

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



CONVERSIÓN DE LA OPERACIÓN DE FRESADO
EN EQUIPO MULTIPROPÓSITO A CONTROL
NUMÉRICO COMPUTARIZADO.

VALERIA FERNANDA LÓPEZ OSORIO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
MECÁNICA

PROFESOR GUÍA: DR. ING. SHEILA LASCANO

PROFESOR CORREFERENTE: MARIO VILLA

Noviembre 2023

Agradecimientos

Luego de un proceso muy extenso, me gustaría agradecer a todas las personas que me acompañaron en esta ardua tarea difícil de afrontar y darle punto final.

Inicialmente a mis profesores; profesora guía Sheila Lascano, por su eterna paciencia, por confiar en que si podía y darme las herramientas para hacerlo. Profesor Claudio Aravena, profesor de taller que siempre me dio palabras de ánimo, dispuesto a ayudarme en lo que necesitara. Profesor Mario Villa, por darse el tiempo de responder todas mis dudas dentro del tema por guiarme siempre buscando el mejor resultado. También mencionar al profesor, Jaime Núñez del taller metalmecánico por su apoyo constante y los demás profesores que tuve dentro de mis años como universitaria que aportaron con sus conocimientos para desarrollarme tanto como profesional y persona.

A mis amistades universitarias, compañeros de carrera, amigas del colegio, que me ayudaron tanto con apoyo emocional como académico, por sus palabras de contención y consejos para seguir adelante.

Agradecer también al equipo de voleibol, rama de la que formé parte y que por muchos años fue mi lugar de distracción y recreación, un equipo en donde pude liberar el estrés y tensión que constantemente se tiene en la universidad. Fue un espacio en el que aprendí mucho y donde construí grandes amistades

Mencionar a mi psicólogo, Alfonso, que, gracias a su ayuda y motivación, me dio el impulso que necesitaba para enfrentar mis miedos, retomar el proyecto, ser firme y no decaer en el proceso.

Finalmente, y más importante a mis padres, hermanos, abuelos, tíos y familia en general. Mi más profundo agradecimiento, porque me han dado todas las herramientas para ser quien soy, me han dado su apoyo incondicional en toda instancia, me facilitaron el espacio y tiempo para superar mis dificultades en todo momento, tanto en los buenos y más aún en los tiempos difíciles.

Dedicatoria

Mamá y Papá

En este momento tan especial, en el que termina finalmente mi proyecto de título, quiero dedicarles este logro con todo mi cariño y gratitud.

A lo largo de mi vida, ustedes han sido mi inspiración y mi mayor apoyo. Su amor incondicional, paciencia y constante ánimo me han guiado en este arduo camino hacia la culminación de mis estudios.

Cada paso que he dado en esta etapa de mi educación ha sido posible gracias a su sacrificio y dedicación. Han sido modelos de esfuerzo y perseverancia, y he aprendido de ustedes la importancia del compromiso y la pasión en la búsqueda de mis metas.

Este logro no solo es mío, sino también de ustedes. Mi trabajo de titulación es un tributo a su amor, sacrificio y valores que me han inculcado a lo largo de los años.

Con esta dedicación, quiero expresar mi profundo agradecimiento por su infinito apoyo y amor. Mi logro es su logro, y este título es un testimonio de nuestra unidad como familia.

Les dedico este trabajo de titulación con todo mi cariño y admiración. Espero que estén tan orgullosos de este hito como lo estoy yo, y quiero que sepan que su amor y apoyo siempre serán mi mayor fuente de fortaleza.

Les agradezco de corazón por estar a mi lado en este viaje, por creer en mí y por ser los padres maravillosos que son. Los quiero infinitamente y estoy ansiosa por compartir con ustedes los éxitos que nos depara el futuro.

Con amor y gratitud,

Valeria

Resumen

Este trabajo se enfoca en la transformación de la operación de fresado manual de una máquina multipropósito que combina las funciones de taladro, fresadora y torno a una máquina a control numérico computarizado. Esto es específico para un entorno académico y la fabricación de piezas en el laboratorio de manufactura avanzada del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

El desarrollo de este proyecto comienza con un análisis detallado de las fresadoras, el proceso de fresado y el control numérico computarizado. Se destacan los parámetros y variables claves relacionados con estas áreas. A continuación, se procede con una ingeniería inversa al equipo a convertir, desglosando sus componentes y explorando alternativas. Se propone un rediseño que incluye una lista detallada de los tipos de componentes necesarios para la conversión, especificando el tipo de componente y los objetivos necesarios para su selección.

En el proceso de incorporación de estos componentes, se establecen y desarrollan criterios de diseño para los adaptadores. Estos criterios tienen en cuenta aspectos como la propuesta de montaje, las necesidades específicas de cada componente y las restricciones asociadas a su funcionamiento tanto de forma individual como en conjunto.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos durante la fabricación e instalación de los componentes seleccionados y diseñados. Se describen los procesos de construcción, montaje, configuración y pruebas de la máquina convertida. El trabajo concluye con el desarrollo de un manual de usuario para que los futuros estudiantes sean capaces de utilizar el equipo sin inconvenientes y estén más cercanos al mundo del CNC

Abstract

This work focuses on the transformation of the manual milling operation of a multipurpose machine that combines the functions of a drill, mill, and lathe into a computer numerical control (CNC) machine. This is specifically intended for an academic environment and the fabrication of parts in the advanced manufacturing laboratory of the Department of Mechanical Engineering at the Universidad Técnica Federico Santa María.

The development of this project begins with a detailed analysis of milling machines, the milling process, and computer numerical control (CNC). Key parameters and variables related to these areas are highlighted. Subsequently, a reverse engineering process is applied to the machine to be converted. This involves dissecting its components and exploring alternative solutions. A redesign is proposed, including a detailed list of the types of components required for the conversion, specifying the type of component and the objectives necessary for its selection.

In the process of incorporating these components, design criteria are established and developed for the adapters. These criteria take into account aspects such as the mounting proposal, the specific requirements of each component, and the constraints associated with their operation, both individually and collectively.

Finally, the results obtained during the manufacturing and installation of the selected and designed components are presented. The construction, assembly, configuration, and testing processes of the converted machine are described. The work concludes with the development of a user manual to ensure that future students can use the equipment without difficulty, thus bringing them closer to the world of CNC machining.

Tabla de contenido

Agradecimientos	I
Dedicatoria	II
Resumen	III
Abstract	IV
Tabla de contenido	V
Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XIV
1. Introducción	XVI
1.1. Definición del problema.....	XVI
2. Objetivos	XVII
2.1. Objetivo general	XVII
2.2. Objetivos específicos.....	XVII
3. Capítulo 1. Marco Teórico	1
3.1. Proceso de fresado [1]	1
3.1.1. Maquinas fresadoras [2]	1
3.1.2. Tipos de operaciones de fresado [3]	5
3.1.3. Herramientas para el mecanizado [4]	8
3.1.4. Parámetros de corte en fresado [7]	15
3.2. Materiales para mecanizar [8]	17
3.2.1. Metales	17
3.2.2. Plásticos.....	18
3.2.3. Maderas	20
3.3. Manual de Conversión Equipo manual a CNC [8].....	21
3.3.1. Levantamiento de datos.....	21
3.3.2. Selección de componentes	21
3.3.3. Diseño de adaptadores.....	23
3.3.4. Estudio de prefactibilidad.....	23
3.3.5. Construcción e incorporación de componentes.....	23
3.3.6. Configuración de electrónica y software para el propósito	23
3.3.7. Pruebas y marcha blanca de la conversión	23
3.4. Control numérico computarizado.....	24
3.4.1. Componentes de un sistema CN [10]	24
3.4.2. Sistema de coordenadas y control de movimientos [10]	25

3.4.3.	Análisis de los sistemas de posicionamiento [10]	27
3.4.4.	Precisión de posicionamiento [10]	32
3.4.5.	Programa del control numérico [10]	35
3.4.6.	Aplicaciones del control numérico.....	38
3.5.	Control numérico en máquinas fresadoras	39
3.5.1.	Aplicación de CAD/CAM en máquinas fresadoras [11].....	39
3.5.2.	Parámetros de corte en fresado CNC [11].....	41
3.5.3.	Operación fresado frontal en CNC [11]	46
3.5.4.	Herramientas de Corte [11]	53
3.6.	Componentes para máquinas CNC [8].....	55
4.	Capítulo 2. Propuesta y Selección de componentes	57
4.1.	Equipo por convertir.....	57
4.1.1.	Equipo multipropósito GRÜNDER HQ-500 [8].....	57
4.2.	Estado Actual	59
4.3.	Propuesta de rediseño y mejoras.	63
4.3.1.	Ingeniería inversa	64
4.3.2.	Explosionado del sistema de alimentación de la fresa	65
4.4.	Lista de componentes	69
4.4.1.	Parámetros para componentes [8]	73
4.5.	Selección de detalle.....	78
4.5.1.	Propuesta de montaje	78
4.5.2.	Diagramas de cuerpo libre.....	80
4.5.3.	Equipo de procesamiento	87
4.5.4.	Unidad de control.....	90
4.5.5.	Programa de piezas.....	95
5.	Capítulo 3. Instalación, montaje y puesta en marcha.	98
5.1.	Diseño de adaptadores.....	98
5.1.1.	Eje extensor	98
5.2.	Componentes comerciales.....	100
5.2.1.	Soporte motor.....	100
5.3.	Caja Hardware.....	101
5.3.1.	Diseño propuesto.....	103
5.4.	Estudio de prefactibilidad técnica	105
5.5.	Estudio de prefactibilidad económica	105
5.6.	Implementación.....	106

5.6.1.	Construcción	106
5.6.1.1.	Construcción de adaptadores.....	106
5.6.1.2.	Modificaciones en el equipo.....	108
5.6.2.	Montaje de componentes.....	109
5.6.3.	Hardware del dispositivo.....	111
5.6.3.1.	Cableado placa controladora	113
5.6.3.2.	Controlador del motor	114
5.7.	Resultados de operación.....	117
5.7.1.	Preparación del trabajo.....	117
5.7.2.	Pruebas en vacío.....	119
5.7.3.	Mecanizado en piezas de trabajo.....	120
5.7.4.	Capacidades finales y observaciones	124
6.	Capítulo 4: Manual de Usuario	126
6.1.	Instalación e inicio del software Mach3.....	126
6.2.	Configuración de Software Mach3	128
6.2.1.	Native units	128
6.2.2.	Ports and pins	128
6.2.3.	Motor tuning.....	132
6.2.4.	Settings.....	134
6.2.5.	Creación código G mediante CAM	135
6.2.6.	Load G-code.....	137
6.3.	Configuración velocidad husillo	139
7.	Conclusiones	140
8.	Recomendaciones.....	144
	Anexos.....	145
A.	Información de los componentes [8].....	145
A1	Motores paso a paso	145
A2	Placa controladora de sistema	146
A3	Controladores de motores.....	147
A4	Fuente de poder de voltaje fijo	149
A5	Software CAD/CAM.....	150
A6	Mach3.....	152
B.	Selección pesos ponderados [8]	153
B1	Equipo de procesamiento	153
B2	Unidad de control	153

B3	Programa de piezas.....	154
C.	Recomendaciones de parámetros de corte.....	154
D.	Cálculos.....	156
D1	Calculo avance cremallera por giro de sinfín.....	156
D2	Avance por pulso.....	157
E.	Planos	158
E1	Plano eje extensor.....	158
F.	Recomendaciones de RPM para fresas enterizas.	159
F1	Afinado.....	159
F2	Desbastado	160
	Referencias.....	161

Lista de Figuras

Figura 1: Dos tipos básicos de máquina fresadora de codo y columna: a) horizontal y b) vertical. [2]	2
Figura 2: Tipos especiales de máquinas fresadoras de codo y columna: a) universal y b) tipo corredera. [2]	3
Figura 3: Máquina fresadora tipo cama simplex de husillo horizontal. [2]	3
Figura 4: Tipos de fresado, a) fresado periférico, b) fresado frontal [3]	5
Figura 5: Tipos de fresado periférico: a) fresado de placa, b) ranurado, c) fresado lateral y d) fresado paralelo simultáneo. [3]	5
Figura 6: Formas de fresado a) ascendente y b) descendente [3]	6
Figura 7: Fresado frontal: a) fresado frontal convencional, b) fresado frontal parcial, c) fresado terminal, d) fresado de perfiles, e) fresado de cavidades y f) fresado de contorno superficial. [3]	7
Figura 8: Seis tipos de operaciones de mecanizado mediante fresado. A partir de ellas se selecciona la geometría de la herramienta de corte. [6]	13
Figura 9: Diámetros de la herramienta de corte: a) para diferentes geometrías de fresa, b) punto real donde se mide el diámetro de la herramienta [5]	14
Figura 10: Fresado frontal en el que se muestran las distancias de aproximación y de recorrido adicional para dos casos: a) cuando el fresador está centrado sobre la pieza de trabajo y b) cuando la herramienta de corte se está desplazado hacia un lado del trabajo. [3]	16
Figura 11: Tipos de aceros según norma ISO para el mecanizado. [5]	17
Figura 12: Diagrama de flujo de selección de componentes para la conversión. [8]	22
Figura 13: Sistema de coordenadas que se usa en el control numérico: a) para trabajo plano y prismático y b) para trabajo rotatorio. [10]	25
Figura 14: Posicionamiento absoluto contra posicionamiento incremental. En este momento la cabeza de trabajo está en el punto (2, 3) y se moverá al punto (6, 8). En el posicionamiento absoluto, el movimiento se especifica mediante $x = 6$, $y = 8$; mientras que, en el posicionamiento incremental, el movimiento se especifica mediante $x = 4$, $y = 5$. [10]	27
Figura 15: Arreglo de motor y tornillo guía en un sistema de posicionamiento por CN. [10]	28
Figura 16: Dos tipos de movimientos bajo CN: a) de ciclo abierto y b) de ciclo cerrado. [10]	28
Figura 17: Codificador óptico a) aparato y b) pulsos emitidos para medir la rotación del disco [10]	31
Figura 18: Una parte del eje del sistema de posicionamiento, con definición de la resolución de control, la exactitud y la repetibilidad. [10]	34

Figura 19: Pieza obtenida por modelado 3D en un software CAD. La mitad izquierda corresponde al modelo sin renderizar y la mitad derecha corresponde al modelo renderizado. [11].....	39
Figura 20: Parámetros de avance por diente (fz) y avance por vuelta (fn) de una fresa de corte. [12]	43
Figura 21: Parámetros de ancho de corte (ae) y profundidad de corte (ap). [12].....	43
Figura 22: Espesor máximo (hex) y espesor medio de viruta (hm), obtenida mediante fresado periférico. [12].....	44
Figura 23: Fresado en escuadra [12]	46
Figura 24 : Fresado de planeado. [12].....	47
Figura 25: Fresado de ranuras. [12].....	48
Figura 26: Fresado de ranuras para: a) Ranuras de ancho inferior a $2 \times D_c$, y b) ranuras de ancho superior a $2 \times D_c$. [12].....	49
Figura 27: Fresado axial en plunge. [12].....	50
Figura 28: Fresado circular exterior. [12]	51
Figura 29: Fresado circular interior. [12]	52
Figura 30: Fresado de cavidades. [12].....	52
Figura 31: Geometría de una fresa enteriza para fresado de ranuras. [13].....	55
Figura 32: Propuesta de acople de motores mediante correas de sincronización, (A) Acople eje Y (B) acople eje X, (las correas sincronizadoras y los adaptadores para el montaje de cada motor no se encuentran mostradas en las imágenes) [8].....	60
Figura 33: a) Diseño de soporte de motor NEMA 23 para el eje Y. b) Diseño de soporte de motor NEMA 34 para el eje X. [8]	61
Figura 34: Diseño de sistema anti-retroceso para el eje Y, (A) vista en isométrico, (B) vista superior. [8]	61
Figura 35: Sistema anti-retroceso del eje X, (A) Vista en isométrico, (B) Vista frontal. [8].....	62
Figura 36: Muestra como quedó el torno luego de la implementación que se le hizo con anterioridad. [8]	62
Figura 37: Explosionado del ensamblaje del sistema de alimentación del cabezal de fresado/taladrado. [14]	66
Figura 38: Explosionado del eje cremallera del cabezal de fresado/taladrado. [14]	68
Figura 39: Mapa conceptual que muestra los grupos que forman parte de un equipo CNC con sus respectivos elementos.....	70

Figura 40: Imágenes del cabezal de la fresadora desde distintos puntos de vista, sin modificaciones. a) Muestra la palanca del avance macro b) Imagen desde otra perspectiva donde se puede ver la manilla (negra) de avance fino.	79
Figura 41: Modelado del equipo multipropósito en inventor con la propuesta para la automatización del eje vertical, vista frontal.	79
Figura 42: Comparación del a) sistema de alimentación antes de la propuesta, b) diseño en inventor de la propuesta de montaje	80
Figura 43: sistema de alimentación de la fresa compuesta por el sinfín (que es el que está conectado al avance micro del eje Z), la corona, piñón y cremallera.....	81
Figura 44: a) Fuerzas presentes en la cremallera b) Fuerzas presentes en el conjunto piñón-corona c) Fuerzas presentes en el componente sinfín con el toque incógnito.....	84
Figura 45: Motor stepper bipolar NEMA 23 (2.7V, 3A, 2N.m, 1.8°) [15]	88
Figura 46: Acople flexible de abrazadera. [15].....	89
Figura 47: Placa controladora RNR MACH3. [15].....	91
Figura 48: TB6600, driver motor paso a paso 3.5A con caja de protección. [15].....	92
Figura 49: Fuente de poder switching (Meanwell) 36V 5.9A 200W. [15]	93
Figura 50: Botón de parada de emergencia. [15]	95
Figura 51: Interfaz gráfica software de control para fresadoras CNC, Mach3Mill.....	96
Figura 52: a) Programa Inventor en su versión del año 2023, desarrollado por Autodesk. B) Inventor CAM, extensión del programa inventor que desarrolla el código G.....	97
Figura 53: Diseño del eje extensor desarrollado en el programa Inventor.....	99
Figura 54: Diseño de caja contenedora del sistema sinfín-corona, mostrando el ajuste del eje extensor y el acople flexible	100
Figura 55: Placa Montaje Motor Nema 23 [15]	101
Figura 56: Diseño propuesto de la distribución de los componentes en el proyecto pasado, desde dos perspectivas. [8]	102
Figura 57: Resultado del ensamblaje de la caja hardware del proceso anterior a) placa controladora dentro de caja de cartón. b) con placa controladora a la vista.....	102
Figura 58: Diseño propuesto en este proyecto para la caja hardware incluyendo en su interior los nuevos elementos, desde distintas perspectivas.	104
Figura 59: Eje extensor conectado al acople flexible y a su vez al motor, con el fin de comprobar el ajuste	107
Figura 60: Eje extensor probando el ajuste con el sinfín, incorporando el pin elástico de 5[mm].a) montaje del adaptador sin el pin elástico. b) montaje ahora incluido el pin elástico.	107

Figura 61: Paso a paso de las modificaciones al cabezal de la fresadora con el fin de montar la placa y el motor paso a paso. a) Paso 1; marcar los puntos para las perforaciones. b) Paso 2, perforaciones realizadas con taladro y broca 4,2 mm, por el profesor Claudio Aravena. c) Paso 3, realizando el hilo con macho 5. d) Perforaciones ya listas con sus respectivos hilos.....	108
Figura 62: Montaje del eje extensor, acople flexible y motor PAP en el cabezal de la fresadora...	110
Figura 63: Vista lateral de la placa del motor y el motor ensamblados en el cabezal.	110
Figura 64: Vista del ensamblaje finalizado, con la respectiva palanca del movimiento macro.	111
Figura 65: Implementacion de trazo de madera para incorporar la placa controladora a la pared de la caja hardware a) posisiomaniemto de el trpzo de madera b) la placa ya incorporadara.	112
Figura 66: Resultado final del monatje de la caja hardware.	113
Figura 67: Cableado de la RRN motion controller indicado por el fabricante. [15]	114
Figura 68: Conexiones del driver, indicado por el fabricante. [15].....	115
Figura 69: curva de torque vs RPM y frecuencia del stepper motor Nema 23.....	117
Figura 70: Elementos utilizados para el montaje del material.	118
Figura 71: Pieza de madera ya montada con los elementos usados como prensa.	118
Figura 72: diseño original que se mecaniza en las piezas de trabajo con sus respectivas dimensiones en milímetros.....	121
Figura 73: Pruebas de mecanizado simple en distintos materiales a distintas revoluciones por minuto.	122
Figura 74: mediciones de las perforaciones circulades de diámetro 10 [mm]. a) medición de la longitud de perforación de manera horizontal. b) medición de la longitud de perforación de manera vertical (posición de la imagen esta rotada en 90 para que se aprecie la medición con el pie de metro)	124
Figura 75: Ventana de reconocimiento de la placa controladora y máquinas conectadas al computador.	126
Figura 76: Ventanas emergentes al seleccionar Mach 3 Loader.a) Ventana de inicio, b) Ventana para crear un nuevo perfil de trabajo.....	127
Figura 77: Interfaz inicial de trabajo de Mach3	127
Figura 78: Selección de configuración de unidades de medida de trabajo a) Selección del menú de configuración, b) Selección de la unidad de trabajo.	128
Figura 79: a) Acceso a configuración Mach3 Mill b) Parámetros básicos de configuración Mach3 Mill.....	129
Figura 80: Configuración de salidas al motor.	130
Figura 81: Configuración de señales de entrada.	130

Figura 82: Configuración señales de entrada, parte dos.....	131
Figura 83: Pestaña de opciones del husillo.	131
Figura 84: Pestaña para configurar Mill options.	132
Figura 85: Pestaña config>Motor tuning	133
Figura 86: Pestaña configuración motor eje Z	133
Figura 87: Proceso de calibración eje Z, mediante reloj comparador y función Settings de Mach3	134
Figura 88: Cuadros de diálogo en Mach3 Mill para calibración sistemas de posicionamiento, a) Pestaña para seleccionar el eje a calibrar, b) Distancia de movimiento de prueba, c) Distancia de movimiento real	135
Figura 89: Pestaña donde se puede encontrar la herramienta CAM de Inventor.	136
Figura 90 a) pestaña del programa mach3 mill para cargar el código G b) pestaña para seleccionar el código G que se quiere mecanizar.....	137
Figura 91: ventana del programa mach3 luego de cargar archivo.....	138
Figura 92 a) MPG MODE donde se pueden mover los ejes a libertad mediante los Button Jog, b) Ventana del programa mach3 donde se puede leer el código G ya cargado, c) Posicionamiento de cada eje medido en mm.....	138
Figura 93: Placa controladora, a) placa por puerto paralelo, b) placa por puerto USB. [8]	147
Figura 94: Controladores de motores, a) regulado mediante potenciómetro, b) regulado por interruptores. [8].....	148
Figura 95: Placa controladora con controladores de motores incluidos. [8]	148
Figura 96: Tipos de fuentes de poder existentes en el mercado a) transformador de voltaje fijo, b) fuente de poder regulable, c) fuente de poder de voltaje fijo. [8]	149
Figura 97: Cinta de opciones de comandos Autodesk Inventor HSM. [8].....	151
Figura 98: Plano eje extensor.....	158

Lista de Tablas

Tabla 1: Recomendaciones de materiales para herramientas de corte en fresado según el tipo de material a mecanizar. [5].....	11
Tabla 2. Propiedades de los tipos de aceros según norma ISO [8].....	17
Tabla 3: Recomendaciones de mecanizado de acuerdo con el catálogo de Plastigen para distintos tipos de plásticos mecanizables. [9].....	19
Tabla 4: Características mecánicas del MDF. [8]	20
Tabla 5: Especificaciones para Torneado HQ 500. [14]	57
Tabla 6: Especificaciones para Fresado y Taladrado HQ 500 [14].....	58
Tabla 7: Especificaciones generales HQ 500 [14]	58
Tabla 8: Velocidad de del husillo para las operaciones de Fresado y taladrado, en RPM. [14]	59
Tabla 9: Revoluciones por minuto (RPM) del cabezal de torno para las distintas configuraciones de las correas de transmisión. [14].....	59
Tabla 10 Listado de piezas correspondiente a milling and drilling feed, de la Figura 37. [14]	67
Tabla 11: Listado de componentes que forman la cremallera. [14]	69
Tabla 12: Parámetros para en el cálculo del par torsional requerido en el motor de accionamiento eje Z.....	87
Tabla 13: Especificaciones del motor. [15].....	88
Tabla 14: Especificaciones físicas del motor. [15].....	88
Tabla 15: Conexiones del motor NEMA 23. [15]	89
Tabla 16: especificaciones físicas de acople flexible. [15]	90
Tabla 17: Características físicas y electrónicas de la placa controladora. [8]	91
Tabla 18: Especificaciones físicas y eléctricas driver TB6600. [15]	92
Tabla 19: Características físicas y eléctricas fuente de poder. [15]	93
Tabla 20: requisitos necesarios para que los programas CAD/CAM sean compatibles con el computador. [16]	94
Tabla 21: Especificaciones técnicas botón parada de emergencia. [15]	95
Tabla 22: Especificaciones físicas placa [15].....	101
Tabla 23: Compras de componentes mecánicos, eléctricos y electrónico.....	105
Tabla 24 a) Configuración pasos por revolución (ns) en motor de pasos, b) Configuración corriente de salida del driver.	116
Tabla 25: Código G de prueba en eje Z con respectivo significado.....	119
Tabla 26: Código G de prueba en ejes X e Y con respectivo significado.	120

Tabla 27: Dimensiones tomadas a cada pieza mecanizada después de finalizar el trabajo, con el fin de evaluar su precisión.	122
Tabla 28: Pociones de las correas en las poleas dependiendo en que RPM se desee trabajar. [14]	139
Tabla 29: Tabla de ponderación de selección de motor. [8]	153
Tabla 30: Tabla de selección tipo de fuente de poder. [8].....	154
Tabla 31: Parámetros de corte en fresado con herramienta enteriza de ranurar de diámetro 6 [mm]. [11].....	156
Tabla 32: RPM de referencia específicas para cada material y respectivo diámetro de fresa, para proceso de afinado.....	159
Tabla 33: RPM de referencia específicas para cada material y respectivo diámetro de fresa, para proceso de desbastado.	160

1. Introducción

La automatización programable mediante Control Numérico Computarizado (CNC) implica que un programa informático que contiene datos codificados controla las operaciones de una parte de la máquina. Estos datos representan el movimiento relativo entre la unidad de procesamiento de información, denominada cabeza de trabajo, y la pieza en la que se trabaja. En la fabricación moderna, este sistema se emplea cada vez más en máquinas herramientas como tornos y fresadoras para la creación de piezas.

