



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO

PROPUESTA EN MARCHA DE EDM DE MICROALAMBRE

Proyecto de investigación

Para obtener el título de:
Ingeniero Mecatrónico

Con especialidad:
Automatización de Procesos

Presenta

Alberto Luis Ruiz Valdés
201520922

Asesor
Ing. Irving Mendoza Paz

Coacalco de Berriozábal, noviembre de 2023

RESUMEN

Dentro de la industria se requiere de realizar cortes específicos para lograr el acabado de piezas de precisión. Tal es el caso de sectores como la aeronáutica, aeroespacial, automotriz, medicina y tecnología, en donde necesitan de máquinas como la Electroerosión (EDM) la cual realiza cortes de hilo y penetración, en donde ofrecen exactitud al 100% y una alta calidad de producción en grandes cantidades, sin importar el sector industrial para el que se utilice.

A continuación, se expondrá la información necesaria sobre el Erosionado con Hilo y Penetración EDM. Se brindará información relevante sobre el tema y sobre todo qué ventajas se pueden obtener al usar la erosión de corte por hilo.

La electroerosión se trata de un proceso de producción llamado también mecanizado por descarga eléctrica (EDM) mediante el cual, se puede obtener un corte por pieza preciso y con los resultados que se exactos.

Este proceso consiste en generar un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo para poder cortar partículas de la pieza hasta obtener en ella la forma del electrodo que se desea. Tanto el arco como el electrodo deben ser conductores, de modo que pueda realizarse el corte como es debido. (GMAK Servicios de maquinado CNC, 2020)

Índice

Contenido

RESUMEN.....	3
Índice.....	4
CAPÍTULO I GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
JUSTIFICACIÓN	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
OBJETIVO GENERAL.....	10
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	11
MAQUINAS DE CORTE CNC.....	12
EDM, ELECTROEROSIÓN POR HILO.....	13
VENTAJAS	14
FUNCIONAMIENTO.....	15
CONTROL DE MOVIMIENTO.....	16
PROGRAMA CNC.....	17
CONTROLADOR CNC	20
PROGRAMA CAM.....	21
SISTEMA DNC MDA.....	23
FOAMGLAS.....	24
MASTERCAM.....	25
CAPÍTULO III DESARROLLO.....	26
FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA E IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICA A RESOLVER	27
DISEÑO DE ESTRUCTURA Y DISTRIBUCIÓN DE POLEAS.....	28
SELECCIÓN DE MATERIALES Y BUSQUEDA DE PROVEEDORES	30
MANTENIMIENTO GENERAL Y SUSTITUCION DE SISTEMA DE POLEAS.....	32
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	34
DISEÑO DE PRUEBAS DE CORTE DE MEDIAS CAÑAS Y OBTENCION DE CODIGO G Y M	35
ELABORACION DE PLANTILLAS DE MEDIAS CAÑAS	40
CAPÍTULO IV RESULTADOS.....	41
RESULTADOS.....	42

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	46
CONCLUSIÓN.....	49
REFERENCIAS	50
Bibliografía.....	50
ANEXOS.....	51

CAPÍTULO I

GENERALIDADES DEL PROYECTO

INTRODUCCIÓN.

El intercambio de calor es un proceso de gran importancia para la industria. Este debe ir de la mano con un apropiado aislamiento térmico que le permitirá aumentar la seguridad del ambiente de trabajo y un ahorro considerable de los recursos energéticos, incrementando las ganancias mensuales.

El Foamglas es una de las mejores opciones para aislamientos a altas y bajas temperaturas, debido a que no absorbe humedad, es resistente a productos químicos, es incombustible y es ecológico, logrando con un ahorro de energía, seguridad y eficacia.

Anteriormente este material solo era distribuido en bloques rectangulares de distintas medidas, esto dificultaba los procesos de instalación en campo al aislar tuberías, por fortuna en la actualidad es posible transformar el producto y distribuirlo en distintas presentaciones como lo son las medias cañas para tuberías.

La creciente demanda de producción en la industria ha ido creciendo cada vez más en los últimos años, por lo que se requiere de una mayor cantidad de personal para la elaboración del producto elevando así el costo de producción y tiempos de fabricación además de aumentar el riesgo de obtener una mala calidad en el producto final debido a un error cometido por el personal.

Afortunadamente en la actualidad podemos contar con sistema automatizados capaces de reducir el tiempo de fabricación del producto sin perder la calidad del mismo y requieren de menos personal que debe ser previamente capacitado para la operación del equipo.

Estos equipos automatizados son las máquinas de corte CNC (control numérico computarizado), los cuales mediante el uso de una computadora logran controlar y monitorear en todo momento los movimientos de una herramienta de corte.

JUSTIFICACIÓN.

Al lograr la completa automatización en el proceso de corte de Foamglas se reducirá considerablemente el tiempo de producción y mejorará la calidad del producto por consiguiente el desarrollo de este proyecto brindará a la empresa una mayor efectividad en cuanto a precisión en cortes, reducción de residuos y una mayor capacidad de producción logrando así un alto nivel competitividad en el mercado satisfaciendo las necesidades que demanda el cliente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Latín Exports S.A. de C.V. es una de las pocas empresas encargadas de la distribución de Foamglas en todo el país, como consecuencia de esto la empresa se encuentra constantemente en la búsqueda de mantenerse con un alto nivel de competitividad en el mercado. Para lograr esto se pretende obtener la Implementación de un sistema de corte automatizado. Sin embargo, el equipo de corte con el que se cuenta aún se encuentra en etapa de desarrollo con un sistema de movimiento impreciso y con ausencia de un sistema de control por lo que se requiere de la aplicación de mejoras en el equipo para poder darle uso.

OBJETIVO GENERAL.

Realizar mejoras en el sistema mecánico de la máquina de corte por hilo CNC para alcanzar un funcionamiento óptimo de esta, así como generar una platilla de diseños de corte de Foamglas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Investigar el funcionamiento de la máquina y detectar las fallas por corregir
- Diseñar en un software CAD la propuesta de las mejoras por aplicar.
- Comenzar la búsqueda de proveedores del material requerido para la mejora.
- Desinstalar las piezas por reemplazar y dar un mantenimiento general a la máquina.
- Generar una propuesta de diseños de corte para realizar pruebas de precisión.
- Implementar las nuevas partes y comenzar con pruebas de funcionamiento.
- Realizar pruebas de calidad y aplicar los ajustes necesarios en los diseños para obtener un producto que cumpla con las exigencias del cliente.
- Generar una plantilla de diseños de corte tomando en cuenta las tolerancias permitidas y generar los códigos G y M de dichos diseños.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

MAQUINAS DE CORTE CNC

El control numérico por computadora es un sistema que nos permite conocer y controlar en todo momento la posición de una herramienta montada en una máquina, esto se logra con una computadora que mediante una serie de ordenes controla las coordenadas de posición de un punto (la herramienta) respecto a un origen (punto 0), es una especie de GPS aplicado a la mecanización.

Con este sistema no solo se controla la posición de la herramienta, sino también, la manera de desplazarse entre las coordenadas, su velocidad, y algunos parámetros más dependiendo el tipo de máquina como lo pueden ser fresadora, torno, rectificadora, máquina de corte por láser, por chorro de agua o por electroerosión, estampadora, prensa, brazo robotizado, entre otras.



Figura 3 Maquinado por hilo

El EDM (Electrical Discharge Machining) o electroerosión por hilo es un proceso de corte para fabricar piezas de gran dureza mediante descargas eléctricas. Consiste en una máquina fija controlada por un sistema CNC (Control Numérico Computarizado) y un hilo metálico que se desplaza a través del material de trabajo.

EDM, ELECTROEROSIÓN POR HILO

A diferencia de los métodos de mecanizado tradicionales, el EDM es una técnica que permite producir piezas totalmente terminadas en un solo proceso. Las máquinas de electroerosión por hilo utilizan un hilo metálico para cortar piezas de acuerdo con un diseño programado.

Junto con el hilo se emplea una serie de descargas eléctricas que producen chispas entre el hilo y la pieza de trabajo y eliminan material, el cual se retira inmediatamente gracias a la presencia de un fluido dieléctrico que fluye continuamente.

Este proceso es empleado frecuentemente en la fabricación de moldes y herramientas debido a su aplicación en materiales duros y su flexibilidad para producir formas complejas. El EDM tiene diferentes aplicaciones:

- Electrodo para electroerosión convencional
- Herramientas de troquelado
- Levas de disco
- Punzones
- Matrices de corte, extrusión, embutición, entre otras
- Troqueles

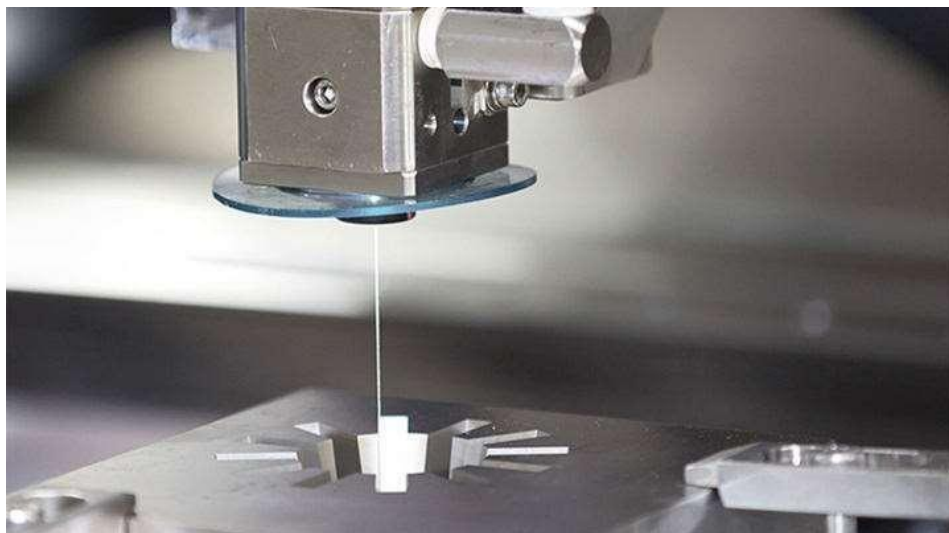


Figura 4. Molde

VENTAJAS

En relación con los métodos tradicionales de corte, el EDM ofrece grandes ventajas para una gran variedad de perfiles, materiales y áreas de trabajo. El mecanizado por electroerosión permite:

- Reducir los tiempos de fabricación
- Disminuir los costos de producción
- Incrementar la velocidad, precisión y flexibilidad en la fabricación
- Dejar de presidir de utillajes
- Contar con un hilo universal para cualquier configuración de pieza
- Fabricar piezas de forma automática sin vigilancia in situ
- Capacitar inmediatamente al personal operario sin necesidad de conocimientos especializados previos
- Aminorar el índice de rechazos en piezas con comprobación gráfica previa
- Reducir los tiempos de control
- Aumentar la precisión de ajuste en punzones y matrices
- Dar tratamiento térmico antes del corte para evitar deformaciones
- Modificar fácilmente la programación
- Comenzar a producir de inmediato con posibilidad de corte rápido de prototipos para prueba
- Tener una integración total en los procesos de diseño, preparación del trabajo y fabricación

En conclusión, el EDM es un excelente método de corte que permite adaptar todos sus parámetros en función del material a mecanizar y la calidad del mecanizado que se desea obtener. (NEXTTEC MACHINERY, Mayo 2021)

FUNCIONAMIENTO

Un equipo CNC se compone de los siguientes seis elementos:

1. Dispositivo de entrada
2. Unidad de control o controlador
3. Máquina herramienta
4. Sistema de accionamiento
5. Dispositivos de realimentación (sólo en sistemas con servomotores)
6. Monitor

La unidad de control o controlador de las máquinas CNC recibe instrucciones de un dispositivo de entrada (en forma de códigos G y códigos M) y mediante su propio software convierte esas instrucciones en señales eléctricas destinadas a activar los motores encargados de mover la máquina herramienta y poner en marcha el sistema de accionamiento, posteriormente se regresará la información al controlador mediante un dispositivo de retroalimentación, para observar cada instrucción y movimiento de la herramienta se cuenta con un monitor integrado en la máquina.

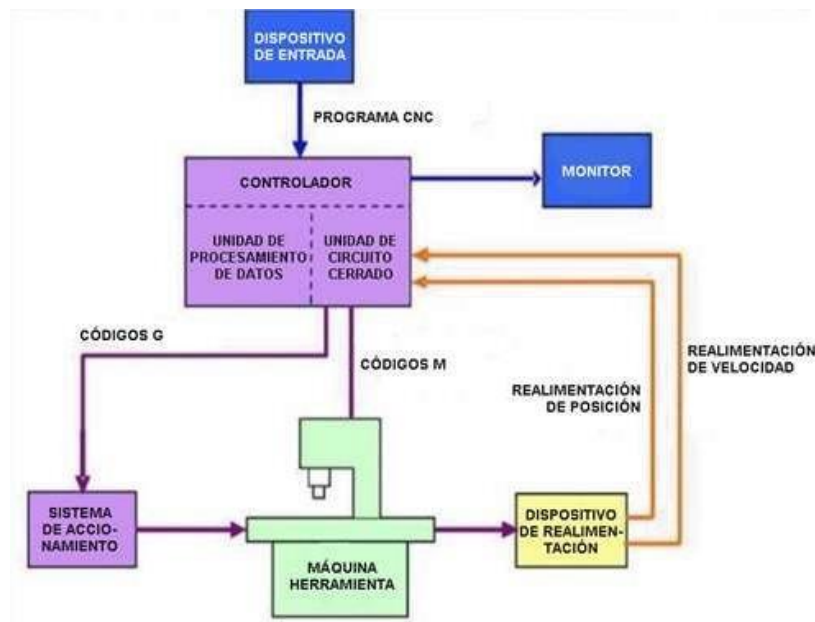


Figura 5 Funcionamiento de un equipo CNC.

CONTROL DE MOVIMIENTO

Todas las máquinas CNC tienen dos o más direcciones programables de movimiento llamadas ejes. Un eje de movimiento puede ser lineal (en línea recta) o rotatorio (en una trayectoria circular) a mayor cantidad de ejes, mayor complejidad. Los ejes se denominan con letras, los nombres más comunes de los ejes lineales son X, Y y Z, mientras que los más comunes de los ejes giratorios son A, B y C.

Los ejes de una máquina CNC son un requisito para generar los movimientos necesarios para el proceso de fabricación. Tomando como ejemplo un taladro industrial, los ejes ubicarían la herramienta sobre el orificio a mecanizar (en dos ejes) y efectuarían la operación (con el tercer eje).

El control de movimiento puede realizarse mediante dos sistemas, que pueden funcionar individualmente o combinados entre sí:

Valores absolutos (código G90), donde las coordenadas del punto de destino son referidas al punto de origen de coordenadas. Se usan las variables X (medida del diámetro final) y Z (medida en dirección paralela al eje de giro del husillo).

Valores incrementales (código G91), donde las coordenadas del punto de destino son referidas al punto actual. Se usan las variables U (distancia radial) y W (medida en dirección paralela al eje de giro del husillo).

La electroerosión por hilo es un proceso de fabricación también conocido como mecanizado por descarga eléctrica o EDM (por su nombre en inglés, electrical discharge machining).

El proceso de electroerosión consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo. (INDUSTRIAS LOHER)

PROGRAMA CNC

La programación CNC o control numérico computarizado, es un tipo de codificación informática que permite tomar el control total de maquinarias y herramientas que se utilizan en manufactureras, fábricas y demás áreas del sector industrial.

El **sistema** cumple con la función principal de otorgar **órdenes precisas** a las máquinas y herramientas para que paso a paso realicen el trabajo de forma **automática** sobre las piezas, con mayor rapidez y eficacia. (GEMAK C NC MACHINING SERVICES)

G90 G71	(cotas absolutas referidas al punto 0,0; Programación en mm)
G00 X0.0 Y0.0	(posicionamiento rápido lineal al punto 0,0 del plano XY)
G01 X10.0	(movimiento lineal de 10mm en la dirección X positiva)
G01 Y10.0	(movimiento lineal de 10mm en la dirección Y positiva)
G01 X0.0	(movimiento lineal de 10mm en la dirección X negativa)
G01 Y0.0	(movimiento lineal de 10mm en la dirección Y negativa)

Figura 6. Códigos G y M

Este es un listado secuencial de instrucciones que ejecutará la máquina. Esas instrucciones se conocen como programa CNC, el cual debe contener toda la información requerida para el mecanizado de la pieza.

El programa CNC está escrito en un lenguaje de códigos G que describen las funciones de movimiento de la máquina (por ejemplo, movimientos rápidos, avances, avances radiales, pausas, ciclos) y los códigos M (describe las funciones misceláneas que se requieren para el mecanizado de la pieza, pero que no corresponden a los movimientos de la máquina (por ejemplo, arranque y detención del husillo, cambio de herramienta, refrigerante, detención del programa). Este

lenguaje de comunicación esta estandarizado por las normas 6983 de ISO (Organización Internacional de Normalización) y RS274 de EIA (Alianza de Industrias Electrónicas) y compuesto por instrucciones Generales (código G) y Misceláneas (código M).

A continuación, se presentan algunos de los códigos g y m más utilizados.

CÓDIGOS G	CÓDIGOS M
G00: Posicionamiento rápido (sin maquinar)	M00: Parada opcional
G01: Interpolación lineal (maquinando)	M01: Parada opcional
G02: Interpolación circular (horaria)	M02: Reinicio del programa
G03: Interpolación circular (antihoraria)	M03: Hacer girar el husillo en sentido horario
G04: Compás de espera	M04: Hacer girar el husillo en sentido antihorario
G10: Ajuste del valor de offset del programa	M05: Frenar el husillo
G20: Comienzo de uso de unidades imperiales (pulgadas)	M06: Cambiar de herramienta
G21: Comienzo de uso de unidades métricas	M07: Abrir el paso del refrigerante B
G28: Volver al home de la máquina	M08: Abrir el paso del refrigerante A
G32: Maquinar una rosca en una pasada	M09: Cerrar el paso de los refrigerantes
G36: Compensación automática de herramienta en X	M10: Abrir mordazas
G37: Compensación automática de herramienta en Z	M11: Cerrar mordazas
G40: Cancelar compensación de radio de curvatura de herramienta	M13: Hacer girar el husillo en sentido horario y abrir el paso de refrigerante
G41: Compensación de radio de curvatura de herramienta a la izquierda	M14: Hacer girar el husillo en sentido antihorario y abrir el paso de refrigerante
G42: Compensación de radio de curvatura de herramienta a la derecha	M30: Finalizar programa y poner el puntero de ejecución en su inicio
G70: Ciclo de acabado	M31: Incrementar el contador de partes
G71: Ciclo de maquinado en torneado	M37: Frenar el husillo y abrir la guarda
G72: Ciclo de maquinado en frentado	M38: Abrir la guarda
G73: Repetición de patrón	M39: Cerrar la guarda
G74: Taladrado intermitente, con salida para retirar virutas	M40: Extender el alimentador de piezas
G76: Maquinar una rosca en múltiples pasadas	M41: Retraer el alimentador de piezas
G96: Comienzo de desbaste a velocidad tangencial constante	M43: Avisar a la cinta transportadora que avance
G97: Fin de desbaste a velocidad tangencial constante	M44: Avisar a la cinta transportadora que retroceda
G98: Velocidad de alimentación (unidades/min)	M45: Avisar a la cinta transportadora que frene
G99: Velocidad de alimentación (unidades/revolución)	M48: Inhabilitar Spindle y Feed override (maquinar exclusivamente con las velocidades programadas)
	M49: Cancelar M48
	M62: Activar salida auxiliar 1
	M63: Activar salida auxiliar 2
	M64: Desactivar salida auxiliar 1
	M65: Desactivar salida auxiliar 2
	M66: Esperar hasta que la entrada 1 esté en ON
	M67: Esperar hasta que la entrada 2 esté en ON
	M70: Activar espejo en X
	M76: Esperar hasta que la entrada 1 esté en OFF
	M77: Esperar hasta que la entrada 2 esté en OFF
	M80: Desactivar el espejo en X
	M98: Llamada a subprograma
	M99: Retorno de subprograma

Figura 7 Códigos G y M

El programa presenta un formato de frases conformadas por bloques, encabezados por la letra N, donde cada movimiento o acción se realiza secuencialmente, cada bloque está numerado y generalmente contiene un solo comando.

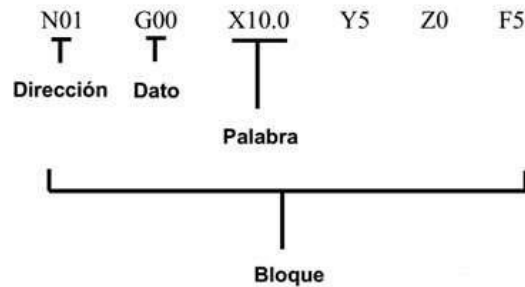


Figura 8. Formato de escritura de línea de código

A su vez, cada código contiene variables (direcciones), identificadas con otras letras y definidas por el programador para cada función específica. Por ejemplo, F define la velocidad de avance, S la velocidad del husillo, T la herramienta seleccionada, X, Y y Z el movimiento de los ejes, I, J y K la localización del centro de un arco, entre otros.

