido.
- Sellado hermético completo y de alta confiabilidad para satisfacer las necesidades ambientales de la industria.
- Óptima correspondencia con el drive servo de CA para lograr una performance inmejorable.

#### **1.4.4 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.**

Un controlador lógico programable PLC (figura 1-34) es un dispositivo operado digitalmente, que usa una memoria para el almacenamiento interno de instrucciones con el fin de implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas, para controlar a través de entradas/salidas digitales o analógicas, varios tipos de máquinas o procesos.

---

<sup>26</sup> Fuente: tjskl.org.cn. recuperado de: [http://www.tjskl.org.cn/images/Czaafe33-pz2104448-sjt\\_ac\\_servo\\_motor\\_unit.html](http://www.tjskl.org.cn/images/Czaafe33-pz2104448-sjt_ac_servo_motor_unit.html)



**Figura 1-34 controlador lógico programable PLC<sup>27</sup>.**

#### 1.4.4.1 ESTRUCTURA.

El PLC básicamente tiene dos tipos d estructura que son el compacto y el modular (figura 1-35) y los elementos que contiene que contiene un PLC son:



**Figura 1-35 Estructura del PLC compacto y modular<sup>28</sup>.**

#### a) UNIDAD CENTRAL DE PROCESO.

Este toma las decisiones relacionadas al control de la máquina o proceso. Durante su operación el PLC recibe la información de la entradas de diferentes dispositivos de censado, ejecuta decisiones lógicas, basadas en un programa almacenado en la memoria, y controla los dispositivos de salida de acuerdo al resultado de la lógica programada.

<sup>27</sup> Fuente: ISG Industrial System Group, Inc. Recuperado de: <http://www.isgautomation.com/siemens-simatic-s7-300-plc-6es7.html>

<sup>28</sup> Fuente: Aprende PLC. Recuperado de: <http://aprendeplc.blogspot.com/2011/03/partes-de-un-plc.html>

#### **b) MODULOS DE ENTRADA.**

Son dispositivos especialmente diseñados para poder recibir datos de entrada tanto análogos como digitales.

#### **c) MODULOS DE SALIDA.**

Son dispositivos especialmente diseñados para enviar datos de salida tanto análogos como digitales desde el PLC hacia otros dispositivos conectados al mismo.

#### **d) INTERFACES.**

Son los que proporciona el vínculo entre la CPU del controlador y los dispositivos de campo del sistema. A través de ellos se origina el intercambio de información ya sea para la adquisición de datos o la del mando para el control de máquinas del proceso.

#### **e) FUENTE DE ALIMENTACION.**

La fuente de alimentación convierte altos voltajes de corriente de línea (115V-230V CA) a bajos voltajes (5V-15V-24V CC) requeridos por el PLC y los módulos de entrada y salida.

#### **f) DISPOSITIVOS PERIFERICOS.**

En la mayoría de los casos, el PLC puede ser ampliable. Las ampliaciones abarcan un gran abanico de posibilidades, que van desde las redes internas (LAN, etc.), módulos auxiliares de E/S, memoria adicional, hasta la conexión con otros autómatas del mismo modelo. Cada fabricante facilita las posibilidades de ampliación de sus modelos, los cuales pueden variar incluso entre modelos de la misma serie.

#### **1.4.4.2 FUNCIONAMIENTO.**

El funcionamiento del PLC es un continuo ciclo cerrado, primero el sistema operativo inicia la vigilancia de tiempo de ciclo, después la CPU

| escribe los valores de imagen de proceso de las salidas en los módulos de salida, a continuación la CPU lee el estado de las entradas en los módulos y actualiza la imagen del proceso de las entradas, el CPU procesa el programa del usuario en segmentos de tiempo y ejecuta las operaciones indicadas en el programa, al final de un ciclo el sistema realiza las tareas pendientes por ejemplo carga y borrado de bloques.

### **Ejecución del Programa.**

Mientras en un control convencional todos los procesos de control se llevan a cabo en paralelo (simultáneamente), en un control programable con memoria se ejecutan de forma secuencial (sucesivas), de acuerdo con una determinada secuencia especificada en el programa, y se repiten cíclicamente.

El resultado de la ejecución del programa de cada ciclo del programa se puede emitir de dos formas:

- a) **Ejecución directa:** En la ejecución directa del programa todas las señales de entrada (X) se conducen a la CPU y se utilizan como datos de entrada. Los resultados de las operaciones que se van ejecutando sucesivamente se transmiten entonces directamente a las salidas (Y).
  
- b) **Ejecución de la imagen de proceso:** Este tipo de ejecución del programa es el que utilizan los controladores de la serie FX y consiste en que se ejecuta primero la secuencia completa del programa y solo entonces se transmiten los resultados a las salidas (Y). Se establece una imagen de los estados de salida de todo el programa para cada ciclo, que es la denominada imagen de proceso. Para la ejecución completa de programa es necesario subdividirlo en tres sectores de trabajo.
  
- a) **Ejecución de entrada:** Antes de realizar una ejecución de programa que vaya a repetirse cíclicamente, el PLC lee los estados de las entradas y los registra en los registros de imagen de entrada. A continuación se realiza la ejecución, no con las entradas sino partiendo

de los registros de imagen de entrada , las modificaciones que se produzcan por el lado de entrada( bornes de entrada), solo podrán tenerse en cuenta cuando termine el ciclo de programa actual, es decir. Que el registro de entrada solamente se actualiza antes de la siguiente ejecución del programa, en el próximo ciclo del programa.

**b) Ejecución del programa:** El PLC lee el estado de los operadores (entradas X, marcadores M, etc.) en el registro de imagen de entrada. Los resultados de los enlaces se registran en el registro de imagen de operadores en la secuencia especificada en el programa.

**c) Ejecución de salida:** Después de una acción completa del programa, se transmite automáticamente el contenido del registro de imagen de salida a la memoria de salida, desde donde actúa sobre los elementos del circuito de salida, a través de relés, transistores o triacs.

Las tres funciones parciales descritas para la ejecución del programa se llevan a cabo de forma sucesiva. El tiempo necesario para ejecutar una vez el programa completo se denomina "tiempo del ciclo del programa".

#### 1.4.4.3 PROGRAMACION (LADDER).

El nombre de este método de programación (que significa escalera en inglés) proviene de su semejanza con el diagrama del mismo nombre que se utiliza para la documentación de circuitos eléctricos de máquinas (figura 1-36). Cabe mencionar que en estos diagramas la línea vertical a la izquierda representa un conductor con tensión, y la línea a la derecha representa tierra.

Existen distintos tipos de lenguaje de programación de un PLC, quizás el más común sea la programación tipo escalera o ladder. Los diagramas de escalera son esquemas de uso común para representar la lógica de control de sistemas industriales. Se le llama diagrama "escalera" porque se asemejan a una escalera, con dos rieles verticales (de alimentación) y "escalones" (líneas horizontales), en las que hay circuitos de control que

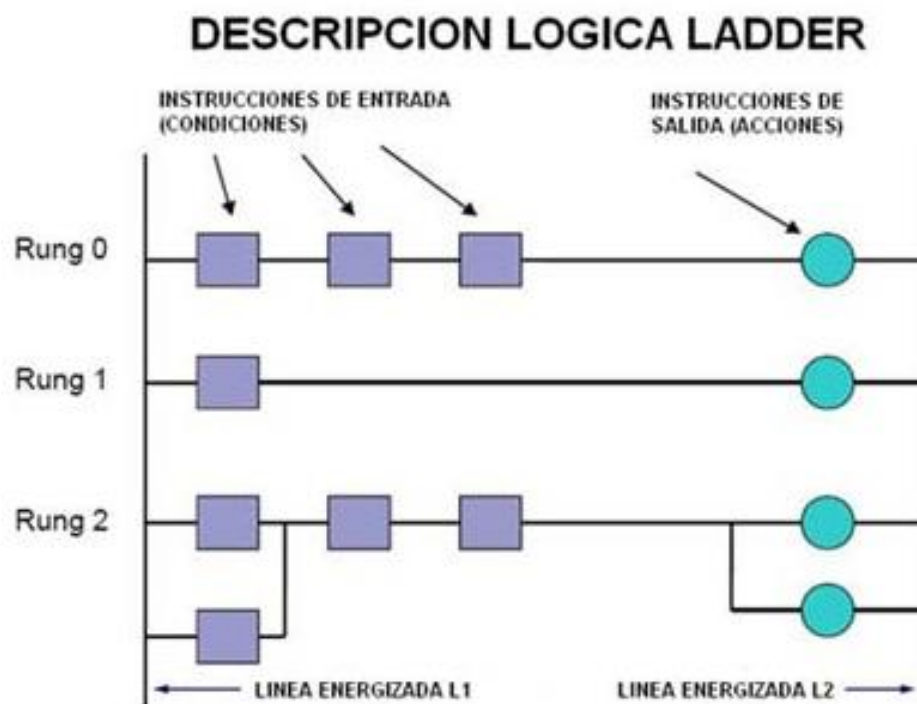
definen la lógica a través de funciones. De esta manera Las principales características del lenguaje ladder son:

- Instrucciones de entrada se introducen a la izquierda.
- Instrucciones de salida se situarán en el derecho.

Los carriles de alimentación son las líneas de suministro de energía L1 y L2 para los circuitos de corriente alterna y 24 V y tierra para los circuitos de CC.

La mayoría de los PLC permiten más de una salida por cada renglón (Rung).

El procesador (o "controlador") explora peldaños de la escalera de arriba a abajo y de izquierda a derecha.



**Figura 1-36 Ejemplo de programación (ladder)<sup>29</sup>.**

<sup>29</sup> Fuente: Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Recuperado de: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/2150512/ContenidoLinea/leccin\\_1635\\_\\_diagrama\\_escalera\\_ladder\\_diagram\\_\\_ld\\_i.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/2150512/ContenidoLinea/leccin_1635__diagrama_escalera_ladder_diagram__ld_i.html)



## CAPÍTULO II

### 2. REDISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.

#### 2.1 LEVANTAMIENTO DEL ESTADO DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.

La máquina electroerosionadora antes del rediseño no contaba con los mecanismos de transmisión de movimiento para el eje z, el control y la posición del tanque por los ejes x e y, era manual, es decir el operador ubicaba la pieza de trabajo en función de su experiencia.

La máquina no contaba con el circuito de electroerosión, y el antiguo controlador estaba conformado por tarjetas electrónicas que no se encontraban en funcionamiento, el sistema de recirculación del fluido dieléctrico se encontraba en malas condiciones y además no existía la tubería de conexión al tanque de trabajo, es allí de donde nace la necesidad de rediseñar la máquina, para que la misma regrese a un estado funcional.

En la (figura 2-1) y (figura 2-2) se evidencia que el posicionamiento era manual, es decir el movimiento longitudinal y transversal de la mesa se realizaba por volantes manuales.



**Figura 2-1 Máquina electroerosionadora: condiciones iniciales.**




**Figura 2-2 Máquina antes de su automatización.**

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA.

La funcionalidad de la máquina estará definida por los siguientes parámetros (tabla 2-1), que son compatibles con las máquinas electroerosionadoras industriales similares y existentes en el mercado.

**Tabla 2-1 Características generales de la máquina de electroerosión.**

Característica	Descripción
<b>Ejes de trabajo</b>	X, Y ,Z
<b>Recorrido longitudinal del eje X</b>	0mm - 100mm
<b>Recorrido transversal del eje Y</b>	0mm - 100mm
<b>Recorrido vertical del eje Z</b>	0mm - 131 mm
<b>Dimensiones internas del tanque</b>	25cmx33cmx20cm
	Continua 

<b>Capacidad de dieléctrico</b>	4gal
<b>Peso máximo del electrodo</b>	0.3kg
<b>Peso máximo de la pieza</b>	5kg
<b>Máximo longitud de pieza</b>	25cm
<b>Máximo ancho de pieza</b>	18cm
<b>Máximo altura de pieza</b>	8cm
<b>Dimensiones de la máquina</b>	80cmx80cmx200cm
<b>Peso de la máquina</b>	2 Ton
<b>Distancia desde el electrodo hasta la mesa de trabajo</b>	13cm
<b>Potencia máxima del generador</b>	2KVA

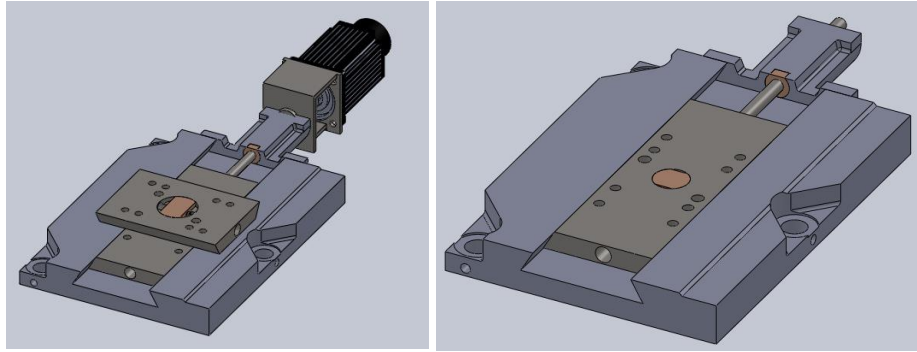
### 2.3 PARÁMETROS DE REDISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO.

A partir de la evaluación inicial de la máquina se nota claramente que la misma no cuenta con ningún sistema de transmisión de movimiento en el eje Z, por lo tanto se inicia con el análisis de la posición, alcance de desplazamiento y velocidad, para realizar un diseño eficiente que cumpla los requisitos de las existentes en el mercado, para así garantizar un adecuado funcionamiento y rango de operatividad de la máquina.

En el diseño se considerará los siguientes puntos:

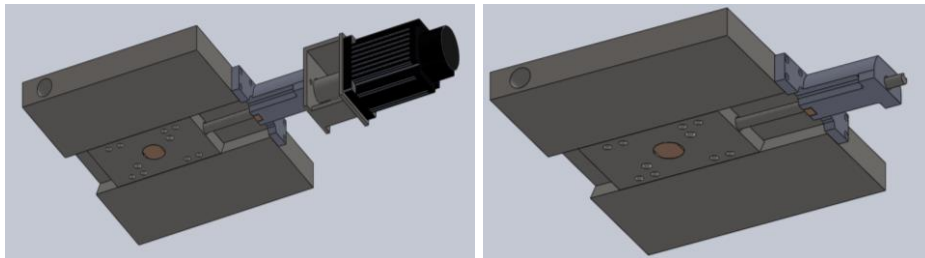
#### 2.3.1 MECANISMOS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO.

- a. Mecanismo para el recorrido longitudinal (figura 2-3), se conserva las guías prismáticas originales para el movimiento del eje X.



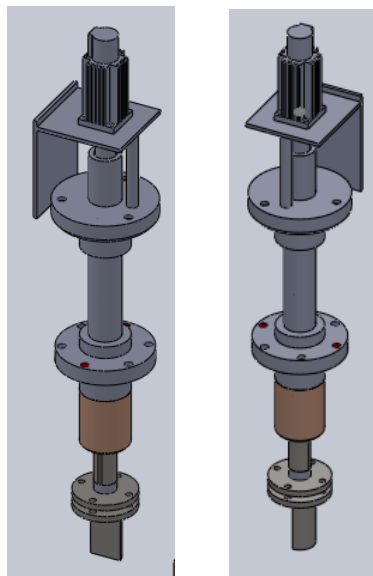
**Figura 2-3 Mecanismo longitudinal.**

- b. Mecanismo para el recorrido transversal (figura 2-4), de la misma manera se conserva.



**Figura 2-4 Mecanismo transversal.**

- c. Mecanismo para el recorrido vertical (figura 2-5), se diseña en su totalidad, esto debido a que la máquina no contaba con este sistema de transmisión en el eje z.



**Figura 2-5 Mecanismo recorrido vertical.**

### 2.3.2 CÁLCULO DE CARGAS ESTÁTICAS APLICADAS A LOS EJES DE MOVIMIENTO.

#### a. Cálculo de cargas estáticas para el eje X.

Para hallar la carga estática que ejerce el eje X se procede a la utilización de la ecuación 1:

$$L_x = \sum W_y + \sum W_x \quad \text{Ecuación 1}$$

$$L_x = (m_{estructura\ y} + m_{motor\ y} + m_{externa}) * g + (m_{estructura\ x}) * g$$

$$L_x = (69.6kg + 2.86kg + 11.34kg) * 9.8\ m/s^2 + (4.4kg) * 9.8\ m/s^2$$

$$L_x = 821.2N + 43.1N$$

$$L_x = 864.3N$$

Dónde:

$L_x$ : Es la fuerza resultante de la sumatoria del peso del eje X e Y.

$W_y$ : Peso de la estructura con su servomotor para el eje Y.

$W_x$ : Es el peso de la estructura actuante en el desplazamiento longitudinal.

#### b. Cálculo de cargas estáticas para el eje Y.

De la misma manera emplearemos la ecuación 2 para calcular la carga estática en el eje Y.

$$L_y = \sum W_y \quad \text{Ecuación 2}$$

$$L_y = (m_{estructura\ y} + m_{motor\ y} + m_{externa}) * g$$

$$L_y = (69.6kg + 2.86kg + 11.34kg) * 9.8\ m/s^2$$

$$L_y = 821.2N$$

Dónde:

$L_y$ : Es la fuerza resultante de la sumatoria del peso del eje Y.

$W_y$ : Peso de la estructura con su servomotor para el eje Y.

c. **Cálculo de cargas estáticas para el eje Z.**

Para el cálculo de las cargas estáticas en el eje Z, se utiliza la ecuación 3.

$$L_z = \sum W_z \quad \text{Ecuación 3}$$

$$L_z = (m_{estructura X} + m_{portaelectrodo} + m_{electrodo}) * g$$

$$L_z = (6,4kg + 2,6kg + 1kg) * 9.8 m/s^2$$

$$L_z = 10N$$

Dónde:

$L_z$ : Es la fuerza resultante de la sumatoria del peso del eje Z.

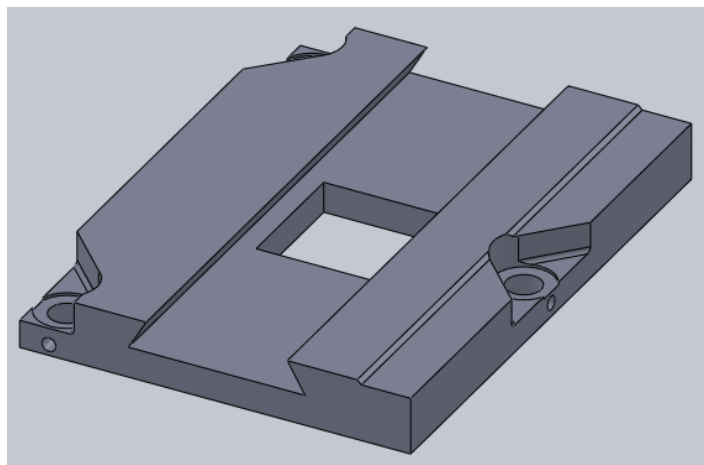
$W_z$ : Peso de la estructura actuante en el desplazamiento del eje Z.

### 2.3.3 REDISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PARA EL MOVIMIENTO LINEAL DE LOS EJES X, Y, Z.

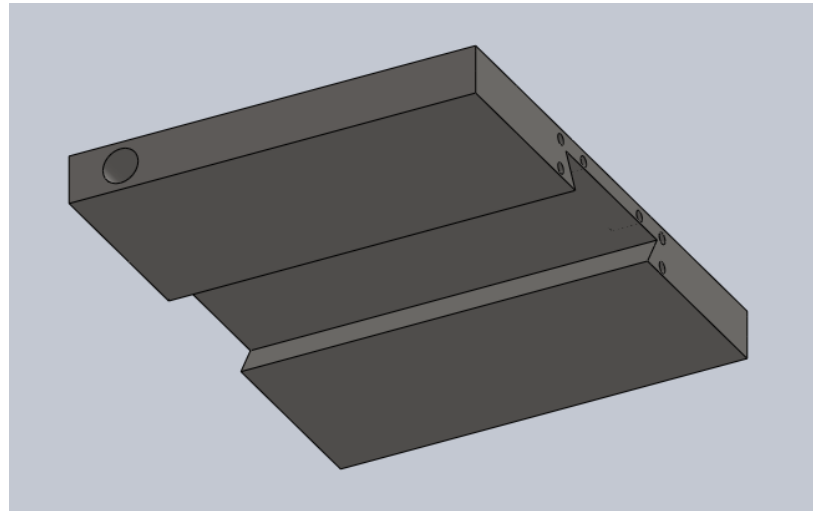
El sistema en estudio es un eje lineal de posicionamiento, el cual está compuesto por unas guías prismáticas y un sistema de transmisión.