Comparado con la operación manual, el CNC presenta varias ventajas. Entre ellas se destaca la capacidad de utilizar software CAD/CAM, que permite la fabricación directa de objetos diseñados, además de ofrecer precisión, repetibilidad, velocidad, calidad, flexibilidad y seguridad, al tiempo que reduce el contacto humano durante la fabricación.

En este contexto, el trabajo de tesis actual se enfoca en la implementación de un sistema CNC para la operación de fresado en un equipo multipropósito. Este equipo se empleará en el Departamento de Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

1.1. Definición del problema

Este equipo multipropósito está situado en las instalaciones del Campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María. Durante un período de desuso, sus componentes se deterioraron, lo que afectó su funcionalidad. Para abordar esta situación, se realizó un mantenimiento exhaustivo y se tomó la decisión de convertir sus procesos a un sistema de control numérico computarizado (CNC).

Esta conversión tiene un gran valor para el campus, ya que muchas actividades académicas y de investigación requieren operaciones específicas que anteriormente debían realizarse en la Casa Central en Valparaíso. Esto implicaba que los estudiantes debían desplazarse para acceder a estas herramientas. El equipo ya había sido intervenido previamente, automatizando la operación de torneado. Sin embargo, aún quedaban pendientes las operaciones de fresado y taladrado.

Como resultado, se sugiere que después de estas intervenciones de automatización, el equipo se instale y utilice en el laboratorio de manufactura avanzada del Departamento de Mecánica. Esto permitirá un acceso más fácil y eficiente para los estudiantes y profesores, mejorando significativamente las capacidades y recursos disponibles en el campus.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar un control numérico computarizado para automatizar la operación de fresado en un equipo multipropósito, para el laboratorio de manufactura avanzada.

2.2. Objetivos específicos

- Estudiar el funcionamiento del equipo multipropósito a convertir y las tecnologías de Control Numérico Computarizado (CNC)
- Especificar y evaluar variables en el proceso de conversión de fresado manual a automático por CNC.
- Definir la tecnología para controlar el equipo.
- Diseñar y seleccionar los componentes estructurales, mecánicos y electrónicos para la fresadora CNC.
- Generar un manual de operación del equipo CNC automatizado.

3. Capítulo 1. Marco Teórico

3.1. Proceso de fresado [1]

El fresado se describe como una técnica de mecanizado en la que una pieza de trabajo se desplaza frente a una herramienta cilíndrica que gira a alta velocidad, poseyendo múltiples filos o bordes cortantes. La característica distintiva del fresado radica en que el eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección de avance, a diferencia del taladrado, donde la herramienta avanza paralela a su propio eje de rotación. La herramienta de corte utilizada en el fresado se llama "fresa" o "cortador de fresadora", y sus filos cortantes son comúnmente conocidos como "dientes".

En la mayoría de los casos, la máquina-herramienta empleada para llevar a cabo esta operación es una fresadora. El fresado es especialmente útil para generar superficies planas, aunque la forma de la pieza final puede variar en función de la trayectoria de la herramienta de corte o la forma de la propia herramienta. Gracias a su versatilidad y alta productividad, el fresado se considera una de las operaciones de mecanizado más ampliamente utilizadas y adaptables.

Es importante destacar que el fresado implica un proceso de corte interrumpido, en el que los dientes de la fresa entran y salen del material durante cada revolución. Este ciclo de entrada y salida interrumpe el proceso de corte y somete a los dientes a un período de fuerza de impacto y cambios térmicos en cada rotación. Por lo tanto, tanto el material de la herramienta como la forma del cortador deben ser diseñados teniendo en cuenta estas condiciones para garantizar un rendimiento óptimo.

Cabe mencionar que no siempre la pieza se mueve respecto de el material a mecanizar, sino que también hay ocasiones y equipos en los que la pieza de trabajo es la que se mueve respecto de la herramienta.

3.1.1. Maquinas fresadoras [2]

Las fresadoras, herramientas fundamentales en el mecanizado, se componen típicamente de una mesa para sujetar y posicionar la pieza de trabajo, y un husillo rotatorio para el cortador. Estas máquinas se clasifican en dos orientaciones principales: horizontales y verticales.

En el caso de las **fresadoras horizontales**, el husillo se encuentra dispuesto de manera horizontal, lo que resulta idóneo para llevar a cabo operaciones como el fresado periférico, ranurado y fresado lateral y paralelo en piezas con una forma aproximadamente cúbica.

Por otro lado, las **fresadoras verticales** cuentan con un husillo dispuesto verticalmente, siendo especialmente adecuadas para el fresado frontal, terminal, el contorneado de superficies y el tallado de matrices en piezas de trabajo relativamente planas.

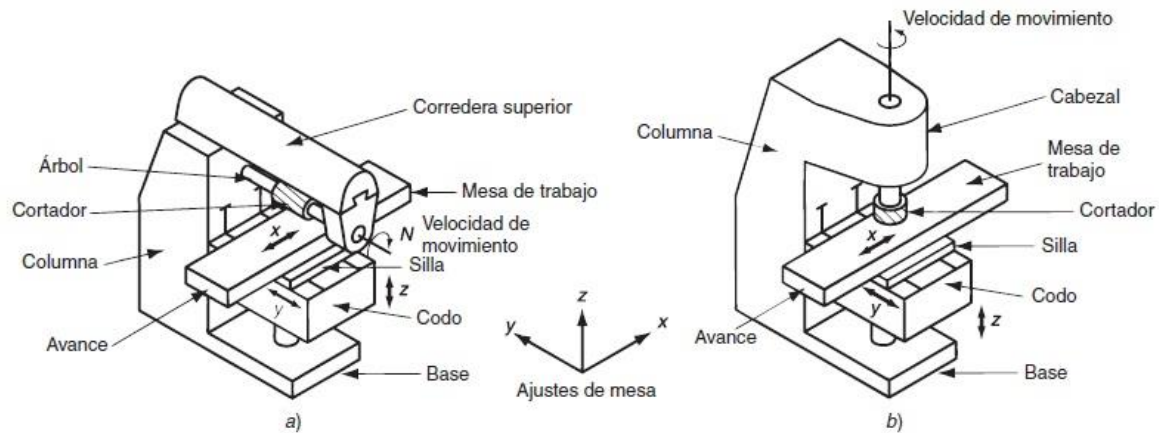


Figura 1: Dos tipos básicos de máquina fresadora de codo y columna: a) horizontal y b) vertical. [2]

Además de esta distinción en la orientación del husillo, las fresadoras se clasifican en varios tipos adicionales:

La **fresadora de codo y columna**, cuyo nombre se origina en sus componentes clave: una columna que sustenta el husillo y un codo que sostiene la mesa de trabajo, se encuentra disponible en configuraciones tanto horizontales como verticales, tal como se muestra en la Figura 1. En su versión horizontal, un árbol (el eje que sostiene el cortador y se acciona mediante el husillo principal) generalmente respalda la fresa, y este árbol, a su vez, suele ser sostenido por un brazo. Por otro lado, en las fresadoras de codo y columna verticales, los cortadores pueden montarse directamente en el husillo principal. Una característica distintiva de estas máquinas radica en la capacidad de su mesa de trabajo para mover la pieza de trabajo en cualquiera de los tres ejes: x, y o z. La mesa de trabajo puede desplazarse en dirección x, la silla puede hacerlo en dirección y, y el codo se eleva o desciende verticalmente para lograr el movimiento z.

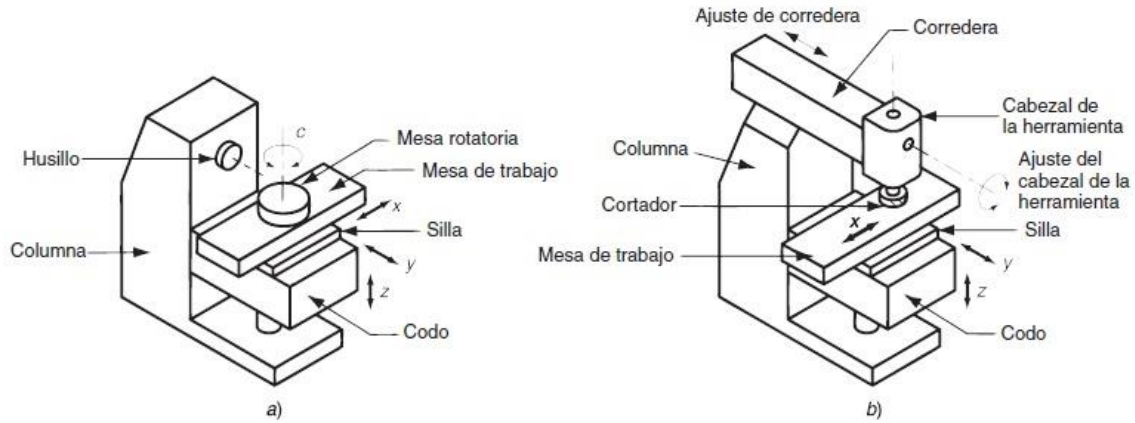


Figura 2: Tipos especiales de máquinas fresadoras de codo y columna: a) universal y b) tipo corredera. [2]

Dos variantes de la máquina de codo y columna:

- **Fresadora universal** Figura 2 a), que permite el giro de la mesa en un plano horizontal, facilitando el fresado de formas helicoidales y angulares.
- **Fresadora con corredera** Figura 2 b), donde el cabezal del husillo se encuentra en una corredera horizontal que puede ajustarse hacia adentro y hacia afuera en la mesa de trabajo para dirigir la fresa hacia el material.

Las **fresadoras tipo bancada** están diseñadas para la producción en masa y se caracterizan por su mayor rigidez, lo que les permite operar a velocidades de avance y profundidades de corte más altas. La mesa de trabajo se encuentra directamente montada en la bancada de la máquina, lo que limita su movimiento longitudinal. Estas máquinas pueden contar con uno, dos o incluso tres husillos para operaciones simultáneas. La construcción característica de las máquinas fresadoras tipo bancada se muestra en la Figura 3.

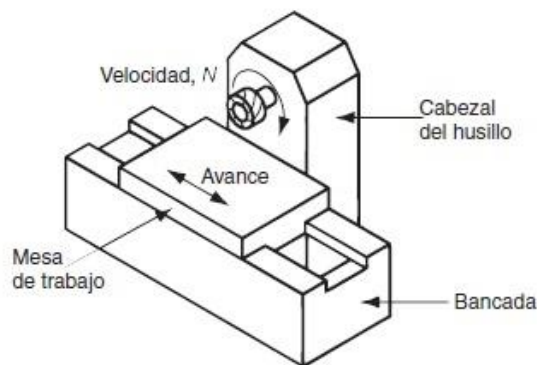


Figura 3: Máquina fresadora tipo cama simplex de husillo horizontal. [2]

Este diseño restringe el desplazamiento longitudinal de la mesa, necesario para mover la pieza frente al cortador. El cortador está montado en un husillo que puede ser ajustado verticalmente a lo largo de la columna de la máquina. Las fresadoras con un solo husillo en la bancada son conocidas como máquinas **simplex**, como se ilustra en la Figura 3, y se encuentran disponibles en configuraciones verticales y horizontales. Las fresadoras **duplex** utilizan dos cabezales de husillo, generalmente ubicados horizontalmente en lados opuestos de la bancada, lo que permite realizar operaciones simultáneas durante el avance de la pieza. Por su parte, las máquinas **triples** incorporan un tercer husillo montado verticalmente en la bancada, lo que incrementa la capacidad de la máquina.

Las **fresadoras tipo cepillo**, aunque se asemejan a un cepillo en términos de apariencia general, están diseñadas para llevar a cabo operaciones de fresado en lugar del cepillado. Suelen ser utilizadas para piezas de gran tamaño y cuentan con cabezales fresadores que siguen una estructura de puente sobre la mesa.

La **fresa trazadora**, conocida también como **fresa perfiladora**, está específicamente diseñada para replicar geometrías irregulares presentes en una plantilla. Una sonda trazadora, controlada manual o automáticamente, sigue la forma de la plantilla, mientras que el cabezal de fresado reproduce la ruta trazada por la sonda para dar forma a la pieza según las especificaciones deseadas. Las máquinas trazadoras se pueden clasificar en dos tipos principales:

- 1) **Trazado x-y**: En este enfoque, la plantilla tiene una forma plana con un contorno que se replica utilizando un control de dos ejes.
- 2) **Trazado x-y-z**: En este caso, la sonda sigue un patrón tridimensional utilizando un control de tres ejes para obtener formas más complejas.

Las fresadoras trazadoras se han usado para crear formas que no pueden ser generadas fácilmente por una acción de avance simple de la pieza de trabajo frente a la fresa. Sus aplicaciones incluyen el maquinado de moldes y troqueles. En años recientes, muchas aplicaciones que se hacían antes en fresas trazadoras se hacen ahora en máquinas fresadoras de control numérico computarizado (CNC).

Las **máquinas fresadoras CNC** (Control Numérico Computarizado) funcionan con datos numéricos en lugar de plantillas físicas. Están especialmente adaptadas para el fresado de perfiles, cavidades, contornos de superficies y operaciones de tallado de matrices, y requieren que el operador realice cambios de fresas y cargue/descargue las piezas de trabajo. [2]

3.1.2. Tipos de operaciones de fresado [3]

Hay dos tipos básicos de operaciones de fresado: fresado periférico y fresado frontal, los que son mostradas en la Figura 4:

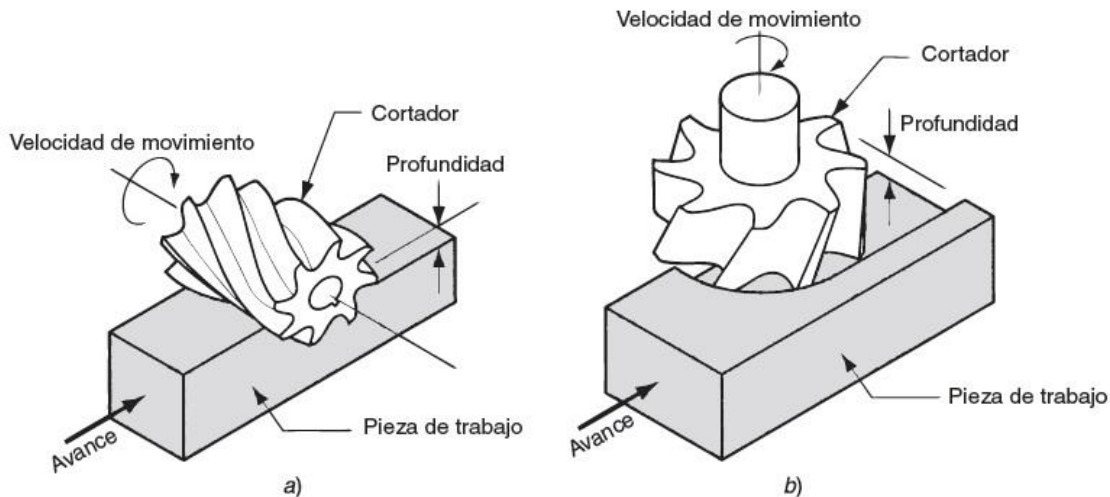


Figura 4: Tipos de fresado, a) fresado periférico, b) fresado frontal [3]

En el contexto del **fresado periférico**, también denominado fresado plano, la orientación del eje de la herramienta es paralela a la superficie que está siendo maquinada. Esta operación se lleva a cabo mediante los bordes cortantes ubicados en la periferia exterior del cortador. El fresado periférico abarca varias modalidades, ilustradas en la Figura 5, que incluyen:

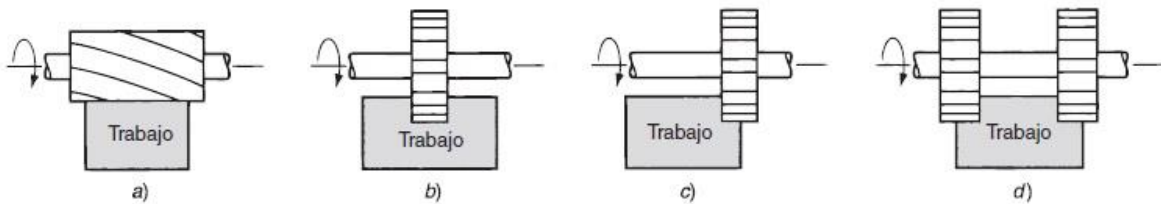


Figura 5: Tipos de fresado periférico: a) fresado de placa, b) ranurado, c) fresado lateral y d) fresado paralelo simultáneo. [3]

- a) **Fresado de placa:** Esta es la forma elemental del fresado periférico, donde el ancho de la fresa se extiende más allá de los límites de la pieza de trabajo en ambos lados.
- b) **Fresado ranurado:** También conocido como fresado de ranuras, se caracteriza por el hecho de que el ancho de la fresa es menor que el ancho de la pieza de trabajo, resultando en la creación de una ranura en la pieza. Cuando la fresa es particularmente delgada, esta operación se emplea para esculpir ranuras estrechas o para dividir una pieza de trabajo en dos, lo cual se denomina fresado aserrado.

- c) **Fresado lateral:** En esta variante, la fresa maquina un costado de la pieza de trabajo.
- d) **Fresado paralelo simultáneo:** Esta modalidad es similar al fresado natural, con la diferencia de que el corte se realiza en ambos lados de la pieza de trabajo de manera simultánea.

En el fresado periférico, existen dos orientaciones opuestas de rotación posibles para la fresa en relación con la pieza de trabajo. Estas orientaciones se conocen como fresado ascendente y fresado descendente, y se representan en la Figura 6. En el fresado ascendente, también llamado fresado convencional, los dientes de la fresa se mueven en dirección contraria al avance mientras cortan la pieza. Esto significa que cortan "contra el avance". Por otro lado, en el fresado descendente, también conocido como fresado de tipo escalamiento, la dirección del movimiento de los dientes de la fresa coincide con la dirección de avance cuando están en contacto con la pieza de trabajo. En este caso, se produce un fresado "con el avance".

La disposición geométrica relativa de estas dos formas de fresado conlleva diferencias en el proceso de corte. En el fresado ascendente, cada diente del cortador comienza a formar una viruta extremadamente delgada que va engrosando a medida que avanza. Por otro lado, en el fresado descendente, cada viruta comienza siendo gruesa y se adelgaza durante el proceso de corte. La longitud de las virutas generadas en el fresado descendente es menor que en el fresado ascendente (en la figura, esta diferencia se ha exagerado para facilitar la comprensión). Esto implica que se requiere menos tiempo para eliminar un volumen determinado de material durante el fresado descendente, lo que a su vez tiende a prolongar la vida útil de la herramienta utilizada en este tipo de fresado.

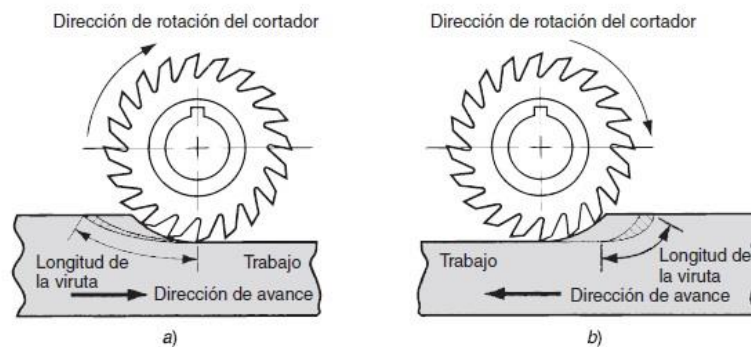


Figura 6: Formas de fresado a) ascendente y b) descendente [3]

La dirección en la que actúa la fuerza de corte es tangencial a la circunferencia de la fresa para los dientes que están en contacto con la pieza de trabajo. En el fresado ascendente, se observa una tendencia a levantar la pieza de trabajo cuando los dientes del cortador se alejan del material. Por el

contrario, en el fresado descendente, la dirección de la fuerza de corte es hacia abajo, lo que tiene como consecuencia que la pieza de trabajo permanezca en contacto con la mesa de la fresadora.

En el **fresado frontal**, el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo, y el proceso de mecanizado se lleva a cabo al cortar los bordes, tanto en el extremo como en la parte exterior de la circunferencia de la fresa. Similar al fresado periférico, el fresado frontal presenta diversas variantes, algunas de las cuales se muestran en la Figura 7:

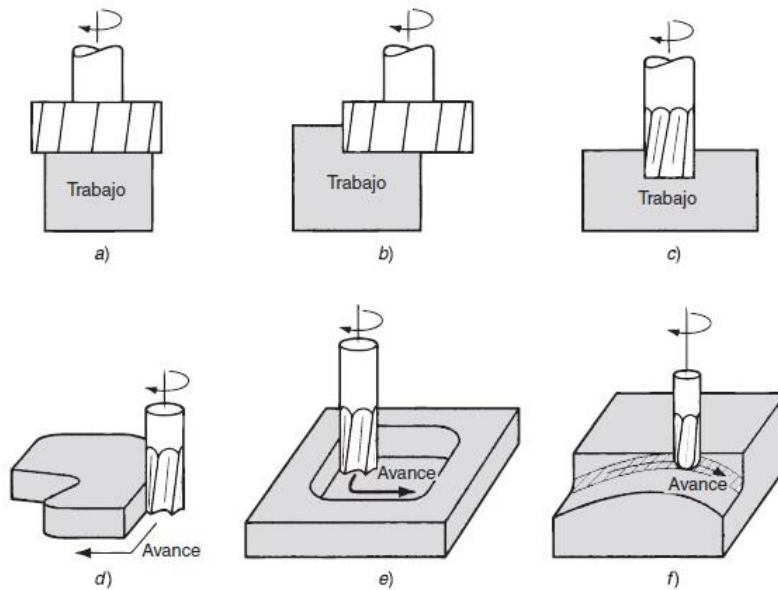


Figura 7: Fresado frontal: a) fresado frontal convencional, b) fresado frontal parcial, c) fresado terminal, d) fresado de perfiles, e) fresado de cavidades y f) fresado de contorno superficial. [3]

- a) El **fresado frontal convencional**, en el cual el diámetro de la fresa supera el ancho de la pieza de trabajo, de manera que la fresa sobresale en ambos lados de la pieza.
- b) El **fresado frontal parcial**, en el que la fresa sobresale de la pieza de trabajo solamente en un lado.
- c) El **fresado terminal**, en el cual el diámetro de la fresa es menor que el ancho de la pieza de trabajo, permitiendo así el corte de una ranura dentro de la pieza.
- d) El **fresado de perfiles**, una variante del fresado terminal en la cual se corta una pieza plana desde su periferia.
- e) El **fresado de cavidades**, otra variante del fresado terminal que se utiliza para mecanizar cavidades poco profundas en piezas planas.
- f) El **fresado de contorno superficial**, en el cual se emplea una fresa con punta de bola en lugar de una fresa cuadrada, y se avanza de manera oscilante en múltiples direcciones a lo largo de una trayectoria curvilínea a intervalos pequeños, con el fin de crear una superficie

tridimensional. Este proceso es fundamental para el maquinado de contornos en moldes y troqueles, y se conoce como tallado o contorneado de troqueles.

3.1.3. Herramientas para el mecanizado [4]

La elección de la calidad y el material de la herramienta de corte es un factor crítico en la planificación de cualquier operación de mecanizado. Garantizar que la herramienta sea adecuada en términos de material y geometría para la pieza de trabajo es esencial para lograr un proceso de mecanizado eficiente y sin complicaciones. La combinación de la forma de la herramienta de corte y su material resulta en diferentes propiedades de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste. Por lo tanto, al seleccionar una herramienta de fresado, se deben tener en cuenta principalmente dos aspectos clave: el material de la herramienta de corte y su geometría.

Material de la herramienta de corte

Por lo general, las herramientas de fresado deben poseer ciertas características específicas en su material, que incluyen:

- Ser lo suficientemente duro para resistir el desgaste durante el fresado y no deformarse.
- Deben ser tenaces, lo que significa que pueden resistir la fractura del núcleo de la herramienta.
- No deben reaccionar químicamente al entrar en contacto con el material de la pieza.
- Deben ser químicamente estables, lo que significa que deben resistir la oxidación y la difusión.
- Deben ser capaces de soportar cambios repentinos de temperatura sin deteriorarse.

Para cumplir con estos requisitos, existen diversos materiales para las herramientas de corte, y la elección del material depende del tipo de material que se va a fresar. Los principales materiales utilizados para herramientas de corte incluyen:

- Acero rápido de alta velocidad o HSS (High Speed Steel).
- Metal duro sin recubrimiento, conocido como HW, que está compuesto principalmente de carburo de tungsteno (WC).
- Metal duro sin recubrimiento (HT), a veces denominado cermet, que contiene carburo de titanio (TiC), nitruros de titanio (TiN) o ambos.
- Metal duro con recubrimiento (HC), que es similar al metal duro sin recubrimiento, pero cuenta con una capa de recubrimiento adicional.

- Cerámica de óxido (CA), compuesta principalmente de óxido de aluminio (Al_2O_3).
- Cerámica mixta (CM), que contiene principalmente óxido de aluminio combinado con otros componentes.
- Cerámica de nitruro (CN), que contiene principalmente nitruro de silicio (Si_3N_4).
- Cerámica con recubrimiento (CN), similar a las cerámicas anteriores, pero con una capa de recubrimiento adicional.
- Diamante policristalino (DP), que es un material de corte extremadamente duro.
- Nitruro de boro cúbico (BN), que también se considera un material de corte superduro.

En entornos industriales, la elección preferida para el fresado de acero suele recaer en herramientas de corte fabricadas a partir de **metal duro**, las cuales son recubiertas con algún tipo de material (HC). Este recubrimiento añade una mayor resistencia mecánica a los filos de corte. El metal duro es un material compuesto que consta de partículas de carburo de tungsteno, representando aproximadamente el 80% de su composición, y un aglutinante con alto contenido de cobalto metálico.

Una alternativa más económica para seleccionar el material de la herramienta es el **acero rápido** de alta velocidad, conocido como HSS (High Speed Steel). Está compuesto por aproximadamente un 0,8% de carbono, un 6% de tungsteno, un 5% de molibdeno, un 4% de cromo, un 2% de vanadio, e hierro. Este material posee una mayor dureza en comparación con otros tipos de acero al carbono y muestra una mayor resistencia a la corrosión. Los elementos aleantes añaden dureza y minimizan la pérdida de dureza durante el mecanizado a altas temperaturas. Esto permite llevar a cabo cortes a velocidades elevadas sin que el filo de la herramienta se vea significativamente afectado. Además, existen recubrimientos disponibles para herramientas de acero rápido, aplicados mediante la técnica de deposición física en estado de vapor (PVD), como el recubrimiento de nitruro de titanio (TiN).