Se debe tener en cuenta que cada máquina tendrá su propio programa CNC, ya que, por ejemplo, una máquina de corte horizontal por hilo no tiene husillo ni requiere de refrigerante.

Un ejemplo de aplicación de los códigos ya mencionados sería el siguiente:

Como muestra la figura 4 contamos con un cuadrado de 20 mm por lado, el código para que la herramienta de corte realice la trayectoria para trazar dicho cuadrado sería:

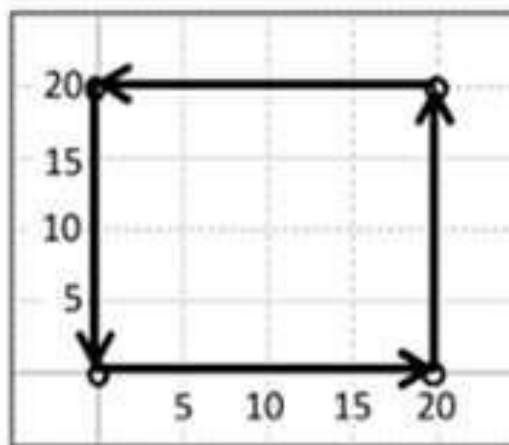


Figura 9 ejemplo de trayectoria de corte

N05 G90 G71 // Coordenadas absolutas y dimensiones en milímetros
 N10 G00 X 0,0 Y0.0 // Desplazamiento rápido a las coordenadas X0, Y0.
 N15 G01 X 20 // Mover la herramienta a la coordenada X20
 N20 G01 Y 20 // Mover la herramienta a la coordenada Y20
 N25 G01 X 0.0 // Mover la herramienta a la coordenada X0
 N30 G01 Y 0.0 // Mover la herramienta a la coordenada Y0

CONTROLADOR CNC

Este componente clave interpreta un programa CNC y acciona la serie de comandos en orden secuencial. A medida que lee el programa, el controlador activa las funciones apropiadas de la máquina, impulsa el movimiento de los ejes, y en general, sigue las instrucciones dadas en el programa.



Figura 10 Controlador FANUC

Además de interpretar el programa CNC, el controlador tiene varios otros propósitos como lo son:

- Modificar (editar) los programas si se detectan errores.
- Realizar funciones de verificación especial (como el funcionamiento en vacío) para confirmar la exactitud del programa CNC.
- Especificar ciertas entradas importantes del operador, tales como los valores de longitud de las herramientas.

Los controladores de control numérico computarizado (CNC) son esenciales para el trabajo fino y delicado requerido para hacer las piezas especializadas necesarias para maquinaria más compleja. Si algo sale mal con uno de estos dispositivos, puede significar un desastre para el proceso de producción. Existen numerosas partes del sistema de un controlador CNC que podrían desarrollar problemas, incluidos los controles de alimentación, las interfaces de los interruptores de límite, los controladores de servomotores, los circuitos de protección o incluso la misma fuente de alimentación.

Cuando resulta que uno de los problemas menos frecuentes es lo que está afectando a un dispositivo, puede ser difícil de diagnosticar y aún más difícil llevar a cabo los servicios de reparación de máquinas CNC. Nuestros técnicos están familiarizados con todos los tipos de problemas del controlador CNC, ya sean comunes o únicos. (K+S Services, 2023)

PROGRAMA CAM

Actualmente existen dos tipos de programación en las máquinas de control numérico: la programación a pie de máquina y la programación CAD/CAM. Dependiendo del tipo de aplicación es conveniente utilizar uno u otro. La programación a pie de máquina se utiliza cuando las operaciones a realizar en la pieza no son demasiado complejas. Generalmente se trata de geometrías 2D o 2D

y 1\2 del tipo cajeros, agujeros o perfiles en repetición en Z. Es una programación utilizada en empresas dedicadas a la fabricación de piezas de producción o a elementos portamoldes que, como ya se ha señalado, en su gran mayoría no requieren operaciones complejas. La programación CAD/CAM se utiliza cuando las geometrías son más complicadas y cuando la pieza ya es una figura con definiciones en 3D. Es la programación empleada en los talleres de moldes y matrices.

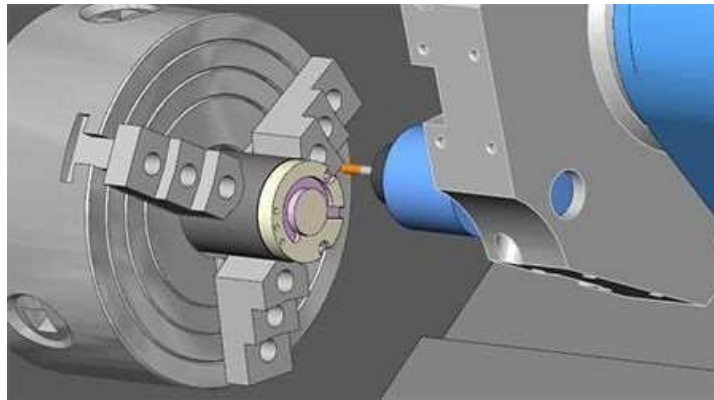


Figura 11 Simulación CAM

El programa CAM (funciona conjuntamente con el diseño asistido por computadora (CAD)). Esto elimina la necesidad de redefinir la configuración de la pieza de trabajo para el programa CAM. El programador CNC simplemente especifica las operaciones de mecanizado a realizar y el programa CAM crea automáticamente el programa CNC. (Interempresas Media, S.L.U)

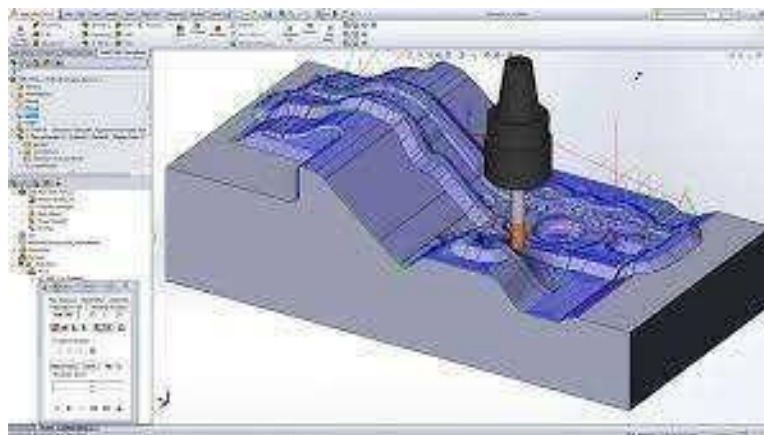


Figura 12 Diseño de trayectorias

SISTEMA DNC MDA

El propósito de un sistema DNC es proporcionar un repositorio central para los datos de manufactura y NC, y poner estos datos a disposición del piso de producción. Los beneficios de una solución DNC completa incluyen:

- Gestión central y control de revisión de programas NC y datos CAM relacionados.
- Conexión directa del repositorio de datos a las máquinas CNC.
- Opciones de configuración para acomodarse a los requerimientos y preferencias del cliente.

El propósito de MDA es recolectar la información desde el equipo para asistir a los fabricantes en la identificación y atención de causas de problemas de equipo. Los beneficios de una solución MDA completa incluyen:

- Portal central para acceder a datos de máquina de tiempo real y archivado.
- Extracción en tiempo real de señales directamente desde el piso de producción.
- Reportes configurables para ayudar a los clientes a comprender y mejorar sus capacidades de manufactura. (Engineering Industries eXcellence)

Una vez que se desarrolla el programa CNC, debe cargarse en el controlador y para ello se usa un sistema de distribución de control numérico (DNC).

Un sistema DNC es una computadora conectada en red con una o más máquinas CNC. Tradicionalmente la transferencia de los programas se efectuaba mediante un protocolo rudimentario de comunicaciones seriales (RS-232C). Sin embargo, la tecnología ha avanzado para dotar a los controladores actuales con mayores capacidades de comunicación, de manera que puedan conectarse en red de maneras más convencionales, por ejemplo, mediante Ethernet.

FOAMGLAS

El Foamglas es un aislamiento ligero y rígido, sellado con millones de células de vidrio y cada célula aísla por sí sola. Fabricado únicamente a partir de vidrio triturado y carbono, es totalmente inorgánico y no favorece la aparición de moho, hongos o microorganismos.

En soluciones industriales, el Foamglas interviene cuando en la empresa se tienen muy altas y bajas temperaturas este material soporta desde -450°F (-268°C) hasta 900°F (482°C). Este aislamiento térmico Foamglas tiene como ventaja ser impermeable, es decir, no absorbe humedad, es resistente a productos químicos, es incombustible y es ecológico.

Este material es presentado en bloques de variadas dimensiones y espesores los cuales se presentan en la sección de anexos de este documento.



Figura 13. Bloques patrón

MASTERCAM

Mastercam es el programa CAD/CAM más popular para manufactura en máquinas de control numérico y centros de maquinado CNC. El programa abarca la programación de fresadoras, centros de maquinado, tornos, el módulo blade expert para alabes, electro erosionadoras de corte por alambre, cortadoras por láser, oxicorte, routers, y más.

Mastercam ofrece una gama de módulos para aplicaciones especiales, también incluye módulos de modelado 3D con producción de dibujos 2D para la preparación de la geometría 3D antes del CAM.

Mastercam es un programa CAD/CAM usado para manufactura en máquinas de control numérico y centros de maquinado CNC, permite leer un diseño CAD 2D y 3D para manufacturarlo con operaciones para máquinas herramientas. (3D CadPortal)

A parte de leer diseños elaborados en otros programas CAD, mastercam permite realizarlos con su interfaz de diseño desde el cual puedes seleccionar el tipo de herramienta de corte y los parámetros del corte según tus especificaciones, también puedes generar el código g y m de tu diseño para cargar en el controlador del equipo CNC.