#### 2.3.3.1 MOVIMIENTO LINEAL.

Para el desplazamiento en el eje X e Y se mantiene sus guías prismáticas montadas en la base de la máquina (figura 2-6) y (figura 2-7), mientras que para el recorrido del eje Z se diseña su mecanismo (figura 2-5).



**Figura 2-6** Guía prismática eje X.



**Figura 2-7 Guía prismática del eje Y.**

### **2.3.3.2 TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO.**

Para este sistema se implementara un tornillo de potencia y tuerca por ser el más óptimo para la aplicación.

## **2.4 CÁLCULO DE LOS TORNILLOS DE POTENCIA.**

### **2.4.1 CÁLCULO DE LA FLEXIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA PARA EL EJE X.**

Este cálculo se lo realizara únicamente para los ejes X, Y debido a que son los que soportan las cargas de los elementos montados sobre ellos, para el análisis se lo considera como un eje cilíndrico sometido a flexión.

Para el determinar el esfuerzo a flexión del tornillo empleamos la ecuación 4.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

$\sigma$ : Esfuerzo a flexión.

$M$ : Momento flector.

$c$ : Distancia del eje neutro a la fibra a analizar.

$I$ : Inercia.

Para asegurar que el esfuerzo sea menor que el límite de fluencia del material, consideramos un factor de seguridad y empleamos la ecuación 5.

$$\sigma_d = \frac{S_y}{n} \quad \text{Ecuación 5}$$

Se considera al tornillo como un elemento de sección circular y aplicamos la ecuación 6 para calcular la inercia.

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad \text{Ecuación 6}$$

Para calcular la distancia del eje neutro se emplea la ecuación 7.

$$c = \frac{d}{2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Combinando la ecuación 6 y 7 en la ecuación 4 del esfuerzo a flexión se obtiene la ecuación 8.

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} \quad \text{Ecuación 8}$$

Igualamos ecuación 8 con la ecuación 5, para así tener un esfuerzo a flexión menor que el esfuerzo de diseño de acuerdo a la ecuación 9.

$$\sigma \leq \sigma_d \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_y}{n}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32Mn}{\pi S_y}}$$

Para nuestro tornillo de potencia en el eje longitudinal se emplea los siguientes datos:

- Material: acero A-36
- Límite a la fluencia ( $S_y$ ) : 260 Mpa
- Longitud: 400 mm



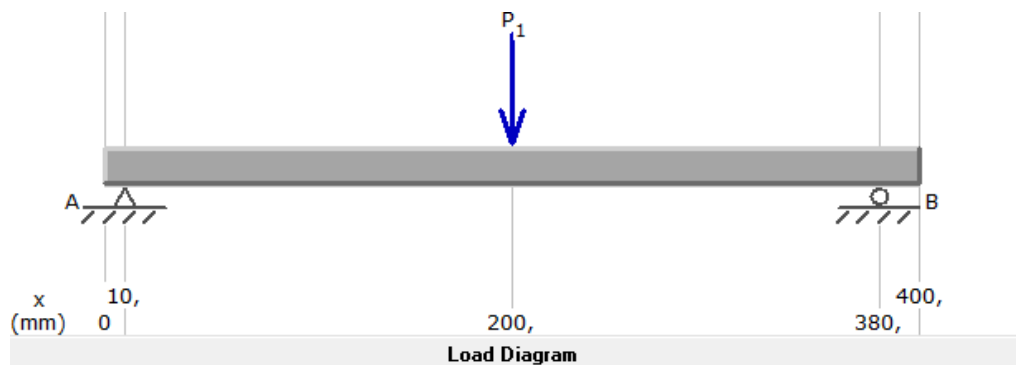
- Factor de seguridad: 1.5
- Carga estática ( $L_x$ ): 864.3 N

La carga estática se divide para tres debido a sus puntos de apoyo.

$$L_x = \frac{864.3}{3}$$

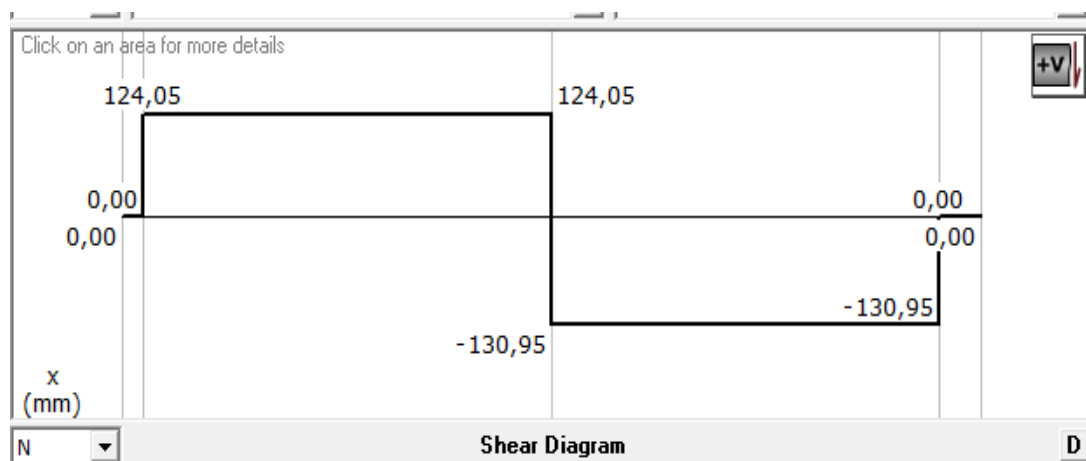
$$L_x = 288 \text{ N}$$

Para el cálculo de momento flector se emplea el software MDSolids, donde se considera la carga como puntal y que actúa en un punto medio (figura 2-8).

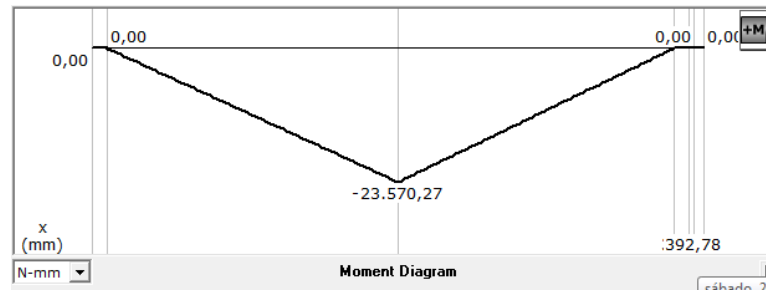


**Figura 2-8 Diagrama de carga aplicada al eje longitudinal.**

Seguidamente el software muestra en la (figura 2-9) el diagrama de fuerza cortante y momento flector (figura 2-10).



**Figura 2-9 Diagrama de fuerza cortante.**



**Figura 2-10 Diagrama de momento flector.**

Con el diagrama de momento flector se obtiene el máximo valor de 23570.27 Nmm, para así emplear la ecuación 10 y encontrar el diámetro.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32Mn}{\pi S_y}} \quad \text{Ecuación 10}$$

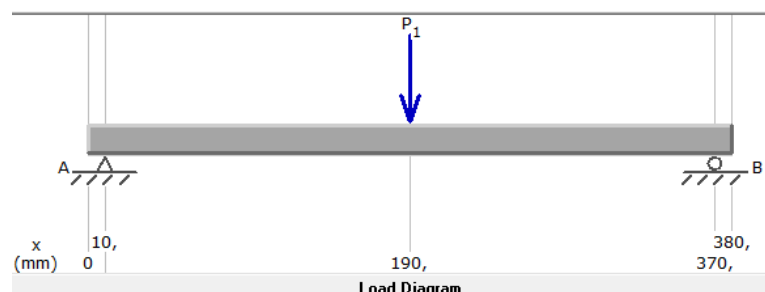
$$d = \sqrt[3]{\frac{32(23570.27)(1.5)}{\pi(260)}}$$

$$d = \sqrt[3]{1385,1046}$$

$$d = 11,14 \text{ mm}$$

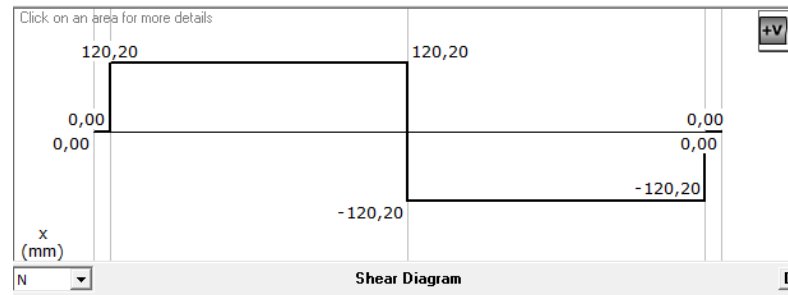
#### 2.4.2 CÁLCULO DE LA FLEXIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA PARA EL EJE Y.

Para el cálculo de flexión en el eje transversal se emplea nuevamente el software MDSolids considerando una longitud de 380 mm, para una carga puntual en un punto medio de acuerdo a la (figura 2-11).

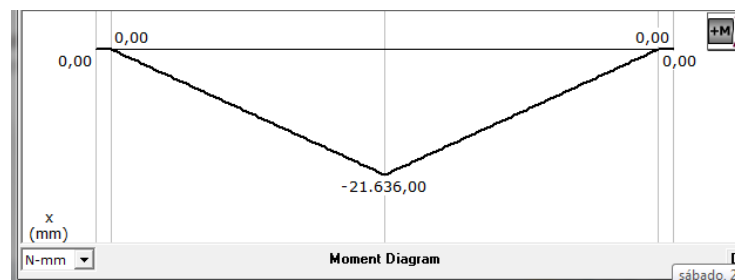


**Figura 2-11 Diagrama de carga aplicada al eje transversal.**

Consecutivamente el software muestra el diagrama de fuerza cortante (figura 2-12) y momento flector (figura 2-13).



**Figura 2-12 Diagrama de fuerza cortante.**



**Figura 2-13 Diagrama de momento flector.**

Una vez obtenido el momento flector máximo de 21636 Nmm, se utiliza la ecuación 9 con los siguientes datos:

- Material: acero A-36
- Limite a la fluencia ( $S_y$ ) : 260 Mpa
- Factor de seguridad: 1.5
- Carga estática ( $L_y$ ):  $821.2N/3 = 273.7$

$$\sigma \leq \sigma_d$$

$$\frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_y}{n}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32Mn}{\pi S_y}}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32(21636)(1,5)}{\pi(260)}}$$

$$d = \sqrt[3]{1271,4374}$$

$$d = 10,83 \text{ mm}$$

## 2.5 SELECCIÓN DE LOS TORNILLOS DE POTENCIA.

### 2.5.1 SELECCIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA PARA LOS EJES X, Y.

Existen varios tipos de roscas, entre las cuales se tiene la rosca unificada fina (UNF), la rosca métrica (M), la rosca unificada normal (UNC) entre otras más.

Debido a que el diámetro del eje X (11,14 mm) e Y (10,83 mm) son semejantes se procede a elegir una rosca de las mismas características.

Basándose en la (tabla 2-2) se eligió una rosca unificada de paso fino para obtener una mayor precisión en los ejes, tabla obtenida de EGA master S.A (2012).

**Tabla 2-2 Roscas unificadas de paso fino estandar<sup>30</sup>.**

UNIFICADA PASO FINO			
Medida Nominal			
Dext		Nº	
Nº 0	(.060")	- 80	UNF
Nº 1	(.073")	- 72	UNF
Nº 2	(.086")	- 64	UNF
Nº 3	(.099")	- 56	UNF
Nº 4	(.112")	- 48	UNF
Nº 5	(.125")	- 44	UNF
Nº 6	(.138")	- 40	UNF
Nº 8	(.164")	- 36	UNF
Nº 10	(.190")	- 32	UNF
Nº 12	(.216")	- 28	UNF
	1/4"	- 28	UNF
	5/16"	- 24	UNF
	3/8"	- 24	UNF
	7/16"	- 20	UNF
	1/2"	- 20	UNF
	9/16"	- 18	UNF
	5/8"	- 18	UNF
	3/4"	- 16	UNF
	7/8"	- 14	UNF
	1"	- 12	UNF
	1"1/8"	- 12	UNF
	1"1/4"	4 12	UNF
	1"3/4"	4 12	UNF
	1"1/2"	- 12	UNF

<sup>30</sup> Fuente: Egamaster. Recuperado de: <http://www.egamaster.com/es/tornillos-tuercas-y-roscas/roscas.html>

## 2.5.2 SELECCIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA PARA EL EJE Z.

Para la selección del eje vertical no se realizó el análisis de flexión debido a que este no soporta ninguna carga montada sobre él, por lo tanto se eligió mediante la aplicación, en donde se requiere un desplazamiento mínimo del electrodo, por lo cual se escogió un paso fino en la norma UNF de la (tabla 2-3).

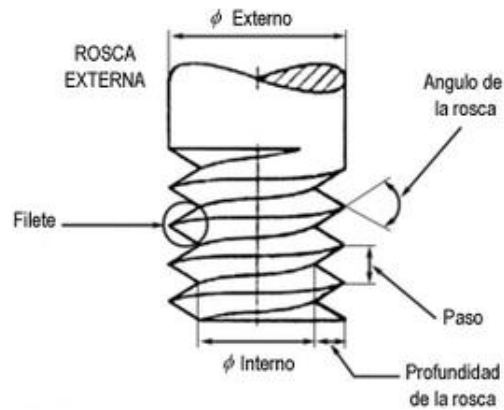
**Tabla 2-3 Roscas unificadas de paso fino estandar<sup>31</sup>.**

UNIFICADA PASO FINO			
Medida Nominal			
Dext	-	Nº	
Nº 0	(.060")	- 80	UNF
Nº 1	(.073")	- 72	UNF
Nº 2	(.086")	- 64	UNF
Nº 3	(.099")	- 56	UNF
Nº 4	(.112")	- 48	UNF
Nº 5	(.125")	- 44	UNF
Nº 6	(.138")	- 40	UNF
Nº 8	(.164")	- 36	UNF
Nº 10	(.190")	- 32	UNF
Nº 12	(.216")	- 28	UNF
	1/4"	- 28	UNF
	5/16"	- 24	UNF
	3/8"	- 24	UNF
	7/16"	- 20	UNF
	1/2"	- 20	UNF
	9/16"	- 18	UNF
	5/8"	- 18	UNF
	3/4"	- 16	UNF
	7/8"	- 14	UNF
	1"	- 12	UNF
	1"1/8"	- 12	UNF
	1"1/4"	4 12	UNF
	1"3/4"	4 12	UNF
	1"1/2"	- 12	UNF

## 2.6 CÁLCULO DEL PAR DE TORSIÓN DEL TORNILLO DE POTENCIA.

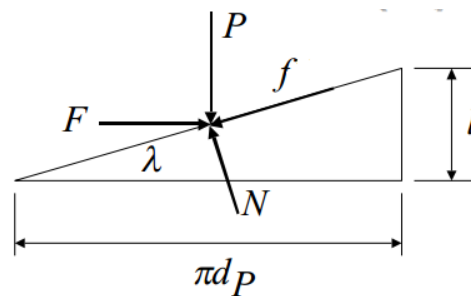
Un tornillo puede ser considerado como un plano inclinado enrollado alrededor de un cilindro, el cual va tomando la forma de una hélice como se observa en la (figura 2-14).

<sup>31</sup> Fuente: Egamaster. Recuperado de: <http://www.egamaster.com/es/tornillos-tuercas-y-roscas/roscas.html>



**Figura 2-14 Partes de un tornillo<sup>32</sup>.**

Para el cálculo de torsión de un tornillo se debe realizar un análisis de fuerza (figura 2-15) y tomar en cuenta con qué tipo de perfil de rosca vamos a trabajar.



**Figura 2-15 Analisis de fuerza en el tornillo.**

Dónde:

P: Carga estática generada por el peso.

N: Fuerza normal.

f: Fuerza de rozamiento.

F: Fuerza generada por el par de torsión.

$\gamma$ : Angulo de inclinación del plano.

$$\tan \gamma = \frac{l}{\pi * d_p}$$

<sup>32</sup> Fuente: Tipos de roscas. Recuperado de: [http://html.rincondelvago.com/roscas\\_sus-tipos.html](http://html.rincondelvago.com/roscas_sus-tipos.html)

|  
l: Avance de la rosca.

$d_p$ : Diámetro del paso.

Mediante la figura 2-15, se formula las ecuaciones de equilibrio.

$$\sum F_x = 0$$

$$F - N(f \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$P + N(f \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma) = 0$$

A continuación se dividen las dos ecuaciones para eliminar la fuerza normal (N), una vez desarrollado se halla la ecuación 11.

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} \frac{(f \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)}{(\cos \alpha \cos \gamma - f \sin \gamma)} \quad \mathbf{Ecuación 11}$$

Para calcular el par de torsión se utiliza la ecuación 12:

$$T = F \frac{d_p}{2}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{P} \frac{d_p (f \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)}{2 (\cos \alpha \cos \gamma - f \sin \gamma)} \quad \mathbf{Ecuación 12}$$

A la ecuación 12 se divide por  $\cos \gamma$  y se complementa con la ecuación del ángulo de inclinación para obtener la ecuación 13.

$$\mathbf{T} = \mathbf{P} \frac{d_p (f \pi d_p + l \cos \alpha)}{2 (\pi d_p \cos \alpha - f l)} \quad \mathbf{Ecuación 13}$$

Los coeficientes de fricción en los tornillos de transmisión poseen diferentes valores, a causa de sus características propias de cada material, para una combinación de los mismos, como se lo representa en (tabla 2-4).

**Tabla 2-4 coeficientes de fricción de algunos materiales.**

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

### 2.6.1 CÁLCULO DEL TORQUE PARA EL EJE LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL.

Los parámetros de diseño del tornillo tanto para el eje X, Y son los siguientes:

- Diámetro nominal ( $d$ ):  $1/2$  in
- Paso ( $p$ ): 16hilos \* 1in
- Carga estática: 864.3N
- Coeficiente de fricción ( $f$ ): 0.16 (Tabla 2-4)

En primer lugar, se calcula el diámetro raíz ( $d_r$ ) con la ecuación 14.

$$d_r = d - \frac{p}{2} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$d_r = 0.5 - \frac{0,0499}{2}$$

$$d_r = 0.48in$$

Después se calcula el diámetro de paso con la siguiente ecuación 15.

$$d_p = \frac{d+d_r}{2} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$d_p = \frac{0.5 + 0.48}{2}$$

$$d_p = 0.49in = 12.5mm$$

Una vez encontrado el diámetro del paso se emplea la ecuación 13 para hallar el torque.



$$T = P \frac{d_p (f \pi d_p + l \cos \alpha)}{2 (\pi d_p \cos \alpha - fl)}$$

$$T = (864.3) * \frac{12,5}{2} * \frac{((0,16)(\pi)(12,5) + (1,27)(\cos 25^\circ))}{((\pi)(12,5)(\cos 25^\circ) - (0,16)(1,27))}$$

$$T = 1044,4 \text{ Nmm} = 1,04 \text{ Nm}$$

El torque calculado será empleado para el eje longitudinal y transversal debido a que sus cargas son similares.