El acero rápido se utiliza principalmente en el mecanizado de aceros inoxidables, ferríticos, martensíticos, aceros fundidos, acero al manganeso, fundiciones aleadas, fundiciones maleables y aceros de fácil mecanización. La temperatura de fusión de las herramientas de acero rápido se sitúa alrededor de los 800°C.

Recubrimientos de herramientas de fresado

Existen dos tipos de revestimientos que se utilizan ampliamente en las herramientas de fresado, abarcando aproximadamente el 80-90% de todos los tipos de herramientas de corte. Estos revestimientos se distinguen por su método de fabricación y la temperatura a la que se aplican. Se conocen como revestimientos CVD y PVD, que se explican a continuación:

1) **Revestimiento CVD:** La sigla CVD proviene del término en inglés "Chemical Vapor Deposition," que significa "deposición química en fase de vapor." Estos revestimientos se crean a través de reacciones químicas a temperaturas que oscilan entre 700 y 1.050°C. Se emplean principalmente en procesos de fabricación donde la resistencia al desgaste de la herramienta es crucial. Algunos de los revestimientos principales son los siguientes:

- Carburo de titanio (TiC): Un revestimiento de una sola capa con un color dorado que fue pionero en su tipo.
- Alúmina Al₂O₃: Químicamente inerte y con baja conductividad térmica, lo que lo hace resistente a la formación de cráteres de desgaste. Actúa como una barrera térmica para mejorar la resistencia a la deformación plástica de la herramienta.
- Nitruro de titanio (TiN): Mejora la resistencia al desgaste y se utiliza para detectar el desgaste.
- Carbonitruro de titanio (MT-TiCN o MT-CVD): Proporciona una mejor adherencia con el metal duro, resistencia al desgaste del filo de la herramienta debido a la abrasión y reduce el desgaste durante el contacto de la herramienta con la pieza de trabajo.

2) **Revestimiento PVD:** Los revestimientos PVD (Physical Vapor Deposition o deposición física en estado de vapor) se crean a temperaturas entre 400 y 600°C. El proceso de fabricación implica la evaporación de un metal que reacciona con el nitrógeno para formar un revestimiento duro de nitruro en la superficie de la herramienta de corte. Este proceso otorga a la herramienta resistencia en aplicaciones de fresado que requieren un filo de herramienta resistente y afilado al mismo tiempo, así como para mecanizar materiales viscosos. Algunos de los revestimientos PVD más utilizados incluyen:

- Carburo de titanio (TiC).
- Carbonitruro de titanio PVD-Ti(C,N): Aporta resistencia al desgaste durante la incidencia.
- Nitruro de titanio aluminio PVD-(Ti,Al)N: Ofrece alta dureza y resistencia a la oxidación, lo que mejora la resistencia al desgaste de la herramienta.
- Óxido PVD: Se utiliza debido a su estabilidad química y su capacidad para mejorar la resistencia a la formación de cráteres de desgaste.

En la Tabla 1, se presentan los materiales recomendados para herramientas de corte específicas utilizadas en procesos de mecanizado de metales según la norma ISO. Estas recomendaciones provienen de SANDVIK Coromant, un destacado fabricante de herramientas de corte a nivel mundial.

Tabla 1: Recomendaciones de materiales para herramientas de corte en fresado según el tipo de material a mecanizar. [5]

Calidad	Áreas de aplicación ISO						Material de mecanizado	Tipo de metal duro	Proceso y composición del recubrimiento	Espesor del recubrimiento	Color	
	P	M	K	N	S	H						
Plaquitas intercambiables												
GC1010	P10		K10			H10	HC		PVD	(Ti,Al)N		
GC1020			K20				HC		PVD	(Ti,Al)N		
GC1025	P10	M15		N15	S15	H15	HC		PVD	Ti(C,N)+TiN		
GC1030	P30	M15		N15	S15	H10	HC		PVD	(Ti,Al)N+TiN		
GC2030	P25	M25			S25		HC		PVD	(Ti,Al)N+TiN		
GC2040	P40	M30			S30		HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN		
GC3040	P20		K30			H25	HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃		
GC3220			K20				HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN		
GC4220	P15		K25			H25	HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN		
GC4230	P25	M15	K30				HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN		
GC4240	P40	M40	K35				HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN		
K15W			K15				HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN		
K20D			K20				HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃		
K20W			K25				HC		CVD	MT-Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN		
H13A			K25	N15	S20		HW					
H10				N10			HW					
H10F				N20	S30		HW					
CT530	P20	M20		N15		H15	HT					
CB50			K05			H05	BN					
CC6190			K10				CN					
CD10				N05			DP					
Fresa enteriza												
GC1610						H	HC		PVD	(Ti,Al)N		
GC1620	P	M	K		S	H	HC		PVD	(Ti,Al)N		
GC1630	P	M	K		S		HC		PVD	(Ti,Al)N		
GC1640	P	M	K		S		HC		PVD	(Ti,Al)N		
H10F				N			HW					

Metal duro: El metal duro se constituye como un material pulvimetalúrgico, compuesto mayormente por partículas de carburo de tungsteno (WC) y un aglutinante metálico rico en cobalto (Co). En aplicaciones de mecanizado, los metales duros están compuestos por más del 80% de la fase WC de alta dureza. Los carbonitruros cúbicos también desempeñan un papel significativo, especialmente en calidades con sinterización gradiente. La fabricación del cuerpo de metal duro se logra mediante el prensado de polvo o técnicas de moldeado por inyección en una estructura que posteriormente se somete a un proceso de sinterización hasta alcanzar la densidad deseada.

Geometría de la herramienta de corte

En lo que respecta a las geometrías de las herramientas de corte empleadas en el fresado, existe una amplia diversidad, y para cada aplicación se encuentra una solución específica. Los factores primordiales a tener en cuenta al seleccionar la geometría son los siguientes:

- **Tipo de fresado:** Este aspecto se refiere al tipo de operación de fresado que se llevará a cabo. Estas operaciones pueden incluir fresado de superficies curvas, fresado de roscas, fresado de ranuras, fresado de cavidades, fresado de superficies planas y perpendiculares, y fresado de agujeros en material sólido, como se puede observar en la Figura 8.
- **Geometría por mecanizar:** Las geometrías a ser mecanizadas varían considerablemente e incluyen formas redondas, rectangulares, toroidales, esféricas, u otras formas específicas del diseño de la pieza de trabajo.
- **Trayectoria de la herramienta:** La trayectoria de la herramienta, junto con los parámetros de geometría y tipo de fresado, define la forma específica de los filos de corte de la herramienta, que pueden ser rectos, redondos u otra variante.
- **Superficie de mecanizado:** Se refiere al área total de la superficie de la pieza de trabajo que será mecanizada y finalizada.
- **Profundidad de fresado:** La profundidad por cada pasada de la herramienta y la profundidad total del mecanizado son factores determinantes en la longitud de la herramienta de corte requerida.
- **Ancho de fresado:** El ancho del corte en la superficie de la pieza es crucial en operaciones como fresado de cavidades o ranuras.
- **Diámetro de corte:** En ciertas operaciones, como el fresado de ranuras y algunas perforaciones cilíndricas, el diámetro efectivo del corte en la pieza coincide con el diámetro nominal de la herramienta. En otras operaciones, este diámetro efectivo varía según la geometría de la herramienta seleccionada y la profundidad por pasada.
- **Ángulo de entrada de la herramienta:** Se refiere a la inclinación del eje de la herramienta con respecto a un eje perpendicular a la superficie de la pieza.
- **Radio de la herramienta:** El radio de la punta de los filos de corte de la herramienta, junto con el ángulo de entrada, influye en la elección del tipo de punta de la herramienta.
- **Longitud de progresión:** Corresponde a la distancia recorrida longitudinalmente por pasada de la herramienta.
- **Tolerancia del mecanizado:** Indica la tolerancia permitida para la superficie final de la pieza de trabajo y está relacionada con el acabado superficial logrado por la herramienta de corte.

- **Potencia del husillo:** Se refiere a la potencia máxima nominal que el husillo de la máquina fresadora es capaz de generar, medida en kilovatios (kW).
- **Velocidad del husillo:** La velocidad máxima a la que puede girar el husillo, expresada en revoluciones por minuto (RPM). Los parámetros de potencia y velocidad del husillo se determinan en función de todos los factores mencionados anteriormente, y la elección de la herramienta utilizada está directamente relacionada con la selección del husillo.

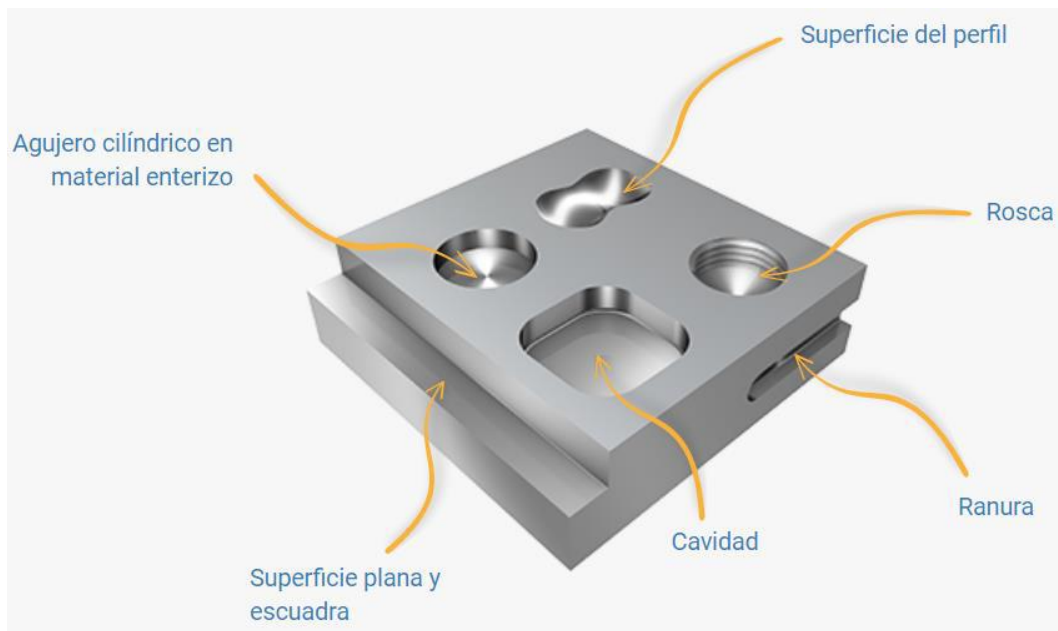


Figura 8: Seis tipos de operaciones de mecanizado mediante fresado. A partir de ellas se selecciona la geometría de la herramienta de corte. [6]

A continuación, se detallan los parámetros fundamentales que caracterizan la geometría de la herramienta de corte:

- **Diámetro de la fresa (D_c):** En el caso de herramientas con el filo en una posición inclinada, el diámetro de la fresa se mide en el punto PK, como se ilustra en las Figura 9 a) y b). Este punto PK corresponde a la intersección del filo principal con la faceta paralela. El diámetro de mayor importancia a considerar es el diámetro eficaz de corte (D_{cap}) a la profundidad real de corte (a_p). Este valor se emplea para calcular la velocidad de corte real y se expresa en milímetros.
- **Ángulo de posición (K_r):** Se refiere al ángulo principal del filo de la fresa, como se muestra en la Figura 9 b). En otras palabras, es el ángulo formado entre el filo principal de la fresa y la superficie de la pieza. Este factor ejerce la mayor influencia sobre la dirección de la fuerza de corte y el espesor de la viruta (h_m) y se mide en grados.

- **Número total de filos (Z_n):** Corresponde al recuento de dientes presentes en la fresa.
- **Número eficaz de filos (Z_c):** Su cálculo es fundamental para determinar el avance de la mesa (V_f) y la eficiencia general del proceso de mecanizado. Suelen tener un impacto crítico en la evacuación de la viruta y en la estabilidad operativa del fresado.
- **Paso (u):** Esta magnitud se refiere a la distancia recta que separa los filos eficaces de la herramienta de corte.
- **Paso diferencial:** Indica una separación no uniforme entre los dientes de una fresa. Se trata de una estrategia muy efectiva para minimizar las vibraciones durante la operación de fresado.

Además de estos factores geométricos, otro aspecto fundamental a considerar al seleccionar la herramienta de corte se relaciona con las demandas mecánicas a las que estará sometida. Estas demandas están estrechamente relacionadas con las características geométricas y los materiales de la herramienta de corte. Por tanto, cuando se aplican condiciones de mecanizado más exigentes, como profundidades de corte significativas, velocidades de avance elevadas, o el mecanizado de materiales de la pieza más duros, se requiere una mayor robustez estructural de la herramienta. Este requisito implica que en el caso de herramientas de dimensiones reducidas, es necesario aplicar condiciones de corte más moderadas para controlar el desgaste del filo de la herramienta y protegerla contra posibles astillamientos y roturas. Las condiciones de corte que influyen en el proceso de mecanizado se conocen como parámetros de corte y se describen a continuación.

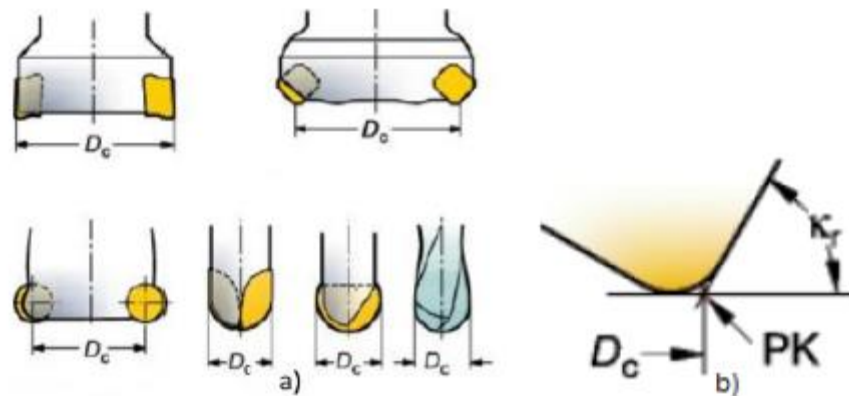


Figura 9: Diámetros de la herramienta de corte: a) para diferentes geometrías de fresa, b) punto real donde se mide el diámetro de la herramienta [5]

3.1.4. Parámetros de corte en fresado [7]

La velocidad de corte se establece en función del diámetro exterior de la fresa y se puede convertir en velocidad de rotación del husillo mediante una fórmula que debería ser familiar para el lector, representada en la ecuación [1]:

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad [1]$$

La tasa de avance en el fresado generalmente se define como la cantidad de avance por cada diente cortante, lo que se conoce como **carga de viruta**, y representa el tamaño de la viruta generada por cada filo de corte. Esta medida puede convertirse en velocidad de avance considerando la velocidad del husillo y el número de dientes en la fresa, mostrado en la ecuación [2]:

$$f_r = N n_t f \quad [2]$$

Donde:

- f_r = velocidad de avance en mm/min (in/min);
- N = velocidad del husillo en rev/min;
- n_t = número de dientes en la fresa;
- f = carga de viruta en mm/diente (in/diente).

La eliminación de material en el fresado se calcula multiplicando el área de la sección transversal del corte por la velocidad de avance. Por lo tanto, si una operación de fresado de una plancha corta una pieza de trabajo con un ancho w y a una profundidad d , la velocidad de remoción de material se determina de la siguiente manera:

$$R_{MR} = w d f_r \quad [3]$$

Esto no tiene en cuenta la entrada inicial de la fresa antes de su compromiso total. La ecuación [3] se aplica a diversas operaciones de fresado, como el fresado terminal, lateral, frontal y otras, con los ajustes adecuados en el cálculo del área de la sección transversal del corte.

El tiempo necesario para fresar una pieza de trabajo de longitud L debe considerar la distancia requerida para comprometer completamente la fresa. Comencemos con el caso del fresado de una plancha. Para calcular el tiempo de ejecución de esta operación, se determina la distancia de aproximación A necesaria para alcanzar la velocidad de corte completa, mediante la ecuación [4]:

$$A = \sqrt{d(D - d)} \quad [4]$$

donde d = profundidad de corte, mm (in); D = diámetro de la fresa, mm (in).

El tiempo para fresar la pieza de trabajo T_m es definido por la ecuación [5]

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad [5]$$

En el fresado frontal, es una práctica común considerar no solo la distancia A para la aproximación sino también una distancia adicional O para el desplazamiento. Hay dos escenarios posibles, tal como se ilustra en la Figura 10.

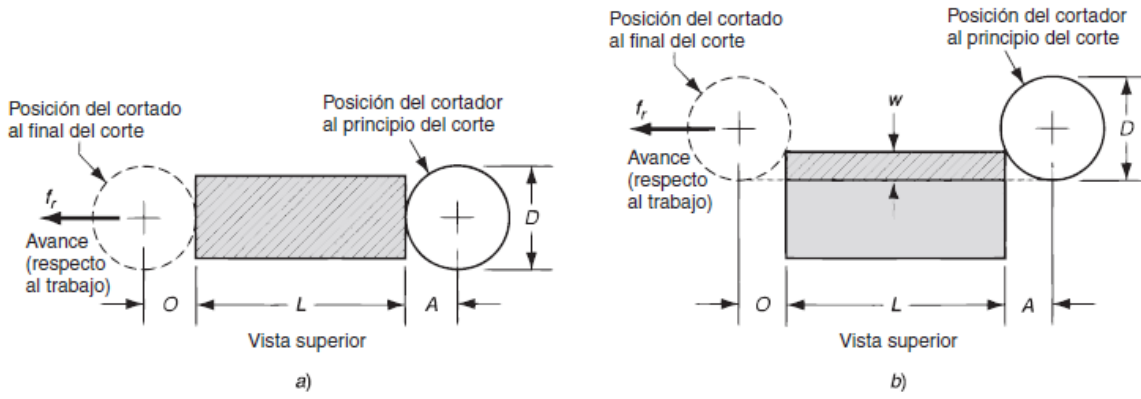


Figura 10: Fresado frontal en el que se muestran las distancias de aproximación y de recorrido adicional para dos casos: a) cuando el fresador está centrado sobre la pieza de trabajo y b) cuando la herramienta de corte se está desplazado hacia un lado del trabajo. [3]

En ambos casos, A es igual a O . El primer escenario ocurre cuando la fresa se ubica en el centro de la pieza de trabajo rectangular. En la Figura 10 a), es evidente que tanto A como O son iguales a la mitad del diámetro de la herramienta de corte. Como muestra la ecuación [6]:

$$A = O = \frac{D}{2} \quad [6]$$

donde D = diámetro de la fresa, mm (in). El segundo escenario se presenta cuando la fresa sobresale en uno de los lados de la pieza de trabajo, como se muestra en la Figura 10 b). En esta situación, las distancias de aproximación y la distancia adicional se calculan usando la ecuación [7]:

$$A = O = \sqrt{w(D - w)} \quad [7]$$

donde w = ancho del corte, mm (in). Por tanto, el tiempo de maquinado en cada caso está representado en la ecuación [8]

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \quad [8]$$

3.2. Materiales para mecanizar [8]

3.2.1. Metales

Los metales son ampliamente empleados en la ingeniería y su maquinabilidad, es decir, su capacidad para ser sometidos a procesos de mecanizado está vinculada a su composición, la presencia de compuestos aleados (en términos de tipos y proporciones) y, en algunos casos, a tratamientos térmicos que puedan haber recibido. La clasificación de metales según la Norma ISO establecidos en la Figura 11:

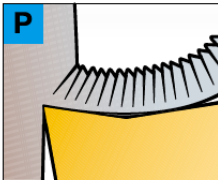
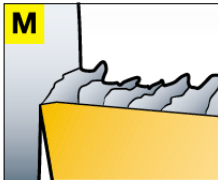
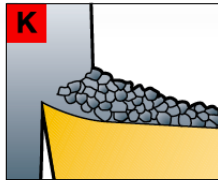
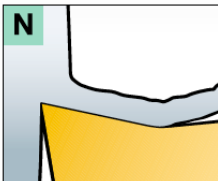
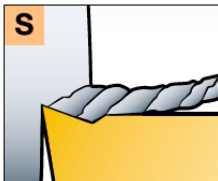
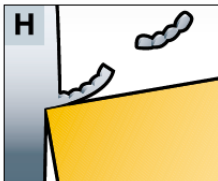
ISO P	Acero	ISO M	Acero inoxidable	ISO K	Fundición
					
ISO N	Aluminio	ISO S	Superalloys termorresistentes	ISO H	Material endurecido
					

Figura 11: Tipos de aceros según norma ISO para el mecanizado. [5]

Propiedades de los Materiales Norma ISO nombrados en la Tabla 2:

Tabla 2. Propiedades de los tipos de aceros según norma ISO [8]

ISO P:	ISO M:	ISO K:
Material de viruta larga.	- Material de viruta larga. - El control de la viruta es regular en el ferrítico y	a. Material de viruta corta. b. Buen control de la viruta en todas las condiciones.

• Control de la viruta relativamente fácil y uniforme. • El acero de bajo contenido en carbono es pastoso y requiere filos agudos. • Fuerza de corte específica :1500–3100 N/mm². • La fuerza de corte y la potencia requerida para mecanizar materiales ISO P, permanecen dentro de un margen limitado.	llega a ser difícil en el austenítico y en el dúplex. • Fuerza de corte específica: 1800–2850 N/mm² • El mecanizado genera elevadas fuerzas de corte, filo de aportación y superficies con endurecimiento térmico y mecánico.	c. Fuerza de corte específica: 790–1350 N/mm². d. El mecanizado a alta velocidad genera desgaste por abrasión. e. Fuerzas de corte moderadas.
ISO N: • Material de viruta larga. • Control de la viruta relativamente fácil, si está aleado. • El aluminio (Al) es pastoso y requiere filos agudos. • Fuerza de corte específica: 350–1350 N/mm². • La fuerza de corte y la potencia requerida para mecanizar materiales ISO N permanecen dentro de un margen limitado.	ISO S: • Material de viruta larga. • Control de la viruta difícil (viruta segmentada). • Se requiere un ángulo de desprendimiento negativo si se utiliza cerámica y positivo si se utiliza metal duro. • Fuerza de corte específica: 2400–3100 N/mm² para HRSA y 1300–1400 N/mm² para titanio. • Las fuerzas de corte y la potencia requerida son bastante elevadas.	ISO H: • Material de viruta larga. • Control de la viruta regular. • Se requiere un ángulo de desprendimiento negativo. • Fuerza de corte específica: 2550–4870 N/mm². • Las fuerzas de corte y la potencia requerida son bastante elevadas.

3.2.2. Plásticos

Los plásticos, como polímeros, exhiben diversas propiedades que se clasifican en tres tipos principales según su estructura molecular. En primer lugar, los termoplásticos poseen una estructura de cadena que les confiere la capacidad de cambiar de estado entre líquido y sólido de manera reversible. En segundo lugar, los termoestables o termoendurecibles forman enlaces en todas las direcciones, creando una estructura reticulada. Se caracterizan por su rigidez y la incapacidad de regresar a su estructura original después de cambiar de estado. En tercer lugar, los elastómeros tienen una estructura reticulada similar a la de los termoestables, pero más separada, lo que les otorga elasticidad para volver a su forma original tras deformaciones mecánicas elásticas.

Si bien los procesos de conformado, como la inyección y extrusión, proporcionan piezas casi terminadas con plásticos, en ocasiones se recurre al mecanizado por diversas razones técnicas o de dificultad en el conformado. Sin embargo, este proceso presenta desafíos distintivos al compararse con materiales como los aceros.

Uno de los desafíos es el desgarre, que se refiere a la formación de grietas considerables en el material. Este problema puede evitarse mediante el mecanizado a altas velocidades de corte y evitando radios muy pequeños.

Otro desafío es el calentamiento de la pieza. Dado que los plásticos tienen una baja conductividad térmica, el calor generado durante el mecanizado se transfiere en gran medida a la herramienta. Esto puede resultar en la fusión de la pieza y la formación de grumos sobre la herramienta, lo que impide alcanzar la geometría deseada en las piezas. Los plásticos termoestables pueden descomponerse frente a un calor excesivo, mientras que los termoplásticos pueden deformarse por fusión. Este problema se puede mitigar mediante el uso de refrigeración por aire, que no solo reduce el calentamiento de la pieza, sino que también ayuda a eliminar las virutas. Además, se aconseja mecanizar a bajos avances y utilizar herramientas resistentes al calor.

A continuación, se presenta Tabla 3 con recomendaciones para mecanizar distintos tipos de plásticos.

Tabla 3: Recomendaciones de mecanizado de acuerdo con el catálogo de Plastigen para distintos tipos de plásticos mecanizables. [9]

MECANIZADO			TECHNYL	ERTACETAL	ERTALYTE TX	ROBALÓN PP	TEFLÓN	POLIURETANO
TORNEADO 	Ángulo de incidencia	°	5-10	5-10	5-10	10-15	5-12	10-15
	Ángulo de virutas	°	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	15-25
	Avance	mm/t	>1,1-0,3	0,1-0,4	0,1-0,4	0,2-0,5	0,1-0,3	0,1-0,3
	Velocidad de corte	m/mín	>200	>300	>300	>250	>150	-150
FRESADO 	Ángulo de incidencia	°	10-20	5-15	5-15	5-15	10-20	10-30
	Ángulo de virutas	°	5-15	5-15	5-15	5-15	5-16	5-20
	Avance	mm/t	>0,03	>0,02	>0,02	>0,05	>0,03	>0,05
	Velocidad de corte	m/mín	<1000	<1000	<1000	<1000	<800	<30
ASERRADO 	Ángulo de incidencia	°	20-30	20-30	20-30	15-30	20-30	20-40
	Ángulo de virutas	°	2-5	0-5	0-5	5-8	5-8	5-10
	Pitch	mm/t	3-8	2-5	2-5	3-10	5-8	5-10
	Velocidad de corte	m/mín	>500	>1000	>1000	-1000	>300	-200
	Sierra circular	m/mín	-3000	-3000	-3000	-	-2500	-2000
TALADRADO 	Ángulo de incidencia	°	5-15	5-10	5-10	10-15	10-16	5-10
	Ángulo de virutas	°	10-20	15-30	15-30	10-30	5-20	20-30
	Ángulo de la punta	°	60-115	60-90	60-90	60-90	110-130	>90
	Avance	mm/t	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,2-0,5	0,1-0,3	0,2-0,4
	Velocidad de corte	m/mín	50-150	50-200	100-150	100-200	150-300	20-60

3.2.3. Maderas

Las maderas se componen de fibras que ejercen una influencia directa en el proceso de mecanizado, ya que afectan la remoción del material, determinando si se logra un corte limpio o si se generan superficies no deseadas. Esto depende de si el corte se realiza en la dirección de las fibras o no. Por lo tanto, al mecanizar madera, es esencial considerar tanto la dirección del mecanizado como la disposición de las fibras en el material.