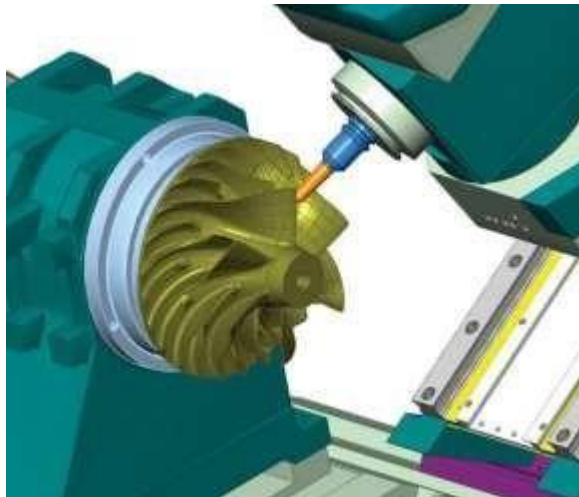


Figura 14 Simulación de maquina

CAPÍTULO III DESARROLLO

FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA E IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICA A RESOLVER

El funcionamiento de la máquina de corte horizontal CNC se enfoca en el control de los movimientos de los ejes X y Z.

En el eje X se produce el movimiento de la mesa de corte, para esto se usa un sistema de cremallera piñón que son accionados por 2 motores a pasos nema 34.

En el eje Z se genera el movimiento de la herramienta de corte, esta herramienta es un alambre especial hecho de carbono debido a lo abrasivo que es el Foamglas.

La herramienta de corte tiene una longitud de 8485 mm la cual está distribuida con un conjunto de 8 poleas fabricadas en aluminio y montadas sobre bujes y rodamientos, el movimiento de estas poleas es generado por un motor trifásico siemens y una banda de transmisión.

El sistema de distribución de las poleas está sujeto a una estructura trapezoidal la cual es direccionada en el eje Z por un conjunto de motores a pasos, husillos y tuercas embaladas, guías y cuerpos de precisión lineal entre otros accesorios.

Al realizar el levantamiento estructural de la máquina se detectaron algunas fallas a continuación presentadas:

- ✚ Algunas poleas presentaban irregularidades en su circunferencia
- ✚ Cuando la maquina se encontraba en un puto elevado perdía estabilidad
- ✚ La estructura carecía de rigidez y era pesada
- ✚ La nivelación entre la mesa y la herramienta de corte estaba desfasada
- ✚ EL hilo comenzaba a desgastar las poleas de aluminio

DISEÑO DE ESTRUCTURA Y DISTRIBUCIÓN DE POLEAS

Con la información obtenida y las fallas detectadas se realizó el diseño de una nueva propuesta estructural con los siguientes cambios:

- I. La estructura trapezoidal se sustituyó por una estructura rectangular.
- II. Los largueros guía del movimiento en Z fueron alargados con el fin de dar estabilidad al llegar a puntos altos.
- III. Se redujo a la mitad la cantidad de poleas a utilizar y se modificó la distribución de estas, además, se propuso agregar un anillo de acero como refuerzo para evitar desgaste por el alambre.

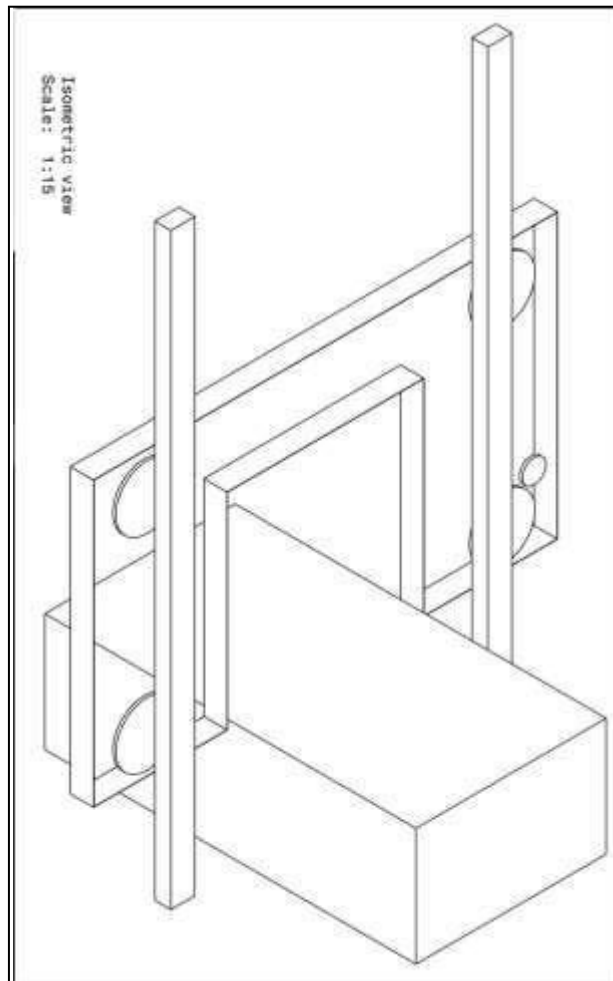


Figura 14 Isométrico de diseño estructural

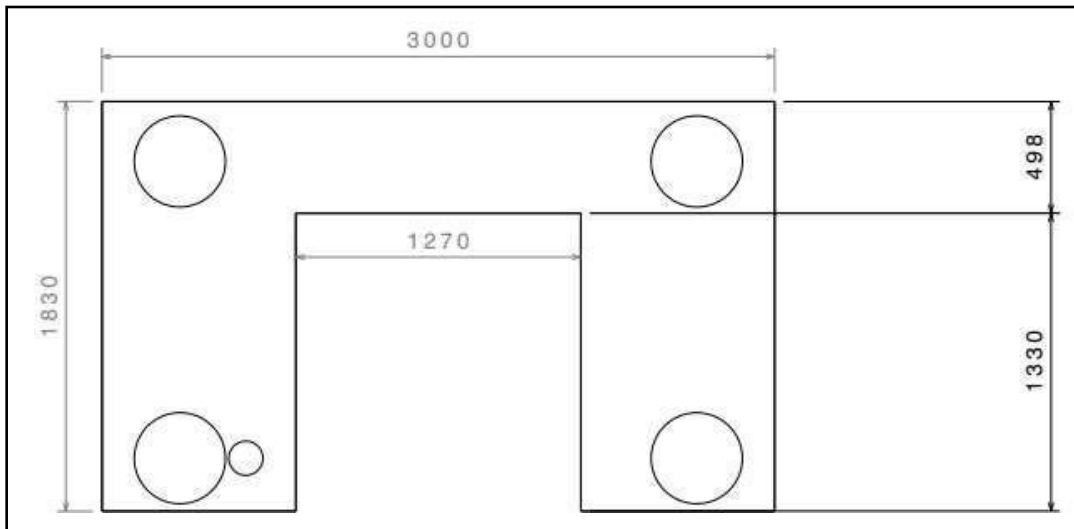


Figura 15 Dimensiones de la estructura rectangular y distribución de poleas

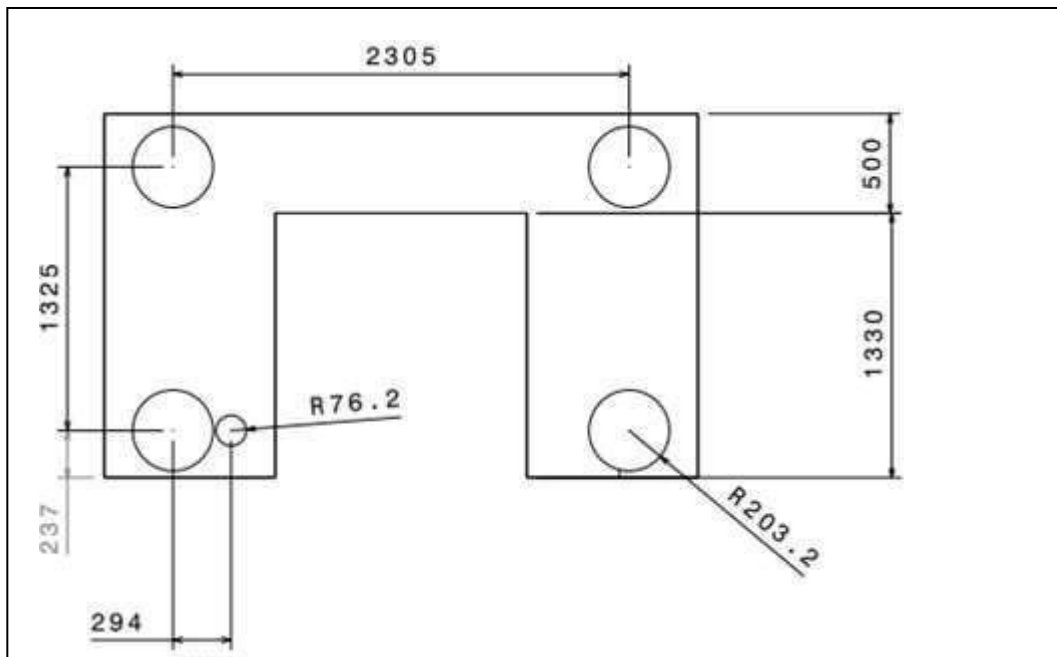


Figura 16 Posición de las poleas

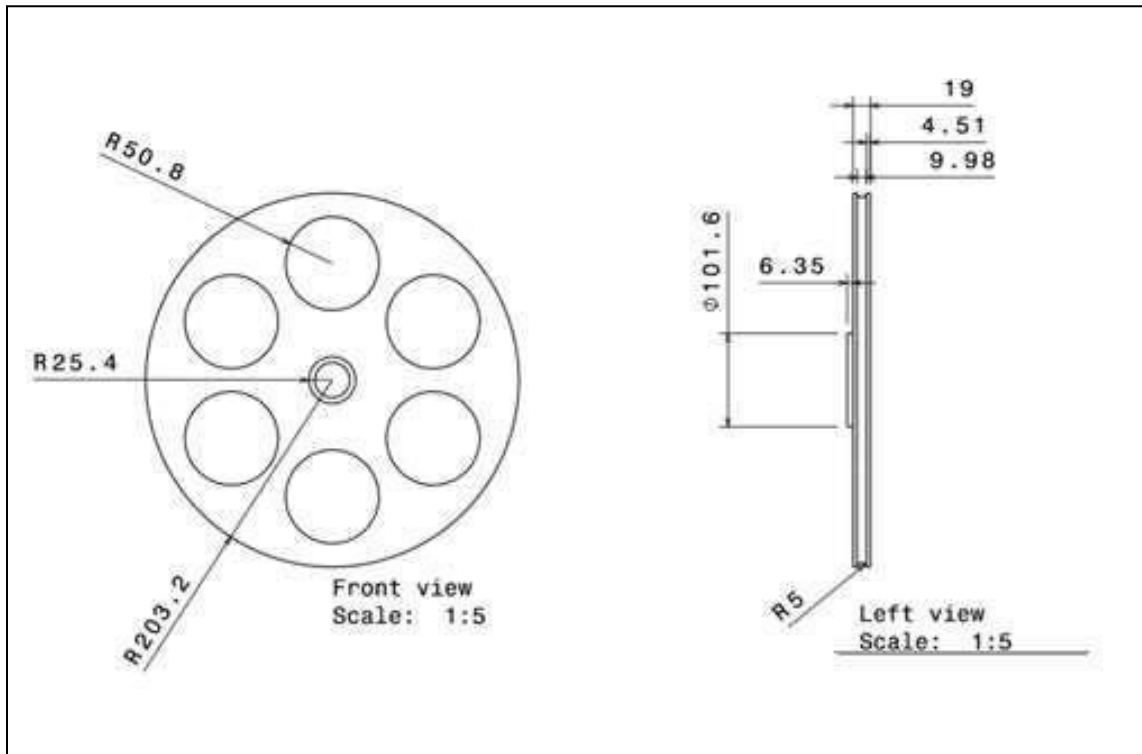


Figura 17 Dimensiones de las poleas

SELECCIÓN DE MATERIALES Y BUSQUEDA DE PROVEEDORES

Una vez definida la propuesta se creó una lista de materiales a ocupar los cuales fueron:

Material	Especificaciones
Estructura para poleas figura 7	Fabricado en lámina de acero al carbón calibre 16 Con puertas fabricadas en lamina de aluminio calibre 18 y perfil de aluminio de 1 pulgada
Poleas figura 9	Con un diámetro de 16" fabricadas en aluminio con un anillo de refuerzo de acero
Bujes y rodamientos figura 10	Se propuso reutilizar los existentes para reducir costos

Tabla 1 Características de materiales

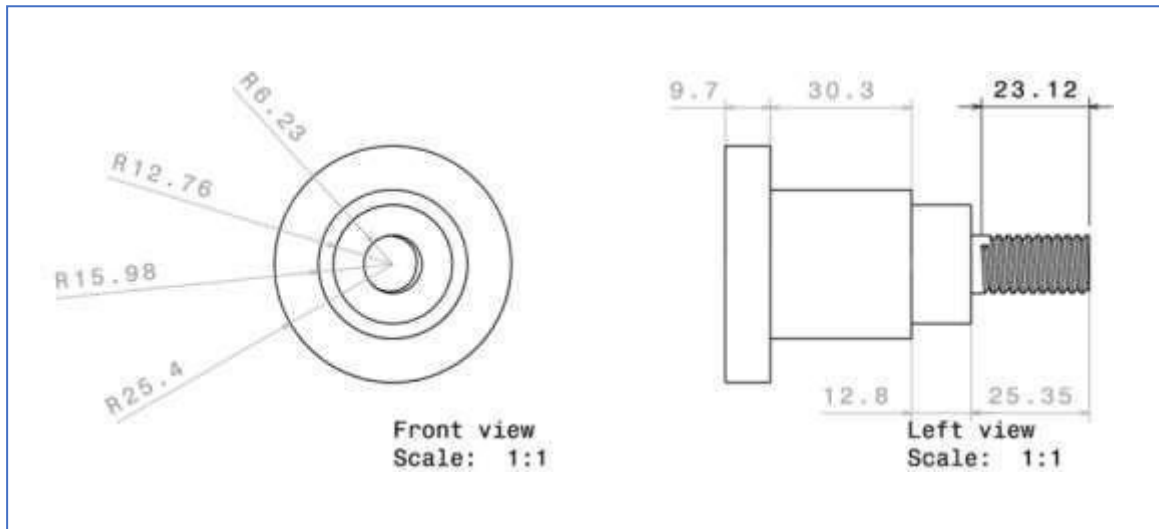


Figura 18 Bujes para poleas

Con los materiales a utilizar definidos comenzó la búsqueda de proveedores para cada trabajo por realizar de la siguiente manera:

Se localizaron los proveedores en los alrededores de las instalaciones de la empresa, tanto en la planta como en las oficinas.

Se adjuntaron los planos correspondientes al trabajo requerido y fueron mandados por correo electrónico junto con las especificaciones correspondientes.

Para un mejor entendimiento sobre el trabajo solicitado se visitaron las empresas personalmente para aclarar cualquier duda existente y de este modo garantizar un buen trabajo

Se obtuvieron las cotizaciones de distintos proveedores y quedaron en espera de aprobación por la empresa

Se seleccionaron los proveedores más competentes y que se ajustaban al presupuesto para el desarrollo del proyecto

Finalmente se generaron las órdenes de compra y se acordaron los tiempos de entrega entre dos y tres semanas según el proveedor.

MANTENIMIENTO GENERAL Y SUSTITUCION DE SISTEMA DE POLEAS

En la espera de la entrega de los materiales solicitados a los proveedores se dio un mantenimiento general a la máquina, el cual se describe en los siguientes puntos.

- I. Desmontar las piezas por sustituir
- II. Limpiar y lubricar los sistemas de movimiento tanto en X como en Z
- III. Limpieza general de toda la maquina
- IV. Nivelación de la mesa de corte y la estructura de la maquina

Al recibir el material proporcionado por los proveedores se procedió con la instalación de las nuevas piezas, el cual se describe en la tabla siguiente

Preparación del área de trabajo, se colocaron dos soportes de madera en los laterales de la máquina los cuales sirven de soporte para descansar la estructura y facilitan el ensamble de la misma	
Colocación de la estructura para el sistema de poleas, atornillada a los cuerpos de la guía de precisión lineal y a las bridas del husillo	

Fijación de los bujes guía para las poleas mediante tres tornillos con sus respectivas rondanas y tuercas



Colocación de las poleas en los bujes guía



Colocación del resto de poleas siguiendo el mismo procedimiento



Ensamble de puertas de aluminio



Tabla 2 Procedimiento de ensamble de estructura y poleas

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Con las mejoras ya aplicadas en el equipo y ya en funcionamiento se realizaron pruebas de nivelación, estabilidad, rigidez y trayectoria de la herramienta de corte realizando un corte recto como lo muestra la figura.



Figura 19 Corte de prueba

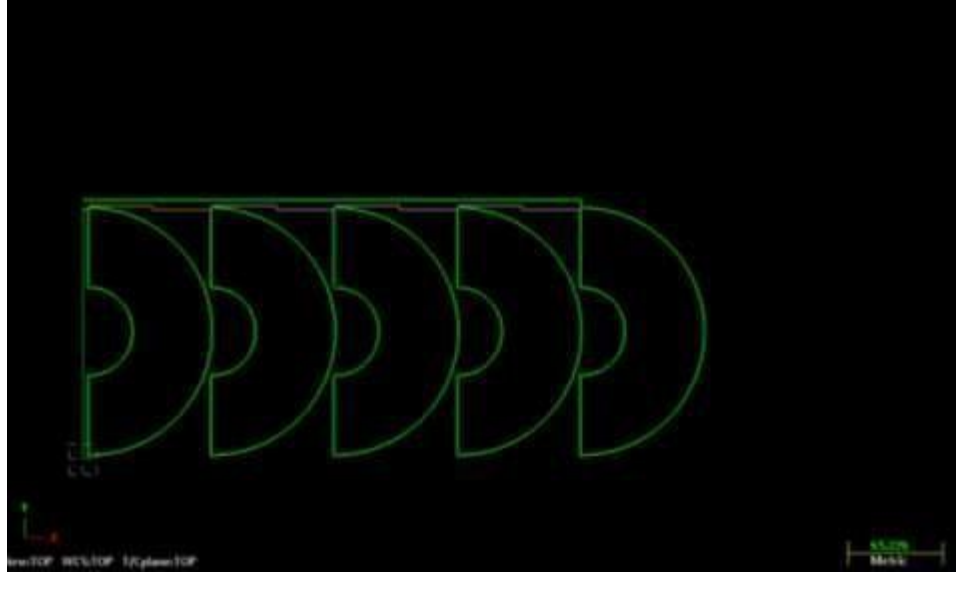
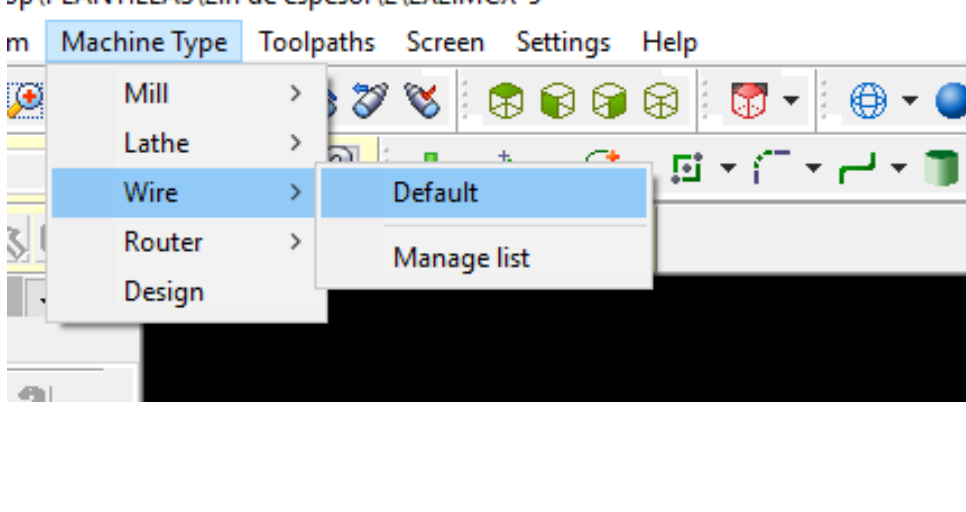
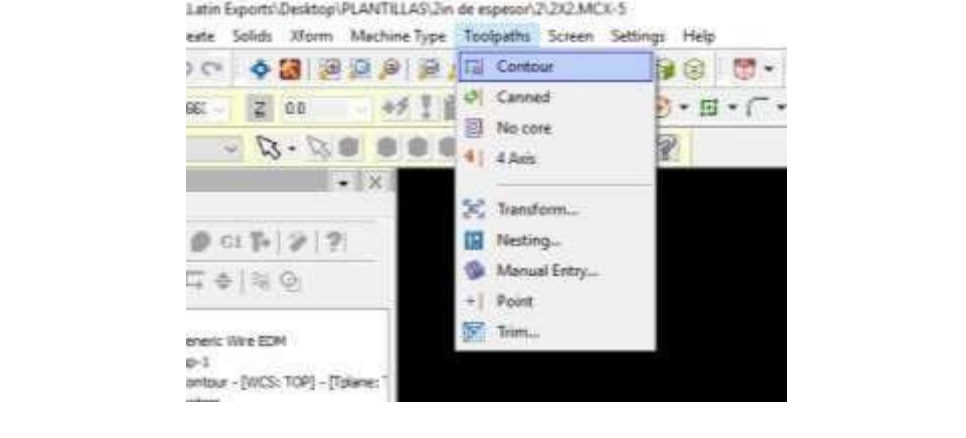
DISEÑO DE PRUEBAS DE CORTE DE MEDIAS CAÑAS Y OBTENCION DE CODIGO G Y M