### 2.6.2 CÁLCULO DEL TORQUE PARA EL EJE VERTICAL.

Los parámetros de diseño del tornillo para el eje Z son los siguientes:

- Diámetro nominal ( $d$ ):  $\frac{3}{4}$  in
- Paso ( $p$ ): 20hilos \* 1in
- Carga estática: 10N
- Coeficiente de fricción ( $f$ ): 0.16 (tabla 2-4)

Nuevamente se calcula el diámetro raíz ( $d_r$ ) con la ecuación 14.

$$d_r = d - \frac{p}{2}$$

$$d_r = 0.75 - \frac{0,06247}{2}$$

$$d_r = 0.72 \text{ in}$$

Luego se calcula el diámetro de paso con la siguiente ecuación 15.

$$d_p = \frac{d + d_r}{2}$$

$$d_p = \frac{0.75 + 0.72}{2}$$

$$d_p = 0.735 \text{ in} = 18.7 \text{ mm}$$

Una vez encontrado el diámetro del paso se emplea la ecuación 13 para hallar el torque.

$$T = P \frac{d_p (f\pi d_p + l \cos\alpha)}{2 (\pi d_p \cos\alpha - fl)}$$

$$T = (10) * \frac{18,7}{2} * \frac{((0,16)(\pi)(18,7) + (1,59)(\cos 25^\circ))}{((\pi)(18,7)(\cos 25^\circ) - (0,16)(1,59))}$$

$$T = 17,6 \text{ Nmm}$$

## 2.7 SELECCIÓN DE LOS SERVOMOTORES PARA LOS EJES X, Y, Z.

### 2.7.1 SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR PARA EL EJE X, Y.

Para la selección de los servomotores se basó en el torque calculado en la sección 2.6, con este valor se escogió el equipo a una determinada potencia de acuerdo a la (tabla 2-5).

**Tabla 2-5 Especificaciones del servomotor para los ejes X, Y.**

Nivel de voltaje	220V
Tipo de servomotor	M02430
Código del motor	0011
Potencia nominal (Kw)	0.75
Corriente nominal (A)	3.0
Velocidad nominal (rpm)	3000
Velocidad máxima (rpm)	4000
Torque nominal (Nm)	2.39
Peso (Kg)	2.86
Encoder (ppr)	2500
Polos	4
Nivel de aislamiento del motor	Class B
Nivel de protección	IP65

## 2.7.2 SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR PARA EL EJE Z.

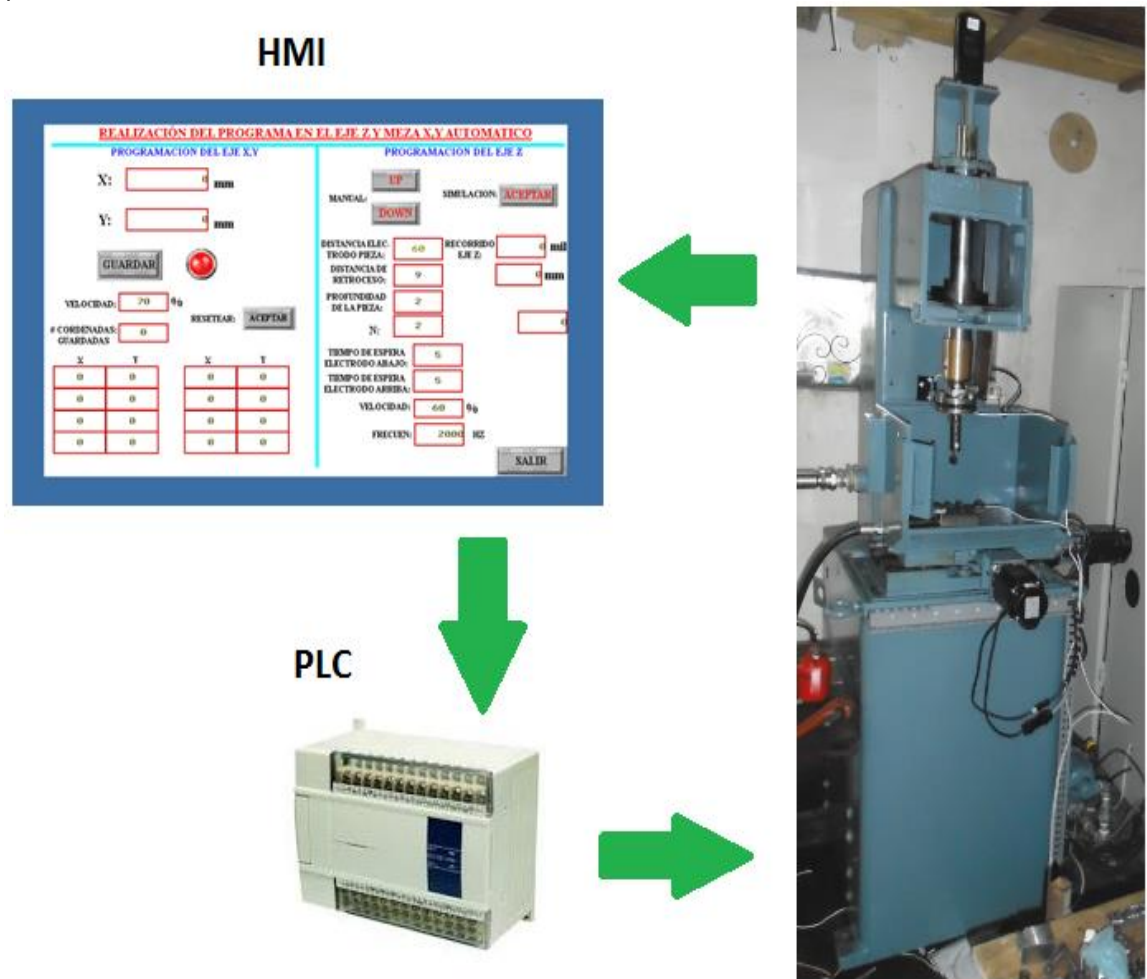
De igual manera se seleccionó de acuerdo al torque calculado en la sección 2.6, y se eligió el servomotor según la (tabla 2-6).

**Tabla 2-6 Especificaciones del servomotor para el eje Z.**

<b>Nivel de voltaje</b>	<b>220V</b>
<b>Tipo de servomotor</b>	M00630
<b>Código del motor</b>	0004
<b>Potencia nominal (Kw)</b>	0.4
<b>Corriente nominal (A)</b>	2.5
<b>Velocidad nominal (rpm)</b>	3000
<b>Velocidad máxima (rpm)</b>	4000
<b>Torque nominal (Nm)</b>	1.27
<b>Peso (Kg)</b>	1.78
<b>Encoder (ppr)</b>	2500
<b>Polos</b>	4
<b>Nivel de aislamiento del motor</b>	Class B
<b>Nivel de protección</b>	IP64

## 2.8 DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO, ELECTRÓNICO Y CONTROL EN LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.

Para el diseño del sistema en la máquina electroerosionadora se considera el esquema general (figura 2-16).

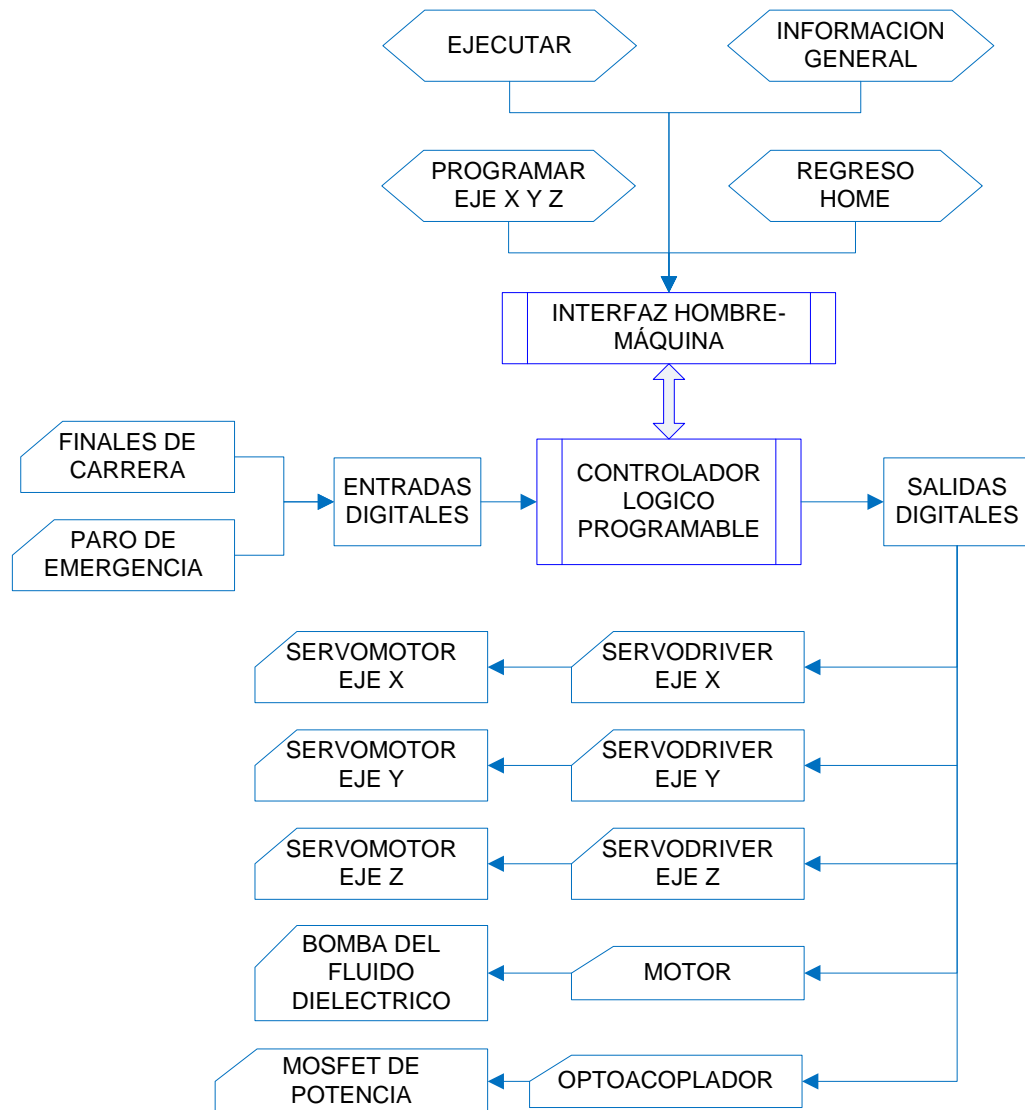


**Figura 2-16 Esquema del sistema de la máquina electroerosionadora**

En el sistema de la máquina electroerosionadora se tiene componentes principales los cuales son: Interfaz hombre-máquina, controlador, máquina – herramienta. La sincronización y comunicación adecuada entre cada componente permitirá desarrollar diferentes mecanizados por descarga eléctrica, donde el usuario a través de la interfaz podrá monitorear los movimientos de los ejes x, y, z durante todo el proceso de descarga eléctrica y remoción del material.

### 2.8.1 DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL HARDWARE

Se detalla en el siguiente diagrama de bloques la configuración de hardware y los elementos del sistema de control de la máquina electroerosionadora (figura 2-17).



**Figura 2-17 Diagrama del sistema de control de la máquina electroerosionadora.**

### 2.8.2 PARÁMETROS DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC).

Esta unidad de control debe cumplir con características necesarias para poder controlar y monitorear una máquina herramienta, como son:

- ❖ Fácil integración de distintos paneles HMI.
- ❖ Adaptación y comunicación perfecta a requerimientos con sistemas de servomotores.

- ❖ Tener salida de pulsos de alta velocidad para los movimientos de los servomotores.
- ❖ Realizar interpolaciones relativas y absolutas para el control simultáneo de los ejes.
- ❖ Poseer registros retentivos para el almacenamiento de posiciones a ejecutarse.
- ❖ Gran flexibilidad para la ejecución de cualquier programa mediante coordenadas.
- ❖ Entregar un eficiente control de posición y velocidad a los servomotores.

### 2.8.3 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.

Dada la oferta de modelos y variedad de fabricantes de PLC's que existen actualmente en el mercado, se busca una elección correcta para alcanzar el objetivo de la aplicación, por lo tanto se utiliza criterios funcionales donde se define la capacidad y complejidad del controlador.

- ❖ **Capacidad:** Determina el número y la naturaleza de las entradas y salidas, cual pueden ser analógicas, digitales entre otras, de acuerdo a la necesidad de la aplicación.
- ❖ **Complejidad:** establece el tratamiento de realizar funciones para manipular variables, con el fin de controlar el proceso eficientemente.

Teniendo en cuenta estos criterios se busca en el mercado el PLC (tabla 2-7) con los requerimientos necesarios para el control:

**Tabla 2-7 Especificaciones técnicas del controlador<sup>33</sup>.**

XINJE : XCC - 32T - E	
ITEMS	ESPECIFICACIONES
	32I/O
Forma de ejecución del programa	Forma de bucle de exploración
Forma de programación	Instrucción en Ladder y bloque de funciones en C
Disposición de velocidad	0.3 us
Apagado retentivo	Use FlashROM and Li Battery
Espacio de programación del usuario	256K
Puntos de entrada y salida	18 DI/ 14DO
Numero de bobinas internas	8768
	Puntos 640
Tiempo (T)	Especificaciones tiempo de 100mS : ajuste del tiempo 0.1~3276.7 sec tiempo de 10mS : ajuste del tiempo 0.01~327.67 sec. tiempo de 1mS : ajuste del tiempo 0.001~32.767 sec
	Puntos 640
Contador	Especificaciones 16 contador de bits : valor de ajuste K0 ~32,767 32 contador de bits : valor de ajuste K0 ~ + 2147483647
Registro de datos (D)	9024 palabras
Flash ROM Register (FD)	1024 palabras
Registros internos de expansión (ED)	36864 palabras
Distribución de alta velocidad	HSC, salida de pulsos, interrupción externa
Ajuste del intervalo del tiempo	0~99mS
Protección de contraseña	6 bits ASCII
Funcion de auto diagnostico	encendido de autocomprobacion, monitoreo en el tiempo comprobacion gramatical

Este controlador (figura 2-18) nos ofrece la capacidad de entradas y salidas necesarias, con una alta velocidad para el control en tres ejes y con registros de datos retentivos para el desarrollo del algoritmo y consigo el control del sistema, de acuerdo a la sección 2.9.2.



**Figura 2-18 PLC Xinje XCC – 32T – E<sup>34</sup>**

<sup>33</sup> Fuente: Manual de usuario PLC Xinje: XCC-32T-E

<sup>34</sup> Fuente: ChinaFactory. Recuperado de: <http://www.ichinafactory.com/Sellingleads/wholesale-399032.html>

### 2.8.3.1 ESPECIFICACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL PLC.

Se describe las características de las entradas (tabla 2-8) y salidas de alta velocidad (tabla 2-9) y de transistor (tabla 2-10) para el control.

**Tabla 2-8 Características de las entradas del PLC.**

Unidades básicas	
Señal de entrada de voltaje	24VDC±10%
Señal de entrada de corriente	7mA/24VDC
Corriente de entrada energizada	hasta 4.5mA
Corriente de entrada des energizada	menor que 1.5mA
Tiempo de respuesta en la entrada	aproximadamente 10ms
Formato de la señal de entrada	transistor a colector abierto
Circuito de aislamiento	aislamiento con opto acoplador
Visualización de la acción de entrada	luz led

**Tabla 2-9 Características de las salidas de alta velocidad.**

Salida de pulsos de alta velocidad	
Modelo	XCC-32T-E
Bit de salida de alta velocidad	Y0~Y4
Fuente de alimentación externa	desde [5~30V] DC
Denotan la acción	indicación por led
Máxima corriente	50mA
Máxima frecuencia de salida de pulsos	200KHZ



**Tabla 2-10 Características de la salida a transistor.**

Salida de transistor genérico	
<b>Modelo</b>	XCC-32T-E
<b>Bit de salida por transistor</b>	Y5~Y15
<b>Fuente de alimentación externa</b>	desde [5~30V] DC
<b>Circuito de aislamiento</b>	aislamiento con opto acoplador
<b>Denotan la acción</b>	indicación por led
<b>Máxima carga</b>	<u>Resistencia de carga</u> 0.8A
	<u>Inducción de carga</u> 12W/24VDC
	<u>lámparas de carga</u> 1.5W/24VDC
<b>Mínima carga</b>	5VDC 2mA
<b>Tiempo respuesta</b>	de <u>OFF→ON</u> bajo los 0.2ms
	<u>ON→OFF</u> bajo los 0.2ms

## 2.8.4 SELECCIÓN DE LOS SERVODRIVERS PARA EL CONTROL EN LOS SERVOMOTORES.

Para la selección se consideró que nuestra aplicación requiere de un control de lazo cerrado para conocer la posición exacta y efectuar un avance correcto para el mecanizado por descarga eléctrica, así como para el posicionamiento del área de trabajo, por lo cual se implementaron servomotores en los tres ejes por su flexibilidad en el control de movimiento.

### 2.8.4.1 Servodriver DS2-20P7-A y DS2-20P4-A.

Se seleccionó dos tipos de servodrivers con sus respectivos servomotores, debido al diferente torque calculado en los ejes X y Z (sección 2.6) y así tener un buen control de velocidad y posición para la aplicación.

Los servodrivens de marca Xijne (figura. 2-19) tiene un buen desempeño en control de posición, velocidad y torque.



**Figura 2-19 Servodriver DS2-20P7-A<sup>35</sup>.**

El principio básico de un servodriver es adquirir la señal del PLC, posteriormente la procesa y envía los pulsos al servomotor y este a su vez retroalimenta a su driver para un control de movimiento en una posición exacta.

#### **2.8.4.2 Características del DS2-20P7-A.**

- ❖ Alta precisión de posicionamiento.
- ❖ Posee un control de posición, velocidad y torque.
- ❖ Configuración flexible.
- ❖ Tiene seis canales de entradas y tres canales de salida.
- ❖ Comunicación RS485 simple.
- ❖ Tiene protecciones sobre voltaje, bajo voltaje, sobre corriente, velocidad excesiva, sobre carga, error de encoder y offset de posición.
- ❖ Son utilizados en industrias tales como torno, amoladora, grabado, de embalaje, de cizallamiento entre otras.

<sup>35</sup> Fuente: OpenCNCMexico. Recuperado de: <http://www.opencncmexico.com/>

### 2.8.5 PARÁMETROS DEL MOTOR PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DEL FLUIDO DIELECTRICO.

Todas las máquinas cuentan con un sistema cíclico de refrigeración que se encarga de impulsar y hacer circular el fluido dieléctrico, con ayuda de un motor con su bomba hidráulica, desde un tanque de enfriamiento hasta el tanque de trabajo, para mantener el fluido a una temperatura constante.

El fluido dieléctrico debe cumplir con cuatro importantes funciones:

- ❖ Aislante entre pieza y electrodo.
- ❖ Conductor de descargas.
- ❖ Refrigerante.
- ❖ Medio de eliminación de las partículas.

Por lo cual para su correcta circulación durante el proceso de maquinado por descarga eléctrica se opta por un motor (figura 2-20) de baja potencia, el mismo que se utiliza para impulsar el bombeo del fluido.



**Figura 2-20 Moto AC del bombeo del fluido dieléctrico<sup>36</sup>.**

#### 2.8.5.1 Especificación del motor.

Se presenta las características más relevantes del motor en la (tabla 2-11)

---

<sup>36</sup> Fuente: ebay. Recuperado de: <http://www.ebay.com/itm/NEW-GENERAL-ELECTRIC-GE-5KE213BC105-7-1-2HP-3520RPM-213T-3PH-AC-MOTOR-B314138-/301063295573>

**Tabla 2-11 Datos de placa del motor.**

<b>Motor</b>	
<b>Modelo :</b>	5K42JG813
<b>Voltaje [V] :</b>	220
<b>Corriente [A] :</b>	1.9
<b>Potencia [hp] :</b>	½
<b>Velocidad [rpm] :</b>	1725
<b>Factor de servicio :</b>	1.0

### **2.8.6 DISEÑO DEL TABLERO ELÉCTRICO DE CONTROL PARA LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.**

Con base en los resultados del diseño mecánico, se optó por un servomotor cuya potencia es de 0.75Kw para el recorrido longitudinal y transversal, mientras que para el recorrido vertical la potencia de 0.4Kw fue el factor para la selección del servomotor en este eje, estas especificaciones técnicas (tabla 2-12) de los equipos van a permitir la adecuada selección del alambre conductor y las respectivas protecciones para los motores y sus drivers.