En el caso de productos derivados de la madera, se encuentran los aglomerados, los cuales se componen de partículas de madera de diversos tamaños unidas mediante resina, cola (pegamento) u otro material. Estos aglomerados se prensan a temperatura y presión controlada para formar tableros u otras formas. La clasificación de los aglomerados se realiza según su densidad, siendo aquellos con una densidad inferior a 300 Kg/mm^3 considerados de baja densidad, los que oscilan entre 300 y 800 kg/mm^3 son de media densidad, y los que superan los 800 kg/mm^3 se consideran de alta densidad.

Un ejemplo de aglomerado es el MDF (Medium density fibreboard) o fibra de densidad media, que está compuesto principalmente por alrededor del 85% de fibras de madera de tamaño reducido. El resto del material lo constituyen resinas y otros compuestos que pueden conferirle propiedades adicionales, como impermeabilidad o resistencia al crecimiento de moho. El MDF presenta diversas ventajas y desventajas en su uso, resumidas en la Tabla 4.

Tabla 4: Características mecánicas del MDF. [8]

Ventajas	Desventajas
Fácil mecanizado al estar compuesto de prácticamente polvo de madera	Poca resistencia al agua pese a su conformado impermeable
Reducido precio en comparación a madera maciza. Pero más alto en relación con otros aglomerados	El polvo resultante de su mecanizado es dañino debido a los componentes aglomerantes.
Buena resistencia a la torsión	Pesado con relación a los aglomerados y los contrachapados
Estables a los cambios de temperatura.	En tableros malas resistencia y propiedades en general en los cantos y esquinas.

La elección de la herramienta y los parámetros de mecanizado apropiados es fundamental al trabajar con diversos materiales. Por lo general, los fabricantes de herramientas de corte suministran los parámetros necesarios para mecanizar sus herramientas, basándose en el tipo de material a ser

trabajado. Además, es crucial tener en cuenta la naturaleza específica del material y las condiciones operativas en las cuales se llevarán a cabo las operaciones de mecanizado.

3.3. Manual de Conversión Equipo manual a CNC [8]

Con el fin de condensar los pasos realizados en la conversión del proceso de torneado realizado anteriormente y luego de un análisis crítico del trabajo se genera una metodología de conversión general de un equipo manual a control numérico computarizado. Siguiendo los siguientes pasos:

3.3.1. Levantamiento de datos

En este paso se junta la información necesaria para realizar el proyecto, se deben reconocer el estado actual del equipo a convertir, las características que se quieren alcanzar en un resultado final, identificar las restricciones del trabajo, el presupuesto con el que se cuenta, y toda información que se estime conveniente.

3.3.2. Selección de componentes

Con el objetivo de seleccionar los componentes adecuados que se ajusten a las necesidades de implementación propuestos (objetivos deseados a cumplir) se propone seguir el diagrama de flujo mostrado en la Figura 12.

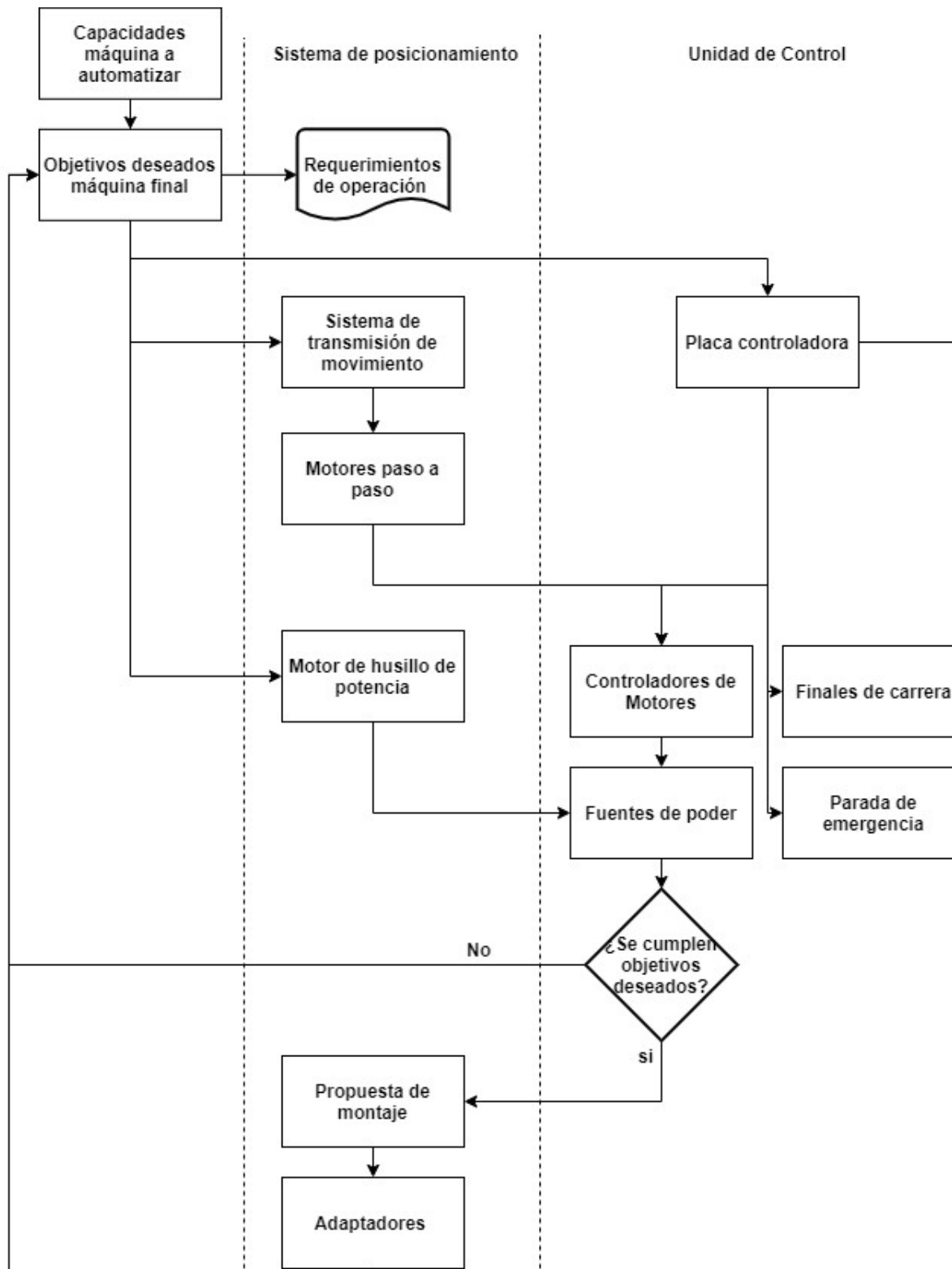


Figura 12: Diagrama de flujo de selección de componentes para la conversión. [8]

3.3.3. Diseño de adaptadores

El diseño de los adaptadores debe incluir los siguientes aspectos:

- Definir necesidades de diseño.
- Estudio de incorporación.
- Realizar propuesta de diseño.
- Definir pasos de fabricación.
- Comprobación del diseño.

3.3.4. Estudio de prefactibilidad

El objetivo de este paso es ver si la máquina puede ser convertida a control numérico, para ello se debe realizar un estudio del equipo a convertir, verificando que tenga los componentes necesarios para funcionar y que estos se encuentren en un estado óptimo de funcionamiento.

3.3.5. Construcción e incorporación de componentes

Al momento de la construcción e incorporación es importante tener los pasos definidos para hacer más ágil el proceso, es decir tener los planos listos como los pasos de fabricación listo al momento de trabajar, así como los pasos de montaje necesarios a modo de tener las herramientas preparadas y eliminar tiempos muertos.

3.3.6. Configuración de electrónica y software para el propósito

Tanto la configuración electrónica como de software debe ser la adecuada para los trabajos que se planean realizar, esto depende de los componentes seleccionados, el software de control y los programas a utilizar.

3.3.7. Pruebas y marcha blanca de la conversión

Es importante realizar pruebas en vacío antes de probar con carga ya que muchos elementos de la incorporación podrían estar mal montados, faltos de sujeción y aquí es cuando se notan los problemas no evidentes, como la falta de lubricación, vibraciones no deseadas, faltas de ajustes y otros inconvenientes que puedan encontrarse.

3.4. Control numérico computarizado

El control numérico (CN) es una forma de automatización programable en la cual un programa que contiene datos alfanuméricos codificados controla las acciones de una parte del equipo. Los datos representan posiciones relativas entre una cabeza de trabajo y una pieza de trabajo. La cabeza de trabajo representa una herramienta u otro elemento de procesamiento y la pieza de trabajo es el objeto que se procesa. El principio operativo del CN es controlar el movimiento de la cabeza de trabajo en relación con la pieza de trabajo y la secuencia en la cual se realizan los movimientos. La primera aplicación del control numérico fue en el maquinado y ésta es todavía un área de aplicación importante. [10]

3.4.1. Componentes de un sistema CN [10]

Un sistema de control numérico consta de tres componentes esenciales:

- 1) El programa de piezas es un conjunto detallado de comandos que guiará el equipo de procesamiento. Cada comando especifica una posición o movimiento que la cabeza de trabajo realizará en relación con el objeto que se está procesando. Las coordenadas x-y-z definen cada posición, y en el contexto de máquinas herramienta, se incluyen detalles adicionales como la velocidad de rotación del eje, la dirección del eje, la velocidad de alimentación, instrucciones para cambios de herramientas y otros comandos asociados con la operación.
- 2) La unidad de control de máquina (MCU) es una microcomputadora que almacena y ejecuta el programa, transformando cada comando en acciones mediante el equipo de procesamiento, de manera secuencial. La MCU comprende tanto hardware como software. El hardware incluye la microcomputadora, componentes para la interfaz con el equipo de procesamiento y elementos de control de retroalimentación. El software consiste en el sistema de control, algoritmos de cálculo y software de traducción que convierte el programa de piezas de CN a un formato utilizable por la MCU. Además, permite la edición del programa de piezas para corregir errores o realizar ajustes en las condiciones de corte. El término "control numérico por computadora" (CNC) se utiliza para distinguir este tipo de CN de las tecnologías anteriores que dependían completamente de dispositivos electrónicos integrados.
- 3) El equipo de procesamiento ejecuta una secuencia de pasos para transformar la pieza de trabajo inicial en una pieza terminada, operando bajo el control de la unidad de control de máquina según las instrucciones del programa de piezas.

3.4.2. Sistema de coordenadas y control de movimientos [10]

Para definir las posiciones en el control numérico, se emplea un sistema de ejes de coordenadas estándar que consta de tres ejes lineales (x , y , z) pertenecientes al sistema de coordenadas cartesianas, junto con tres ejes rotatorios (a , b , c), como se ilustra en la Figura 13 a). Los ejes rotatorios son utilizados para permitir la rotación de la pieza de trabajo, presentando distintas superficies durante el proceso de mecanizado, o para orientar la herramienta o la cabeza de trabajo desde diferentes ángulos en relación con la pieza. La mayoría de los sistemas de control numérico no requieren los seis ejes, ya que muchos son sistemas de posicionamiento cuyas ubicaciones se definen en un plano x - y . La programación de estas máquinas implica la especificación de una secuencia de coordenadas x - y . En contraste, algunas máquinas herramienta cuentan con un control de cinco ejes para dar forma a configuraciones geométricas de piezas de trabajo complejas, generalmente compuestas por tres ejes lineales y dos rotatorios.

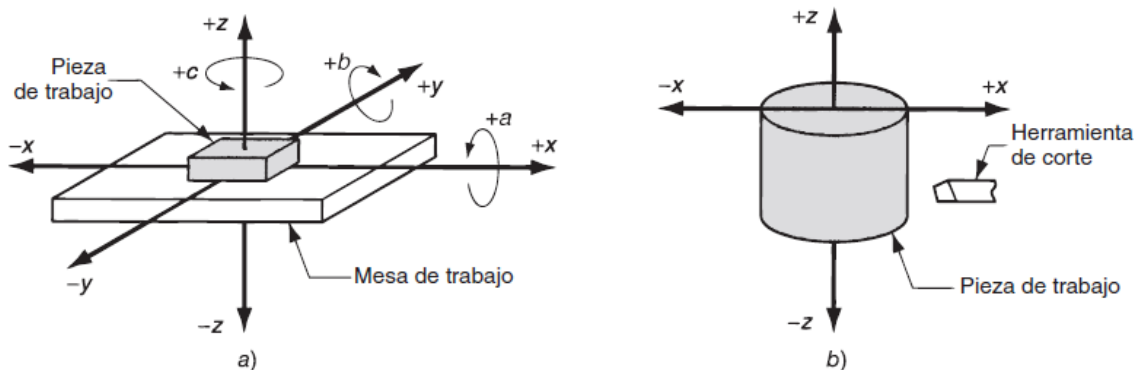


Figura 13: Sistema de coordenadas que se usa en el control numérico: a) para trabajo plano y prismático y b) para trabajo rotatorio. [10]

Las coordenadas para un sistema de control numérico (CN) rotativo se presentan en la Figura 13 b). Estos sistemas están vinculados a las operaciones de torneado en tornos con control numérico. A pesar de que la pieza de trabajo rota, dicho giro no constituye uno de los ejes controlados. La trayectoria de corte de la herramienta del torno en relación con la pieza de trabajo se define en el plano x - z , tal como se ilustra en la figura.

En numerosos sistemas de CN, los desplazamientos relativos entre el elemento de procesamiento y la pieza de trabajo se logran asegurando la pieza a una mesa y, posteriormente, controlando las posiciones y movimientos de la mesa en relación con la cabeza de trabajo, la cual puede estar estacionaria o semiestacionaria. Este método de operación es fundamental en la mayoría de las máquinas herramienta destinadas a insertar componentes. Por otro lado, en algunos sistemas, la pieza

de trabajo permanece inmóvil, mientras que la cabeza de trabajo se desplaza a lo largo de dos o tres ejes. Este enfoque se emplea en cortadores por flama, trazadoras o graficadores x-y, así como en máquinas de medición de coordenadas.

Los sistemas de control de movimiento basados en control numérico (CN) se clasifican en dos categorías:

1) Sistemas de Punto a Punto: También conocidos como sistemas de posicionamiento, estos desplazan la cabeza de trabajo o la pieza de trabajo a una posición predeterminada, sin considerar la trayectoria específica que deben seguir para alcanzar dicho lugar. Una vez que se completa el movimiento, la herramienta realiza una acción de procesamiento en esa posición, como taladrar o perforar un agujero. Por lo tanto, el programa consiste en una serie de posiciones puntuales en las cuales se ejecutan las operaciones.

2) Sistemas de Trayectoria Continua: Estos sistemas proporcionan un control continuo y simultáneo de más de un eje, lo que les permite regular la trayectoria que sigue la herramienta en relación con la pieza. Esto posibilita que la herramienta lleve a cabo un proceso mientras los ejes están en movimiento, permitiendo que el sistema genere superficies angulares, curvas bidimensionales o contornos tridimensionales en la pieza de trabajo. Este método de operación es esencial en máquinas de dibujo, operaciones de fresado y torneado, así como en el corte con llama. En el ámbito del mecanizado, el control de trayectoria continua también se conoce como torneado de contornos.

Otro aspecto del control de movimiento se relaciona con las posiciones en el sistema de coordenadas, las cuales se pueden definir de manera absoluta o incremental. En el posicionamiento absoluto, las posiciones de la cabeza de trabajo se establecen siempre con referencia al origen del sistema de coordenadas. Por otro lado, en el posicionamiento incremental, la disposición siguiente de la cabeza de trabajo se define en función de la posición actual. La distinción entre ambos se representa en la Figura 14.

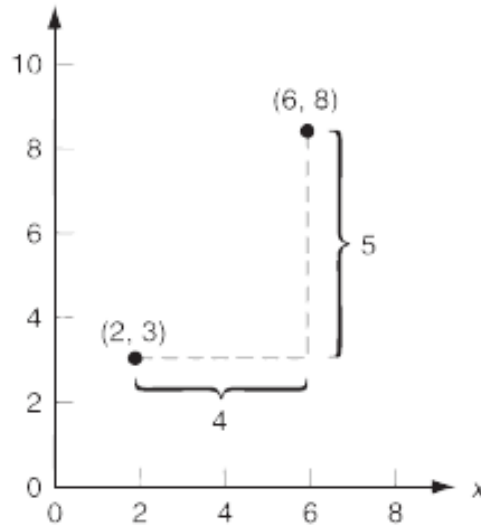


Figura 14: Posicionamiento absoluto contra posicionamiento incremental. En este momento la cabeza de trabajo está en el punto (2, 3) y se moverá al punto (6, 8). En el posicionamiento absoluto, el movimiento se especifica mediante $x = 6$, $y = 8$; mientras que, en el posicionamiento incremental, el movimiento se especifica mediante $x = 4$, $y = 5$. [10]

3.4.3. Análisis de los sistemas de posicionamiento [10]

La tarea del sistema de posicionamiento consiste en transformar las coordenadas especificadas en el programa de piezas del control numérico (CN) en posiciones relativas entre la herramienta y la pieza de trabajo durante el proceso de mecanizado. En la Figura 15 se representa el funcionamiento de un sistema de posicionamiento simple. Este sistema incluye una mesa de trabajo donde la pieza de trabajo permanece fija. La función de la mesa es desplazar la parte con respecto a una herramienta o cabezal de sujeción. Para lograr esto, la mesa de trabajo se desplaza linealmente mediante un tornillo guía rotatorio, controlado por un motor, como un motor de engranajes o servomotor. El diagrama muestra un solo eje por simplicidad, pero para permitir movimientos en los ejes x-y, el sistema real se construiría sobre un segundo eje perpendicular al primero. El tornillo guía tiene un paso específico, medido en mm/roscas (in/roscas) o mm/rev (in/rev). En consecuencia, la mesa se desplaza una distancia igual al paso del tornillo guía con cada revolución. La velocidad de desplazamiento de la mesa, equivalente a la velocidad de avance en la operación de mecanizado, se determina mediante la velocidad de rotación del tornillo guía.

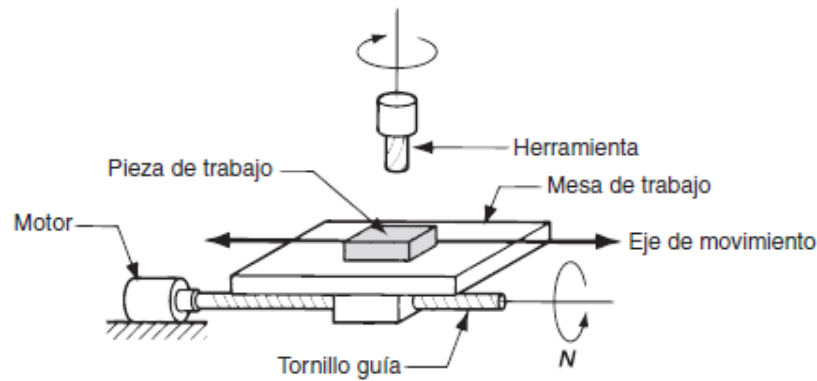


Figura 15: Arreglo de motor y tornillo guía en un sistema de posicionamiento por CN. [10].

En los sistemas de control numérico (CN), se emplean dos tipos fundamentales de control de movimientos: a) de ciclo abierto y b) de ciclo cerrado, como se ilustra en la

Figura 16. La distinción radica en que un sistema de ciclo abierto opera sin verificar la posición exacta de la mesa de trabajo. En contraste, un sistema de control de ciclo cerrado utiliza mediciones de retroalimentación para asegurarse de que la posición de la mesa de trabajo coincida con la especificada en el programa. Los sistemas de ciclo abierto son más económicos que los de ciclo cerrado y son adecuados cuando la resistencia al movimiento es mínima. Por lo general, se prefieren los sistemas de ciclo cerrado para máquinas herramienta que realizan operaciones de trayectoria continua, como el fresado o el torneado, donde las fuerzas de resistencia pueden ser significativas.

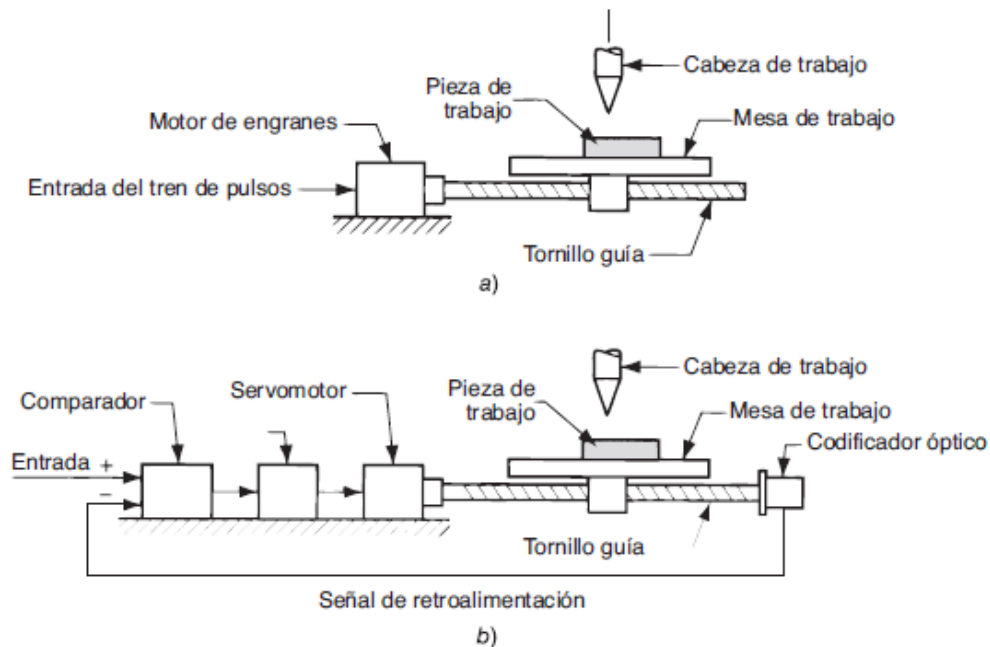


Figura 16: Dos tipos de movimientos bajo CN: a) de ciclo abierto y b) de ciclo cerrado. [10]

Sistemas de posicionamiento de ciclo abierto suelen emplear un motor de engranajes para accionar el tornillo guía. En el control numérico (CN), se regula un motor de engranajes a través de una sucesión de pulsos eléctricos generados por la unidad de control de máquina. Cada pulso induce una fracción de revolución al motor, denominada ángulo de paso. Los ángulos de paso aceptables deben cumplir con la relación mostrada en la ecuación [9]:

$$\alpha = \frac{360}{n_s} \quad [9]$$

donde α = ángulo de paso, grados; y n_s = cantidad de ángulos de paso para el motor, que debe ser un entero.

El ángulo a través del cual rota el tornillo guía, suponiendo una relación uno a uno entre engranes del motor y el tornillo guía, está dado por la ecuación [10]

$$A = \alpha n_p \quad [10]$$

donde

- A = ángulo de rotación del tornillo guía, grados;
- n_p = cantidad de pulsos que recibe el motor;
- α = ángulo de paso, definido aquí en grados/pulsos.

Esta ecuación y las subsecuentes deben modificarse en el caso de que la relación de engranajes no sea de 1:1. La respuesta de movimiento de la mesa, derivada de la rotación del tornillo guía, se establece a partir de la ecuación [11]:

$$x = \frac{pA}{360} \quad [11]$$

Donde:

- x = posición del eje x en relación con la posición inicial, mm (in);
- p = paso del tornillo guía, mm/rev (in/rev);
- $\frac{A}{360}$ = la cantidad de revoluciones (y revoluciones parciales) del tornillo guía.

Si se fusionan las dos ecuaciones anteriores y se reorganizan, se puede determinar la cantidad de pulsos necesarios para lograr un aumento específico en la posición x en un sistema de punto a punto a través de la ecuación [12]:

$$n_p = \frac{360x}{p\alpha} \quad [12]$$

Los pulsos se emiten a una frecuencia específica, lo que provoca que la mesa de trabajo se desplace a una velocidad que corresponde a la velocidad de avance en la dirección del eje del tornillo guía. La velocidad de rotación del tornillo guía está vinculada a la frecuencia del tren de pulsos y se relaciona como muestra la ecuación [13]:

$$N = \frac{60f_p}{n_s} \quad [13]$$

donde

- N = velocidad de rotación, rev/min;
- f_p = frecuencia del tren de pulsos, Hz (pulsos/s);
- n_s = pasos/rev o pulsos/rev.

En el caso de una mesa bidireccional con control de trayectoria continua, se sincronizan las velocidades relativas de los ejes para lograr la dirección de desplazamiento requerida.

La velocidad de desplazamiento en la mesa, en la dirección del eje del tornillo guía, se calcula según ilustra la ecuación [14], en función de la velocidad de rotación:

$$v_t = f_r = Np \quad [14]$$

donde

- v_t = velocidad de viaje de la mesa, mm/min (in/min);
- f_r = velocidad de alimentación en la mesa, mm/min (in/min);
- N = velocidad de rotación según se define en la ecuación anterior, rev/min;
- p = paso del tornillo guía, mm/rev (in/rev).

La frecuencia necesaria del tren de pulsos para regular la mesa a una velocidad de avance determinada se calcula mediante una combinación de las ecuaciones [13] y [14], con un reordenamiento para resolver f_p , se obtiene la ecuación [15].

$$f_p = \frac{n_s v_t}{60 p} \quad [15]$$

Sistemas de posicionamiento de ciclo cerrado (sistemas de control numérico de ciclo cerrado), representados en la

Figura 16 b), emplean servomotores y dispositivos de retroalimentación para garantizar la consecución de la posición deseada. Un sensor de retroalimentación comúnmente utilizado en el control numérico (así como en robots industriales) es el codificador óptico, cuya ilustración se presenta en la Figura 17. Este codificador óptico se compone de una fuente de luz, un fotodetector y

un disco que contiene una serie de ranuras por las cuales pasa intermitentemente la fuente de luz para activar el fotodetector. Este disco está conectado, ya sea directamente o mediante un tren de engranajes, a un eje rotativo cuya posición y velocidad angular se miden. A medida que el eje rota, las ranuras hacen que el fotodetector perciba la fuente de luz como una secuencia de destellos, los cuales se transforman en una serie correspondiente de pulsos eléctricos. Al contar los pulsos y calcular la frecuencia del tren de pulsos, es posible determinar la posición y la velocidad de la mesa de trabajo.