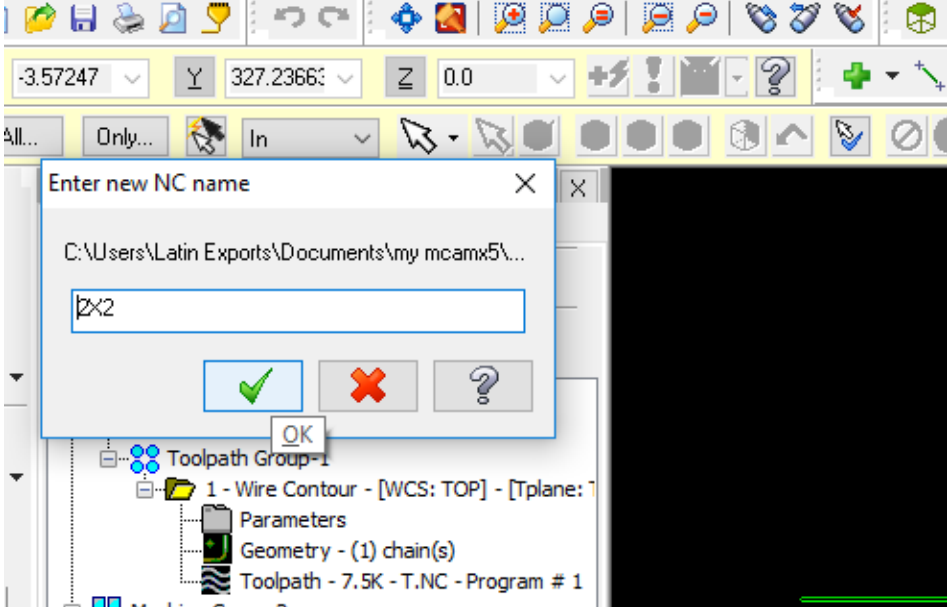
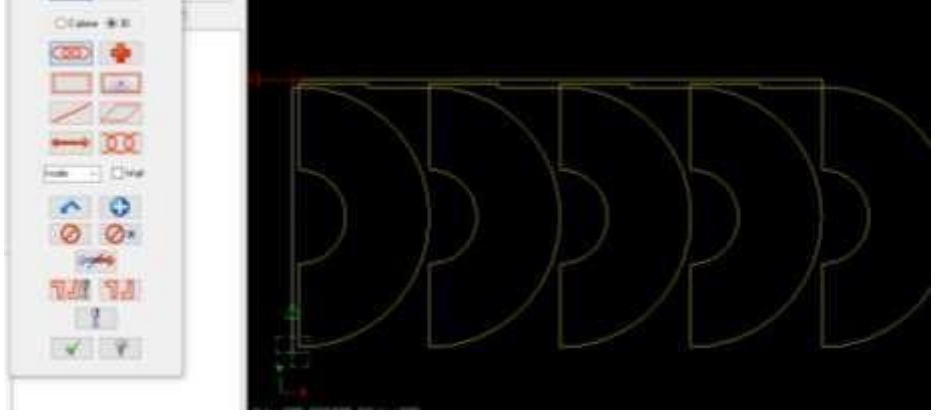
Antes de realizar una plantilla de los diseños de corte se tuvieron que hacer varias pruebas en cuanto a las tolerancias y ajustes necesarios para el corte de medias cañas según el material consumido por la herramienta de corte y los diámetros establecidos para tubería cedula40.

DIAM. NOMINAL		DIAM. EXT.	SDR 7 266.61 psi/18.41 bares		SDR 7.3 253.97 psi/17.51 bares		SDR 9 200 psi/13.84 bares		SDR 9.3 192.77 psi/13.29 bares		SDR 11 160.00 psi/11.03 bares		SDR 11.5 152.38 psi/10.51 bares	
Pulg.	mm.	Pulg.	e pared mm.	Diam. interior mm.	e pared mm.	Diam. interior mm.	e pared mm.	Diam. interior mm.	e pared mm.	Diam. interior mm.	e pared mm.	Diam. interior mm.	e pared mm.	Diam. interior mm.
1/2	21.34	0.840	3.05	14.99	2.92	15.27	2.36	16.41	2.29	16.56	1.93	17.30	1.85	17.48
3/4	26.67	1.050	3.81	18.75	3.66	19.08	2.97	20.50	2.87	20.70	2.41	21.62	2.31	21.84
1	33.40	1.315	4.78	23.47	4.57	23.88	3.71	25.68	3.58	25.93	3.05	27.08	2.90	27.36
1.1/4	42.16	1.660	6.02	29.64	5.77	30.18	4.67	32.41	4.52	32.74	3.84	34.19	3.66	34.54
1.1/2	48.26	1.900	6.88	33.91	6.60	34.52	5.36	37.11	5.18	37.47	4.39	39.14	4.19	39.52
2	60.33	2.375	8.61	42.39	8.26	43.13	6.71	46.38	6.48	46.84	5.49	48.92	5.26	49.40
3	88.90	3.500	12.70	62.48	12.17	63.58	9.88	68.35	9.55	69.01	8.08	72.09	7.72	72.82
4	114.30	4.500	16.33	80.34	15.65	81.74	12.70	87.88	12.29	88.75	10.39	92.68	9.93	93.62
5	141.30	5.563	20.22	99.31	19.35	101.04	15.70	108.64	15.19	109.70	12.85	114.58	12.29	115.75
6	168.28	6.625	24.03	118.26	23.06	120.32	18.69	129.39	18.08	130.63	15.29	136.45	14.63	137.85
8	219.08	8.625	31.29	153.97	30.02	156.64	24.33	168.45	23.55	170.08	19.91	177.65	19.05	179.45
10	273.05	10.750	39.01	191.92	37.41	195.25	30.25	209.96	29.36	211.99	24.82	221.41	23.75	223.67
12	323.85	12.750	46.25	227.61	44.37	231.57	35.99	249.00	34.82	251.41	29.44	262.61	28.17	265.28
14	355.60	14.000	50.80	249.94	48.72	254.28	39.52	273.41	38.23	276.07	32.33	288.37	30.91	291.29
16	406.40	16.000	58.06	285.65	55.68	290.60	45.16	312.47	43.69	315.52	36.96	329.57	35.33	332.89
18	457.20	18.000	65.30	321.34	62.64	326.92	50.80	351.54	49.15	354.94	41.55	370.74	39.75	374.50
20	508.00	20.000	-	-	69.60	363.25	56.44	390.60	54.64	394.39	46.18	411.94	44.17	416.13
22	558.80	22.000	-	-	-	-	62.08	429.67	60.10	433.83	50.80	453.14	48.59	457.73
24	609.60	24.000	-	-	-	-	-	-	65.56	473.25	55.42	494.33	53.01	499.34

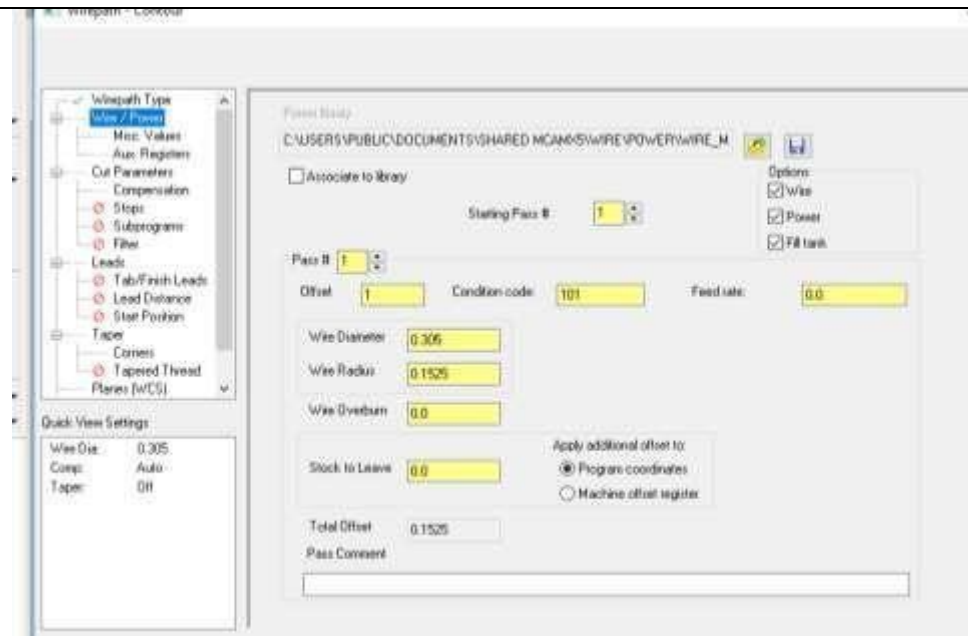
Figura 3 Tabla de dimensiones de tubería cedula 40

Al tener definidos los diseños se usó el programa Mastercam para generar los códigos de programación basándose en el siguiente procedimiento:

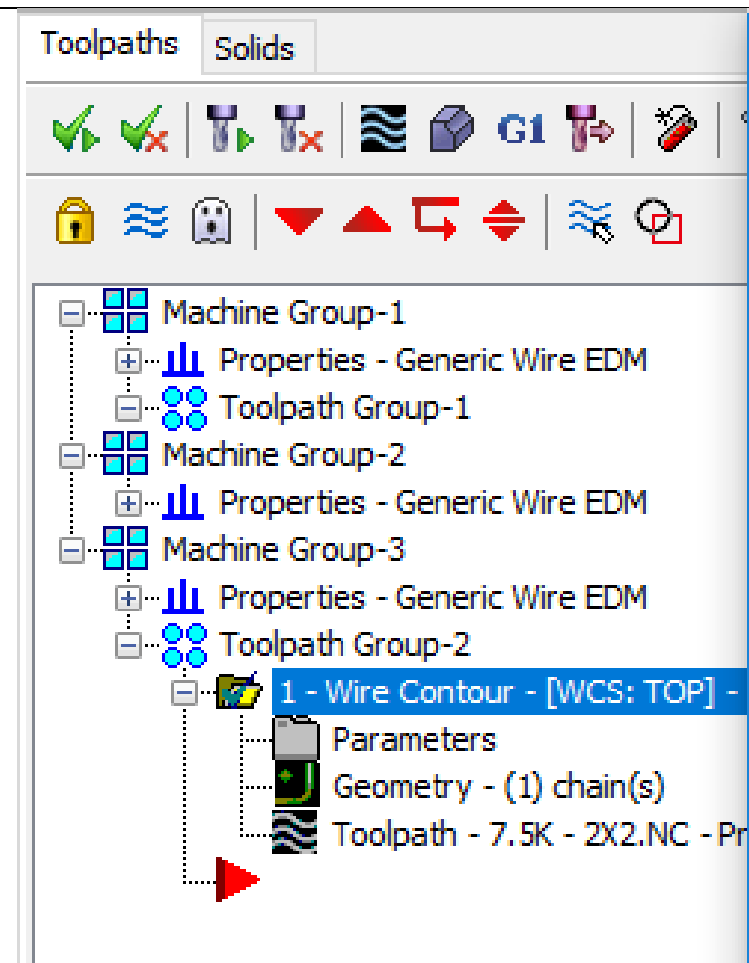
Realizar el diseño de la media caña en mastercam	
Seleccionar el tipo de maquinado, en este caso seleccionamos wire (alambre) y elegimos el que nos da por default	
Se selecciona "toolpaths" seguido de contour para seleccionar la ruta de la herramienta de corte dándole	

una entrada y una salida como lo indican las flechas.	
Seleccionamos el nombre de la trayectoria de la herramienta, y posteriormente ok en las ventanas emergentes.	
Se selecciona la entrada y salida de la herramienta de corte, como lo marcan las flechas roja y verde	

A continuación aparecerá una ventana en la que seleccionaremos las especificaciones de la herramienta de corte.



Una vez terminados estos pasos se generará la trayectoria de la herramienta y se procede a obtener el código de programación, seleccionando el icono G1



[illegible]

Tabla 4 Procedimiento para generar códigos g y m con Mastercam

ELABORACION DE PLANTILLAS DE MEDIAS CAÑAS

Basándose en los resultados de las pruebas realizadas se obtuvo una medida estandarizada para realizar los ajustes en los diseños de las medias cañas de distintos diámetros y espesores, tomando esto en cuenta se realizaron las plantillas para el corte de medias cañas con espesores desde $\frac{1}{2}$ pulgada hasta 4 pulgadas y con diámetros desde 1 pulgada hasta 40 pulgadas.

Todos los diseños realizados están basados en la tabla de tolerancias y cortes permitidos según las dimensiones y espesores de medias cañas, es importante señalar que a mayor diámetro y espesor se cuenta con una mayor cantidad de cortes permitidos para segmentación de las medias cañas, esto con el fin de aprovechar todo el material posible reduciendo considerablemente el desperdicio de materia prima. En la sección de anexos del documento se puede consultar dicha tabla.

A continuación, se presenta un ejemplo del diseño de una media caña con un diámetro de 10 pulgadas y un espesor de $2\frac{1}{2}$ pulgadas, elaborada en 5 segmentos las medidas señaladas están en milímetros.

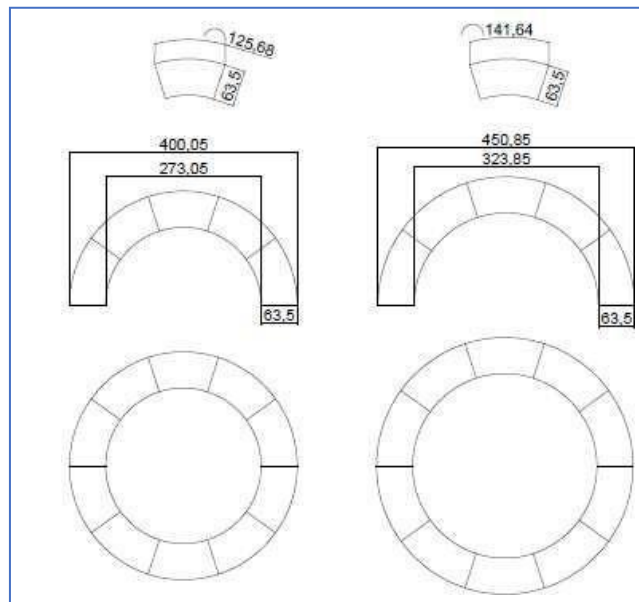


Figura 20 Diseño de media caña de 10 x $2\frac{1}{2}$ pulgadas

CAPÍTULO IV RESULTADOS

RESULTADOS

A continuación, se presentan fotografías de los cortes realizados con la implementación del nuevo sistema mecánico de la máquina de corte por hilo CNC y los diseños de la plantilla generada, con el objetivo de observar de manera gráfica los resultados obtenidos.



Figura 21. Cortes cilíndricos



Figura 22 Corte de segmentos y medias cañas completas

Como se puede observar la máquina de corte horizontal por hilo realiza los cortes de manera precisa y uniforme cumpliendo con los requerimientos de la empresa.

El desarrollo de este proyecto favoreció a la empresa de la siguiente manera:

- Se redujo el tiempo de producción del producto
- Se disminuyó la merma de materia prima
- Se lograron cortes precisos y de calidad
- Al contar con la plantilla de diseños se redujo el tiempo para generar las cotizaciones solicitadas por los clientes.

La máquina de electroerosión por hilo puede cortar una pieza, independientemente de su dureza, ya que la mecanización se lleva a cabo por un proceso de arranque eléctrico y termodinámico producido por las descargas. Es por esto que se puede utilizar el acero templado como material para las piezas a mecanizar.

El control numérico acciona los motores que mueven la mesa, según el perfil que se quiera cortar por la acción de las descargas enviadas desde el hilo.

Las señales de mando de los motores se originan en el CNC a partir de la información almacenada en la cinta perforada que ha sido programada previamente según las dimensiones del plano.

El generador proporciona los impulsos eléctricos que darán lugar a las descargas que saltarán entre el hilo y la pieza.

Como líquido dieléctrico se utiliza agua desionizada, que se obtiene a partir de agua normal mediante resinas desionizadoras. Este líquido dieléctrico es movido desde su depósito por una bomba que lo envía a la zona de trabajo.

A continuación, se detallan las ventajas específicas de cada área, así como su justificación:

Concepción de las piezas:

Utillajes más compactos, debido a la posibilidad de suprimir chasis de matrices.

Simplificación de piezas, por la posibilidad de realizar matrices más complicadas.

Normalización de elementos, por la utilización de placas normalizadas sobre las que se pueden mecanizar mediante la electroerosión con hilo toda clase de orificios de corte, centrado, etc.

Preparación del trabajo

Preparación rápida del trabajo, no es necesario el estudio de electrodos ni su fabricación.

Puesta en fabricación inmediatamente, el plazo de puesta en fabricación a partir del diseño puede ser inferior a una jornada.

Tecnología simplificada, las variables de trabajo son menos que en el mecanizado convencional.

Fabricación:

Tiempos de fabricación reducidos, volumen de material a arrancar mínimo.

No son necesarios utillajes, el electrodo de hilo es universal y sirve para cualquier configuración de pieza.

Trabajo automático, el trabajo se desarrolla sin vigilancia suplementaria.

Alta utilización de la máquina, como consecuencia de la posibilidad de trabajo automático.

Mano de obra sin cualificación especial, porque el mecanizado mediante electroerosión por hilo, no exige conocimientos tecnológicos previos especiales y el operario puede ser formado en poco tiempo.

Calidad

Menos rechazos, debido a que el trabajo se desarrolla automáticamente y a la posibilidad de comprobación gráfica previa del programa.

Tiempos de control reducidos, los controles intermedios no son necesarios.

Rebarbas mínimas en las piezas obtenidas con el utillaje, debido a la precisión de ajuste de punzones y matrices.

Se evitan las deformaciones de tratamiento térmico, puesto que el tratamiento se realiza antes del corte.

Flexibilidad

Facilidad de modificación, los programas pueden ser fácilmente modificables sobre la misma máquina.

Rapidez de puesta a punto, posibilidad de corte rápido de prototipos para su ensayo.

Integración

Posibilidad de coordinar, de manera sencilla, el diseño, la preparación del trabajo y la fabricación, en virtud de las facilidades ofrecidas por el sistema de corte por hilo y la programación de la máquina.

El proceso de corte mediante electroerosión por hilo (WEDM) siempre ha sido conocido por conseguir tolerancias ajustadas en sus piezas, caracterizándose por poder obtener geometrías complejas con cambios bruscos de dirección o radios pequeños, siendo esta mejora de la precisión una de las tareas más importantes a cumplir por los grandes fabricantes de este tipo de maquinaria. Sin embargo, existen cada vez necesidades más exigentes por parte de sectores como el automovilístico o el aeronáutico impulsados, a su vez, por el cambio drástico en el paradigma industrial de esta nueva revolución que se caracteriza por la conectividad, la eliminación de defectos y el tratamiento de grandes cantidades de datos.

Dicho cambio se refleja en la figura, donde se muestran las principales líneas de investigación sobre electroerosión por hilo durante el año 2016. La investigación del proceso y la mejora de las máquinas representan aproximadamente un 20 % de los trabajos publicados, y el análisis de los parámetros a utilizar en función de los nuevos materiales que pueden erosionarse y el estudio de las superficies y su resistencia a fatiga adquieren una importancia similar. Asimismo, el estudio de la

temperatura y la transferencia de calor durante el proceso y el análisis de las descargas apenas representan un 7 % del total. Los artículos no clasificados y los que tienen relación con el láser, la soldadura agrupa a la otra mitad de trabajos de este gráfico.



Figura 23 Porcentajes de estudios comparativos a la electroerosión por EDM de hilo

A lo largo de este apartado se describirá la metodología experimental de los ensayos realizados y el cálculo de los parámetros necesarios para el establecimiento del espesor, con lo que se obtendrán unos resultados los cuales pueden analizarse para, finalmente, intentar predecir el cambio de espesor con antelación.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En los próximos párrafos se detallan los ensayos llevados a cabo para analizar el paso previo a la factibilidad del uso de las herramientas necesarias en la mejora del proceso y la precisión de WEDM, mediante el uso de cantidades masivas de datos

para la resolución de problemas típicos en este proceso de corte, comprobando si puede determinarse el espesor durante el proceso de corte.

Espesor de pieza programado [mm]	200	150	100
Tiempo de pausa [μ s]	18	14	13
Intensidad [A]	5	5	5
Tensión de servo de referencia [V]	80	80	80
Presión del dieléctrico [bar]	31	31	31
Tensión del hilo [kg]	18	18	18
Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]	10	10	10

Tabla 5. Parámetros utilizados para el corte de las probetas para los ensayos.