**Tabla 2-12 Características de los servomotores de los ejes X, Y, Z.**

<b>EJE</b>	<b>X, Y</b>	<b>Z</b>
<b>Voltaje [V]:</b>	220	220
<b>Corriente nominal [A]:</b>	3	2.5
<b>Potencia [Kw]:</b>	0.75	0.4
<b>Torque [Nm]:</b>	2.39	1.27
<b>Velocidad [rpm]:</b>	3000	3000

### 2.8.6.1 SELECCIÓN DEL CONDUCTOR.

Para la selección del conductor se basa en la corriente nominal y aplicar el cálculo de la corriente de diseño para los ejes X, Y, Z utilizando la ecuación 16 y se representa en la (tabla 2-13).

$$I_d = 1.25 * I_n \quad \text{Ecuación 16}$$

**Tabla 2-13 Corrientes calculadas para los motores de los ejes X, Y, Z.**

Eje X, Y	Eje Z
$I_d = 1.25 * I_n$	$I_d = 1.25 * I_n$
$I_d = 1.25 * 3A$	$I_d = 1.25 * 2.5A$
$I_d = 3.75 A$	$I_d = 3.125 A$

Con los resultados se selecciona el calibre del conductor.

### 2.8.6.2 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE LOS SERVODRIVES EN CADA EJE.

Para el cálculo del elemento de protección se utiliza la ecuación 17 y se representa en la (tabla 2-14).

$$I_p = 2.5 * I_n \quad \text{Ecuación 17}$$

**Tabla 2-14 Corriente calculada para la selección del breaker de protección.**

Eje X, Y	Eje Z
$I_p = 2.5 * I_n$	$I_p = 2.5 * I_n$
$I_p = 2.5 * 3A$	$I_p = 2.5 * 2.5A$
$I_p = 7.5 A$	$I_p = 6.25 A$

Por lo tanto se selecciona un breaker de 6 [A] para los ejes X e Y, de igual manera para el eje Z se calculó una protección de 4 [A], con la correcta selección de los breakers se puede así tener una adecuada protección de cortocircuitos.

### **2.8.6.3 SELECCIÓN DEL ELEMENTO DE PROTECCIÓN DEL TABLERO ELÉCTRICO DE CONTROL DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.**

Se emplea la ecuación 18.

$$I_{pt} = 2.5 * \sum I_{motores} + \sum I_{varias\ cargas} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$I_{pt} = 2.5 * [(3A + 3A + 2A + 1.9A) + (10A)]$$

$$I_{pt} = 49.75 [A]$$

Como resultado se selecciona un breaker de 40 [A], para la sobreprotección del tablero.

### **2.8.7 DISEÑO DEL CIRCUITO DE MECANIZADO POR DESCARGA ELÉCTRICA.**

Para realizar el diseño del circuito EDM se formó de las siguientes etapas:

#### **2.8.7.1 Etapa de rectificación.**

Para la aplicación se requiere de corriente directa, por lo cual se emplea una etapa de rectificación donde se convertirá una señal de corriente alterna de entrada en una corriente continua de salida.

Para lo cual se eligió un transformador de acuerdo a su potencia para que proporcione una corriente requerida para la erosión.

Mediante la ecuación 19 se calcula la potencia del transformador para una corriente de 10 A.

$$I_p = \frac{S_p}{V_p} \quad \text{Ecuación 19}$$

|  
Dónde:

$S_p$ : Potencia aparente del primario.

$I_p$ : Corriente del primario.

$V_p$ : Voltaje del primario.

$$S_p = I_p V_p$$

$$S_p = (10A) * (220)$$

$$S_p = (10A) * (220)$$

$$S_p = 2200VA$$

$$S_p = 2.2VA \approx S_s$$

Una vez calculado la potencia aparente, se elige un transformador de 2KVA con entrada de 110V/220V y salidas de 100V/130V/160V, con los datos previamente encontrados se calcula la potencia activa con la ecuación 20 y con un factor de potencia (FP) de 0.8.

$$P = S_s * FP \quad \text{Ecuación 20}$$

$$P = 2000 * 0.8$$

$$P = 1600W$$

Se implementa la etapa de rectificación, para la cual se utilizó un puente de diodos para la rectificación y capacitores para filtrar la señal se utiliza el voltaje secundario RMS de 100 V del transformador y se calcula el voltaje pico con la ecuación 21.

$$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$V_{pico} = V_{RMS} \sqrt{2}$$

$$V_{pico} = (100 V) \sqrt{2}$$

$$V_{pico} = 141.5 V$$

Para filtrar la señal a un rizado mínimo de un 10 por ciento se emplea la siguiente ecuación 22.

$$C = \frac{5 \cdot I}{f \cdot V_{max}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde:

$C$ : Capacidad del condensador del filtro en faradios.

$I$ : Corriente que suministrará la fuente.

$f$ : Frecuencia de la red.

$V_{max}$ : Tensión de pico de salida del puente.

$$C = \frac{5 \cdot 10A}{60Hz \cdot 141.5V}$$

$$C = 5889,28\mu f$$

### 2.8.7.2 Diseño del circuito del EDM.

Para el diseño se optó por el circuito resistencia-capacitor, para lo se calcula la resistencia con la ecuación 23.

$$V = IR \quad \text{Ecuación 23}$$

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{141.5V}{10A}$$

$$R = 14.15\Omega$$

Para calcular el capacitor se utiliza la corriente máxima que entrega el transformador y aplicamos la ecuación 22.

$$C = \frac{5 \cdot I}{f \cdot V_{max}}$$



$$C = \frac{5 * 10A}{60Hz * 141.5V}$$

$$C = 5889,28\mu f$$

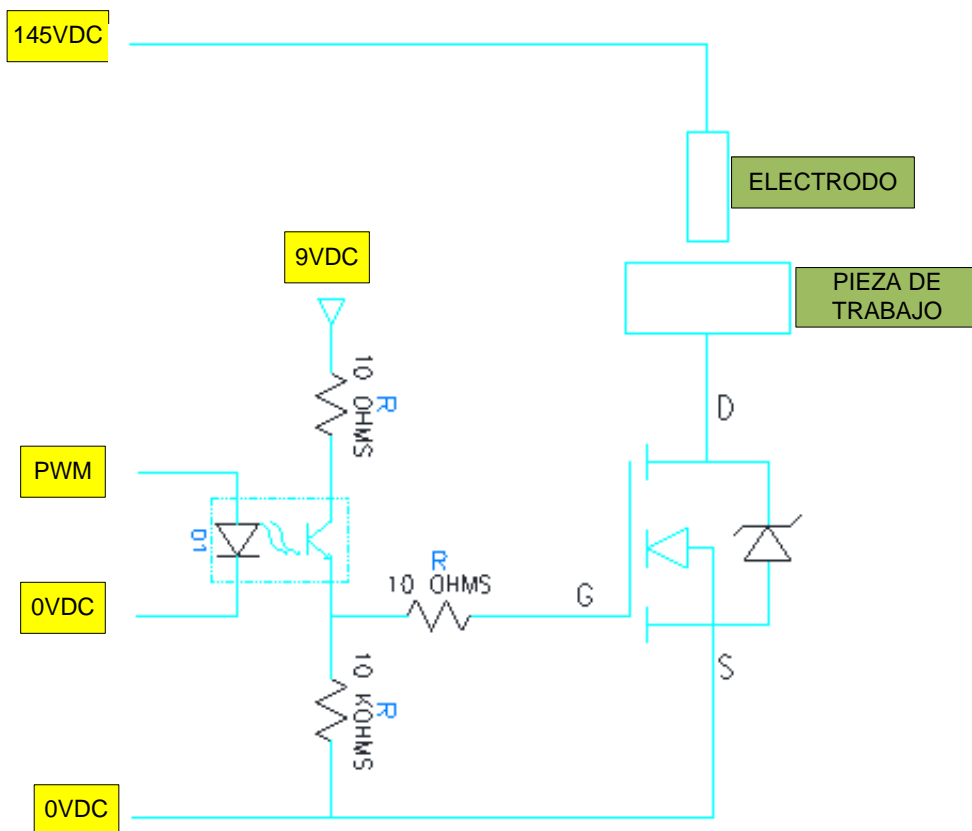
Una vez calculado el circuito resistencia- capacitor, se calcula el tiempo de carga y descarga de capacitor con la ecuación 24.

$$t = 5 * \tau = 5 * R_{eq}C_{eq} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$t = (5)(15\Omega)(10000\mu f)$$

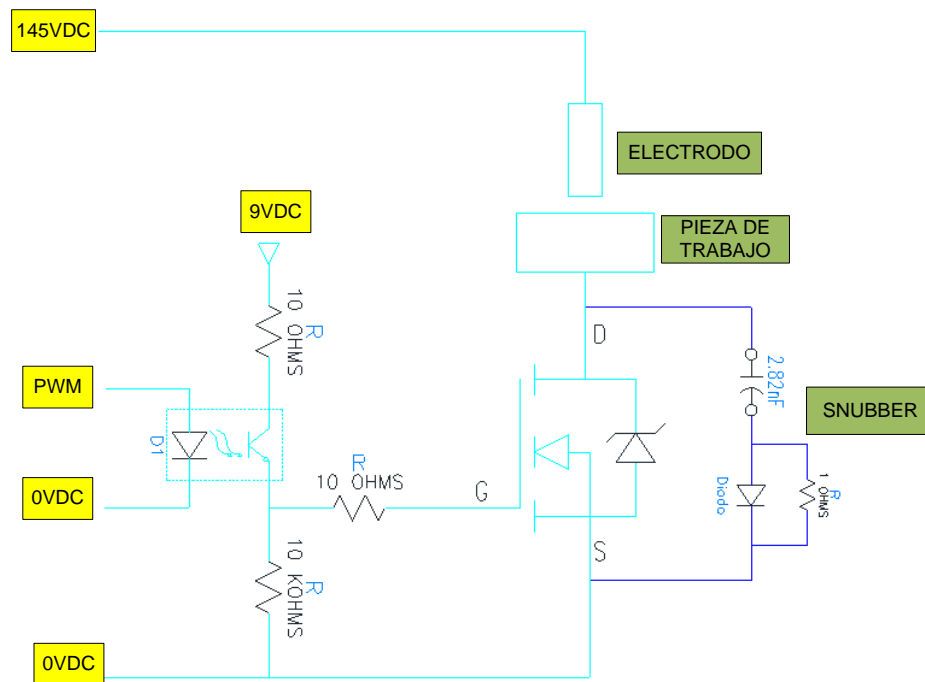
$$t = 0.75s$$

Posteriormente se implementa el aislamiento de la parte de control con la de potencia con un opto acoplador de acuerdo con la (figura 2-21).



**Figura 2-21 Circuito del mecanizado por descarga eléctrica.**

Para mejorar la conmutación de encendido y apagado se emplea el circuito snubber (figura 2-22) con la ecuación 25.



**Figura 2-22 Circuito del mecanizado por descarga eléctrica con snubber.**

$$C = \frac{I_p * t_{off}}{V} \quad \text{Ecuación 25}$$

Dónde:

C: Capacitor.

$I_p$ : Corriente pico.

$t_{off}$ : Tiempo que se demora en llegar a 0 amperios.

$$C = \frac{10 \text{ A} * 41 \text{ ns}}{145 \text{ V}}$$

$$C = 2.82 \text{ nf}$$

Una vez calculado el capacitor, se puede encontrar el valor de la resistencia con la ecuación 24.

|

$$5\tau = 5RC = t_{on}$$

$$R = \frac{t_{on}}{5C}$$

$$R = \frac{12ns}{5(2.82nf)}$$

$$R = 0.86\Omega \approx 1\Omega$$

La rapidez del volumen de remoción de materiales suelen ser de 2 a  $400 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Para encontrar la tasa de remoción de la máquina electroerosionadora se calcula en función del volumen a removerse, por el tiempo que tarda la operación, de acuerdo a la ecuación 26.

Como ejemplo se tiene una placa de acero que se requiere mecanizar de acuerdo a las siguientes características:

$$\text{Placa} = l * a * p = 100\text{mm} * 20\text{mm} * 100\text{mm}$$

$$\text{Volumen} = 1\text{in} * 1\text{in} * 1\text{in} = 3\text{in}$$

$$\text{Tiempo} = 7\text{h} \frac{60\text{min}}{1\text{h}} = 420\text{min}$$

$$\text{Profundidad} = 10\text{mm}$$

$$V_r = \frac{V}{t} \quad \text{Ecuación 26}$$

Dónde:

$V_r$ : Rapidez de remoción.

$V$ : Volumen.

$t$ : Tiempo.

$$V_r = \frac{16484.028\text{mm}^3}{420\text{min}}$$

$$V_r = 39.2 \text{ m}^3 / \text{min}$$

## 2.8.8 ELEMENTOS ELÉCTRICOS.

### 2.8.8.1 SELECTOR ON/OFF TRIFÁSICO.

Se eligió un selector para la conexión y desconexión de la alimentación eléctrica principal (figura 2-23), de acuerdo a la corriente del circuito de control y potencia, cual valor es de 56 A.



Figura 2-23 Selector On / OFF<sup>37</sup>.

### 2.8.8.2 PARO DE EMERGENCIA.

El paro de emergencia es un dispositivo para todo tipo de maquinaria en movimiento, por lo que se implementó este dispositivo para permitir al operador parar en cualquier instante del proceso en caso de colisión (figura 2-24).



Figura 2-24 Paro de emergencia<sup>38</sup>.

<sup>37</sup> Fuente: Alibaba.com. Recuperado de: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/bigm-selector-switch-lw26-25-3p-off-on-605730669.html>

### 2.8.8.3 BREAKER.

Se instala un breaker (figura 2-25) para cada equipo de acuerdo a la sección 2.8.6.3 con el objetivo de interrumpir o abrir el circuito eléctrico cuando la intensidad se eleve infinitamente, produciéndose un cortocircuito, para así proteger y conservar el equipo.



Figura 2-25 Breaker<sup>39</sup>.

### 2.8.8.4 FINAL DE CARRERA.

Se implementó un interruptor de límite o final de carrera (figura 2-26), al final del recorrido longitudinal, transversal y vertical, para evitar colisiones con la estructura de la máquina y sobre guardar los mecanismos de los ejes.



Figura 2-26 Final de carrera<sup>40</sup>.

<sup>38</sup> Fuente: directindustry. Recuperado de: <http://www.directindustry.es/prod/emas/botones-pulsadores-parada-emergencia-38087-773967.html>

<sup>39</sup> Fuente: S. V. ENTERPRISES. Recuperado de: <http://www.svindustrial-electrical.com/air-circuit-breaker-1551957.html>

### 2.8.8.5 RELÉ.

Se implementó un relé de 24VDC (figura 2-27) para activar la bobina del contactor y energizar las líneas de fuerza del motor de la bomba.

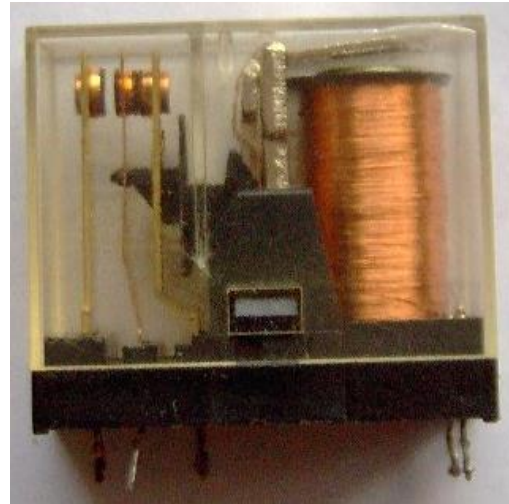


Figura 2-27 Relé<sup>41</sup>

### 2.8.8.6 CONTACTOR.

El contactor se implementó con bobina de 110VAC (figura 2-28), para conectar o interrumpir el paso de corriente, al recibir la señal del relé para la activación del motor de la bomba.



Figura 2-28 Contactor<sup>42</sup>.

---

40 Fuente: Sensores de proximidad. Recuperado de: <http://sensoresdeproximidad.blogspot.com/p/sensor-fin-de-carrera-el-final-de.html>

41 Fuente: relay.jpg Componente electrónico. Recuperado de: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electronic\\_component\\_relay.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electronic_component_relay.jpg)

### 2.8.8.7 TOUCH SCREEN.

Se implementó una pantalla táctil (figura 2-29) para el ingreso de parámetros de los tres ejes y monitoreo del funcionamiento de los mismos.



Figura 2-29 Touch Screen<sup>43</sup>.

## 2.9 DISEÑO DE LA PROGRAMACIÓN DEL PLC PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.

El esquema de la programación para el control de la máquina electroerosionadora se compone de:

- ❖ Programación de los planos X, Y, Z (Manual - Automático).
- ❖ Ejecutar.
- ❖ Home.

### 2.9.1 PROGRAMAR PLANO X, Y, Z (MANUAL - AUTOMÁTICO).

Para el desarrollo de la programación se consideró dos modos, el manual (figura 2-30) y el modo automático (figura 2-31), en los cuales se estableció memorias retentivas para guardar posiciones en los ejes X e Y, mientras que para el eje Z se elaboró una relación de trabajo [n], para el mecanizado por electroerosión.

<sup>42</sup> Fuente: INSTALACIONES ELÉCTRICAS INFOCAP. Recuperado de: <http://electricidadinfocap.blogspot.com/2013/10/el-contactor-electrico-documento-basado.html>

<sup>43</sup> Fuente: Alibaba.com. Recuperado de: [http://wuxixinje.en.alibaba.com/product/772242982-218181402/Color\\_HMI\\_touchwin\\_TH465\\_UT.html](http://wuxixinje.en.alibaba.com/product/772242982-218181402/Color_HMI_touchwin_TH465_UT.html)

❖ Manual:

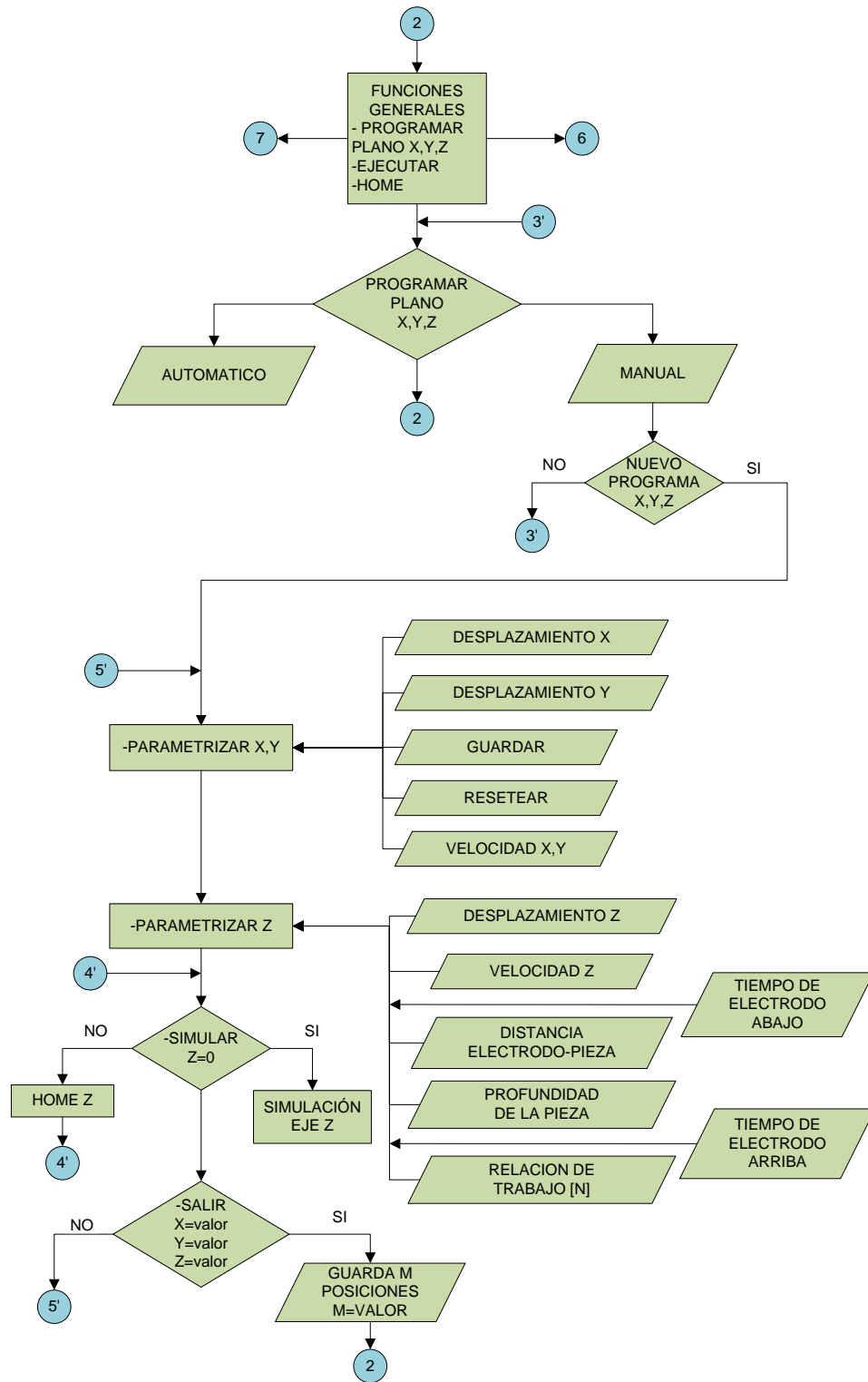


Figura 2-30 Diagrama de flujo de la programación en manual.