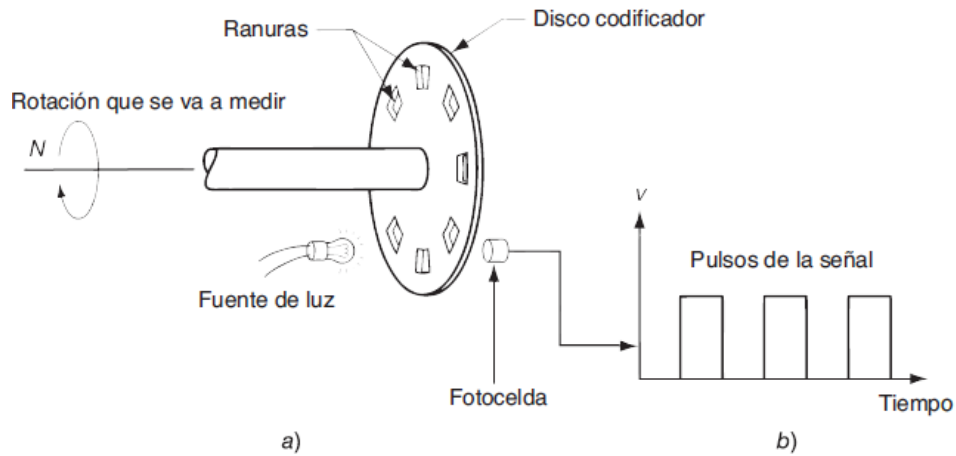


Figura 17: Codificador óptico a) aparato y b) pulsos emitidos para medir la rotación del disco [10]

Las fórmulas que explican el funcionamiento de un sistema de posicionamiento de ciclo cerrado guardan semejanza con las de un sistema de ciclo abierto. En el caso del codificador óptico básico, se impone la siguiente condición para el ángulo entre las ranuras del disco, tal como los enseña la ecuación [16].

$$\alpha = \frac{360}{n_s} \quad [16]$$

donde α = ángulo entre ranuras, grados/ranura; n_s = cantidad de ranuras en el disco, ranuras/ rev; y 360 = grados/rev. Para cierta rotación angular de la flecha, el codificador detecta una cantidad de pulsos que está dada por la ecuación [17]:

$$n_p = \frac{A}{\alpha} \quad [17]$$

donde n_p = cuenta de pulsos; A = ángulo de rotación, grados; y α = ángulo entre ranuras, grados/pulsos. El conteo de pulsos puede usarse para determinar la posición lineal del eje x de la mesa de trabajo, mediante la factorización del paso del tornillo guía. Por lo tanto, se representa como la ecuación [18]

$$x = \frac{p n_p}{n_s} \quad [18]$$

De manera similar, la velocidad de alimentación a la cual se mueve la mesa de trabajo se obtiene a partir de la frecuencia del tren de pulsos, mostrada en la ecuación [19].

$$f_r = \frac{60 p f_p}{n_s} \quad [19]$$

donde f_r = velocidad de alimentación, $[mm/min]$ (in/min); p = paso, $[mm/rev]$ (in/rev); f_p = frecuencia del tren de pulsos $[Hz]$ ($pulsos/s$); n_s = cantidad de ranuras en el disco codificador, $[pulsos/rev]$; y 60 es el factor para convertir los segundos a minutos. La serie de pulsos generada por el codificador se compara con las coordenadas de posición y la velocidad de alimentación especificadas en el programa de piezas; la unidad de control de máquina utiliza la discrepancia para controlar un servomotor, que a su vez gestiona la mesa de trabajo. Se emplea un convertidor digital a analógico (DAC) para convertir las señales digitales de la MCU a una señal analógica continua, destinada a operar el motor conductor. Los sistemas de control numérico (CN) de ciclo cerrado, tal como se describe aquí, son adecuados cuando existe una resistencia al movimiento de la mesa. La mayoría de las operaciones de máquinas herramienta para el corte de metales caen en esta categoría, especialmente aquellas que involucran un control de trayectoria continua, como el fresado y el torneado.

Las ecuaciones previas asumen una relación de engranajes de 1:1. Para relaciones de engranajes diferentes, se deben realizar ajustes en el cálculo.

3.4.4. Precisión de posicionamiento [10]

Tres medidas críticas de precisión en el posicionamiento son: resolución de control, exactitud y capacidad de repetición. Estos conceptos se clarifican al considerar un solo eje del sistema de posición.

La resolución de control se refiere a la capacidad del sistema para dividir el rango total de movimiento del eje en puntos estrechamente espaciados que pueden ser diferenciados por la unidad de control. Se define como la distancia entre dos puntos de control consecutivos en el movimiento del eje. A veces, estos puntos de control se denominan puntos direccionables, ya que son posiciones específicas a lo largo del eje hacia las cuales la mesa de trabajo puede dirigirse. Es preferible que la resolución de control sea lo más pequeña posible, y esto depende de las limitaciones impuestas por 1) los

componentes electromecánicos del sistema de posicionamiento y/o 2) la cantidad de bits que utiliza el controlador para definir la posición de las coordenadas del eje.

Los factores electromecánicos que limitan la resolución incluyen el paso del tornillo guía, la relación de engranajes en el sistema de accionamiento y el ángulo de paso en el motor de engranajes (para un sistema de ciclo abierto) o el ángulo entre las ranuras en un disco codificador (para un sistema de ciclo cerrado). En conjunto, estos factores determinan una resolución de control, que es la distancia mínima que puede moverse la mesa de trabajo. Por ejemplo, la resolución de control para un sistema de ciclo abierto que se conduce mediante un motor de engranajes con una relación de engranajes de 1:1 entre el eje del motor y el tornillo guía está dada por la ecuación [20]

$$CR_1 = \frac{p}{n_s} \quad [20]$$

donde CR_1 = resolución de control de los componentes electromecánicos, en mm (in); p = paso del tornillo guía, en mm/rev (in/rev); y n_s = cantidad de pasos/rev. Puede desarrollarse una expresión similar para un sistema de posicionamiento de ciclo cerrado.

Aunque no es una limitación frecuente en la tecnología computacional moderna, el segundo posible factor que restringe la resolución de control es la cantidad de bits utilizados para definir el valor de coordenadas del eje. Esto puede ser impuesto por la capacidad de almacenamiento de bits del controlador. Si denotamos por B el número de bits en el registro de almacenamiento para el eje, el número de puntos de control entre los cuales se puede dividir el rango del eje es igual a 2^B . En caso de que los puntos de control estén separados por distancias iguales dentro del rango, entonces, se representa como la ecuación [21]:

$$CR_2 = \frac{L}{2^B - 1} \quad [21]$$

donde CR_2 = resolución de control del sistema de control de la computadora, mm (in); y L = rango del eje, mm (in). La resolución del control del sistema de posicionamiento es el máximo de los dos valores; esto es, según indica la ecuación [22]:

$$CR = \text{Máx}\{CR_1, CR_2\} \quad [22]$$

Por lo general, resulta conveniente que $CR_1 \geq CR_2$, lo que significa que el sistema electromecánico es el factor limitante en la resolución de control.

Cuando un sistema de posicionamiento se orienta para desplazar la mesa de trabajo hacia un punto de control específico, la habilidad del sistema para llegar a dicho punto se verá restringida por errores

mecánicos. Estos errores surgen de diversas imprecisiones e imperfecciones en el sistema mecánico, como la holgura entre el tornillo guía y la mesa de trabajo, retrocesos en los engranajes y desviaciones en los componentes de la máquina. Es conveniente asumir que los errores siguen una distribución estadística alrededor del punto de control, siendo esta una distribución normal con una media de 0. Además, al suponer que la desviación estándar de la distribución permanece constante a lo largo del rango de los ejes considerados, se puede afirmar que casi todos los errores mecánicos (99.74%) se encuentran dentro de las ± 3 desviaciones estándar del punto de control. Este concepto se ilustra en la Figura 18 para una porción del rango del eje que abarca tres puntos de control.

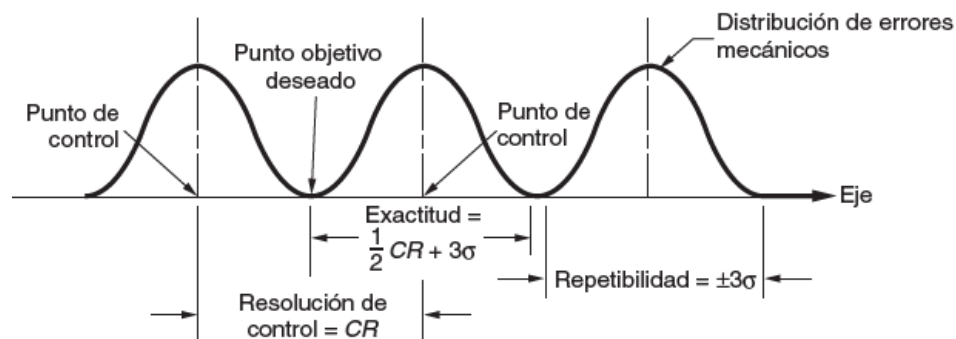


Figura 18: Una parte del eje del sistema de posicionamiento, con definición de la resolución de control, la exactitud y la repetibilidad. [10]

Dadas estas definiciones de resolución de control y distribución de errores mecánicos, se examinarán ahora los conceptos de exactitud y repetibilidad. La exactitud se define en el peor escenario posible, donde el punto objetivo está exactamente entre dos puntos de control adyacentes. Dado que el sistema solo puede moverse hacia uno u otro de los puntos de control, se produce un error en la posición final de la mesa de trabajo. En caso de que el objetivo esté más cerca de uno de los puntos de control, la mesa se desplazará hacia el punto más cercano, resultando en un error menor. Por tanto, es apropiado definir la exactitud en el peor escenario. La **exactitud** de cualquier eje en un sistema de posicionamiento se refiere al máximo error posible que puede ocurrir entre el punto objetivo deseado y la posición real alcanzada por el sistema, expresado por la fórmula: $Exactitud = 0.5CR + 3\sigma$, donde CR representa la resolución de control en milímetros (o pulgadas) y σ es la desviación estándar de la distribución de errores, también medida en milímetros (o pulgadas).

En cuanto a la repetibilidad, se relaciona con la capacidad de un sistema de posicionamiento para retornar a un punto de control específico que ha sido previamente programado. Esta capacidad se evalúa en términos de los errores de posición que se presentan cuando el sistema intenta posicionarse en un punto de control determinado. Estos errores de posición reflejan las imperfecciones mecánicas del sistema de posicionamiento, las cuales se definen mediante la distribución normal supuesta

anteriormente. Por lo tanto, la **repetibilidad** de cualquier eje en un sistema de posicionamiento se define como el rango de errores mecánicos asociados con dicho eje, expresado como $Repetibilidad = \pm 3\sigma$.

3.4.5. Programa del control numérico [10]

En las aplicaciones de las máquinas herramienta, la tarea de programar el sistema se denomina programación de piezas por control numérico, debido a que el programa se prepara para una pieza determinada. Por lo general, lo realiza alguien familiarizado tanto con el proceso de trabajo con metales como con el procedimiento de programación para el equipo particular de la planta. Es posible que se usen otros términos para la programación de otros procesos, pero los principios son similares y se requiere que una persona capacitada prepare el programa. En la actualidad, los sistemas de computadora se usan ampliamente para preparar programas de CN.

La programación de piezas requiere que el programador defina los puntos, las líneas y las superficies de la pieza de trabajo en el sistema del eje y que, además, controle el movimiento de la herramienta de corte en relación con estas características de pieza definidas. Entre las técnicas de programación de partes, las más importantes son:

- 1) **Programación manual de piezas** Para los trabajos de maquinado sencillos punto por punto, tales como operaciones de taladrado, con frecuencia la programación manual es el método más fácil y económico. La programación manual de piezas usa datos numéricos básicos y códigos alfanuméricos especiales para definir los pasos en el proceso. Por ejemplo, para realizar una operación de taladrado se introduce un comando del siguiente tipo: $n010x70.0y85.5f175s500$

Cada “letra” en el enunciado especifica un detalle en la operación de taladrado. La letra n ($n010$) es simplemente un número de secuencia para el enunciado. Las letras x e y indican las posiciones de coordenadas ($x = 70.0$ mm y $y = 85.5$ mm). Las letras f y s especifican la velocidad de alimentación y la velocidad de giro que se van a usar en la operación de taladrado ($velocidad\ de\ alimentación = 175$ mm/min y $velocidad\ de\ giro = 500$ rev/min)). El programa de piezas con CN completo consta de una secuencia de enunciados similares al comando anterior.

- 2) **Programación de piezas asistida por computadora** La programación de piezas asistida por computadora implica el uso de un lenguaje de programación de alto nivel. Está diseñado para la programación de trabajos más complejos que la programación manual. El primer lenguaje de programación de piezas fue la de herramientas programadas automáticamente (APT, por sus siglas

en inglés), creado como una extensión de la investigación original de máquinas herramienta por CN que se usó por primera vez en producción alrededor de 1960.

En la APT la tarea de programación de piezas se divide en dos pasos: 1) definición de una configuración geométrica de pieza y 2) especificación de la trayectoria de la herramienta y la secuencia de operación. En el paso 1, el programador define la configuración geométrica de la pieza de trabajo mediante elementos básicos de geometría, como puntos, líneas, planos, círculos y cilindros. Estos elementos se definen usando enunciados de geometría de la APT, como:

$$P1 = \text{POINT}/25.0, 150.0$$
$$L1 = \text{LINE}/P1, P2$$

P1 es un punto definido en el plano x-y que se localiza en $x = 25$ mm y en $y = 150$ mm. L1 es una línea que va a través de los puntos P1 y P2. Se usan enunciados similares para definir círculos, cilindros y otros elementos geométricos. La mayoría de las formas de la pieza de trabajo se describen usando enunciados como éstos para especificar sus superficies, esquinas, bordes y posiciones de orificio.

La especificación de una trayectoria de herramienta se realiza con enunciados de movimiento de APT. Un enunciado común para una operación de punto a punto es: GOTO/P1

Esto dirige a la herramienta para que se mueva de su posición actual a una posición definida mediante P1, donde P1 se ha definido mediante un enunciado previo de geometría de APT. Los comandos de movimiento de trayectoria continua usan elementos de geometría como líneas, círculos y planos. Por ejemplo, considere el comando GORGT/L3, PAST, L4

El enunciado dirige a la herramienta para que vaya a la derecha (GORGT) a lo largo de la línea L3 hasta que se coloque justo después de la línea L4 (por supuesto, L4 debe ser una línea que intercepte a L3).

Se usan enunciados APT adicionales para definir los parámetros de operación, como velocidades de alimentación, velocidades de giro, tamaños de herramientas y tolerancias. Cuando se termina, el programador introduce el programa APT a la computadora; durante el procesamiento se generan enunciados de bajo nivel (similares a los que se preparan en la programación manual de piezas) para que los use una máquina herramienta particular.

- 3) **Programación de piezas asistida por sistemas CAD/CAM** El uso de estos sistemas lleva a la programación de piezas asistida por computadora un paso adelante, usando un sistema gráfico computarizado CAD/CAM que interactúa con el programador conforme se prepara el programa

de piezas. En el uso convencional de la APT se escribe un programa completo y después se introduce en la computadora para su procesamiento. Muchos errores de programación no se detectan sino hasta el procesamiento en la computadora. Cuando se usa un sistema CAD/CAM, el programador recibe una verificación visual inmediata conforme introduce cada enunciado para determinar si es correcto. Cuando el programador introduce la configuración geométrica de piezas, el elemento se despliega gráficamente en el monitor. Conforme el programador diseña la trayectoria de una herramienta, ve exactamente cómo desplazarán los comandos de movimiento a la herramienta, en relación con la pieza. Los errores se corrigen de inmediato y no después de escribir el programa completo.

La interacción entre el programador y el sistema de programación es un beneficio significativo de la programación asistida por CAD/CAM. Hay otros beneficios importantes al usar CAD/CAM en la programación de piezas por CN. Primero, el diseño del producto y sus componentes puede obtenerse en un sistema CAD/CAM. El programador de control numérico recupera la base de datos de diseño resultante, incluida la definición geométrica de cada pieza, para usarla como la configuración geométrica inicial para la programación de piezas. Esta recuperación ahorra un tiempo valioso en comparación con la reconstrucción de la pieza desde cero, usando enunciados de geometría de la APT.

Segundo, existen rutinas especiales de software disponibles comercialmente para la programación de piezas mediante sistemas CAD/CAM, que automatizan algunas secciones de la herramienta y generan trayectorias de una ruta, tales como un perfilado por fresado en la superficie de una pieza, el fresado de una cavidad dentro de la superficie de una pieza, la elaboración de contornos en superficies y ciertas operaciones punto a punto. El programador de pieza solicita estas rutinas como comandos especiales **macro**. Su uso produce ahorros significativos en el tiempo y esfuerzo de programación.

- 4) **Ingreso manual de datos** (MDI, por sus siglas en inglés) es un método en el cual un operador de máquina introduce el programa de piezas en la fábrica. El método usa una pantalla CRT con capacidad de imágenes en los controles de la máquina herramienta. Los enunciados de programación de piezas por CN se introducen mediante un procedimiento controlado con menús que requiere una capacitación mínima del operador de la máquina herramienta. Debido a que la programación de piezas está simplificada y no requiere personal especial en la programación de piezas con CN, el MDI es una forma adecuada para que los talleres especializados instrumenten económicamente el control numérico en sus operaciones.

3.4.6. Aplicaciones del control numérico

El maquinado es un área importante de aplicación para el control numérico, pero el principio de operación del CN también se aplica a otras actividades. En muchos procesos industriales, debe controlarse la posición de una cabeza de trabajo de acuerdo con la pieza o producto en los que se trabaja. Las aplicaciones se dividen en dos categorías. Debe señalarse que no todas las aplicaciones se identifican con el nombre de control numérico en sus respectivas industrias.

Aplicaciones de máquinas herramienta: el CN se usa ampliamente para operaciones de maquinado, tales como el torneado, el taladrado y el fresado. Esto ha motivado el desarrollo de máquinas herramientas altamente automatizadas, llamadas centros de maquinado, las cuales cambian sus propias herramientas de corte para realizar diversas operaciones de maquinado bajo un programa de CN. Además del maquinado, otras máquinas herramienta controladas numéricamente son: máquinas para esmerilado, máquinas para procesamiento en prensa de láminas metálicas, máquinas para doblado de tubos y procesos de corte térmico.

Aplicaciones que no son de máquinas herramienta:

- Máquinas de colocación de cinta y máquinas de devanado de filamentos para compuestos,
- Máquinas para soldadura por fusión, tanto con arco como con resistencia,
- Máquinas para inserción de componentes en ensambles electrónicos,
- Máquinas de dibujo,
- Máquinas de medición de coordenadas para inspección.

Entre los beneficios del control numérico relacionados con el equipo que se opera manualmente en estas aplicaciones están:

- Menor tiempo improductivo, lo que resulta en ciclos más cortos,
- Tiempos de manufactura más cortos,
- Reparaciones más sencillas,
- Mayor flexibilidad de manufactura,
- Mayor exactitud
- Menos errores humanos.

3.5. Control numérico en máquinas fresadoras

3.5.1. Aplicación de CAD/CAM en máquinas fresadoras [11]

Las aplicaciones de los programas gráficos asistidos por computadora CAD / CAM se utilizan tanto para diseñar un producto como para programar los procesos de manufactura, específicamente, en procesos de mecanizado en tornos, fresadoras y centros de mecanizado CNC. El software CAM utiliza los modelos y ensamblajes creados en el software CAD para generar trayectorias de herramientas que dirigen máquinas-herramienta para convertir diseños en partes físicas. El software CAD / CAM se utiliza para diseñar y fabricar prototipos y piezas terminadas.

El software CAD (Diseño asistido por computadora) fue inventado por el ingeniero francés, Pierre Bezier, quien desarrolló los principios fundamentales del CAD con su programa llamado UNISURF en 1966. El CAD tiene como principal función la de modelar una pieza terminada, para ello, hace uso de un amplio rango de herramientas computacionales y así crear un dibujo 2D por medio de entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos; o un modelado 3D mediante herramientas que crean superficies y sólidos. El usuario del programa puede asignarle a su diseño una serie de propiedades como color, capa, estilo de línea, nombre, definición, geométrica, material, textura, entre otras, que le permiten manejar el diseño de manera más amigable, sobre todo si se trata de complejas piezas tridimensionales. Otra función del CAD es que permite renderizar el modelo diseñado (proceso de generar una imagen fotorrealista), como se observa en la Figura 19 donde se muestran las diferencias entre un modelo 3D no renderizado y otro renderizado.

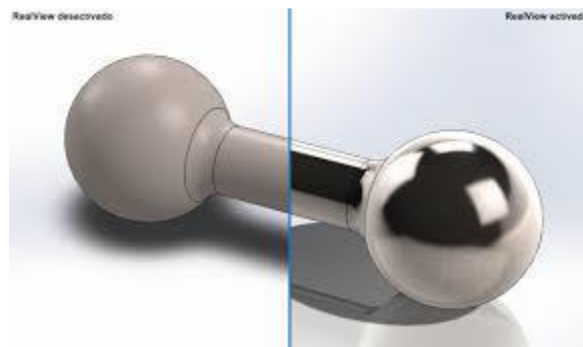


Figura 19: Pieza obtenida por modelado 3D en un software CAD. La mitad izquierda corresponde al modelo sin renderizar y la mitad derecha corresponde al modelo renderizado. [11]

El software CAM tiene sus inicios en el año 1957, y fue concebido por el científico informático Patrick J. Hanratty, quien bautizó a este programa como “PRONTO. CAM va relacionado directamente con el uso de computadoras y desarrollo informático para ayudar en la fase de

manufactura de un producto, es el puente entre el Diseño Asistido por Computadora CAD y el lenguaje de programación de las máquinas CNC con una intervención mínima de la persona que opera el equipo.

La base de datos que se genera mediante el software CAD es procesada por el CAM de tal manera de extraer los datos y generar instrucciones (código de piezas) para operar y controlar la máquina herramienta, y poder realizar las pruebas e inspecciones de calidad antes del proceso de mecanizado.

La función principal del CAM es la posibilidad de describir la trayectoria de la herramienta para diversas operaciones de mecanizado por medio de máquinas CNC. El programa de piezas creado por el CAM, que contiene las instrucciones de movimientos durante el mecanizado, puede ser modificado por el programador para optimizar la trayectoria de la herramienta, o para modificar su trayectoria si es que se encuentran posibles colisiones entre la herramienta de corte y otros elementos de la máquina o la pieza de trabajo.

Inventor CAM es una solución de software de fabricación asistida por computadora (CAM) desarrollada por Autodesk. Está diseñada para trabajar en conjunto con Autodesk Inventor, un software de diseño mecánico en 3D. Inventor CAM permite a los usuarios crear trayectorias de herramientas para máquinas CNC (Control Numérico por Computadora) y controlar el proceso de fabricación directamente desde sus modelos 3D en Inventor. Aquí hay algunas características y capacidades clave de Inventor CAM:

1. Integración con Autodesk Inventor: Inventor CAM está estrechamente integrado con Autodesk Inventor, lo que significa que los cambios de diseño realizados en Inventor se actualizan automáticamente en Inventor CAM, reduciendo la necesidad de transferencia manual de datos y asegurando la consistencia entre diseño y fabricación.
2. Mecanizado 2.5D y 3D: Inventor CAM admite operaciones de mecanizado 2.5D y 3D. Esto incluye tareas como desbaste, contorneado, fresado en cavidades y mecanizado de superficies 3D complejas. Los usuarios pueden definir trayectorias de herramientas y estrategias para mecanizar piezas de manera eficiente.
3. Simulación y Verificación: El software ofrece herramientas de simulación y verificación para comprobar y validar las trayectorias de herramientas antes de enviarlas a la máquina CNC. Esto ayuda a detectar y prevenir errores o colisiones que podrían dañar la máquina o la pieza de trabajo.

4. Postprocesamiento: Inventor CAM genera código G específico de la máquina CNC utilizando postprocesadores. Los usuarios pueden configurar estos postprocesadores para que coincidan con los requisitos específicos de sus máquinas CNC.
5. Optimización de Trayectorias de Herramientas: Incluye características para optimizar las trayectorias de herramientas con el fin de minimizar el tiempo de mecanizado, reducir el desgaste de las herramientas y mejorar el acabado de superficies. Esto ayuda a aumentar la productividad y reducir los costos.
6. Mecanizado de Múltiples Ejes: Para tareas de mecanizado más avanzadas, Inventor CAM admite mecanizado de múltiples ejes, lo que permite operaciones complejas como el fresado de 4 ejes y 5 ejes. Esto es especialmente útil para mecanizar formas y contornos complejos.
7. Gestión de la Biblioteca de Herramientas: El software proporciona una biblioteca de herramientas donde los usuarios pueden definir y gestionar sus herramientas de corte. Esto ayuda a seleccionar las herramientas adecuadas para operaciones de mecanizado específicas.
8. Edición de Trayectorias de Herramientas: Los usuarios pueden editar manualmente las trayectorias de herramientas si es necesario, lo que permite ajustes y personalización del proceso de mecanizado.
9. Documentación: Inventor CAM puede generar documentación, como hojas de preparación y listas de herramientas, para ayudar a los operarios y mecánicos en la configuración y operación de las máquinas CNC.

3.5.2. Parámetros de corte en fresado CNC [11]

El control de los parámetros de corte no se aplica solamente en función del tipo de herramienta de corte que se seleccione, sino que también se controlan en función de la calidad de la superficie de trabajo que se quiera obtener luego del fresado, del tipo de geometría y el tipo de material a cortar. Pero también hay casos donde se deben ajustar debido a limitaciones estructurales de la máquina fresadora y que provoquen un exceso de vibraciones durante el corte del material.

Velocidad de corte (V_c): Indica la velocidad superficial en el diámetro de la herramienta y corresponde al valor inicial para calcular los siguientes datos de corte. Las velocidades de corte son recomendadas en función del tipo de material a mecanizar, según la operación de fresado que se esté realizando, la profundidad de corte por pasada de la herramienta y la calidad de la superficie que se desee obtener. La velocidad de corte está expresada en unidades de metros por minuto (m/min)

Velocidad de corte eficaz o verdadera (V_e): Este valor indica la velocidad superficial en el diámetro eficaz de la herramienta, y es importante en fresas (herramienta de corte) de plaquita redonda, fresas

de ranurar de punta esférica, y cualquier herramienta con radio de punta grande. Así como fresas con ángulos de posición (Kr) inferior a 90° .