Para la adquisición de las descargas del proceso de WEDM se ha utilizado osciloscopio de alta frecuencia (Tektronix DPO 5034B) y una sonda de tensión (Tektronix TMDP0200), con las condiciones mostradas en la tabla 2. Teniendo en cuenta la naturaleza del proceso WEDM, se han obtenido secuencias de descargas en periodos de tiempo que se consideran suficientemente largos como para poder registrar potenciales eventos que tuvieran lugar durante el corte.

Parámetros del osciloscopio		Valor
Tiempo de registro [mm]		4,0
Frecuencia de muestreo [MS/s]		10,0
Longitud de muestreo [-]		20.000,0
Escala horizontal [μ s]		200,0
Resolución [ns]		100,0
Duración del ensayo [ms]		2,0
Rango de tensión [V]		$\pm 120,0$
Escala vertical [V/div]	Tensión	20,0
	Intensidad	0,5

Tabla 6. Parámetros del osciloscopio utilizados.

Se lleva a la práctica este procedimiento teórico mediante el corte de una pieza de acero AISI D2 de geometría compleja, representada mediante la siguiente figura, cuyas dimensiones pueden observarse en la tabla.

Dimensiones [mm]	Espesor programado [mm]		
	200	150	100
C1	73	55	37
C2	100	75	50
C3	67	50	33
C4	67	50	33
C5	80	60	40
C6	53	40	27
C7	67	50	33

Tabla 7. Dimensiones de la pieza de calibración de los parámetros U.

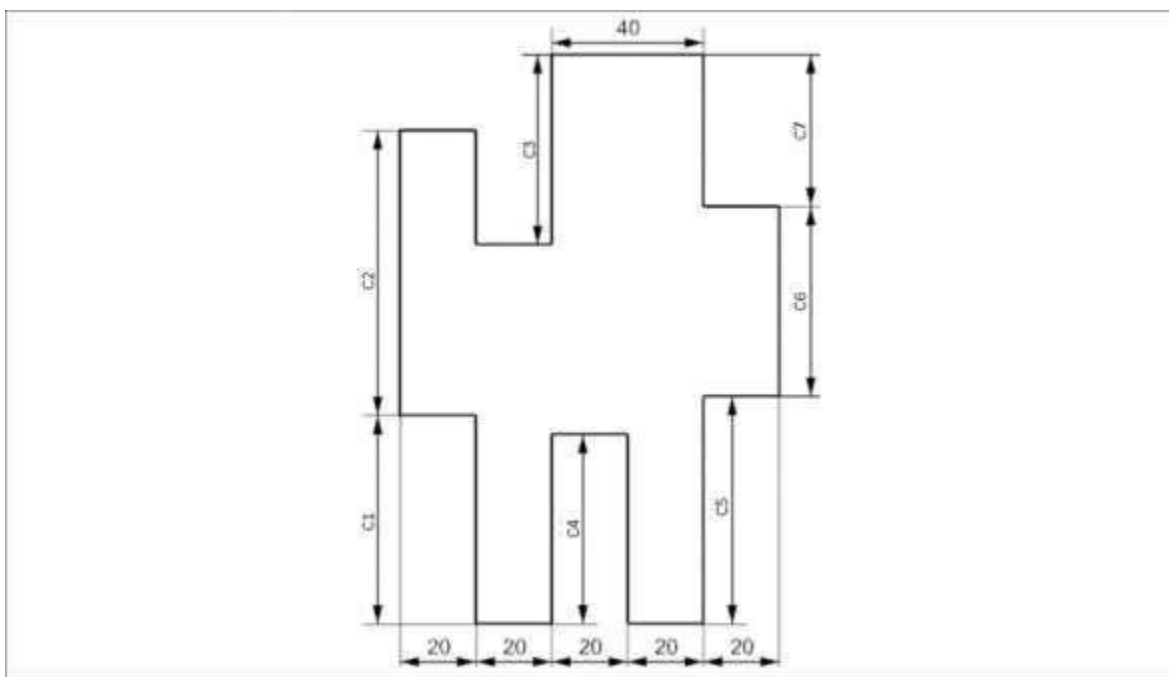


Figura 24. Geometría de la pieza para la obtención de los parámetros U.

CONCLUSIÓN.

Mediante la técnica de corte por hilo se puede producir en un solo proceso el producto final, así el plazo de entrega del producto puede ser acortado extremadamente, comparado con el sistema tradicional que se sirve de las máquinas convencionales de arranque de viruta.

En la mayor parte de las aplicaciones consideradas, la electroerosión por hilo permite una reducción de costos de fabricación entre el 30 y el 60% en comparación con procedimientos convencionales.

La electroerosión por hilo presenta, en relación con los métodos convencionales, ventajas en las áreas de concepción de las piezas, preparación del trabajo y mecanizado. Por otra parte, su flexibilidad y las posibilidades que ofrece en cuanto a una integración del trabajo, desde la concepción del mismo hasta la fabricación final, garantizan una organización y resultados muy superiores a los métodos convencionales.

REFERENCIAS.

Bibliografía

3D CadPortal. (s.f.). *MASTERCAM*. UU.EE.: 3D CadPortal.

Engineering Industries eXcellence. (s.f.). *Control numérico directo (DNC)*. Engineering Industries eXcellence.

GEMAK CNC MACHINING SERVICES. (s.f.). *¿Qué es la Programación CNC?* GEMAK CNC MACHINING SERVICES.

GMAK Servicios de maquinado CNC. (2020). *Todo sobre Erosionado con Hilo y Penetración (EDM)*. GMAK Servicios de maquinado CNC.

INDUSTRIAS LOHER. (s.f.). *Mecanizado por descarga eléctrica (EDM)*. INDUSTRIAS LOHER.

Interempresas Media, S.L.U. (s.f.). *Tecnología de la programación: el CAD/CAM*. Interempresas Media, S.L.U.

K+S Services. (2023). *Controladores CNC*. K+S Services.

NEXTTEC MACHINERY. (Mayo 2021). *Ventajas del EDM Electroerosión por Hilo o Mecanizado*. GRUPO HI-TECH.

ANEXOS.

Presentaciones de Foamglas

FOAMGLAS® Insulation

Distributor Price List

FOAMGLAS® ONE™ Insulation Block



Small Format – 18" x 24" (ASTM Grade 6)

Comments: FOAMGLAS® ONE™ Block will be invoiced at board foot price.

Metric sizes available upon request.

All packages are stretch-wrapped on pallets unless otherwise requested.

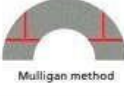
Additional quantities may be added to fill the truck.

PART CODES	STANDARD BLOCK SIZE	SHRINK WRAPPED	
		PRICE PER BOARD FOOT	PRICE PER SQUARE FOOT
135113	1½" x 18" x 24"	\$1.40	\$2.10
135114	2" x 18" x 24"	\$1.40	\$2.80
125115	2½" x 18" x 24"	\$1.40	\$3.50
135116	3" x 18" x 24"	\$1.40	\$4.20
135117	3½" x 18" x 24"	\$1.40	\$4.90
155118	4" x 18" x 24"	\$1.40	\$5.60
145119	4½" x 18" x 24"	\$1.40	\$6.30
135121	5" x 18" x 24"	\$1.40	\$7.00
115122	5½" x 18" x 24"	\$1.40	\$7.70
115123	6" x 18" x 24"	\$1.40	\$8.40
135123	6½" x 18" x 24"	\$1.40	\$9.10
135122	7" x 18" x 24"	\$1.40	\$9.80

PACKAGING INFORMATION

STANDARD BLOCK SIZE	SQUARE FEET PER PACKAGE	BOARD FEET PER PACKAGE	APPROX. WEIGHT PER PACKAGE (lb.)	PACKAGES PER PALLET	PALLETS PER 53' TRUCK	PIECES PER PACKAGE
1½" x 18" x 24"	48	72	44	20	24	16
2" x 18" x 24"	36	72	44	20	24	12
2½" x 18" x 24"	27	67.5	42	20	26	9
3" x 18" x 24"	24	72	44	20	24	8
3½" x 18" x 24"	18	63	39	20	28	6
4" x 18" x 24"	15	60	37	20	30	5
4½" x 18" x 24"	15	67.5	42	20	26	5
5" x 18" x 24"	12	60	37	20	30	4
5½" x 18" x 24"	12	66	41	20	26	4
6" x 18" x 24"	12	72	44	20	24	4
6½" x 18" x 24"	9	58.5	36	20	30	3
7" x 18" x 24"	9	63	39	20	28	3

Tabla de segmentación de medias cañas

		PIPE SIZE	PROFILE	ACCEPTABLE JOINTS	PROFILE	BOND OR FABRICATION JOINTS	THROUGH JOINTS
STANDARD PROFILE		NPS ≤ 6 in. (OD ≤ 168.3 mm)		 Preferred	PIPE SECTION HALF PSH	MAX 1 JOINT PER HALF SECTION*	NONE
		6 in. < NPS ≤ 10 in. (168.3 mm < OD ≤ 273 mm)		 Preferred	PIPE SECTION HALF PSH	MAX 3 JOINTS PER HALF SECTION*	
APPLICATION DEPENDENT		10 in. < NPS ≤ 24 in. (273 mm < OD ≤ 609.6 mm)			PIPE SECTION QUARTER PSQ**	MAX 2 JOINTS PER QUARTER SECTION	MAX 2 JOINTS PER QUARTER SECTION
		10 in. < NPS < 18 in. (273 mm < OD < 457 mm)		 Segmented method Mulligan method	PIPE SECTION HALF PSH	MAX 3 JOINTS PER HALF SECTION	MAX 2 JOINTS PER HALF SECTION
		18 in. ≤ NPS ≤ 24 in. (457 mm ≤ OD ≤ 609.6 mm)		 Mulligan method	PIPE SECTION HALF PSH	MAX 4 JOINTS PER HALF SECTION	MAX 2 JOINTS PER HALF SECTION
SEGMENTAL PROFILE		24 in. < NPS ≤ 36 in. (609.6 mm < OD ≤ 914.4 mm)		 ← W ≥ 8 in. (200 mm) → All segments equal size, W, to make complete ring	CURVED SIDEWALL PIPE SEGMENTS PSG	MAX 1 JOINT PER SEGMENT	NONE
LARGE ELEMENT PROFILE					PIPE SECTION QUARTER PSQ	MAX 4 JOINTS PER QUARTER SECTION	MAX 4 JOINTS PER QUARTER SECTION