❖ Automático:

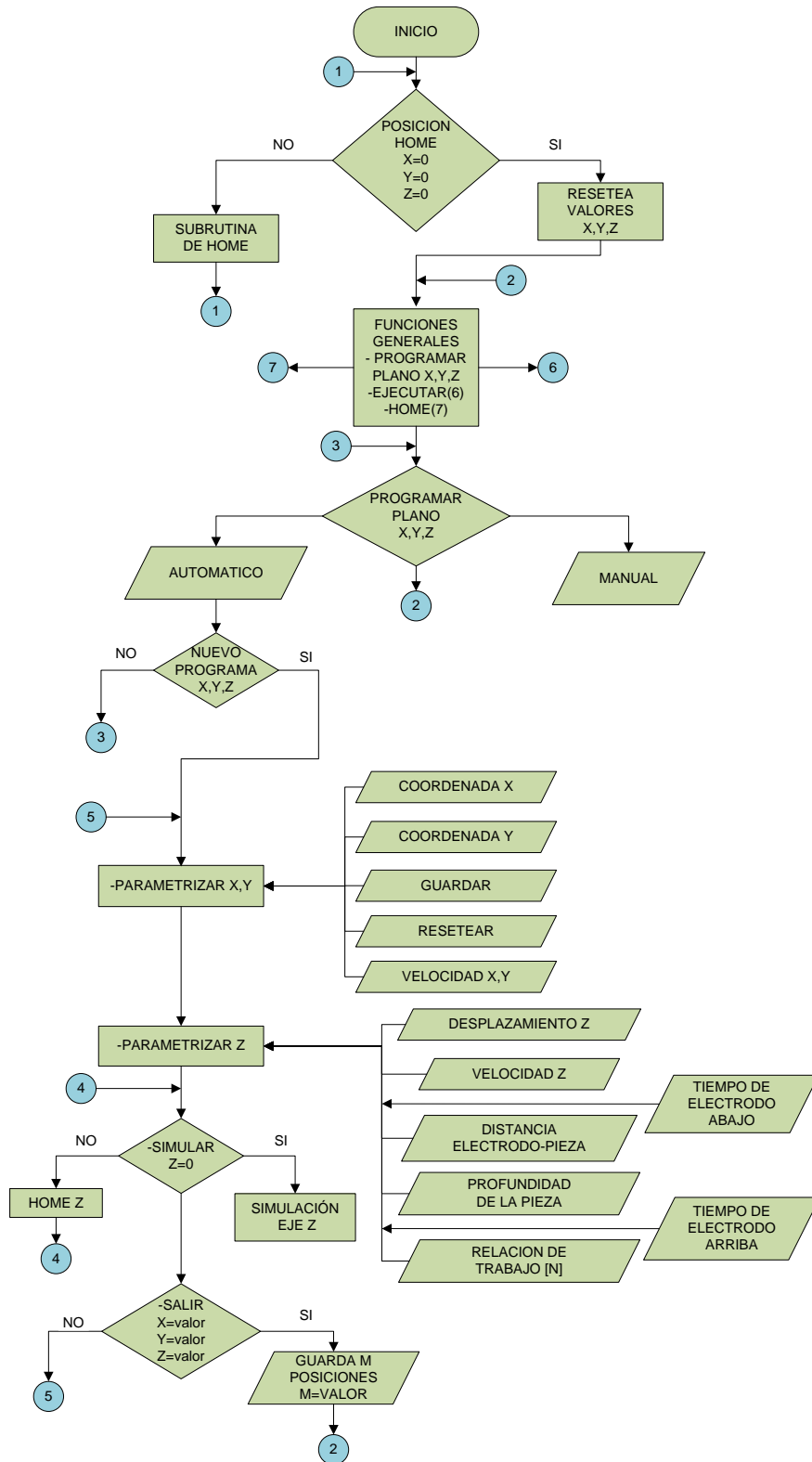


Figura 2-31 Diagrama de flujo de la programación en automático.

## 2.9.2 EJECUTAR.

En la (figura 2-32) se representa el diagrama de flujo de la función ejecutar del programa donde todas las M posiciones guardadas en los ejes (X, Y) y los parámetros de trabajo en el eje Z (distancia electrodo pieza, distancia de retroceso, profundidad de la pieza, relación de trabajo, tiempo de espera abajo y arriba), para el mecanizado por descarga eléctrica.

Consecutivamente con las salidas de cada variable se monitorea las posiciones de avance de los ejes (X, Y, Z), la frecuencia en la erosión y el motor de la bomba del dieléctrico, tanto para el modo manual – automático.

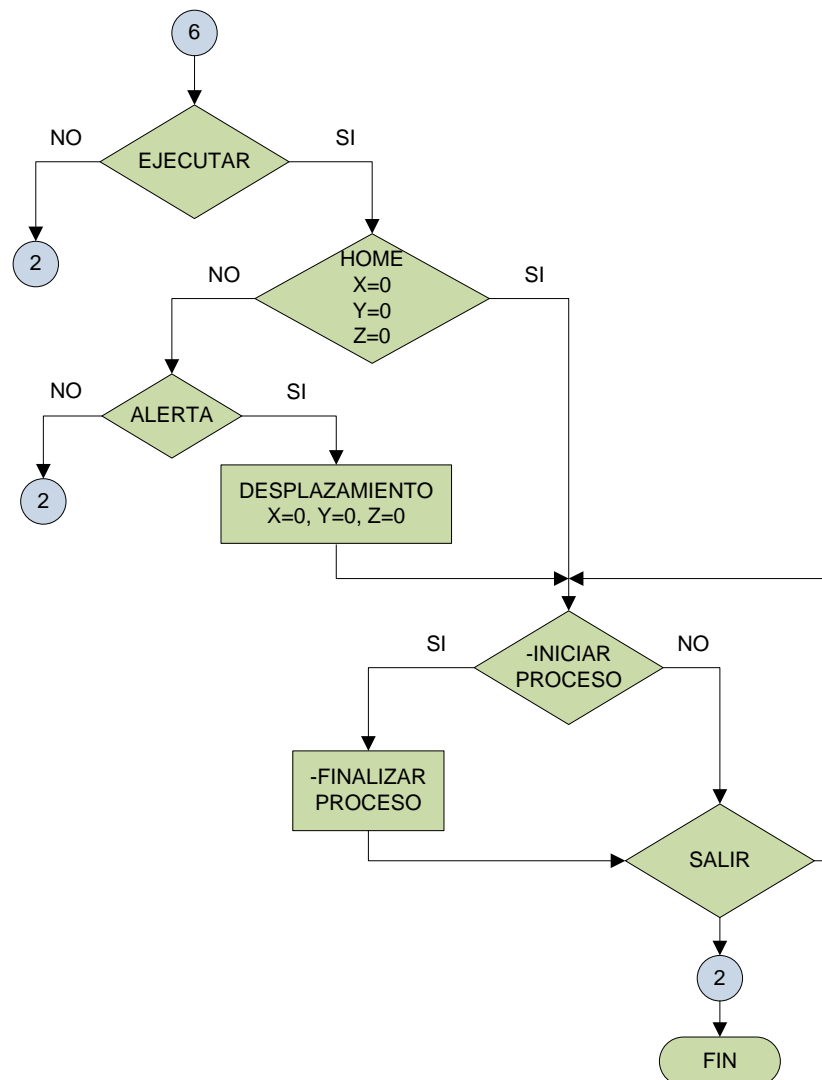


Figura 2-32 Diagrama de flujo de la ejecución en manual – automático.

### 2.9.3 HOME.

Para el diagrama de flujo de home (figura 2-33), se elaboró de dos formas, por ejes individuales y un general (X, Y, Z), permitiendo al usuario regresar los valores a su cero máquina.

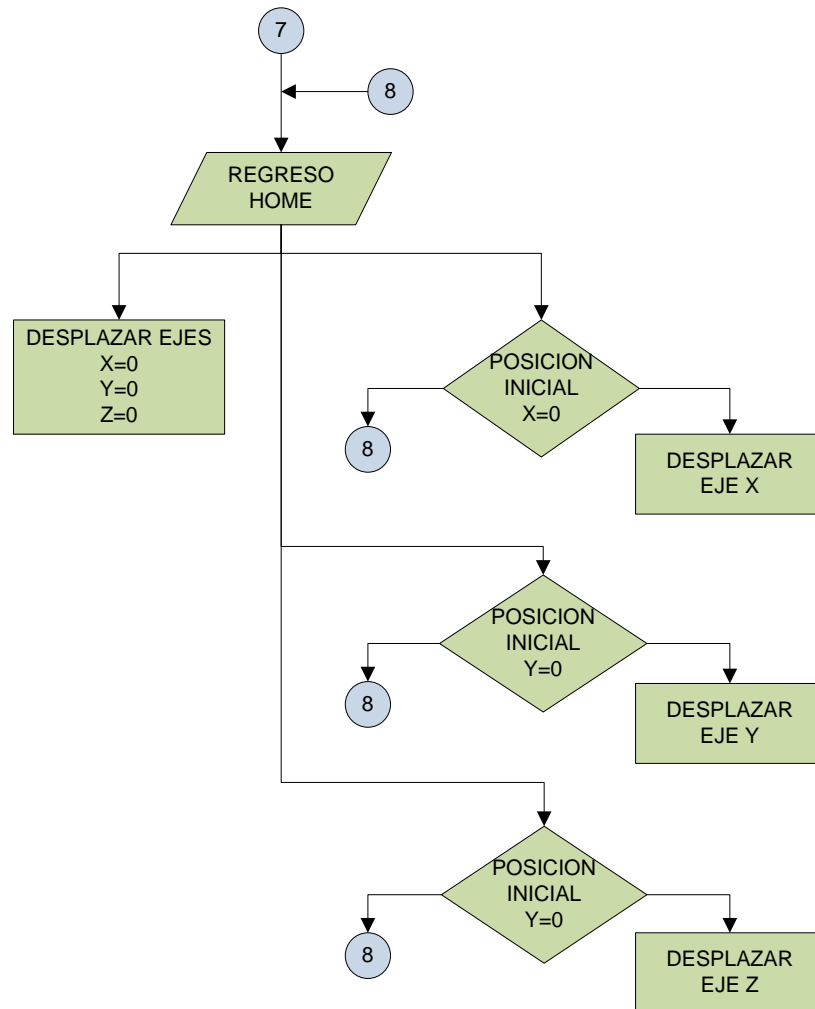


Figura 2-33 Diagrama de flujo de home en X, Y, Z.

## CAPÍTULO III

### 3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN LA MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA.

#### 3.1 IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA.

Una vez terminado el diseño y la selección del sistema mecánico, como se puede observar en la (figura 3-1), se procede a realizar el montaje o implementación de sus partes.

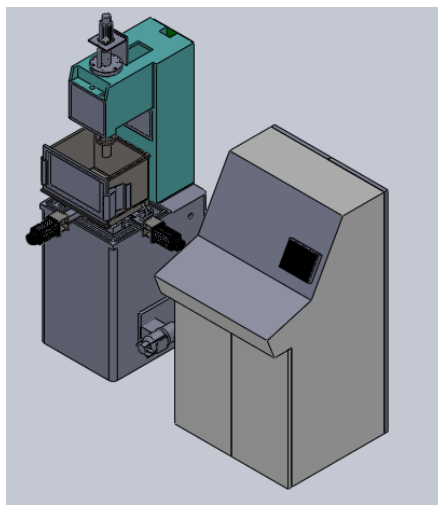


Figura 3-1 Simulación 3D del diseño mecánico.

#### 3.1.1. IMPLEMENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL EJE Z.

##### a. TORNILLO DE POTENCIA EJE Z.

En el eje Z básicamente se construyó el tornillo y la tuerca de potencia (figura 3-2) de acuerdo a la sección 2.5.2, esta selección nos permite realizar el control del desplazamiento del porta electrodo de una manera más precisa y de este modo controlar eficazmente el avance del mecanizado.

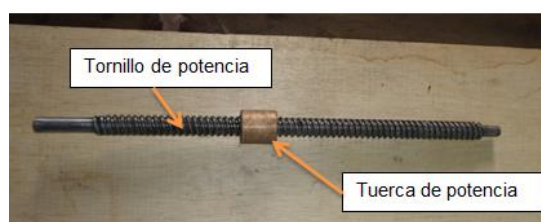


Figura 3-2 Tornillo de potencia eje Z.

### b. BASE DEL SERVOMOTOR EJE Z.

Se acopló el servomotor a la columna de la máquina a través de la base que se muestra en la (figura 3-3), con la misma se logra un adecuada sujeción del motor para evitar pandeo y vibraciones.

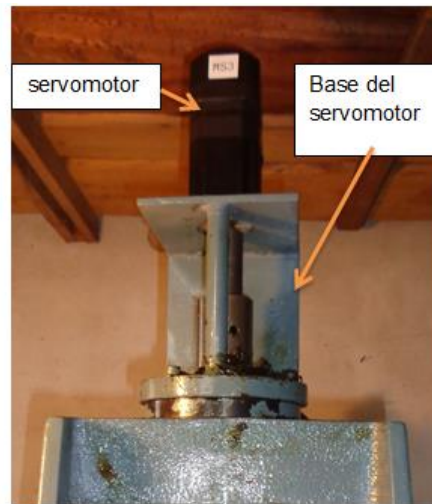


Figura 3-3 Base para el servomotor eje Z.

### c. MATRIMONIO SERVOMOTOR EJE Z.

Se construyó un matrimonio (figura 3-4) para poder adaptar la salida del movimiento del servomotor, con el tornillo de potencia del eje z y así lograr desplazar el porta electrodos de abajo hacia arriba, este movimiento se logra manteniendo el tornillo de potencia girando en un punto fijo y haciendo que la tuerca se desplace junto con el eje que sujeta al porta electrodos.



Figura 3-4 Matrimonio eje Z.

#### d. CILINDRO DE BRONCE.

Se construyó un cilindro de bronce (figura 3-5) el mismo que se utilizó para lograr que el eje que sujeta al porta electrodos en Z, se desplace linealmente de abajo hacia arriba sin vibraciones de ningún tipo, además se mecanizaron dos chaveteros con una chaveta en el eje que sujeta al porta electrodos para mejorar la estabilidad del mecanismo.

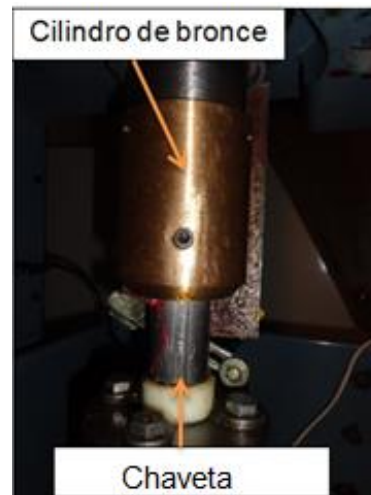


Figura 3-5 Cilindro de bronce eje Z.

#### e. PLETINA PARA EL FINAL DE CARRERA EN EL EJE Z.

Al ser una máquina que necesita puntos de referencia, se construyó una pletina que aloje al final de carrera (figura 3-6), misma que se encarga de censar la altura máxima a la que puede llegar el porta electrodos sin efectuar ningún daño a la integridad de la máquina electroerosionadora.

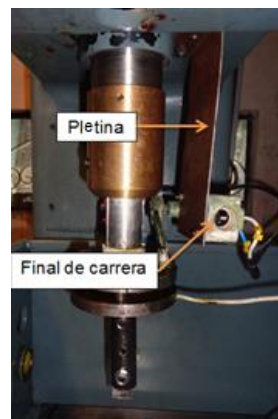


Figura 3-6 Pletina para alojar el final de carrera eje Z.

### e. MONTAJE FINAL DEL EJE Z.

Una vez armado el eje Z con todos los elementos que se necesitaron para las adaptaciones mecánicas, se culminó el eje z como se ilustra en la (figura 3-7).



Figura 3-7 Montaje final del eje Z.

## 3.1.2 IMPLEMENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL EJE X E Y.

### a. TORNILLO DE POTENCIA EJE Z.

Para los ejes x e y, se fabricaron los tornillos de potencia (figura 3-8), conservando el paso de los originales pero se alargó su longitud para facilitar la adaptación con servomotores, razón por la cual las tuercas de los dos ejes se conservaron en las dimensiones originales de la máquina.

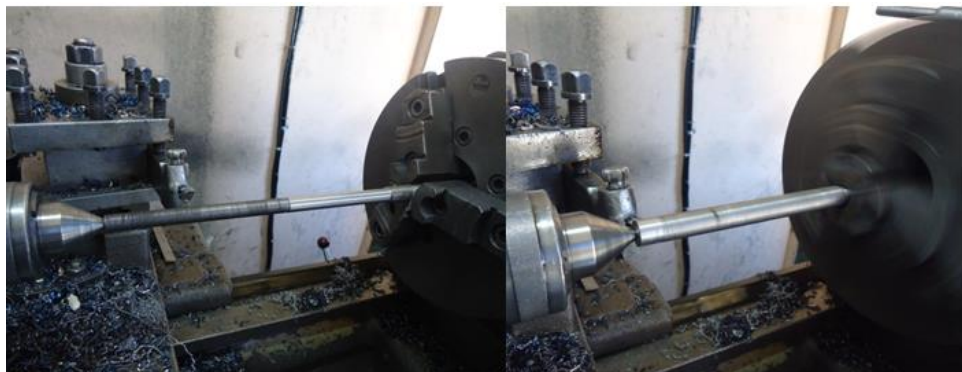
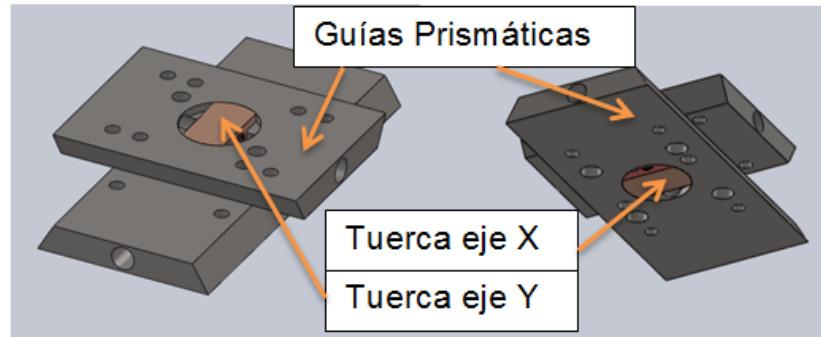


Figura 3-8 Construcción de los tornillos de potencia para los ejes X e Y.

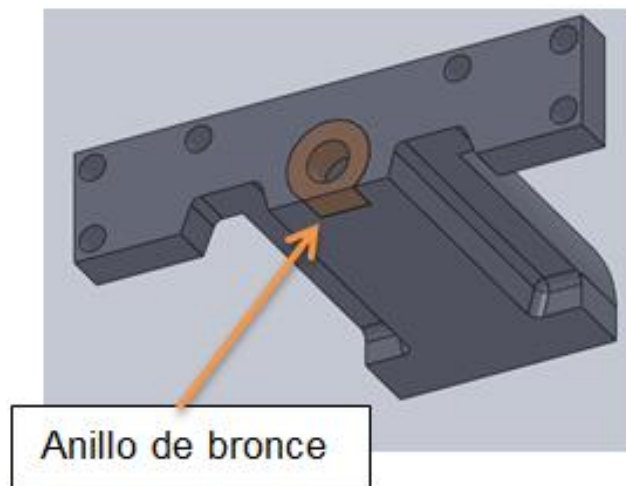
Las tuercas de los tornillos de potencia no se modificaron, así como las guías prismáticas debido a que su diseño es el óptimo para el nuevo tornillo de potencia.