Velocidad del husillo (n): Corresponde al número de revoluciones que realiza la herramienta de fresado sobre el husillo en cada minuto. Este valor está orientado a la selección del tipo de husillo a utilizar en la máquina fresadora. Se mide en unidades de revoluciones por minuto (RPM) y se calcula a partir del valor de velocidad de corte recomendado para una operación, según la siguiente relación:

$$V_c = \frac{D_{cap} \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad [23]$$

Despejando el valor de n en la ecuación [23], se obtiene la ecuación [24]:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{D_{cap} \cdot \pi} [RPM] \quad [24]$$

Donde n se mide en revoluciones por minuto [RPM], la velocidad de corte V_c en [m/min], y el diámetro efectivo de corte D_{cap} en [mm].

Avance por diente (fz): Corresponde al avance lineal en dirección del corte. Este valor se mide en unidades de milímetros por diente (mm/diente) y se utiliza para calcular el avance de la mesa en los sistemas de posicionamiento. En catálogos de herramientas de corte se encuentran recomendaciones de este parámetro dependiendo del diámetro de la herramienta, el número de dientes que posea y la profundidad de corte utilizada.

Avance por vuelta (fn): Valor que indica hasta donde se desplaza la herramienta durante una rotación completa Figura 20. Se utiliza para calcular el avance de la mesa y también para determinar el tipo de acabado superficial que una herramienta puede dejar en la pieza de trabajo. El avance por vuelta se mide en unidades de milímetros por revolución (mm/rev), y se relaciona con el avance por diente (fz) en [mm/diente] y el número de dientes de la herramienta (Zn) por medio de la ecuación [25]:

$$fn = Zn \cdot fz \quad [25]$$

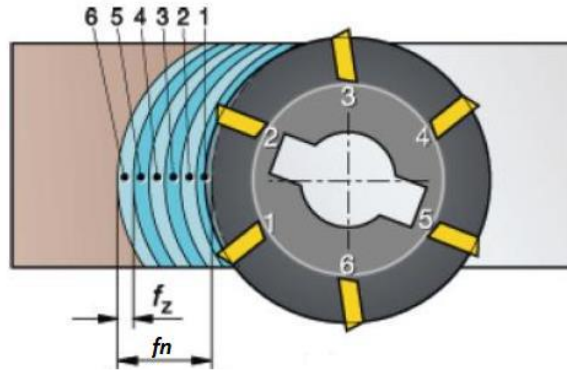


Figura 20: Parámetros de avance por diente (f_z) y avance por vuelta (f_n) de una fresa de corte. [12]

Avance por minuto (V_f): Corresponde a la velocidad de avance de la mesa (ya sea en dirección x o y) y se expresa en unidades de milímetros por minuto (mm/min). Representa el desplazamiento de la herramienta respecto a la pieza en función del avance por diente (f_z), el número de dientes de la herramienta (Z_n) y la velocidad de giro del husillo (n), y se relacionan por medio de la ecuación [26]:

$$V_f = Z_n \cdot f_z \cdot n \quad [26]$$

Anchura de corte (a_e): También llamada anchura radial, corresponde a la distancia de penetración de la herramienta sobre la pieza en dirección radial al eje de la herramienta y perpendicular a la dirección de avance, como se muestra en la Figura 21. Se mide en milímetros (mm).

Profundidad de corte (a_p): Corresponde a la distancia de penetración de la herramienta sobre la pieza en dirección paralela al eje de la herramienta y perpendicular a la dirección de avance (Figura 21). Este valor está limitado por el tamaño del filo de la herramienta y por la potencia de la máquina fresadora. Se mide en milímetros (mm).

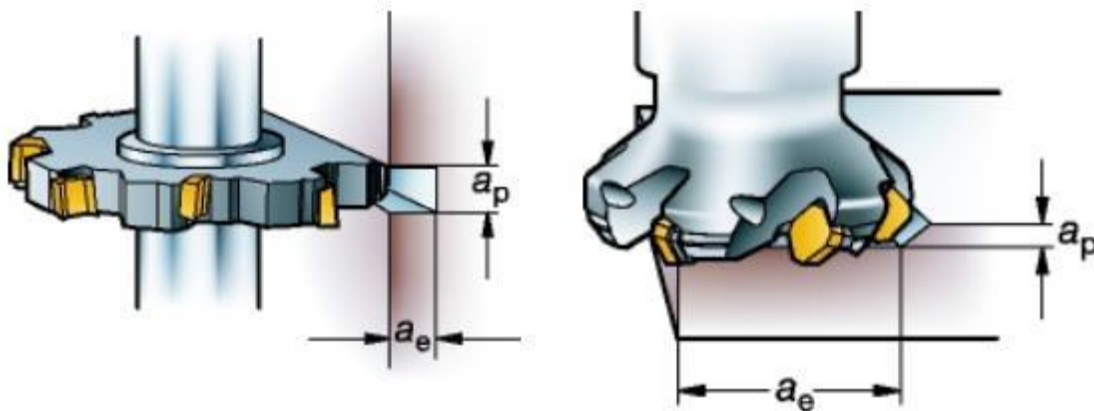


Figura 21: Parámetros de ancho de corte (a_e) y profundidad de corte (a_p). [12]

Inmersión radial (ae/Dc): Es la razón entre la anchura de corte (ae) respecto al diámetro de la fresa (Dc).

Espesor máximo de viruta hex: Este valor es resultado del empañe de la fresa, es decir, de la penetración de la herramienta en la pieza de trabajo (Figura 22). Depende del avance de la herramienta (fz), la anchura de corte (ae) y el ángulo de posición (Kr). Se mide en milímetros (mm).

Espesor medio de viruta h_m : Corresponde al valor promedio del espesor de viruta como se muestra en la Figura 22. Este valor es útil para determinar la fuerza de corte específica (Kc), y se utiliza para el cálculo de la potencia neta de consumo en el husillo de la máquina. Se mide en milímetros (mm).

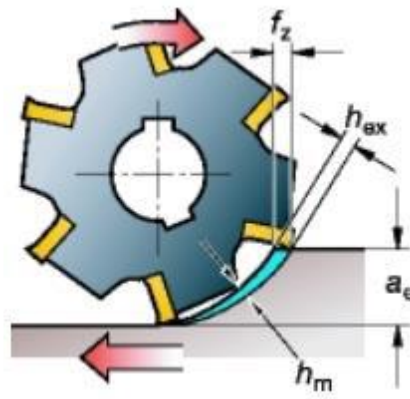


Figura 22: Espesor máximo (hex) y espesor medio de viruta (h_m), obtenida mediante fresado periférico. [12]

Para procesos de fresado lateral, el espesor medio de viruta (h_m) se calcula mediante la ecuación [27] si la herramienta posee filo recto:

$$h_m = \frac{360 \operatorname{sen}(Kr) ae fz}{D_{cap} \pi \arccos\left(1 - \frac{2ae}{D_{cap}}\right)} \quad [27]$$

Donde Kr corresponde al ángulo de posición en grados $[\circ]$, ae el ancho de fresado en [mm], fz el avance por diente en [mm/diente], y D_{cap} el diámetro eficaz de la herramienta en [mm].

Si el proceso de fresado es planeado, y la pieza se encuentra centrada respecto a la herramienta, el espesor medio de viruta se calcula mediante la ecuación [28]:

$$h_m = \frac{180 \cdot \operatorname{sen}(Kr) \cdot ae \cdot fz}{D_{cap} \pi \arcsin\left(\frac{2ae}{D_{cap}}\right)} \quad [28]$$

Velocidad de arranque de viruta (Q): Volumen de material eliminado en milímetros cúbicos por hora. Se calcula a partir de los valores de ancho de fresado (ae) en [mm], profundidad de corte (ap) en [mm] y velocidad de avance (Vf) en [mm/min], expresada por la ecuación [29].

$$Q = \frac{ap \cdot ae \cdot Vf}{1000} [RPM] \quad [29]$$

Fuerza específica de corte (Kct): Depende del esfuerzo de resistencia al corte (Kc) del material cuando se mecaniza con un valor de espesor de viruta concreto (hm). Y corresponde al esfuerzo cortante que tiene que superar la herramienta de corte al mecanizar el material. Se mide en unidades de esfuerzo, Newton por milímetro cuadrado (N/mm^2). Y se calcula por medio de la ecuación [30]:

$$Kct = \frac{Kc \cdot hm^{-mc}}{Dcap \pi} \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) \quad [30]$$

Donde Kc corresponde a la resistencia al corte del material, hm es el espesor medio de viruta en [mm], mc es una constante específica para cada material, en el caso del acero al carbono ISO P $mc = 0,25$, exceptuando el caso del acero de fácil mecanizado donde $mc = 0,21$, γ_0 corresponde al ángulo de desprendimiento de la viruta, es decir, el ángulo (en grados) que posee el filo de corte para evacuar la viruta.

Potencia neta (Pc) y eficiencia (η): Son valores que permiten determinar la potencia bruta que el husillo requiere para operar la herramienta y así garantizar que la máquina cumpla con los parámetros de corte necesarios para obtener una buena calidad de la pieza terminada. La potencia neta se mide en kilowatts (kW), y se calcula como muestra la ecuación [31]:

$$Pc = \frac{ap \cdot ae \cdot Vf \cdot Kct}{60 \cdot 10^6} \quad [31]$$

Con ap la profundidad de fresado en [mm], ae el ancho de fresado [mm], Vf la velocidad de avance [mm/min], y Kct el esfuerzo cortante [N/mm^2].

Tiempo de mecanizado: Se mide en minutos, y corresponde a la longitud del mecanizado (lm) en [mm] dividida por el avance de la mesa (Vf) en [mm/min].

3.5.3. Operación fresado frontal en CNC [11]

El fresado frontal con herramientas de ranurar abarca una amplia variedad de operaciones de mecanizado. A continuación, se detallan las operaciones de mecanizado más exigentes para una máquina fresadora utilizando herramientas enterizas de ranurar:

Fresado en escuadra: Como se observa en la Figura 23, durante el fresado en escuadra se generan dos superficies al mismo tiempo, operación que requiere combinar fresado periférico (lateral) y planeado. Uno de los requisitos más importantes de este proceso es conseguir una escuadra real de noventa grados. Las herramientas de ranurar son una buena solución para escuadras que requieran accesibilidad. Sin embargo, los diámetros de herramienta aconsejados para esta aplicación son mayores (de 10 hasta 20 milímetros), puesto que se necesita una herramienta más robusta que disminuya la posibilidad de vibraciones.

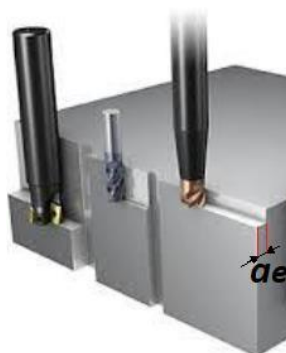


Figura 23: Fresado en escuadra [12]

Las principales recomendaciones para el fresado en escuadra con herramienta de ranurar son:

- El mecanizado en concordancia (descendente) siempre debe ser la primera elección.
- Si la razón entre el diámetro de la herramienta y el ancho de corte es mayor a diez ($D_c/ae > 10$), entonces el avance por diente f_z se debe ajustar según el valor de espesor máximo de viruta h_{ex} para conseguir un buen resultado y evitar la rotura del filo.
- Si la profundidad de la escuadra es inferior al 75% de la longitud del filo, la calidad de la superficie vertical no suele necesitar acabado adicional.
- Cuanto más profundo sea el mecanizado, más importante resulta elegir una velocidad de corte baja que permita evitar la vibración.
- Y si hay vibración, se debe reducir el valor de la velocidad de corte e incrementar el valor del avance por diente f_z , y verificar el valor recomendado de h_{ex} .

- Para escuadras de profundidad dos veces el diámetro de la fresa ($a_p = 2 \times D_c$) se recomienda utilizar una profundidad de corte radial de $a_e = 50\%$ de D_c .
- En el fresado en escuadra, el espesor medio de viruta h_m se calcula a partir de la ecuación, que describe el proceso de fresado lateral.

Planeado: Consiste en el proceso de generar una superficie plana por acción de la punta de la herramienta sobre el material. El planeado es la operación de fresado más habitual y se puede realizar utilizando una amplia gama de herramientas distintas. Las fresas con ángulo de posición de 45° son las que se utilizan con más frecuencia, pero las fresas con plaquita redonda, las fresas de escuadrar y las fresas de disco también se utilizan en determinadas condiciones.

En el fresado de planeado con fresas de ranurar, el espesor medio de viruta h_m se calcula a partir de la ecuación [27], ya que el mecanizado se realiza de forma lateral con un ancho de corte bajo (empañe bajo). En la Figura 24 se muestra un proceso típico de planeado, utilizando una fresa con insertos.

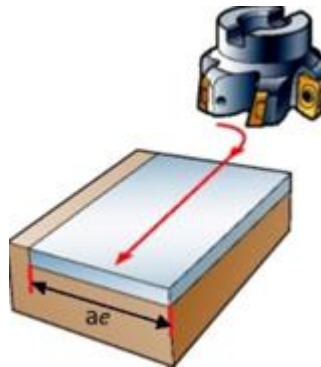


Figura 24 : Fresado de planeado. [12]

Las recomendaciones generales para el proceso de planeado utilizando fresas de ranurar son:

- Se recomienda utilizar un alto avance f_z (hasta 4 mm/diente), y que la herramienta posea un pequeño ángulo de posición (K_r menor a 45°), con la finalidad de mecanizar virutas delgadas, y hacer un método de mecanizado más productivo.
- la profundidad de corte está limitada a un máximo de $a_p = 30\%$ la longitud del filo.
- El empañe radial máximo es $a_e = 20\%$ de D_c
- Si es posible, se debe evitar fresar sobre las interrupciones (agujeros o canales). Estos cortes intermitentes plantean grandes exigencias sobre el filo a causa de las numerosas entradas y salidas.
- Como alternativa, se puede reducir la velocidad de avance recomendada un 50% sobre el área de la pieza que contiene las interrupciones.

Fresado de ranuras: El mecanizado de ranuras corresponde a la formación de una hendidura o canal largo y estrecho en el material con la finalidad de realizar un ensamblaje o guiar una pieza movable. Las fresas frontales de ranurar se seleccionan para ranuras más cortas y superficiales, especialmente las cerradas, y para fresar chaveteros. Las ranuras típicas son:

- Rectas, curvas y acodadas.
- Más anchas que el diámetro de la herramienta.

En el fresado de ranuras, el espesor medio de viruta h_m se calcula a partir de la ecuación [28], ya que la herramienta describe un mecanizado frontal, con la particularidad que luego de cada pasada la herramienta desciende hasta conseguir la profundidad deseada de la ranura, como se observa en la Figura 25.

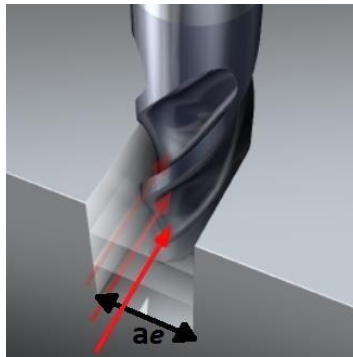


Figura 25: Fresado de ranuras. [12]

Las principales recomendaciones para el fresado de ranuras son:

- Se debe minimizar la distancia desde el portaherramientas hasta el filo para que el voladizo sea lo más corto posible.
- Si el voladizo es grande, se deben hacer cortes más superficiales con mayor avance.
- El diámetro de herramienta debe ser lo más grande posible para conseguir la mejor relación diámetro/longitud, que incrementa la estabilidad.
- La anchura de la ranura debe ser como máximo 70% más que el diámetro de la fresa, D_c
- Ranurado convencional: Para ranuras con diámetro igual al diámetro de la fresa ($D_m = D_c$), el empuje radial es $ae = D_c$.
- Para ranuras de diámetro mayor al de la fresa ($D_m > D_c$), se puede realizar un recorrido de avance en espiral, y se debe considerar lo siguiente: Para ranuras de ancho inferior a $2 \times D_c$, el empuje radial máximo es $a_e = 20\%$ de D_c (El radio del espiral debe ser $w < 10\%$ de D_c ,

Figura 26 a), y para ranuras de ancho superior a $2 \times D_c$, el empañe radial máximo $a_e = 10\%$ de D_c (El radio del espiral debe ser $rad_m = 50\%$ de D_c , Figura 26 b).

- El fresado convencional de ranuras es una operación exigente, por lo que para ranuras con $D_m = D_c$, la profundidad de corte axial a_p debe ser como máximo 30% de la longitud del filo.
- Para ranuras con $D_m > D_c$, la profundidad de corte axial a_p debe ser como máximo 20% de la longitud del filo.
- Se recomienda utilizar fresado descendente siempre que se pueda para que la acción de corte sea más favorable.

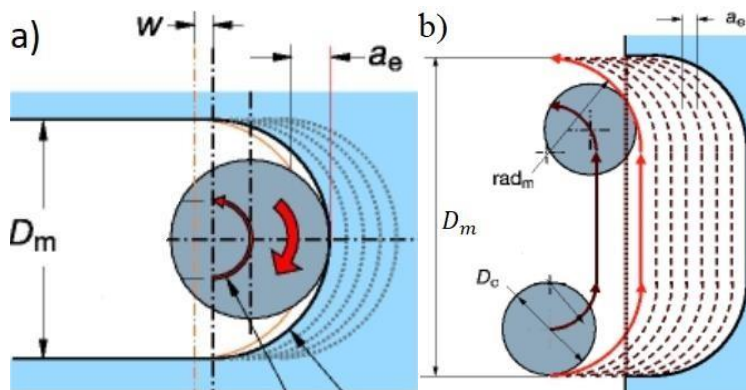


Figura 26: Fresado de ranuras para: a) Ranuras de ancho inferior a $2 \times D_c$, y b) ranuras de anchos superior a $2 \times D_c$. [12]

Fresado axial en "plunge": En el fresado en "plunge", el mecanizado se realiza en el extremo de la herramienta en lugar de la periferia lo que supone una ventaja, ya que cambia la dirección de las fuerzas de corte predominantes de radial a axial (Figura 27). En general, el fresado en "plunge" es un método alternativo cuando no se puede utilizar fresado lateral debido a la vibración. Por ejemplo:

- Si el voladizo de herramienta es superior a 4 veces su diámetro.
- Si la estabilidad del mecanizado es deficiente.
- Para semi-acabado de esquinas.
- Para materiales de difícil mecanización como el titanio.
- También puede ser una alternativa si la potencia o el par de la máquina están ilimitados.

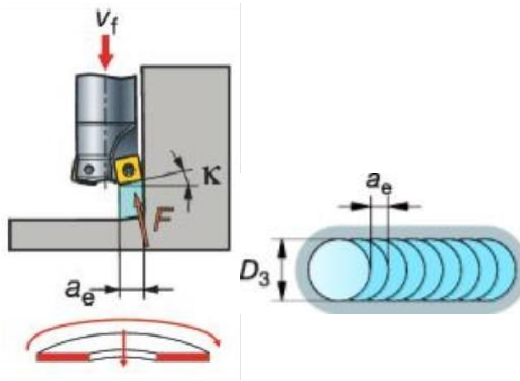


Figura 27: Fresado axial en plunge. [12]

Cabe señalar que en el fresado axial en plunge, la potencia neta (P_c) del husillo se calcula de manera diferente debido a que el avance de la herramienta es de manera axial en vez de radial, y se determina a través de la ecuación [32]:

$$P_c = \frac{D_c \cdot a_e \cdot V_f \cdot K_c}{60 \cdot 10^6} \quad [32]$$

Donde P_c se mide en $[kW]$, D_c corresponde al diámetro de la fresa en $[mm]$, a_e es ancho del corte, V_f es la velocidad de avance axial de la herramienta en $[mm/min]$, y K_c corresponde a la resistencia al corte del material $[N/mm^2]$

Las recomendaciones generales para el fresado axial en plunge son:

- Se debe verificar que siempre haya más de un diente en contacto con el corte.
- Se recomienda utilizar fresas con paso reducido.
- Se puede utilizar como valor máximo de empuje radial $a_e = D_c$.
- El máximo valor del avance por diente para fresas de ranurar es $f_z = 0,05 [mm]$
- Luego de terminado el avance axial, el desplazamiento lateral para mecanizar la siguiente perforación debe ser $s = 0.75 \times D_c$.
- Se debe reducir gradualmente la profundidad en "plunge" para minimizar la vibración.
- Se recomienda utilizar un "programa con desplazamiento en gancho" para evitar re-mecanizar en el movimiento de retorno. Se debe retroceder hasta 1 mm de separación de la pared al final del corte, y NO se recomienda utilizar un ciclo de taladrado porque el re-mecanizado puede provocar vibración al extraer la herramienta.
- Se debe dejar existencias constantes para las operaciones posteriores de acabado.

Mecanizado circular: El fresado circular es un método alternativo a la utilización tradicional de las herramientas de mandrinar. El avance de la fresa sigue un recorrido circular con desplazamiento

simultáneo de los ejes x e y, luego de terminado el recorrido, la herramienta se desplaza descendiendo verticalmente en el material (fresado axial) para mecanizar circularmente otro nivel, así hasta llegar a la profundidad deseada. Es posible ejecutar un fresado circular con solo desplazar en un recorrido circular la mayoría de las fresas con un ángulo de posición de 90 grados.

Existen dos tipos de fresado circular denominados: **fresado exterior** y **fresado interior**, que se diferencian en que el primero es un mecanizado exterior de cuerpos cilíndricos y el segundo corresponde a un mecanizado interior de alojamientos o perforaciones cilíndricas.

En el fresado circular exterior se realiza un mecanizado de tipo lateral, como se muestra en la Figura 28, por lo que el espesor medio de viruta se calcula por medio de la ecuación [27].

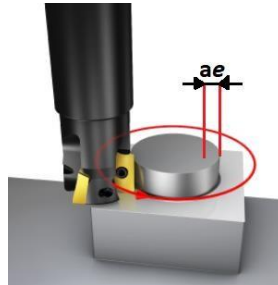


Figura 28: Fresado circular exterior. [12]

Al aplicar fresado circular exterior se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Se recomienda utilizar fresado descendente para mayor estabilidad del proceso.
- Se recomienda utilizar un corte axial amplio, valor máximo de $a_p = 2 \times D_c$
- El empuje radial máximo es $a_e = 30\%$ de D_c .
- Se debe controlar el empuje radial para minimizar la vibración y para maximizar la productividad.

En el fresado circular interior, el espesor medio de viruta h_m se calcula a partir de la ecuación [27] (fresado lateral), como se muestra en la

Figura 29, donde luego de realizar una perforación con taladro, se amplía el diámetro de la perforación mediante fresado. Las principales características de esta operación son:

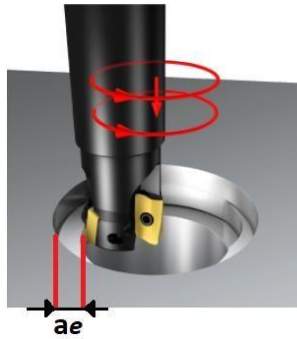


Figura 29: Fresado circular interior. [12]

Fresado de cavidades: El fresado de cavidades es similar al fresado circular interior, se realiza una perforación circular mediante taladrado y luego se amplía con una fresa de ranurar. Terminada la perforación con la profundidad definitiva, se utiliza la fresa para mecanizar el contorno de la cavidad mediante fresado lateral, como se muestra en la Figura 30, donde la cavidad tiene forma cuadrada.

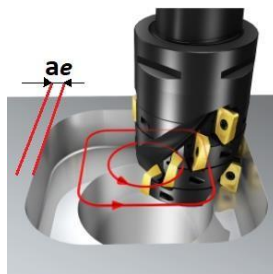


Figura 30: Fresado de cavidades. [12]

Cabe notar que en todas las definiciones anteriores se destaca si el proceso de mecanizado es de tipo planeado o lateral, esto es importante para definir qué tipo de viruta se formará, y tiene directa relación con el consumo de potencia durante la operación. También se puede observar en las Figura 24 a Figura 30 el empañe radial o ancho de corte a_e , parámetro de corte que tiene relevancia para el cálculo del espesor medio de viruta y la potencia de corte.

Las sugerencias para la herramienta y las condiciones de corte al aplicar fresado circular interior y fresado de cavidades son:

- El diámetro de la fresa D_c no debería ser superior al 75% del diámetro del agujero.
- Se debe utilizar el valor de D_c más grande posible y completar el refresado de las esquinas con un valor no superior a $1.5 \times$ el radio de punta.
- En el mecanizado de las esquinas, se recomienda utilizar el radio de punta más grande posible, y el recorrido de avance de la herramienta debe ser forma de espiral.
- Se recomienda utilizar un corte axial amplio, valor máximo de $a_p = 2 \times D_c$

- El empañe radial máximo es $ae = 30\%$ de D_c .
- Se debe penetrar el agujero taladrado siguiendo un recorrido circular.
- Se debe controlar el empañe radial para minimizar la vibración en las esquinas y para maximizar la productividad.

3.5.4. Herramientas de Corte [11]

En el capítulo anterior, se establecieron las dos categorías de herramientas que se emplearán en las pruebas de fresado en la máquina: Acero rápido HSS y Metal duro con recubrimiento. El siguiente paso en este proceso implica la elección de la forma de la fresa, la cual se divide en dos categorías principales: herramientas de corte con inserciones intercambiables y herramientas de corte enterizas.

- **Herramientas de corte con inserciones intercambiables:**

Este tipo de fresas están equipadas con inserciones o plaquitas de corte que pueden cambiarse, y la cantidad de estas plaquitas varía dependiendo del diámetro de la herramienta. Estas inserciones se fijan en una estructura conocida como el cuerpo de la fresa. En lugar de filos de corte, estos insertos tienen dos caras, cada una con al menos tres filos de corte. Esta característica principal ofrece la ventaja de permitir la rotación de los insertos cuando sus filos se desgastan. Otra característica relevante de estos insertos es que son más gruesos, lo que los hace más resistentes y confiables.

- **Herramientas de corte enterizas:**

En contraste con las fresas con inserciones intercambiables, este tipo de herramienta consta de una sola estructura que incluye un mango cilíndrico para sujeción en el portaherramientas, un cuerpo central con una geometría afilada en forma helicoidal para realizar fresados periféricos, y una punta con diversas geometrías, que pueden ser puntas rectas para fresado plano o puntas redondas para fresado de perfiles curvos. La principal ventaja de esta herramienta es su capacidad para fresar diámetros de corte más pequeños en comparación con las fresas con inserciones. La Figura 31 ilustra las características principales de la geometría de una fresa de corte enteriza.

Estas herramientas están disponibles en versiones fabricadas con metal duro, metal duro con recubrimiento y acero rápido (HSS), siendo este último material preferido en las herramientas enterizas debido a su menor costo en comparación con los otros materiales disponibles.

Comparación entre herramientas de corte con insertos y herramientas enterizas.

Tanto las herramientas enterizas como las que incorporan insertos presentan atractivos para operar en diversas condiciones de fresado. No obstante, ambas exhiben una serie de ventajas y desventajas que hacen que una geometría sea más adecuada en función de las limitaciones de un proceso de mecanizado específico. Antes de determinar el tipo de herramienta de corte, es importante destacar que los parámetros de selección están principalmente orientados a cumplir con fines educativos en operaciones de fresado. Esto significa que se busca reducir los tiempos de mecanizado por pieza para ajustarse al tiempo de clase establecido como objetivo. Otros objetivos que se pretenden cumplir con la elección de la herramienta incluyen la economía en los componentes de la máquina, facilidad en el montaje y la capacidad de fresar piezas pequeñas.

La Figura 31 muestra la geometría de la herramienta seleccionada, que corresponde a una **fresa enteriza diseñada para operaciones de fresado frontal**. Esta elección se basa principalmente en la versatilidad de operaciones de mecanizado que puede llevar a cabo.

Las ventajas principales de esta herramienta son las siguientes:

- Los filos desgastados en herramientas con puntas de geometría esférica pueden ser restaurados mediante el reafilado.
- Los filos rotos en herramientas de punta plana también pueden ser reparados mediante el reafilado.
- En caso de rotura irreparable de la herramienta, el costo es menor en comparación con una herramienta recubierta.
- El rango de diámetros de las fresas para ranurar abarca desde los 0,4 hasta los 25 mm, lo que permite realizar una amplia variedad de operaciones de fresado frontal, como fresado en escuadra, fresado de ranuras, planeado, fresado en "plunge" (o fresado axial), fresado de cavidades y mecanizado circular.
- Las diversas geometrías de la punta de la herramienta permiten llevar a cabo operaciones de achaflanado, roscado y perfilado (fresado de contornos), logrando diferentes niveles de desbaste y acabado en las piezas mecanizadas.

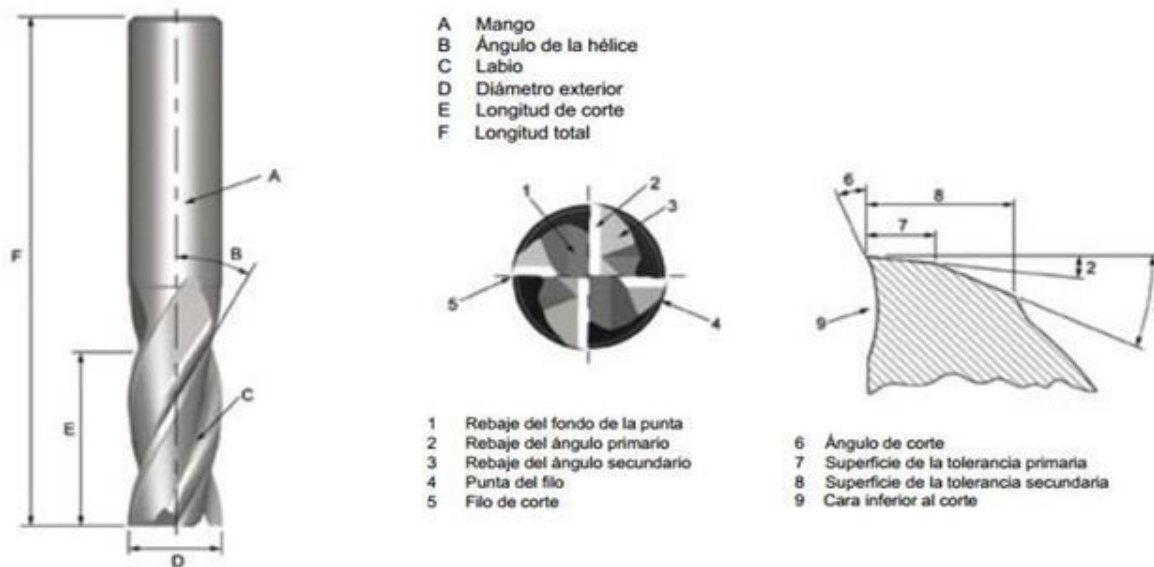


Figura 31: Geometría de una fresa enteriza para fresado de ranuras. [13]

3.6. Componentes para máquinas CNC [8]

Toda máquina CNC necesita de ciertos elementos estándar para su funcionamiento, los cuales serán mencionados a continuación:

Motores: estos componentes son los encargados de ejecutar las ordenes entregadas en el control numérico, estos entregaran la potencia a los carros principal y transversal.

Sistema de transmisión de movimiento: Este componente es el encargado de convertir el torque entregado por el eje del motor en fuerza lineal para el desplazamiento de los carros y el mecanizado, y de transmitir la potencia del mismo, estos componentes se identifican por la relación de transmisión de movimiento. En la maquina actual se cuenta con un husillo de rosca trapecial para el movimiento de los carros principal y transversal.

Placa controladora: este componente se encarga de convertir la información recibida por el computador en pulsos los cuales son enviados a los controladores de los motores., además permiten la comunicación de la máquina con el usuario mediante un software compatible.

Controladores de los motores: este componente se encarga de enviar la energía y pulsos necesarios al motor al recibir las ordenes de la placa controladora. Los controladores alimentan al motor de voltaje y corriente por lo que requieren estar conectados a una fuente de poder externa. Estos tienen dos secciones de configuración, la primera corresponde a la corriente máxima que entregara a los

motores y la segunda corresponde a los pulsos por revolución que entregara, también llamado resolución para los micro pasos.

Computador: Este componente es el encargado de dar soporte a los programas necesarios para la operación y permitir el interfaz usuario máquina. Para seleccionar un computador se considera el software que soporta, Windows, Mac, Linux, etc. El tipo de puertos con el que cuenta, puerto USB o paralelo. La capacidad que tiene para manejar los softwares necesarios para controlar la máquina como lo son los softwares CAD (diseño asistido por computador) y CAM (manufactura asistida por computador).

Finales de carrera: estos son interruptores los cuales al ser accionados detienen el movimiento de los carros, su funcionamiento puede ser el de un interruptor normalmente abierto o de uno normalmente cerrado dependiendo de la conexión que se haga. Se pueden clasificar de acuerdo con su tipo de accionamiento, y a la fuente de alimentación con la que trabajan.

Fuentes de poder: este componente se encarga de transformar la energía de la red a una útil para el sistema de control numérico. De entre las opciones encontradas para cumplir este propósito se tienen:

Parada de emergencia: este es un interruptor con enclavamiento, su funcionamiento corresponde a un interruptor normalmente cerrado que al momento de presionarlo corta la señal entregada por la placa controladora.

Programa generador de código G: este componente se refiere al software especializado en generar la geometría deseada y pasarla código G que posteriormente es leído por la máquina para su ejecución.

Programa interfaz usuario máquina: este componente es el software que permite la comunicación con la máquina.

4. Capítulo 2. Propuesta y Selección de componentes.

En este capítulo se hablará del estado actual en el que se encuentra el equipo, se propondrá un rediseño y se hará la selección de los componentes necesarios. Todo esto continuando con el proyecto de título, "Conversión de la operación de torneado en equipo multipropósito a control numérico computarizado" [8], el cual se centró en el mismo equipo, pero enfocándose en la operación de torneado. En su proyecto se pudo ver las selecciones que hizo y el por qué. Al ser el mismo equipo se seguirá la línea y se mantendrán las selecciones ya realizadas y que por supuesto sean viables para la automatización del proceso de fresado.

4.1. Equipo por convertir

4.1.1. Equipo multipropósito GRÜNDER HQ-500 [8]

La versátil máquina GRÜNDER HQ-500, como su nombre indica, ofrece diversas funciones, incluyendo torneado, fresado, taladrado y roscado. Destaca por su eficacia en el mecanizado de piezas de dimensiones reducidas. En la Tabla 5 se encuentran las descripciones para el proceso de torneado mientras que la Tabla 6 muestra las especificaciones para los procesos de fresado/taladrado. Tabla 7 contine información general de la maquina multipropósito. Las

Tabla 8 y Tabla 9 muestran las velocidades del husillo [RPM] para la operación de fresado/taladro y las revoluciones por minuto del cabezal del torno respectivamente.

Tabla 5: Especificaciones para Torneado HQ 500. [14]

Especificaciones para Torneado HQ 500	
Distancia entre centros	500 mm
Volteo sobre bancada	420 mm
Máxima carrera longitudinal	440 mm
Máxima carrera transversal	200 mm
Cono de husillo	M. T. 4
Carrera de contrapunta	70 mm
Cono de contrapunta	M. T. 3

Diámetro del agujero del husillo	28 mm
Velocidad de husillo	160 – 1360 r.p.m (7 etapas)
Paso del tornillo guía	6 T.P.I o 4 mm
Hilo que puede ser cortado	4 – 120 T.P.I / 0.2 – 6 mm
Rango de automático longitudinal y transversal	0.002 – 0.014 in / 0.05 – 0.35 mm

Tabla 6: Especificaciones para Fresado y Taladrado HQ 500 [14]

Especificaciones para Fresado y Taladrado HQ 500	
Cono de husillo	M.T. 3
Carrera del husillo	110 mm
Máxima distancia entre el centro del husillo a la columna.	440 mm
Máxima distancia entre la nariz y la mesa	306 mm
Velocidad de husillo	120 – 3000 r.p.m (16 etapas)
Tamaño de mesa	475 x 160 mm
Capacidad de taladrado	22 mm
Capacidad de fresado final	28 mm
Capacidad de fresado frontal	80 mm

Tabla 7: Especificaciones generales HQ 500 [14]

Especificaciones generales HQ 500	
Potencia del motor	0,5 KW
Voltaje / Frecuencia	a necesidad del cliente
Peso neto	245 Kg
Peso bruto	275 Kg
Dimensiones generales	1460 x 580 x 965 mm
Dimensiones de empaque	1430 x 580 x 1100 mm

Tabla 8: Velocidad de del husillo para las operaciones de Fresado y taladrado, en RPM. [14]

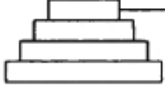
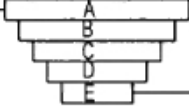
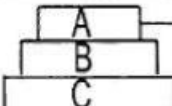
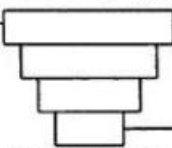
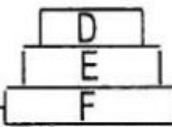
THE DRILLING-MILLING UNIT SPEEDS (○/min)							
							
MOTOR		MIDDLE		SPINDLE			
— A	— B	— A	— C	— A	— D	— B	— A
E —	E —	D —	E —	C —	E —	D —	B —
125	200	310	350	400	450	530	600
— B	— C	— B	— D	— C	— D	— C	— D
C —	D —	A —	C —	B —	B —	A —	A —
660	900	1380	1450	1670	2140	2350	3000

Tabla 9: Revoluciones por minuto (RPM) del cabezal de torno para las distintas configuraciones de las correas de transmisión. [14]

SPINDLE SPEEDS (○/min)						
						
MOTOR		MIDDLE		SPINDLE		
A-F	A-E	A-D	B-F	C-F	B-E	C-D
160	300	375	470	600	870	1360

4.2. Estado Actual

Anteriormente, como se mencionó el equipo multipropósito fue intervenido debido a que se realizó la conversión de la operación de torneado manual a control numérico, pero parte de los objetivos de ese proyecto fue no intervenir en las demás funciones manuales, es decir, en la operación manual de fresado y taladrado. El movimiento del husillo en el cabezal fijo, para fresado y taladrado no fueron intervenidos.

Ahora, la función de fresadora/taladro, utiliza los movimientos de los carros principal y transversal como mesa de fresado, los cuales se encargan de mover el material de trabajo mientras que la

herramienta de corte gira en el cabezal fijo, donde sus revoluciones por minuto son configuradas desde un motor eléctrico similar al del torno, con sus propias poleas y correas en V para las relaciones de transmisión. Estos movimientos de los carros principal y transversal fueron modificados, ya que se les incorporó en estos ejes, motores paso a paso para poder controlar sus movimientos, longitudinal y transversal respectivamente (eje X y eje Y), además de un sistema de transmisión de correa sincronizadora para desplazar la ubicación de los motores a una posición conveniente que permite darle mejor soporte al motor (representado teóricamente en la Figura 32), los tornillos motrices fueron reemplazados por husillos de bolas para evitar el backlash. Esto fue, a grandes rasgos, lo que se modificó e interfiere en el futuro proceso automático de fresado. Aparte de esto se incorporó fuera del equipo una caja de hardware, ubicada en la parte inferior de la base de la máquina, la que está compuesta por los agentes externos tales como drivers de los motores PAP, fuentes de poder y placa controladora.

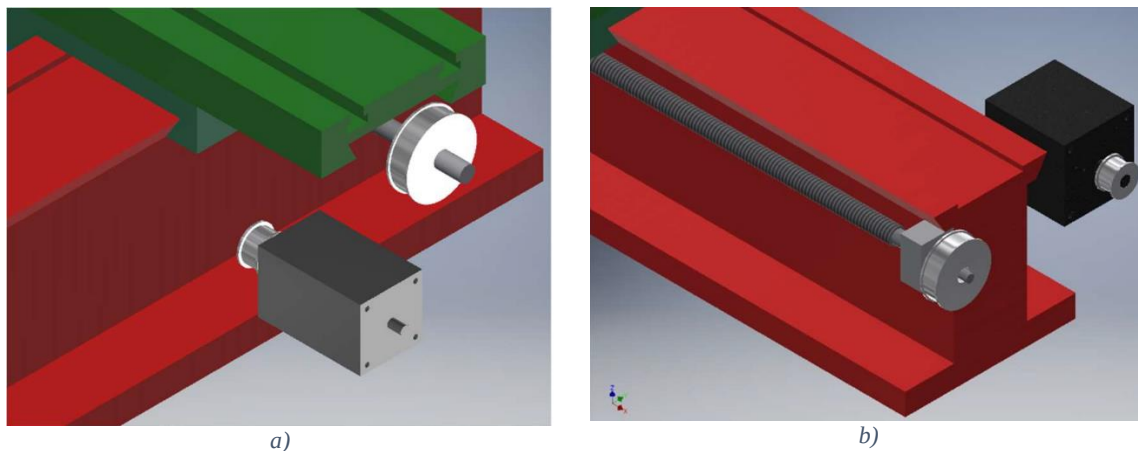


Figura 32: Propuesta de acople de motores mediante correas de sincronización, (A) Acople eje Y (B) acople eje X, (las correas sincronizadoras y los adaptadores para el montaje de cada motor no se encuentran mostradas en las imágenes) [8]

muestra los adaptadores diseñados para el montaje de cada motor, los que van acoplados a cada carro con el fin de sostener el motor u mantener cerrado el sistema de transmisión de correas.

Los diseños mostrados en la Figura 33 a) corresponde a un perfil rectangular de acero al cual se le realizan perforaciones para el ingreso de los ejes del motor paso a paso y del tornillo motriz, cuenta con orificios en ovalo para los pernos de sujeción del motor que permiten el montaje de la correa de sincronización en los ejes, lo que ofrece aislamiento de las virutas en la operación de la máquina. Para la sujeción al carro transversal tiene dos pletinas que encajan en las guías de este y dos perforaciones para la entrada de pernos como los ilustra la Figura 33 b).

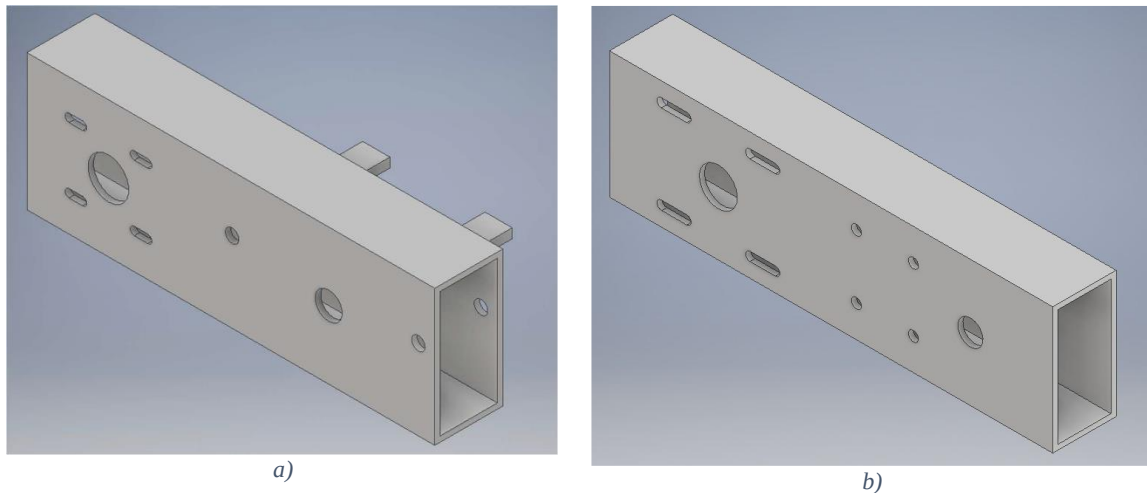


Figura 33: a) Diseño de soporte de motor NEMA 23 para el eje Y. b) Diseño de soporte de motor NEMA 34 para el eje X. [8]

El conjunto propuesto se compone de una segunda tuerca de bronce, una placa y dos pletinas de acero, las cuales se muestran en la Figura 34. La tuerca se une a la placa mediante pernos y golillas de presión, este subconjunto es montado en las pletinas que a su vez están montadas fijas al carro transversal.

La tuerca se acopla a la placa mediante pernos de tal manera que permite el desplazamiento de esta por el tornillo motriz y evita el giro relativo de la tuerca por el mismo. la placa mantiene una posición fija respecto al carro al apoyarse en las pletinas por la rendija que poseen. Con esto la eliminación de holgura entre la tuerca original y la tuerca principal se realiza al girar los pernos de la segunda tuerca.

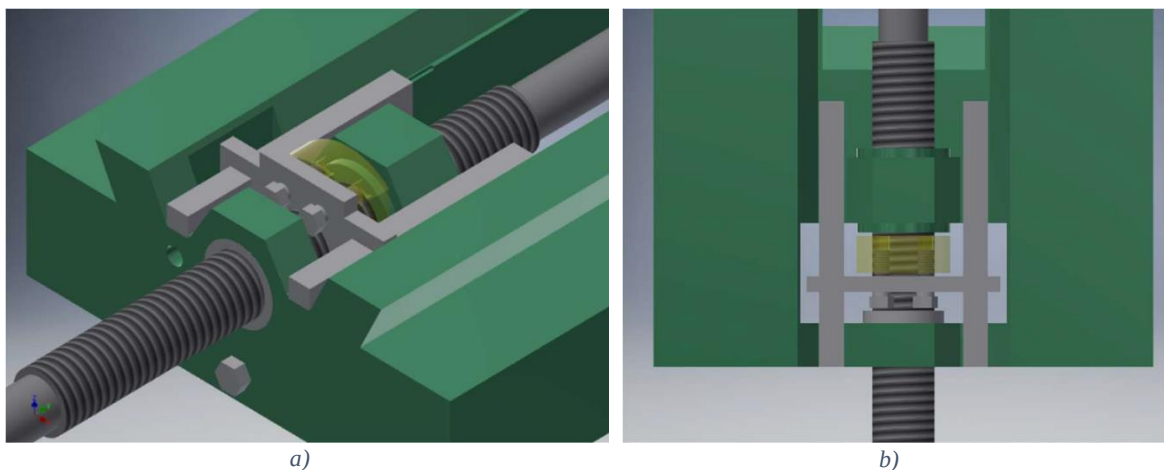


Figura 34: Diseño de sistema anti-retroceso para el eje Y, (A) vista en isométrico, (B) vista superior. [8]

El sistema anti-retroceso del eje X se muestra en la Figura 35 y consiste en la compresión de una tuerca sobre otra.

El conjunto se compone de la segunda tuerca partida de similares dimensiones a la original, una zapata de goma (pastilla de bicicleta) unida a un perno, y un soporte para la zapata, mostrados en la Figura 35.

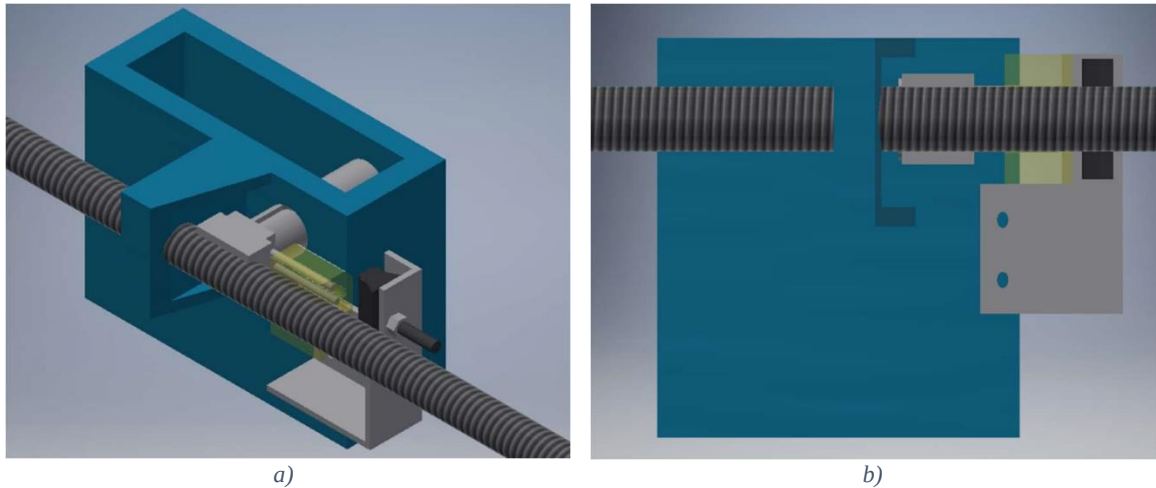


Figura 35: Sistema anti-retroceso del eje X, (A) Vista en isométrico, (B) Vista frontal. [8]

Finalmente, el resultado de la conversión realizada se ilustra en la Figura 36, donde se encuentran los motores ya acoplados con sus respectivas poleas y correas dentro de cada adaptador. Los demás cambios ejecutados no se pueden ver a simple vista ya que estas por dentro de los carros.

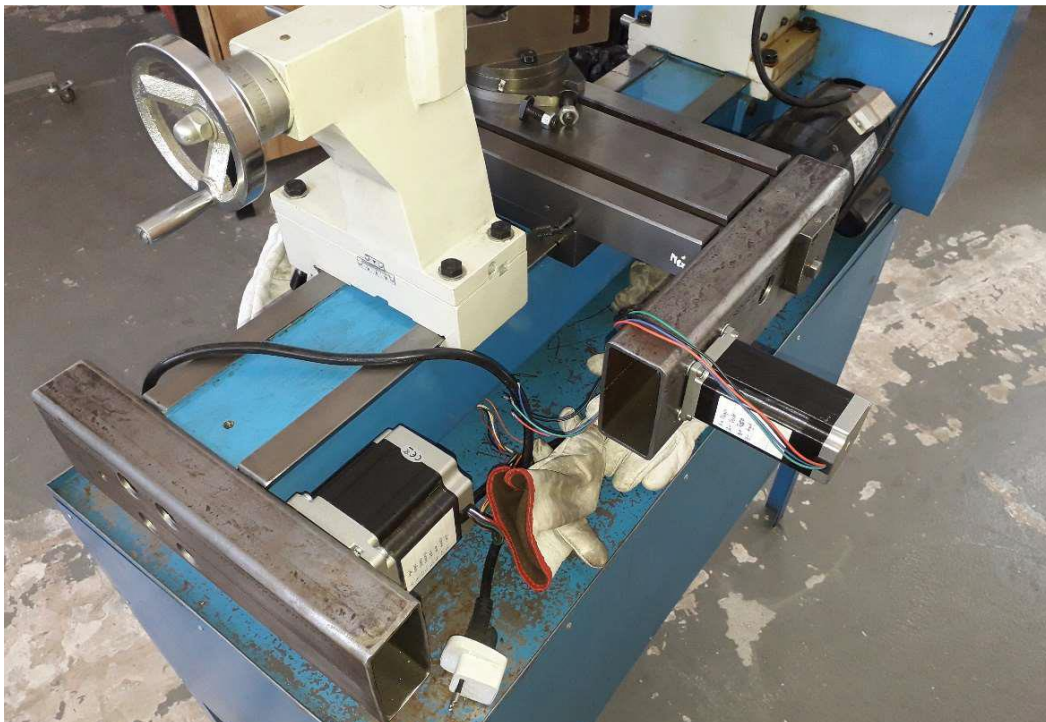


Figura 36: Muestra como quedó el torno luego de la implementación que se le hizo con anterioridad. [8]

El flujo de energía de la máquina empieza en la red la cual llegue al motor del cabezal fijo, que hace girar el material de trabajo o herramienta de trabajo. De ser necesario también desde el motor se transfiere la potencia a los movimientos de los carros principal y transversal. [8]

4.3. Propuesta de rediseño y mejoras.

Como continuación del proyecto se quiere realizar la automatización del husillo de fresado/taladrado para que se mueva automáticamente por el eje Z, para que pueda subir y bajar cuando sea requerido.

En la máquina actualmente ya se cuenta con un equipo de posicionamiento compuesto por los carros principal y transversal, una unidad de control y un programa de piezas. Esto fue realizado para la operación de torneado, ahora se debe realizar un sistema aparte o bien si lo permite la implementación anterior incorporar a lo que ya está hecho los nuevos ajustes para la operación de fresado, Para poder realizar esto se mantienen los objetivos del proyecto anterior, mencionados a continuación:

1. Seguridad en operario y máquina en el funcionamiento de la máquina final.
2. Fácil operación de la máquina.
3. Facilidad de reemplazo de componentes.
4. Conservar o mejorar dentro de lo posible las capacidades técnicas de la máquina, de esto se plantea:
 - Poder mecanizar metal, madera y plásticos.
 - Rango revoluciones por minuto en torneado: 160 - 1360 (rpm) o más.
 - Rango revoluciones por minuto en fresado/taladrado: 120 - 3000 (rpm) o más.
 - Amplio rango de avance en ambos carros de movimiento: se consideran como mínimo los parámetros originales de la máquina que son 0,05 - 0,35 (mm/rev) que usando las revoluciones por minuto actuales el rango queda en: 8 - 476 (mm/min).
Esto para poder mecanizar madera y acero cuyos rangos de operación son extremos opuestos, para la madera se requieren altos avances y para el acero se requieren bajos.
 - Dimensiones de piezas a realizar similar a la actual de la máquina.
 - Sin dejar de lado la temperatura, vibraciones, esfuerzos aceleraciones y cambios en los centros de masa.