**Figura 3-9 Guías y tuercas ejes X e Y.**

#### **b. SOPORTE EJES X E Y.**

En los soportes de los 2 ejes se realizaron adaptaciones para insertar un anillo de bronce (figura 3-9) el mismo que nos va a ayudar a centrar de mejor manera los nuevos tornillos de potencia.



**Figura 3-10 Anillo de bronce, soportes ejes X e Y.**

#### **c. BASE PARA SERVOMOTOR EJES X E Y.**

Para adaptar los servomotores a los soportes de los ejes X e Y, fue necesario la fabricación de bases (figura 3-11) mismas que deben alojar fácilmente a los servomotores y adaptarlos a la carcasa de la máquina, para dar soporte y estabilidad a los motores.





**Figura 3-11 Base para servomotor ejes X e Y.**

**f. MATRIMONIO SERVOMOTOR EJES X E Y.**

Se construyó un matrimonio (figura 3-12) para poder adaptar la salida del movimiento del servomotor con el tornillo de potencia de los ejes X e Y para así lograr desplazar la mesa.

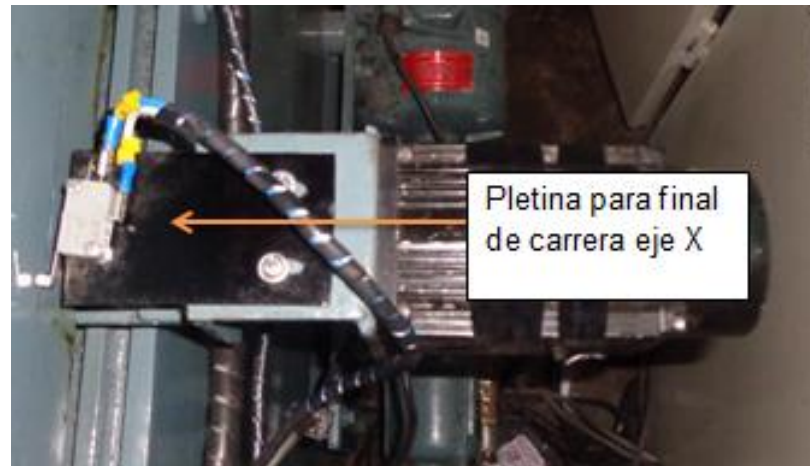


**Figura 3-12 Matrimonio ejes X e Y.**

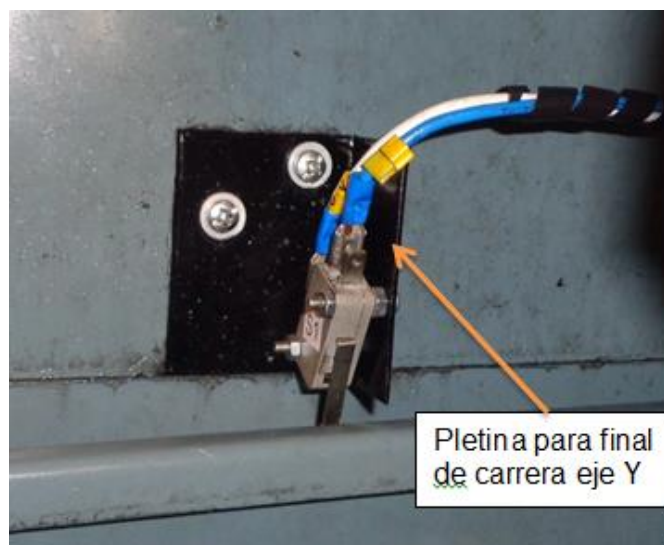
**g. PLETINA PARA EL FINAL DE CARRERA EN EL EJE X.**

Al ser una máquina que necesita puntos de referencia, se construyó una pletina que aloje al final de carrera en el eje X (figura 3-13) y otra pletina que aloje al final de carrera en el eje Y (figura 3-14) respectivamente, estos finales de carrera tiene por misión el ser un punto de referencia para que la

La máquina se posicione a lo largo de los ejes X e Y con precisión y a su vez determinar los rangos de operación en los que la máquina no colisione ni se desacople.



**Figura 3-13 Pletina para alojar el final de carrera eje X.**

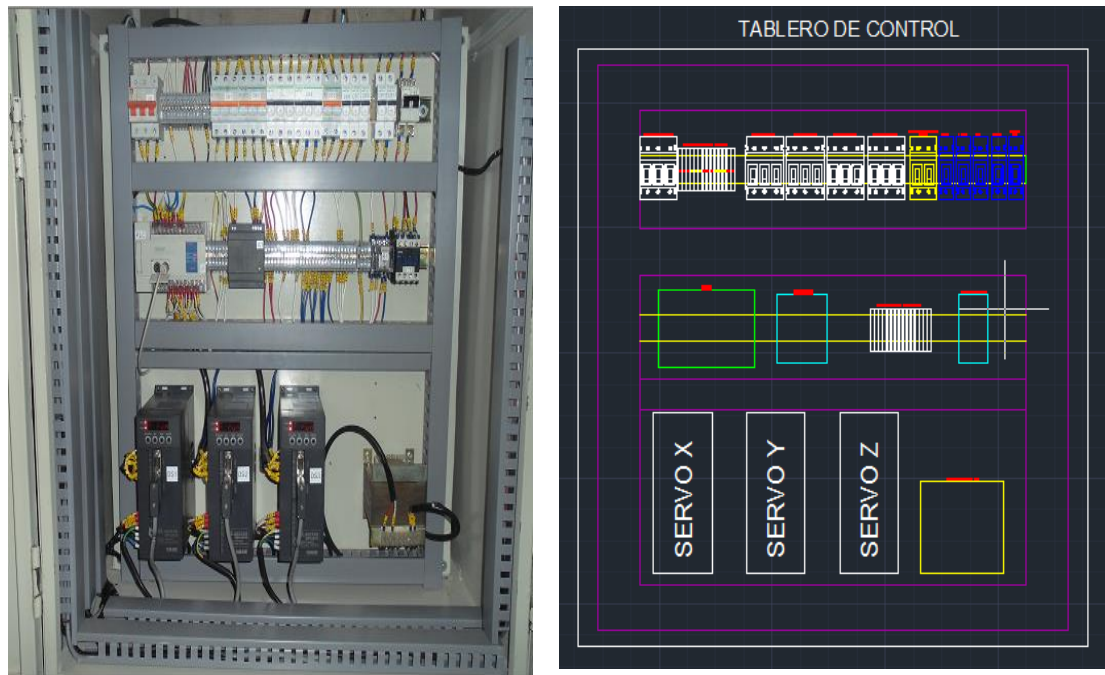


**Figura 3-14 Pletina para alojar el final de carrera eje Y.**

### **3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.**

#### **3.2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL TABLERO DE CONTROL.**

Una vez seleccionados los componentes eléctricos y de acuerdo al diagrama de ubicación y planos eléctricos (Anexo B) (figura 3-15.), se procede la implementación.



**Figura 3-15 Distribución de elementos en el tablero de control.**

Los cables de alimentación y las señales de control deben estar separados para evitar perturbaciones.

### 3.2.1.1 CONEXIÓN ELÉCTRICA DE LOS ELEMENTOS.

Para la alimentación principal de control se implementó un breaker de 40 A, a continuación se colocó un grupo de borneras para alimentar a los breakers de protección de cada equipo (Servodriver del eje X, Y, Z, motor de la bomba, transformador, PLC, fuente 24 VDC, touch screen, ventiladores).

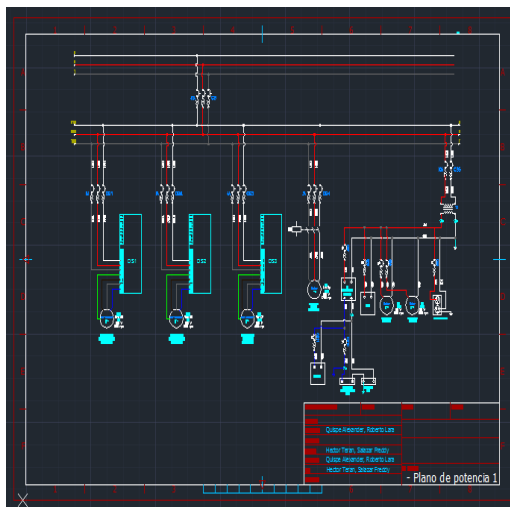
Se utilizó cable BLENDEN para proteger las señales de control ante el ruido y perturbaciones producidas en el sistema, el mismo se conectó desde las salidas del PLC hacia cada servodriver, y posteriormente se realizó las otras conexiones a todos los equipos y elementos de acuerdo a su corriente de diseño (sección 2.8.6.1) y su diagrama de ubicación (figura 3-16).



**Condiciones Iniciales**



**Tablero eléctrico EDM**



**Planos eléctricos**

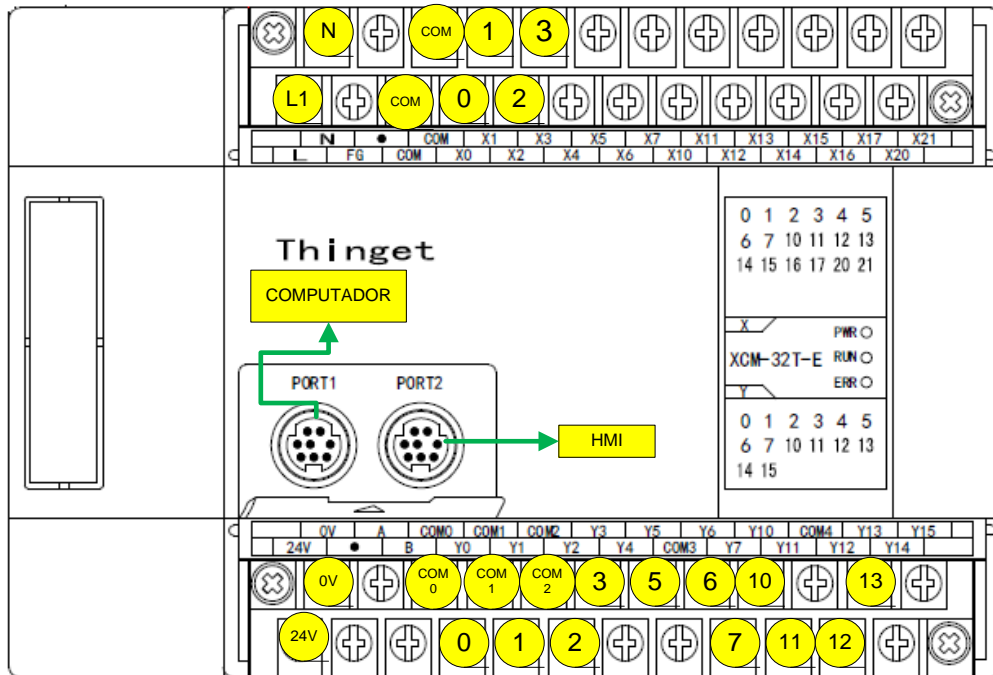


**Tablero de control**

**Figura 3-16 Conexión eléctrica de los elementos y equipos.**

### 3.2.1.2 TERMINALES DE CONEXIONES DEL PLC XCC-32T-E.

Para el control y comunicación de la máquina electroerosionadora se debe conectar de acuerdo al esquema (figura 3-17), donde se visualiza las señales de entrada y salida a sus distintos elementos y equipos, estas conexiones se encuentran detalladas en los planos del anexo B.



**Figura 3-17 Esquema de conexión del PLC.**

❖ **Entradas (X):**

- [0] Final de carrera del eje X.
- [1] Final de carrera del eje Y.
- [2] Final de carrera del eje Z.
- [3] Paro de emergencia.
- 

❖ **Salidas (Y):**

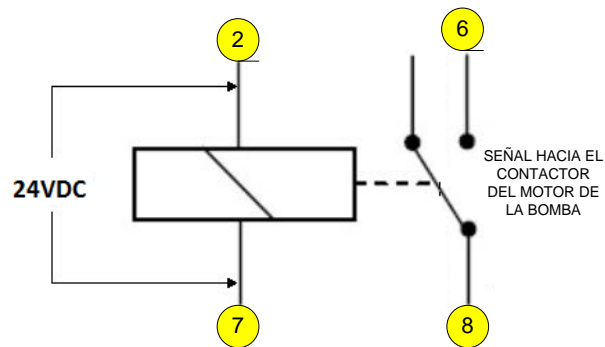
- [0] Pulso de salida del eje X.
- [1] Pulso de salida del eje Y.
- [2] Pulso de salida del eje Z.
- [3] Pulso de salida de la erosión.
- [5] Dirección del eje X.
- [6] Dirección del eje Y.
- [7] Dirección del eje Z.
- [10] Servo on del eje X.
- [11] Servo on del eje Y.
- [12] Servo on del eje Z.
- [13] Bobina del relé del motor.

❖ **Comunicación:**

- [PORT 1] Computadora.
- [PORT 2] HMI.

### 3.2.1.3 CONEXIÓN DEL RELÉ DE SALIDA HACIA EL CONTACTOR DE MOTOR DE LA BOMBA DE FLUIDO DIELECTRICO.

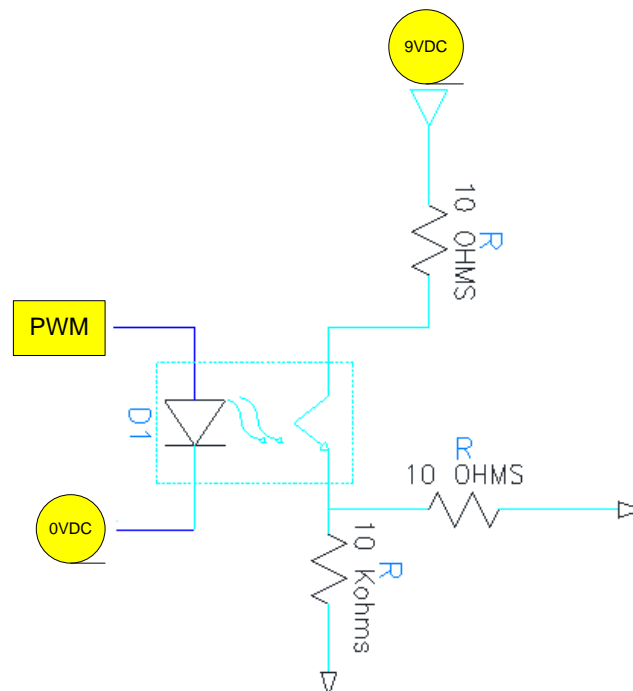
Se realiza la conexión (figura 3-18) desde la salida Y13 del PLC hacia el relé para la activación del contactor del motor y así aislar el control de potencia, salvaguardando el controlador ante un cortocircuito.



**Figura 3-18 Conexión del relé se salida hacia el contactor del motor.**

### 3.2.1.2 Conexión del pulso de salida hacia el opto acoplador.

Para la conexión del pulso hacia el opto acoplador se lo realiza de acuerdo a la (figura 3-19).



**Figura 3-19 Conexión del pulso hacia el opto acoplador.**

### 3.2.2 DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL PLC XINJE XCC-32T-E AL SERVODRIVER DS2-20P7-A.

Para la conexión del PLC hacia el servodriver, se utiliza las salidas de alta velocidad y de transistor a colector abierto.

Para controlar un servodriver se debe conectar tres señales, cuales son; la energización del servomotor (Servo ON), el tren de pulsos (PUL-) y la dirección (DIR-).

El esquema de conexión para el eje X, Y, Z se muestra en la (figura 3-20).

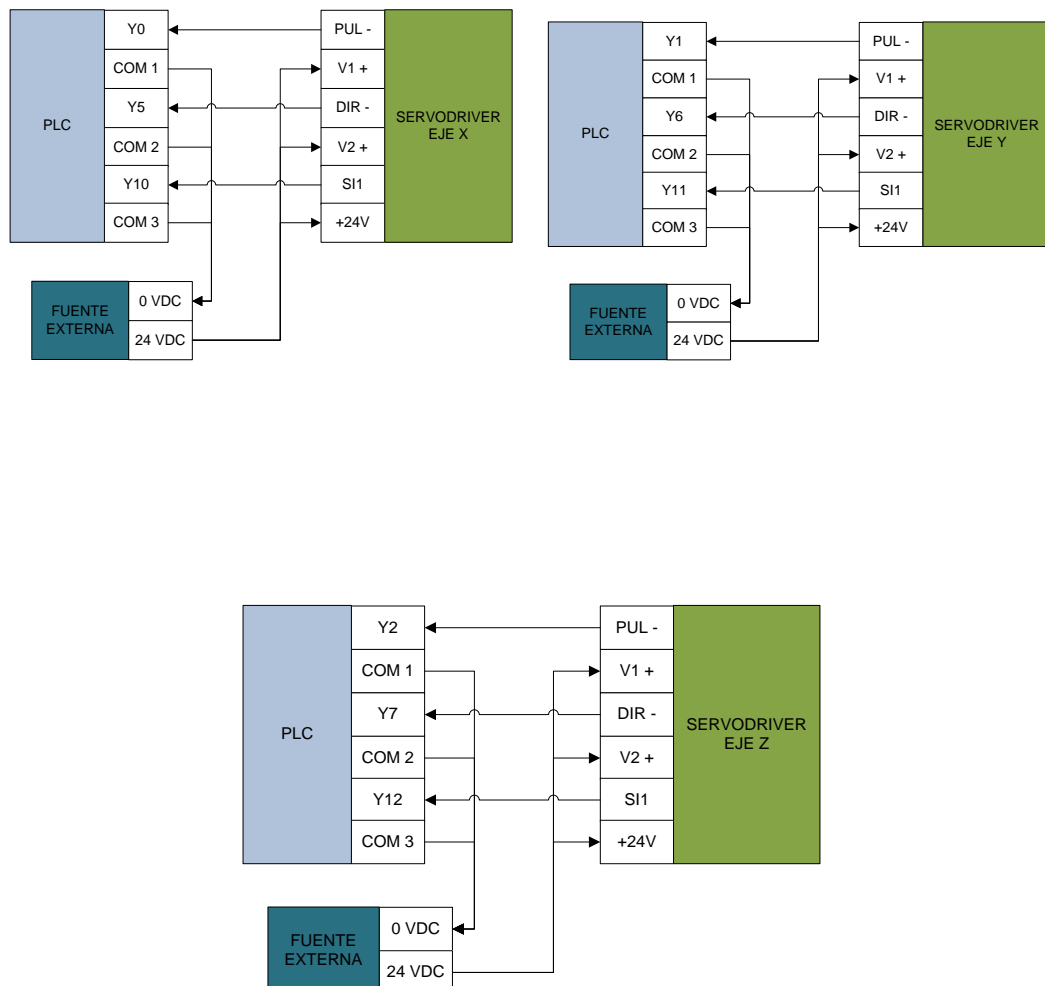


Figura 3-20 Conexión del PLC con los servodrivres de los ejes X, Y, Z.

### 3.2.3 PARAMETRIZACIÓN DEL SERVODRIVER.

Una vez seleccionado los drivers para el control de los servomotores de los ejes X, Y, Z, se procede a configurar los parámetros para el control de los mismos.

La relación de transmisión electrónica viene dada por los parámetros (P2-02) para el numerador y (P2-03) para el denominador y calculada en la siguiente ecuación 27.

$$R = \frac{P2-02}{P2-03} = \frac{E*N}{P} \quad \text{Ecuación 27}$$

Dónde:

R: relación de transmisión electrónica.

E: pulsos del encoder.

N: número de polos.

P: cantidad de pulso de entrada del controlador (1um por pulso).

Para el ajuste de los parámetros se considera que el paso de tornillo es el mismo para el eje X, Y, mientras que para el eje Z es diferente, por lo tanto es necesario calcular la relación de transmisión electrónica con la ecuación 27, para los dos casos a continuación:

#### 3.2.3.1 RELACIÓN DE TRANSMISIÓN ELECTRÓNICA PARA EL EJE X, Y

Para encontrar la relación de los pulsos de acuerdo al paso del tornillo se emplea la ecuación 28.

$$P = \frac{Ph}{1\mu m} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde, Ph: paso del tornillo.

$$P = \frac{1,59 \text{ mm}}{1\mu m} * \frac{1000\mu m}{1\text{mm}}$$

$$P = 1590 \text{ pulsos}$$



Utilizando la ecuación. 27, de la relación de transmisión electrónica se configura los parámetros para el eje X, Y.

$$R = \frac{P2 - 02}{P2 - 03} = \frac{E * N}{P}$$

$$R = \frac{2500 * 4}{1590} = \frac{10000}{1590}$$

$$R = \frac{1000}{159}$$

### 3.2.3.2 RELACIÓN DE TRANSMISIÓN ELECTRÓNICA PARA EL EJE Z.

Se calcula mediante la ecuación 28 el número de pulsos para el eje z

$$P = \frac{Ph}{1um}$$

$$P = \frac{1,27 mm}{1um} * \frac{1000um}{1mm}$$

$$P = 1270 \text{ pulsos}$$

Nuevamente aplicando la ecuación 27, se configura los parámetros para el eje Z.

$$R = \frac{P2 - 02}{P2 - 03} = \frac{E * N}{P}$$

$$R = \frac{2500 * 4}{1270} = \frac{10000}{1270}$$

$$R = \frac{1000}{127}$$

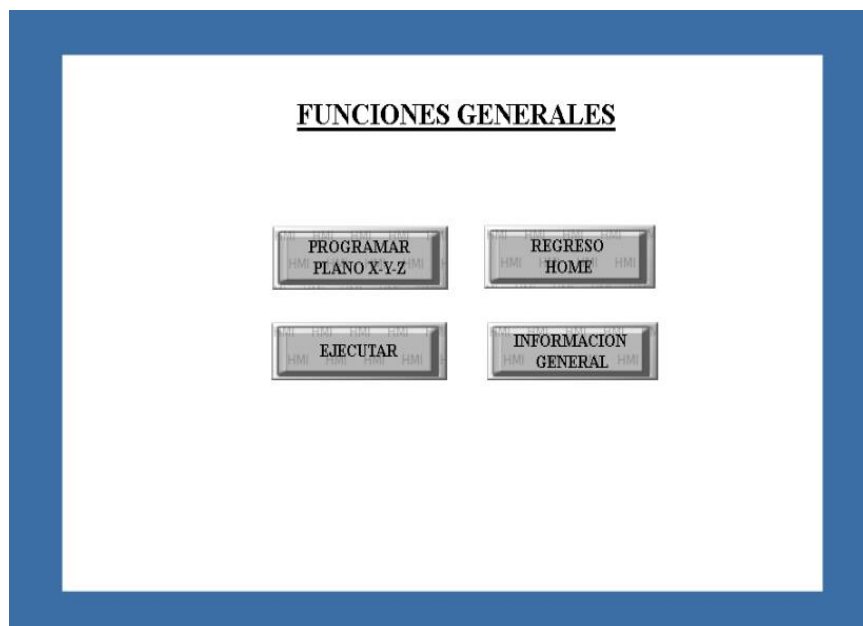
Finalmente se ajusta los parámetros del servodriver de acuerdo a la (tabla 3-1).

**Tabla 3-1 Parametrización de los servodriver.**

Parámetro	Función	Valor ajustado	
		Eje X, Y	Eje Z
<b>P0-01</b>	modo de control	6	6
<b>P2-02</b>	configuración numerador	electrónica del 1000	1000
<b>P2-03</b>	configuración denominador	electrónica del 159	127

### 3.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ.

Mediante el uso del software TouchWin se ha diseñado la interfaz con la finalidad que el usuario pueda controlar la máquina en forma manual y automática, la maquina electroerosionadora EDM, se ha creado con la siguiente pantalla principal (figura 3-21).



**Figura 3-21 Funciones generales del sistema de control.**

**PROGRAMAR PLANO X, Y, Z:** Ingresa a la configuración de la posición manual o automática de los tres ejes y permite guardar los puntos a ser mecanizados en un área de trabajo.

**REGRESO A HOME:** Permite regresar la mesa a la posición home es decir cero máquina en los tres ejes.

**EJECUTAR:** Mediante esta opción se ejecutan las posiciones guardadas y se enciende el circuito de electroerosión parametrizado anteriormente.

**INFORMACION GENERAL:** Contiene información general de las características de la máquina.

Para posicionar el eje X, Y, Z existen dos posibilidades, configurar en modo manual (figura 3-22) o automático (figura 3-23).

**REALIZACIÓN DEL PROGRAMA EN EL EJE Z Y MEZA X,Y MANUAL**

**PROGRAMACION DEL EJE X,Y**

- Y

+ X    CONTROL DE MOVIMIENTO EJE X,Y    - X

+ Y

POS. X  mil  mm    # DEPOS. GUARDADAS

POS. Y  mil  mm   

VELOCIDAD:  %    RESETEAR:

X		Y	
4353	54693	0	0
34898	54693	0	0
34898	14963	0	0
5544	19641	0	0

**PROGRAMACION DEL EJE Z**

MANUAL:     SIMULACION:

DISTANCIA ELEC. TRODO PIEZA:     RECORRIDO EJE Z:  mil

DISTANCIA DE RETROCESO:      mm

PROFUNDIDAD DE LA PIEZA:    

N:

TIEMPO DE ESPERA ELECTRODO ABAJO:  ms

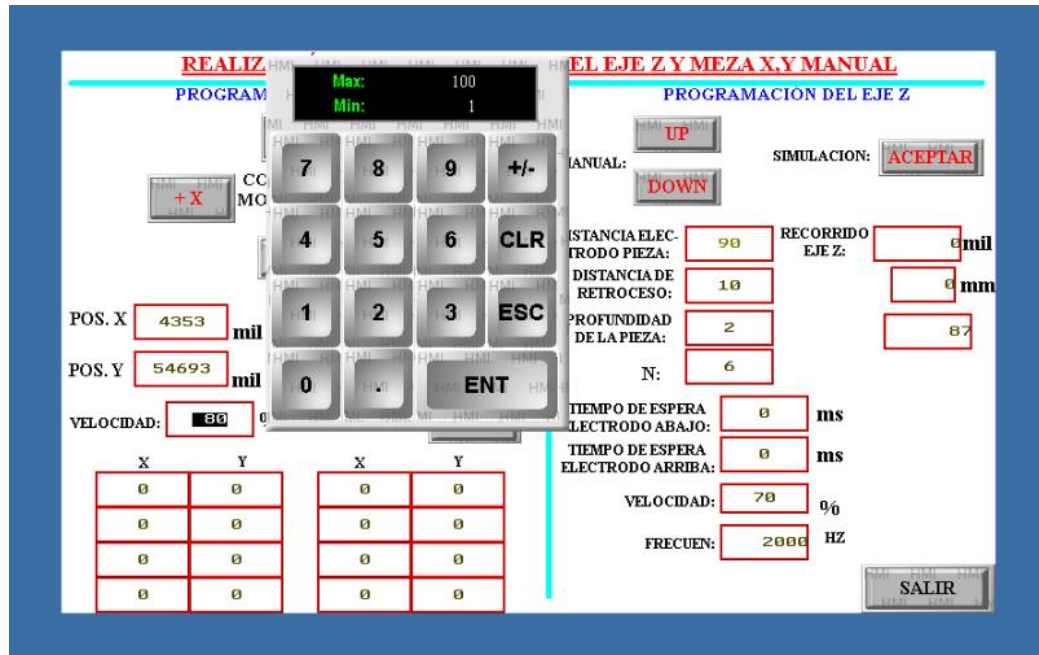
TIEMPO DE ESPERA ELECTRODO ARRIBA:  ms

VELOCIDAD:  %

FRECUEN:  HZ

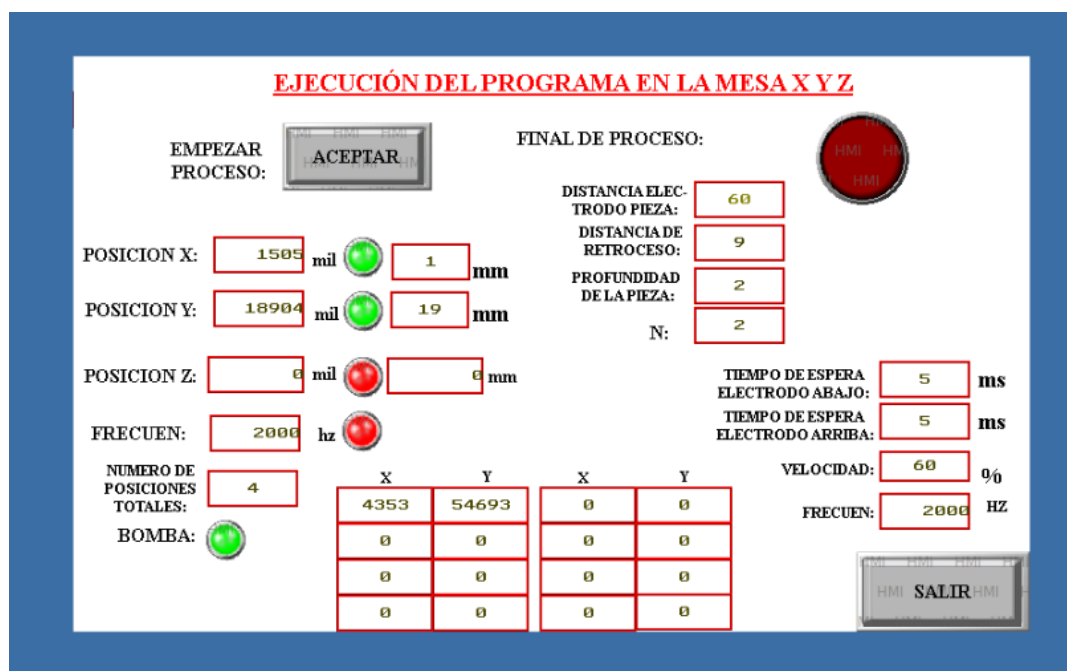
**Figura 3-22 Configuración de posiciones eje x, y, z modo manual.**

Y también se puede configurar en modo automático, ingresando los valores por el teclado y almacenando las posiciones de acuerdo a las necesidades de los usuarios.



**Figura 3-23 Pantalla configuración automática.**

Una vez parametrizadas las posiciones se diseñó la interfaz para la ejecución del programa y activación del circuito de EDM (figura 3-24), en donde luces indicadoras muestran si están trabajando los servomotores, si está encendida la bomba y monitoreo de las posiciones que se están ejecutando.



**Figura 3-24 Ventana de ejecución del programa.**

Una característica muy importante en la interfaz es la posibilidad de retornar al home (figura 3-25), para iniciar una aplicación, si durante la ejecución surgiera algún problema se puede presionar el paro de emergencia y reiniciar la programación.



**Figura 3-25 Ventana de parámetros a Home**

Todas estas opciones permitirán al usuario realizar diferentes mecanizados para diversas piezas de distinta forma y tamaño permitiendo a la maquina competir en el mercado local.

## CAPÍTULO IV

### 4 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA.

#### 4.1 PRUEBAS A LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS.

Luego que el tablero eléctrico (figura 4-1) se colocó en el lugar más adecuado de la máquina se procedió a conectar los cables de alimentación, se realizaron las siguientes pruebas en la instalación.



**Figura 4-1** Tablero de control de la maquina electroerosionadora.

Utilizando el multímetro se selecciona la función continuidad y con la ayuda de los planos eléctricos se procede a revisar la interconexión de los elementos, se verifica que el cableado se haya realizado según los diagramas especificados en el anexo B.

## 4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PLC.

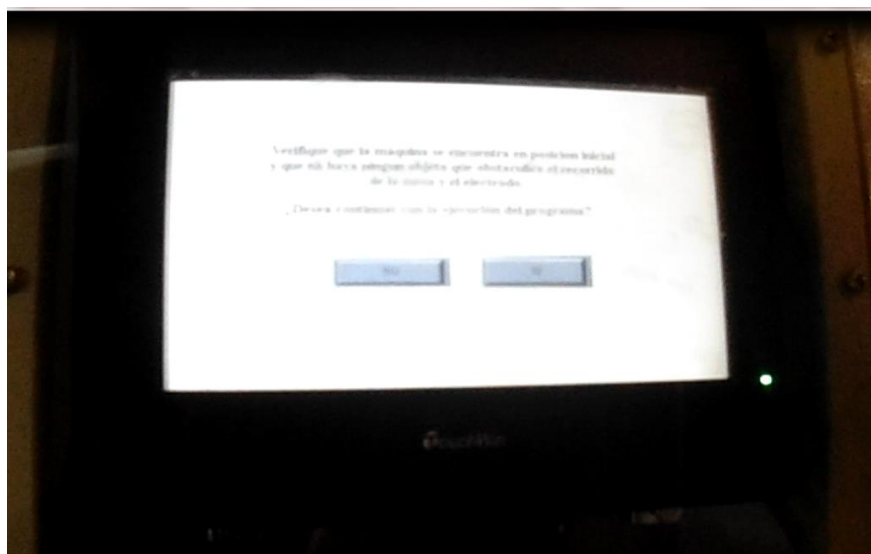
Comprobada la correcta instalación y con la seguridad de que no se presenten cortocircuitos que dañen los componentes, se enciende la alimentación principal del PLC, verificando su arranque (figura 4-2) y a su vez se verifica que este corriendo el programa almacenado en la memoria del mismo, cuando se establece la comunicación con el computador se debe probar al PLC poniéndolo en run y stop desde el software XCPPro.



**Figura 4-2 Verificación del encendido del PLC.**

## 4.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL HMI.

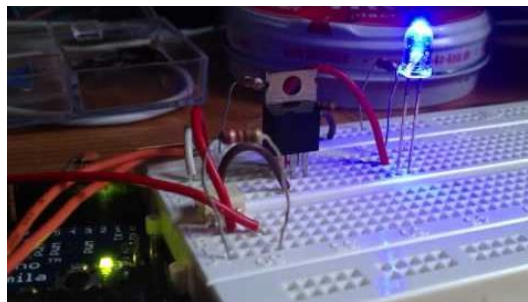
Se evidenció el funcionamiento de la interfaz HMI (figura 4-3) en los modos de operación MANUAL y AUTOMÁTICO, también se comprobó la comunicación del HMI-PLC se ejecute correctamente sin ningún tipo de interrupciones.



**Figura 4-3 Pruebas del funcionamiento de la comunicación HMI-PLC.**

#### 4.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR DE PULSOS DEL PLC.

Mediante el generador de pulsos se da las señales de activación y desactivación del mosfet, mismo que nos ayuda a realizar el mecanizado por electroerosión, debido a que actúa como un switch que se abre y se cierra permitiendo el paso de la corriente a una frecuencia determinada, para la comprobación del generador de pulsos se utilizó un led que permite visualmente observar su operación.



**Figura 4-4 Comprobación del generador de pulsos del plc.**

#### 4.5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO DE POTENCIA.

La verificación del circuito de potencia se lo realiza en vacío sin dieléctrico en el tanque, la razón es la facilidad de poder conectar las puntas del multímetro con los terminales del porta electrodos y la pieza a mecanizar, para verificar que el voltaje medido sea el mismo que debe proporcionar la fuente de alimentación y que es aproximadamente 150 V CD (figura 4-5).



**Figura 4-5 Verificación del voltaje de la fuente de alimentación.**



#### 4.6 PRUEBAS DE POSICIONAMIENTO DE LA MESA DE TRABAJO.

Mediante la programación en el HMI, la mesa se desplaza a las posiciones en las que se requieren ubicar, mediante un calibrador se comprobó que estas medidas sean las correctas, este control se logra gracias a la correcta calibración de la relación de pulsos que entrega el PLC por cada milímetro que se necesita para que esta se desplace. Para la prueba en el eje Y, a la máquina se programa un desplazamiento de 4cm y se realizó la medición para comprobar el correcto desplazamiento de la misma (figura 4-6).



**Figura 4-6 Verificación del desplazamiento de la mesa de trabajo eje Y.**

Para la prueba en el eje X a la máquina se programó un movimiento de 2cm y se realizó la medición, para comprobar el correcto desplazamiento de la misma (figura 4-7).



**Figura 4-7 Verificación delo desplazamiento de la mesa de trabajo eje X.**

| Para la prueba del eje Z a la máquina se configuro un desplazamiento de 20.3 cm, cabe resaltar que esta medida se alcanzó porque al momento de la medición la máquina no tenía colocado el electrodo. Una vez que se realizó la medición se comprobó que el eje Z se desplazó la distancia requerida (figura 4-8).



**Figura 4-8 Verificación del desplazamiento del eje Z.**

Finalmente se logró el correcto posicionamiento de los tres ejes de la máquina gracias a las pruebas previas de calibración de los servomotores realizadas.

#### **4.7 PRUEBAS DEL MECANIZADO POR DESCARGA ELÉCTRICA.**

Una vez revisado que la máquina opere a la precisión requerida se inician las pruebas de mecanizado, realizando una comparación entre electrodos de distinto material, en este caso cobre electrolítico y grafito, se escogieron estos materiales porque son los más comúnmente utilizados en este tipo de mecanizado.

Para la primera prueba se realizó con un electrodo de cobre electrolítico (figura 4-9), donde se observó que existe un desgaste considerable de 0.9mm.



**Figura 4-9 Electrodo de cobre electrolítico.**

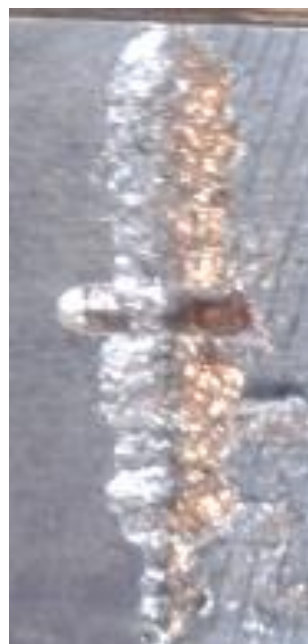
Obteniendo el mecanizado como resultado de la utilización del electrodo de cobre electrolítico de acuerdo a los siguientes parámetros (tabla 4-1).

**Tabla 4-1 Parámetros de mecanizado con cobre electrolítico.**

Material del electrodo	Material de la pieza de trabajo	Frecuencia	Corriente	Profundidad de mecanizado	Figura de mecanizado
<b>Cobre electrolítico</b>	Acero A-36	900 Hz	5 Amp.	3 mm	4-10
<b>Cobre electrolítico</b>	Acero A-36	1100 Hz	6 Amp.	4 mm	4-11
<b>Cobre electrolítico</b>	Acero A-36	1500 Hz	8 Amp.	3 mm	4-12
<b>Cobre electrolítico</b>	Acero A-36	2000 Hz	9 Amp.	6 mm	4-13



**Figura 4-10 Mecanizado de 3mm**



**Figura 4-11 Mecanizado de 4mm**



**Figura 4-12 Mecanizado de 4mm**



**Figura 4-13 Mecanizado de 6mm**

Consecutivamente se realiza la prueba con un electrodo de grafito (figura 4-14), este presenta un desgaste menor de 0.1mm.

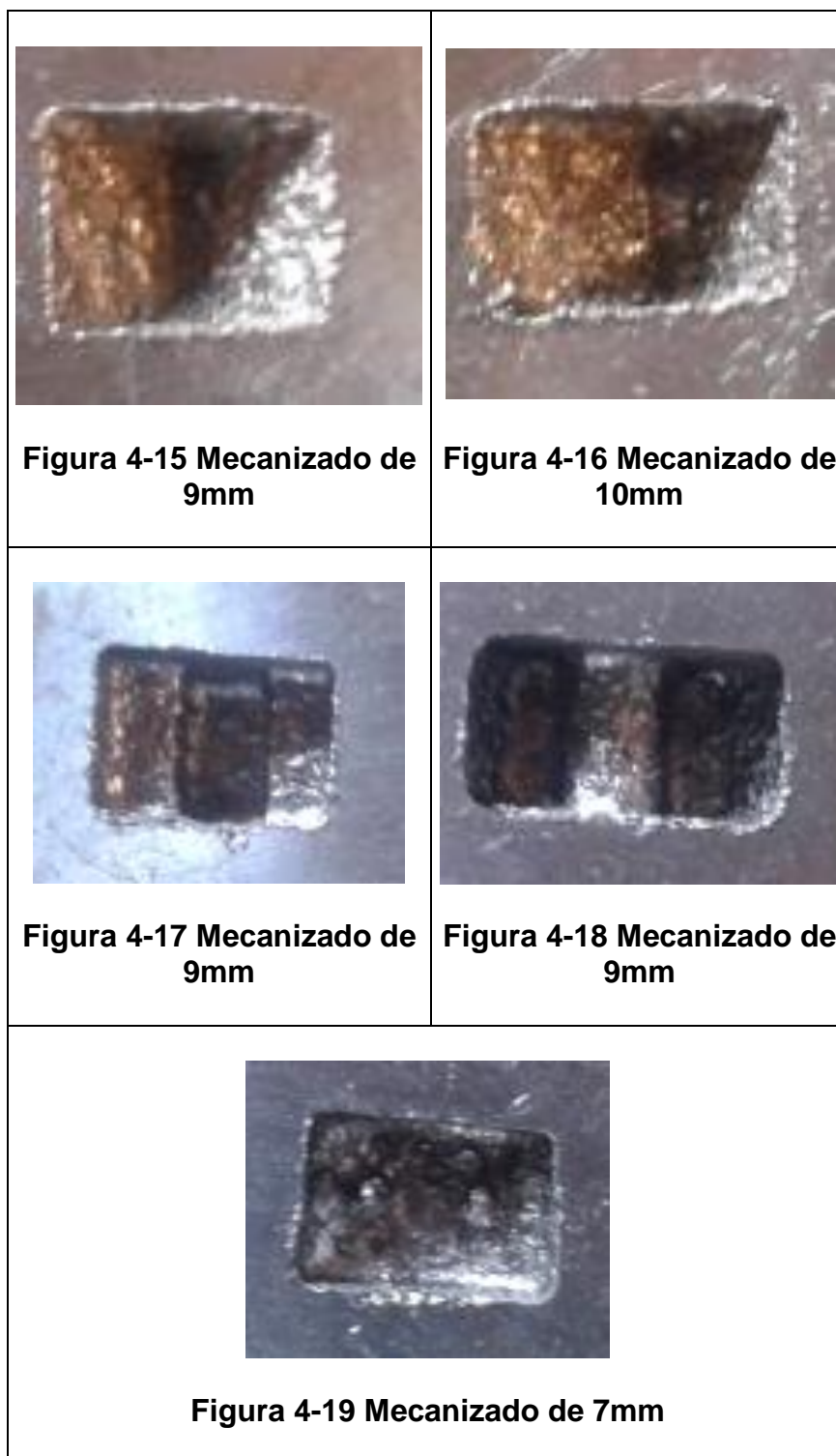


**Figura 4-14 Electrodo de grafito.**

Posteriormente se realizó el mecanizado por descarga eléctrica con los siguientes parámetros de la tabla 4-2.

**Tabla 4-2 Parámetros de mecanizado con grafito.**

Material del electrodo	Material de la pieza de trabajo	Frecuencia	Corriente	Profundidad de mecanizado	Figura
<b>Grafito</b>	Acero A-36	2000	9 Amp.	9 mm	4-15
<b>Grafito</b>	Acero A-36	3000	10 Amp.	10 mm	4-16
<b>Grafito</b>	Acero A-36	4000	10 Amp.	9 mm	4-17
<b>Grafito</b>	Acero A-36	4000	10 Amp.	9 mm	4-18
<b>Grafito</b>	Acero A-36	4000	10 Amp.	7 mm	4-19



## 4.8 RESULTADOS.

### 4.8.1 ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE X.

En modo manual se realizó el análisis del desplazamiento en el eje X, mediante la comparación entre la parametrización del servomotor y el valor

medido con un instrumento de medición de acuerdo a los siguientes parámetros de la tabla 4-3.

**Tabla 4-3 Análisis de desplazamiento en modo manual eje X.**

Desplazamiento mediante flechas por la Touch en milímetros	Valor medido en milímetros	Número de pulsos por programación	Visualización de la Touch en milésimas
20	20	20000	19500
40	40	40000	39660
60	60	60000	59700
80	80	80000	79850

**En modo automático** se realizó el análisis del desplazamiento en el eje X, mediante la comparación entre la parametrización del servomotor y el valor medido con un instrumento de medición de acuerdo a los siguientes parámetros de la tabla 4-4.

**Tabla 4-4 Análisis de desplazamiento en modo automático eje X.**

Valor ingresado por la Touch en milímetros	Valor medido en milímetros	Número de pulsos por programación	Visualización de la Touch en milésimas
20	20	20000	20000
40	40	40000	40000
60	60	60000	60000
80	80	80000	80000

#### 4.8.2 ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y.

**En modo manual** se realizó el análisis del desplazamiento en el eje Y, mediante la comparación entre la parametrización del servomotor y el valor medido con un instrumento de medición de acuerdo a los siguientes parámetros de la tabla 4-5.

**Tabla 4-5 Análisis de desplazamiento en modo manual eje Y.**

Desplazamiento mediante flechas por la Touch en milímetros	Valor medido en milímetros	Número de pulsos por programación	Visualización de la Touch en milésimas
20	20	20000	19700
40	40	40000	39700
60	60	60000	59600
80	80	80000	79846

**En modo automático** se realizó el análisis del desplazamiento en el eje Y, mediante la comparación entre la parametrización del servomotor y el valor medido con un instrumento de medición de acuerdo a los siguientes parámetros de la tabla 4-6.

**Tabla 4-6 Análisis de desplazamiento en modo automático eje Y.**

Valor ingresado por la Touch en milímetros	Valor medido en milímetros	Número de pulsos por programación	Visualización de la Touch en milésimas
20	20	20000	20000
40	40	40000	40000
60	60	60000	60000
80	80	80000	80000

#### 4.8.3 ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Z.

**En modo manual** se realizó el análisis del desplazamiento en el eje Z, mediante la comparación entre la parametrización del servomotor y el valor medido con un instrumento de medición de acuerdo a los siguientes parámetros de la tabla 4-7.



**Tabla 4-7 Análisis de desplazamiento en modo manual eje Z.**

Desplazamiento mediante flechas por la Touch en milímetros	Valor medido en milímetros	Número de pulsos por programación	Visualización de la Touch en milésimas
<b>20</b>	20	20000	19850
<b>60</b>	40	40000	39980
<b>100</b>	100	100000	99960
<b>120</b>	120	120000	121010

**En modo automático** se realizó el análisis del desplazamiento en el eje Z, mediante la comparación entre la parametrización del servomotor y el valor medido con un instrumento de medición de acuerdo a los siguientes parámetros de la tabla 4-8.

**Tabla 4-8 Análisis de desplazamiento en modo automático eje Z.**

Valor ingresado por la Touch en milímetros	Valor medido en milímetros	Número de pulsos por programación	Visualización de la Touch en milésimas
<b>20</b>	20	20000	19950
<b>60</b>	40	40000	39960
<b>100</b>	100	100000	99990
<b>120</b>	120	120000	119980

#### 4.8.4 ANÁLISIS DE LA RAPIDEZ DE REMOCIÓN DEL MECANIZADO POR DESCARGA ELÉCTRICA.

##### 4.8.4.1 ANÁLISIS DE RAPIDEZ DE REMOCIÓN CON UN ELECTRODO DE COBRE ELECTROLÍTICO.

Para este análisis se basó en la sección 2.8.7 para hallar la rapidez de remoción (tabla 4-9) en el mecanizado de descarga eléctrica, de acuerdo a los siguientes parámetros:

**Tabla 4-9 Rapidez de remoción del cobre electrolítico**

Profundidad	Volumen	Tiempo	Rapidez de remoción	Figura
3 mm	$3870.96m^3$	3,2 horas	$19.35 m^3/min$	4-10
4 mm	$5161.28m^3$	4,15 horas	$20.24 m^3/min$	4-11
3 mm	$3750m^3$	3 horas	$20.83 m^3/min$	4-12
6 mm	$7500m^3$	6,4 horas	$18.75 m^3/min$	4-13

Estos valores están dentro de los rangos de trabajo de las maquinas electroerosionadoras convencionales y existentes en el mercado.

##### 4.8.4.2 ANÁLISIS DE RAPIDEZ DE REMOCIÓN CON UN ELECTRODO DE GRAFITO.

Nuevamente se fundamentó en la sección 2.8.7 para calcular la rapidez de remoción en el mecanizado de descarga eléctrica, de acuerdo a los siguientes parámetros de la tabla 4-10.

**Tabla 4-10 Rapidez de remoción de grafito**

Profundidad	Volumen	Tiempo	Volumen de remoción	Figura
9 mm	$5806.44m^3$	8 horas	$12.09 m^3/min$	4-15
10 mm	$6451.6m^3$	9 horas	$11.94 m^3/min$	4-16
9 mm	$4572m^3$	8 horas	$9.52 m^3/min$	4-17
9 mm	$5715m^3$	8 horas	$11.90 m^3/min$	4-18
7 mm	$4516.12m^3$	6 horas	$12.54 m^3/min$	4-19

Cumple los parámetros de la maquinas electroerosionadoras.

#### 4.8.5 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS.

La hipótesis planteada en el anteproyecto es:

¿Es posible rediseñar y automatizar con HMI una máquina electroerosionadora?

Luego de la puesta a punto de la automatización de la máquina con un HMI se verifica el cumplimiento de la hipótesis. Ya que se logró automatizar la máquina dotándola de todas las modificaciones tanto mecánicas como eléctricas para que la misma pueda trabajar con el HMI y el controlador de una manera eficaz en el proceso de electroerosionado por descarga eléctrica

En consecuencia, la hipótesis es validada.

#### 4.8.6 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO.

La factibilidad del proyecto dependerá del estudio y análisis de los siguientes parámetros expuestos a continuación.

#### 4.8.7 INVERSIÓN INICIAL DEL PROYECTO.

Para el análisis de la inversión necesaria para la implementación del proyecto, se requirió de un análisis de los insumos utilizados.

En la Tabla 4.11 se muestra los insumos que intervinieron en el presente proyecto de tesis.

**Tabla 4-11 Implementos para la automatización de la máquina electroerosionadora.**

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL
1	Máquina electroerosionadora "Carcasa"	1	1000	1000
3	Servomotor y servo driver	3	1800	5400
3	PLC	1	300	700
4	touch screen	1	500	700
5	Materiales Mecánicos	Global	500	500
6	Materiales Eléctricos	Global	300	800
7	Mano de obra y adaptaciones	Global	600	600
TOTAL				9700

#### 4.8.7.1 INVERSIONES

Por analizar la viabilidad de una inversión puede entenderse el hecho de plantear que si los ingresos derivados de nuestro proyecto de negocio van a ser suficientes para hacer frente a los compromisos adquiridos con los

|  
agentes que ponen dinero para financiarlo, y en qué medida ese proyecto va a ser rentable.

Los modelos de simulación financiera para analizar proyectos de inversión se basan normalmente en el análisis de los ingresos y gastos relacionados con el proyecto, teniendo en cuenta cuándo son efectivamente recibidos y entregados, es decir, en los flujos de caja que se obtienen en dicho proyecto con el fin de determinar si son suficientes para soportar el servicio de la deuda anual (principal + intereses) y de retribuir adecuadamente el capital aportado por los socios.

Los modelos de simulación utilizan algunos métodos para analizar si un proyecto es económicamente viable, y en qué medida. Los que se consideran como los más utilizados por los expertos son los siguientes:

- VAN: Que consiste en actualizar a valor presente los flujos de caja futuros que va a generar el proyecto, descontados a un cierto tipo de interés, y compararlos con el importe inicial de la inversión.
- TIR: Es la tasa de descuento que iguala el VAN a cero.

Estos modelos permiten dar una medida, más o menos ajustada, de la rentabilidad que podemos obtener con el proyecto de inversión, antes de ponerlo en marcha.

#### **4.8.7.2 PROYECCIÓN DE VENTAS**

Las proyecciones de ventas son importantes en la medida que alimentan diversos procesos de gestión y planeación dentro de la empresa. Toda proyección económica o financiera se basa en gran medida en un buen estimado de ventas.

A pesar de la importancia de las proyecciones de ventas, las herramientas usadas para estimarlas pueden mejorarse ampliamente. Sobre todo las cuantitativas. Estas descansan sobre modelos de regresión simple, o regresión múltiple. Los modelos de regresión en general tratan de explicar

|  
el comportamiento de una variable ventas en este caso sobre la base de una variable causal o de más de una variable.

Para el análisis económico de una inversión puede reducirse la misma a las corrientes de pagos e ingresos que origina, considerado cada uno en el momento preciso en que se produce.

En la Tabla 4-12 se muestra la proyección que se realizó estimando la cantidad de matrices vendidas en el peor de los casos, es decir cuando las ventas realizadas sean muy bajas a lo registrado en años anteriores.

Estos son los valores que se estiman para una proyección de 10 años

**Tabla 4-12 Proyección de ventas de matrices**

Año	Valor (\$)
0	0
1	1500
2	1500
3	2000
4	2000
5	2500
6	2500
7	3000
8	3000
9	3500
10	3500

El siguiente estado financiero nos permite ver la capacidad de pago de la empresa para hacer frente a las obligaciones financieras que contrajo. Aunque está vinculado al estado de resultados, su objetivo no es mostrar utilidades, sino dinero disponible o déficit en caja, pudiéndose dar el caso de una empresa que muestre utilidades pero no tenga flujo de efectivo.

En la Tabla 4-13 se muestra el Flujo de Efectivo; es un resumen donde se puede visualizar la inversión, los costos operativos, impuestos a la renta, los ingresos y los flujos anuales, además el VAN (Valor actual neto), TIR (Tasa interna de retorno).

**Tabla 4-13 VAN y TIR**

Año	Inversión	Costos operativos	Impuestos renta	Ingresos	Flujo
0	<b>9700</b>				
1		<b>320</b>	<b>180</b>	1500	<b>1000</b>
2		<b>325</b>	<b>252</b>	2100	<b>1523</b>
3		<b>265</b>	<b>324</b>	2700	<b>2111</b>
4		<b>273</b>	<b>396</b>	3300	<b>2631</b>
5		<b>281</b>	<b>468</b>	3900	<b>3151</b>
6		<b>289</b>	<b>540</b>	4500	<b>3671</b>
7		<b>297</b>	<b>612</b>	5100	<b>4191</b>
8		<b>305</b>	<b>684</b>	5700	<b>4791</b>
9		<b>313</b>	<b>756</b>	6300	<b>5231</b>
10		<b>321</b>	<b>828</b>	6900	<b>5751</b>
Tasa interna de retorno					<b>26%</b>
Valor actual neto al 5%					<b>16053.89</b>

#### **4.8.8 VALOR ACTUAL NETO (VAN)**

Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto.

El valor actual neto es muy importante para la valoración de inversiones en activos fijos, a pesar de sus limitaciones en considerar circunstancias imprevistas o excepcionales de mercado. Si su valor es mayor a cero, el proyecto es rentable, considerándose el valor mínimo de rendimiento para la inversión.

En este proyecto el Valor Actual Neto es 16.053,89 dólares americanos.

#### **4.8.9 TAZA INTERNA DE RETORNO (TIR)**

La tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad (TIR) de una inversión, está definida como la tasa de interés con la cual el valor actual neto o valor presente neto (VAN o VPN) es igual a cero. El VAN o VPN es calculado a partir del flujo de caja anual, trasladando todas las cantidades futuras al presente. Es un indicador de la rentabilidad de un proyecto, a mayor TIR, mayor rentabilidad.

En este proyecto el TIR es la ganancia que va a obtener, además con este indicador se puede decir si el negocio es rentable, teniendo una tasa interna de retorno del 26%.



## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### CONCLUSIONES:

- Se rediseño la trasmisión de movimiento de los ejes x, y de la máquina electroerosionadora y se construyó el sistema de transmisión mecánico del eje z, automatizando las diferentes tareas de mecanizado mediante una interfaz humano máquina, logrando así su reincorporación en el mercado de fabricación de moldes y matrices.
- Dentro de los electrodos que se puede utilizar para la fabricación de moldes en acero por medio de electroerosión, el cobre electrolítico presenta un mayor desgaste versus el grafito.
- Se diseñó la transmisión de movimiento de los ejes X, Y, Z con un paso fino para un desplazamiento preciso de 1mm equivalente a 1000pulsos mediante un control en lazo cerrado que permite obtener un acabado superficial de acuerdo a las demandas del mercado.
- Se diseñó e implementó el programa de control para los movimientos de los tres ejes de la máquina electroerosionadora en modo manual y automático, permitiendo de esta manera introducir sentencias de control por planos para el eje X, Y, mientras que para el eje Z se desarrollo de una relación de trabajo para el mecanizado por electroerosión.
- Se diseñó el circuito de electroerosión para una corriente máxima de 10 A, con una tasa de remoción que bordea entre los rangos de 35 a 40 minutos por 1mm.
- Se realizó un sistema de circulación continuo de fluido dieléctrico mediante una bomba, para desalojar las partículas pulverizadas y crear un medio ideal para el proceso por descarga eléctrica.

## RECOMENDACIONES:

- Parametrizar adecuadamente las posiciones de los ejes X, Y, Z, para evitar colisiones que pueden afectar los elementos de la transmisión de movimiento.
- Tener muy presente las condiciones de seguridad para toda la ejecución de la máquina durante el mecanizado por descarga eléctrica, y así evitar colisiones y cortocircuitos.
- No colocar las manos en el tablero de potencia del circuito de EDM, ya que se manejan corrientes mayores de 5A en corriente directa.
- No tocar simultáneamente el electrodo y la mesa de trabajo ya que puede producir una descarga eléctrica en el cuerpo.
- El operador por ningún motivo debe girar con las manos ningún eje cuando los servo drives estén encendidos, ya que esto produciría daños al encoder.
- Realizar la lubricación por goteo de los tres ejes para evitar el desgaste mecánico de la tuerca, y en especial del eje Z ya que este trabaja más de 6 horas continuas.
- Inspeccionar visualmente la contaminación del diésel para realizar el cambio del mismo para un mejor mecanizado en el proceso.

|  
**BIBLIOGRAFÍA:**

- ELMAN C., J. (2001). Electrical Discharge Machining. EStados Unidos: SME Society of Manufacturing Engineers.
- HELMÍ A., Y., & El-Hofy, H. (2008). Machining Technology: Machine Tools and Operations. Estados Unidos: CRC Press.
- MADOU, M. (2011). Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnology (Tercera ed., Vol. II). CRC Press.
- SCHEY, J. (2000). Procesos no tradicionales de maquinado (4ta ed.). Mexico: Mc Graw Hill.
- SOLÁ, P. M. (1989). Electromecanizado: electroerosión y mecanizado electroquímico. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.

**NETGRAFÍA:**

- Aprendamos Tecnología. (2008). aprendamostecnologia.org. Citado el 15 de Marzo de 2014, de <http://aprendamostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/mecanismos-de-transformacion-del-movimiento/>
- C.I.P ETI Tudela. (2013). etitudela. Citado el 15 de Enero de 2014, de <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/edm/Cap1.htm>
- EGA master S.A. (05 de 2012). Rosca. Citado el 07 de 2013, de <http://www.egamaster.com/es/tornillos-tuercas-y-roscas/roscas.html>
- Mena, A. (Diciembre de 2013). Repositorio Virtual ESPE LATACUNGA. Citado el 15 de Marzo de 2014, de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7204/1/T-ESPEL-MEC-0014.pdf>
- Oficios Técnicos. (2013). tecnoficio. Citado el 20 de Febrero de 2014, de [http://www.tecnoficio.com/electricidad/velocidad\\_de\\_motores\\_electricos2.php?psps\\_page=3](http://www.tecnoficio.com/electricidad/velocidad_de_motores_electricos2.php?psps_page=3)
- Rodríguez, F. D. (2007). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán . Citado el 10 de febrero de 2014, de [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m2/electroerosion.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m2/electroerosion.pdf)

|

## **ANEXOS.**

**ANEXO A MANUAL DE USUARIO**

**ANEXO B PLANOS ELÉCTRICOS**

**ANEXO C PLANOS MECÁNICOS**

**ANEXO D PROGRAMA PLC**

**ANEXO E CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS**