4.3.1. Ingeniería inversa

Para tomar decisiones acertadas en la elección de los componentes y la creación de un diseño adecuado, es esencial realizar algunas anotaciones que simplificarán los cálculos futuros. Esto incluye especificar el material con el que se trabajará, recomendar el tipo de herramienta de corte a emplear y definir los parámetros de corte. Es importante mencionar que la potencia necesaria ya está establecida por el motor incorporado en el torno multipropósito, la cual fue previamente detallada en las características técnicas del equipo.

Materiales para mecanizar

En cualquier proceso de mecanizado, sin importar su tipo, los ajustes de la máquina y la elección del material a trabajar están directamente vinculados a las capacidades físicas de potencia, resistencia, estructura y tamaño de la máquina herramienta. En este caso, ya tenemos información sobre las dimensiones y la potencia de la máquina, pero aún debemos calcular el momento necesario para automatizar el eje Z. Por lo tanto, ahora tomaremos un enfoque inverso, comenzando por identificar el tipo de pieza y material que vamos a mecanizar. Luego, seleccionaremos la herramienta de corte apropiada y determinaremos los parámetros de corte más exigentes para el proceso. Con estos datos, determinaremos los requisitos de fuerza y torque y, finalmente, seleccionaremos los componentes estructurales, electrónicos y electromecánicos adecuados.

Es relevante mencionar que, en este caso, el material a mecanizar en la fresadora CNC será acero al carbono (acero con bajo, medio y alto contenido de carbono). A partir de este punto, el proceso de diseño de la fresadora y la selección de componentes se centrarán en cumplir con los requisitos específicos para mecanizar este tipo de material.

La industria del fresado produce una amplia variedad de piezas mecanizadas utilizando diversos materiales, cada uno con características únicas determinadas por sus elementos de aleación, tratamiento térmico, dureza y proceso de formado, entre otros factores. Estas características tienen un impacto significativo en la elección de la geometría, calidad y datos de corte de la herramienta de trabajo. Por esta razón, los materiales utilizados para las piezas se han clasificado en seis grupos principales según la norma ISO, y cada grupo presenta propiedades específicas en cuanto a su maquinabilidad. Estos grupos de materiales incluyen el ISO P (aceros al carbono), ISO M (acero inoxidable), ISO K (fundición), ISO N (metales blandos no ferrosos), ISO S (súper aleaciones termorresistentes HRSA y titanio) y ISO H (aceros templados y revenidos con dureza entre 45-68 HRC).

A continuación, se detallan las principales características del grupo ISO P, correspondiente a los aceros al carbono:

- Material de viruta larga.
- Control de la viruta relativamente fácil y uniforme.
- El acero de bajo contenido en carbono es pastoso y requiere filos agudos.
- Fuerza de corte específica :1500–3100 N/mm².
- La fuerza de corte y la potencia requerida para mecanizar materiales ISO P permanecen dentro de un margen limitado.

4.3.2. Explosionado del sistema de alimentación de la fresa

Se realizará ingeniería inversa solo para el eje Z, ya que es el eje que se necesita intervenir y/o modificar en la posterior implementación.

Para lograr comprender de mejor manera el funcionamiento y encontrar alguna alternativa para automatizar este eje, es necesario desarmar el ensamblaje pieza por pieza. De esta forma se entiende de manera práctica como se logra el movimiento vertical del eje Z.

La Figura 37 muestra el conjunto de piezas que forman el sistema de alimentación de la operación de fresado y taladrado, con su respectivo listado de piezas adjunto en la Tabla 10. El cual fue desensamblado y retirado del cabezal de la fresadora para revisar los componentes y el estado en que se encontraban en su interior.

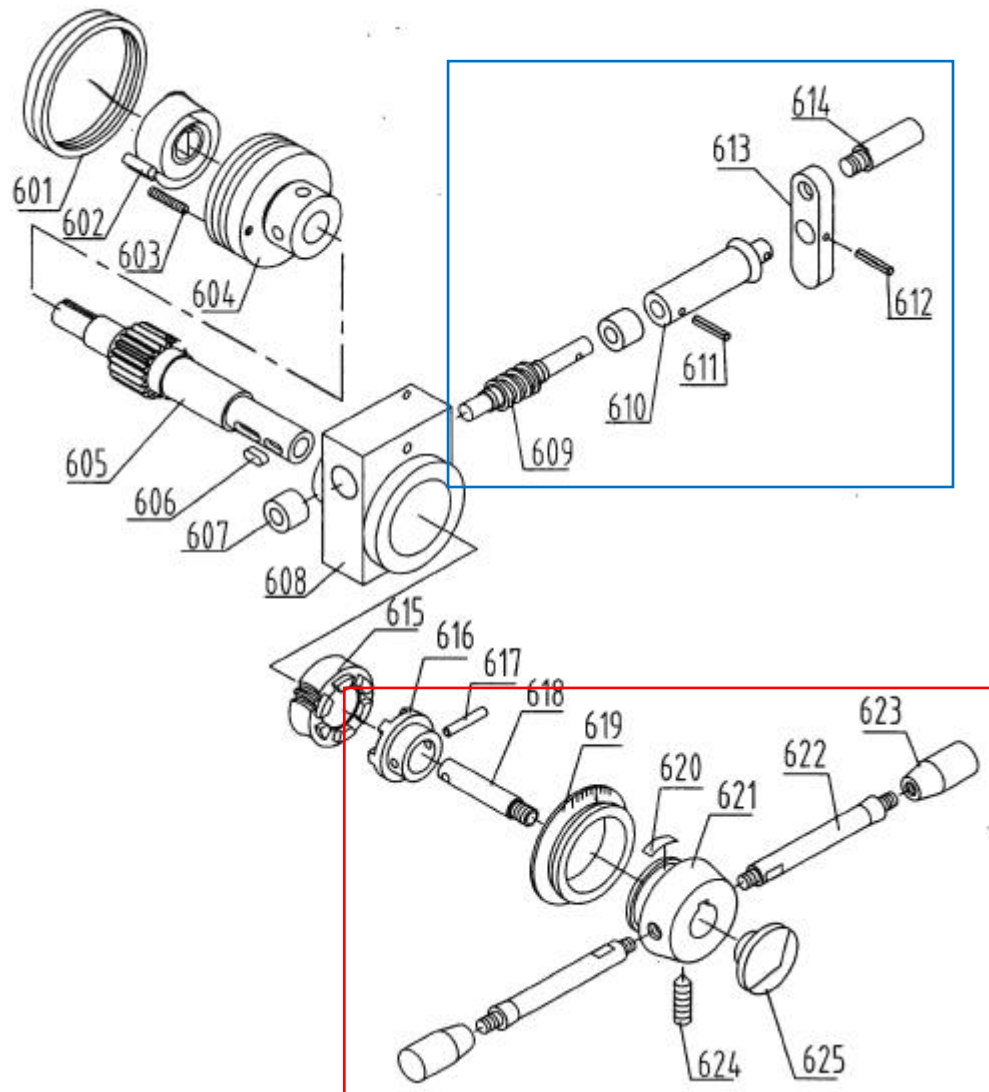


Figura 37: Explosionado del ensamble del sistema de alimentación del cabezal de fresado/taladrado. [14]

Tabla 10 Listado de piezas correspondiente a milling and drilling feed, de la Figura 37. [14]

MILLING&DRILLING FEED ASSEMBLY			
Index No.	Part No.	Description	QTY.
601	HQ400-24-019	Spring box cover	1
602	HQ500-05-006	Spring	1
603	GB/T73-1985	Screw	1
604	HQ500-05-007	Spring box	1
605	HQ500-07-001	Gear shaft	1
606	GB/T1096-1979	Key 6×14	1
607	HQ400-23-010	Collar	2
608	HQ500-07-002	Feed box	1
609	HQ400-23-004	Worm	1
610	HQ500-07-003	Handle shaft	1
611	GB/T879-1986	Spring pin 4×20	1
612	GB/T879-1986	Spring pin 4×14	1
613	HQ500-07-004	Arm	1
614	GB/T4141.4	Handle M8×40	1
615	HQ400-23-005	Worm gear	1
616	HQ400-23-006	Clutch tooth	1
617	GB/T119-1979	Pin D5×28	1
618	HQ400-23-009	Shaft	1
619	HQ400-23-007	Dial ring	1
620	HQ400-23-008	Spring piece	1
621	HQ400-23-013	Dial seat	1
622	HQ400-23-001	Handle	2
623	GB/T4141.14	Handle knob BM8×40	2
624	GB/T71-1979	Screw M6×18	1
625	GB/T4141.27	Knurled knob BM10×40	1

Como se muestra en el explosionado de la Figura 37 el grupo de piezas está formado por la palanca, la que al girarla permite el avance macro del husillo del eje Z (Rectángulo rojo de la Figura 37), la cual está conectada a un eje pequeño que a su vez está fijo gracias a un pin con la corona, la corona forma otro subconjunto con el sin fin, ambos dan lugar al avance micro que se mueve mediante una manilla al costado (Rectángulo azul de la Figura 37). Ahora ya sea el movimiento macro o el micro mueven la corona que se une por un extremo a un eje que contiene un piñón que conecta con la cremallera del eje fresador/taladrador (Figura 38), es decir, que al girar el eje-piñón se logra subir o bajar, dependiendo lo que se desea hacer, la cremallera que contiene el eje Z. Al otro extremo del eje-piñón tiene una ranura que conecta con un resorte espiral, el cual su función es devolver a la posición

original el husillo. La Figura 38 muestra el explosionado de la cremallera con sus componentes mientras que en la Tabla 11 se mencionan sus respectivos nombres y descripción.

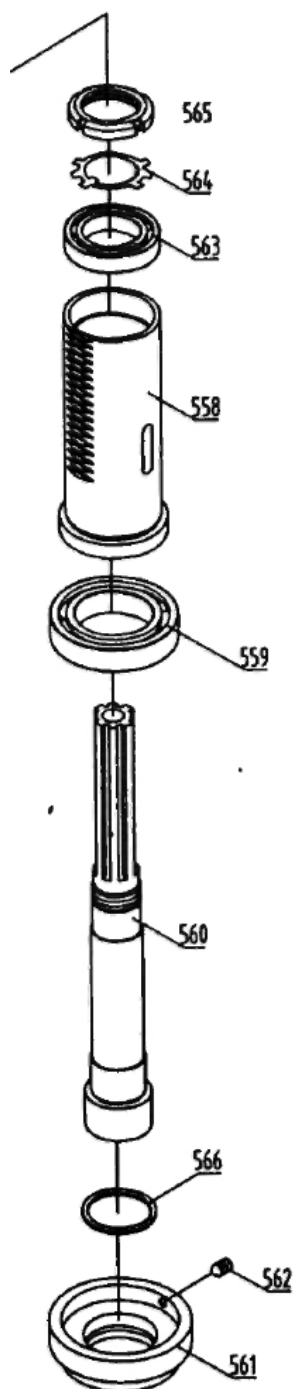


Figura 38: Explosionado del eje cremallera del cabezal de fresado/taladrado. [14]

Tabla 11: Listado de componentes que forman la cremallera. [14]

Index No.	Part No.	Description	QTY.
558	HQ500-08-001	Quill	1
559	GB/T297	Ball bearing 2007107	1
560	HQ500-08-002	Spindle	1
561	HQ400-22-002	Cover	1
562	GB/T71	Screw M5×8	1
563	GB/T297	Bearing 2007106	1
564	GB/T812	Spanner nut M30×1.5	1
565	GB/T858	Washer Φ30	1

4.4. Lista de componentes

Los equipos CNC (Control Numérico Computarizado) constituyen una pieza fundamental en la industria moderna, brindando una versatilidad y precisión sin precedentes en procesos de fabricación y mecanizado. Estos sistemas, independientemente de su aplicación específica, comparten una serie de componentes genéricos esenciales que conforman su estructura fundamental, los cuales son resumidos en la Figura 39. Estos elementos genéricos, aunque comunes a todos los equipos CNC, se combinan y adaptan de manera específica según la naturaleza de la tarea a realizar, ya sea fresado, torneado, o cualquier otra operación de mecanizado. En este contexto, comprender la función y la interacción de estos componentes genéricos es esencial para desentrañar el funcionamiento y las capacidades de cualquier sistema CNC.

En las secciones siguientes, se explorarán varias alternativas para la automatización de sistemas manuales a CNC. Tras exhaustivas investigaciones y comparaciones, se han identificado ciertos elementos que son comúnmente utilizados en este proceso de conversión. Estos elementos se destacan como opciones viables para la automatización. Posteriormente, se llevará a cabo una selección específica, este enfoque permitirá considerar y evaluar diversos factores cruciales para nuestro proyecto en particular, asegurando así una elección fundamentada y adaptada a nuestras necesidades determinadas.

En la Figura 39, se reúnen los tres grupos principales de componentes que conforman un equipo de control numérico computarizado, con sus respectivos elementos. En capítulos siguientes se describen con mayor detalle.

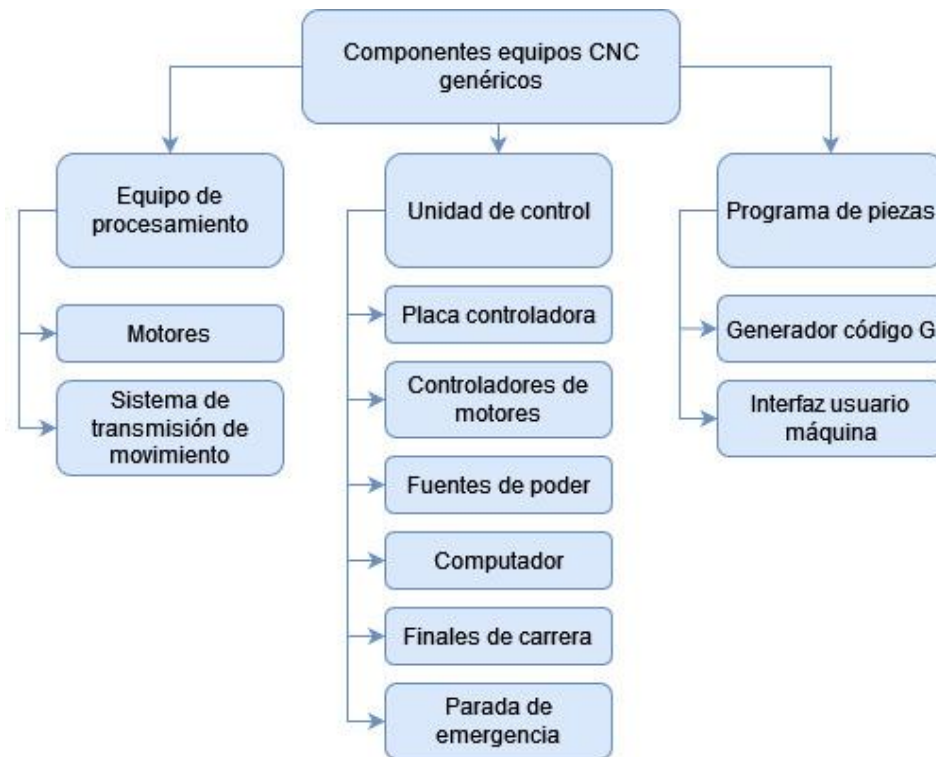


Figura 39: Mapa conceptual que muestra los grupos que forman parte de un equipo CNC con sus respectivos elementos.

Motores: Estos componentes son responsables de ejecutar las instrucciones entregadas desde el control numérico, proporcionando la potencia necesaria para desplazar el sistema en el eje Z. Hay varias opciones de motores disponibles para su uso, que incluyen:

- Motores paso a paso. (Anexo A1)
- Servomotores.

Cuando se elige un tipo de motor para la conversión, es fundamental considerar aspectos como la capacidad de torque durante su funcionamiento, las dimensiones del motor y el tipo de control que se desea implementar en la máquina, ya sea un control de lazo abierto o de lazo cerrado.

Sistema de transmisión de movimiento: Este componente tiene la tarea de transferir el torque generado por el eje del motor al sinfín, lo que permite que, al girar, inicie el movimiento que se traducirá en el desplazamiento vertical de la cremallera y, por ende, del husillo. Entre las alternativas posibles para este sistema se encuentran:

- Acoples flexibles.
- Poleas sincronizadoras.

Cuando se selecciona un sistema de transmisión, es esencial considerar la capacidad de la máquina que se está modificando, es decir, el espacio disponible y los mecanismos ya presentes en la máquina, la relación entre el avance y la rotación del mecanismo, así como la ventaja mecánica del sistema (es decir, si amplifica o reduce la fuerza aplicada).

Placa controladora: Este elemento tiene la responsabilidad de convertir la información proveniente del ordenador en pulsos que luego se transmiten a los controladores de los motores. Además, posibilita la comunicación entre la máquina y el usuario a través de software compatible.

Existen dos tipos de placas a elegir:

- Placas de puerto paralelo.
- Placas de puerto USB.

Al seleccionar una placa, se deben tener en cuenta aspectos como el número de ejes que se desean controlar, la compatibilidad con el software utilizado, la capacidad de procesamiento (cantidad de pulsos por segundo que puede generar) y si requiere una fuente de alimentación externa para su funcionamiento. (Anexo A2)

Controladores de los motores: Estos dispositivos se encargan de suministrar la energía y los pulsos necesarios a los motores, en respuesta a las órdenes recibidas de la placa controladora. Los controladores proveen voltaje y corriente al motor, por lo que necesitan estar conectados a una fuente de alimentación externa. Estos controladores tienen dos configuraciones principales: la primera determina la corriente máxima entregada a los motores, y la segunda define los pulsos por revolución, también conocidos como resolución para los micro pasos.

Se pueden optar por dos tipos de controladores (Anexo A3):

- Controladores de rangos definidos.
- Controladores analógicos.

Computadora: Este componente es fundamental para respaldar los programas necesarios para el funcionamiento y permitir la interfaz entre el usuario y la máquina. Al seleccionar una computadora, se consideran aspectos como el software que es compatible (Windows, Mac, Linux, etc.), el tipo de puertos disponibles (USB o paralelo) y su capacidad para manejar programas esenciales para el control de la máquina, como los programas CAD (diseño asistido por computadora) y CAM (manufactura asistida por computadora).

Finales de carrera: Estos interruptores tienen la función de detener el movimiento de los carros cuando se activan. Pueden ser del tipo normalmente abierto o normalmente cerrado, dependiendo de cómo estén conectados. Los finales de carrera se pueden clasificar según su método de accionamiento y la fuente de alimentación con la que trabajan. Debido a su accesibilidad y bajo costo, generalmente no hay muchas variaciones al elegir un interruptor de contacto mecánico.

Para seleccionar uno de estos interruptores, se deben considerar aspectos como el método de activación que se utilizará, los valores de voltaje y corriente de trabajo, y el tipo de montaje en la máquina.

Fuentes de poder: Este componente se encarga de convertir la energía proveniente de la red eléctrica en una forma utilizable por el sistema de control numérico. Entre las opciones disponibles para cumplir con esta función, se incluyen (Anexo A4):

- Transformador de voltaje fijo.
- Fuente de alimentación regulable.
- Fuente de alimentación de voltaje fijo.

Cuando se elige una fuente de poder, es esencial considerar el tipo de red eléctrica al que se puede conectar, el voltaje de salida que proporciona y la corriente máxima que puede suministrar, según los requisitos de funcionamiento. También se deben tener en cuenta aspectos como el sistema de refrigeración incorporado y las dimensiones físicas de la fuente.

Parada de emergencia: Este interruptor está diseñado con un mecanismo de bloqueo y funciona como un interruptor normalmente cerrado. Cuando se presiona, interrumpe la señal transmitida por la placa controladora.

Al seleccionar uno de estos interruptores de parada de emergencia, es importante considerar su visibilidad y el método de montaje requerido para su instalación en la máquina.

Programa generador de código G: este componente se refiere al software especializado en generar la geometría deseada y pasarla código G que posteriormente es leído por la máquina para su ejecución.

- Vectric Aspire.
- Surfcam.
- Fusion 360.
- Inventor. (Anexo A5)

La elección de estos softwares depende de las necesidades del trabajo al que estará destinado, teniendo programas enfocados a trabajos en 2D, 3D en base a las operaciones para la que está diseñada la máquina.

Programa interfaz usuario máquina: este componente es el software que permite la comunicación con la máquina.

- Mach 3, Artsoft. (Anexo A6)
- GRBL, Arduino.

Al momento de seleccionar un programa de interfaz es importante ver la compatibilidad que tiene este con el hardware en específico con la placa controladora y con el programa generador de código, las funciones que posee para la operación, y las capacidades de soporte del computador con el programa.

4.4.1. Parámetros para componentes [8]

Objetivos deseados en la máquina final:

Luego se definen los objetivos que se quieren alcanzar en el resultado final considerando aspectos tanto técnicos como cualitativos (estética o alguna característica deseada), esto es de vital importancia ya que limitan el alcance de la conversión de la máquina, para ellos se consideran las capacidades actuales que cumple la función de torneado.

Los objetivos deseados se plasman en las capacidades finales a lograr:

- Estado de los mecanismos existentes en el equipo, evaluando si son adecuados para la conversión o si es necesario reemplazarlos con componentes nuevos que cumplan con los requisitos de funcionamiento esperados.
- Dimensiones del equipo, es decir, el espacio disponible para la incorporación de componentes en la bancada o los ejes, sin realizar modificaciones significativas en la estructura existente.
- Tamaño de las piezas que se podrían fabricar en la máquina y las distancias máximas que los ejes pueden recorrer.
- Los materiales para los cuales la máquina está diseñada para trabajar.
- Las herramientas de corte que se emplearán en el proceso de mecanizado.
- Parámetros de mecanizado, incluyendo los avances y las relaciones de transmisión con los que la máquina opera actualmente, tanto en el torno como en la fresa.

- Las revoluciones por minuto máximas que la máquina puede alcanzar en su estado actual, así como los tipos de mecanismos incorporados para su funcionamiento.
- La seguridad del usuario, especialmente teniendo en cuenta que este equipo será utilizado por estudiantes en futuros trabajos, por lo que la seguridad juega un papel crucial en la toma de decisiones.

Motores paso a paso

Estos se seleccionan por el torque que pueden ofrecer, se considera el torque mantenido, que es el mayor torque que puede entregar.

Parámetros de entrada:

- Torque requerido (N): este se estima en base al material a mecanizar y a los parámetros de operación de la máquina (relación de transmisión).
- Relación de transmisión del sistema de transmisión de movimiento.
- Ventaja mecánica del sistema de transmisión.

Parámetros de salida:

- Pasos/ revolución: cantidad de pulsos que debe recibir el motor para dar una vuelta completa.
- Corriente nominal de operación.
- Corriente máxima de operación.
- Espacio físico y dimensiones.

Sistema de transmisión de movimiento

Este se selecciona en base a las funciones que se realizarán, definiendo la precisión y la ventaja mecánica (relación de fuerzas, velocidades y desplazamientos), este depende de lo que se quiere mecanizar, por ejemplo, si se trabajara con piezas que no requieren tanta precisión, pero sí de velocidad de mecanizado se sugiere trabajar con un sistema de piñón cremallera o por correas de transmisión, mientras que si se requiere de altas fuerzas y una precisión elevada se sugiere usar un sistema de tornillo de potencia.

Parámetros de entrada:

- Propósito de trabajo: materiales y piezas a mecanizar.
- Dimensiones físicas de la máquina.

Parámetros de salida:

- Relación de transmisión mecánica: (avance/revolución).
- Ventaja mecánica: relación (fuerza - momento de entrada) / (fuerza – momento de salida).
- Espacio físico y dimensiones.
- Tipo de acoplamiento.

Placa controladora del sistema

La placa controladora se selecciona teniendo como entrada las capacidades deseadas de la máquina, en específico la cantidad de ejes a controlar y la precisión que se quiere alcanzar siendo.

Parámetros de entrada:

- Ejes que necesita controlar.
- Precisión que se requiere: esto afecta la cantidad de pulsos máxima que entrega por segundo (Hz).

Parámetros de salida:

- Software de control compatible.
- Cantidad de pulsos por segundo máxima (Hz).
- Voltaje de operación.
- Espacio físico y dimensiones.
- Tipo de conexiones.

Controladores de los motores

Para los controladores, los motores definen los parámetros de corriente y pulsos que se deben entregar. Los controladores de los motores en conjunto con la placa y el motor definen la velocidad y precisión máxima que se podrá alcanzar.

Parámetros de entrada:

- Pasos por revolución de los motores seleccionados.
- Corriente máxima y nominal de los motores.

Parámetros de salida:

- Rango de pulsos por revolución que puede entregar.
- Rango de corriente que puede suministrar.
- Voltaje de entrada de operación.
- Espacio físico y dimensiones.

Fuentes de poder

Las fuentes de poder son lo último de la selección ya que se debe definir primero cuales son las necesidades energéticas del sistema de posicionamiento y la unidad de control de la máquina. Las fuentes de poder en los controladores de los motores definen el torque en los motores por la corriente que suministran y la velocidad por el voltaje al que operan.

Parámetros de entrada:

- Energía necesaria para los controladores de los motores.
- Energía necesaria para la placa controladora.
- Energía necesaria para el husillo de potencia.

Parámetros de salida:

- Espacio físico y dimensiones.

Finales de carrera y parada de emergencia

Los finales de carrera quedan condicionados por el voltaje y corriente de operación de la placa controladora.

Parámetros de entrada:

- Voltaje que suministra la placa controladora.
- Corriente máxima que puede suministrar la placa controladora.

Parámetros de salida:

- Espacio físico y dimensiones.
- Forma de accionamiento.

Software de control de la placa controladora

El software de control es dependiente de la placa seleccionada ya que debe haber compatibilidad con el hardware, siendo más fácil cambiar este que los componentes físicos al momento de la selección.

Parámetros de entrada:

- Placa controladora seleccionada: compatibilidad.

Parámetros de salida:

- Dominio de archivos CAD/CAM que puede leer el software.
- Requerimientos de hardware y software para correr el programa.

Software CAD/CAM

El software CAD/CAM debe poder trabajar con el software de control de la máquina, de este se tiene:

Parámetros de entrada:

- Dominio de archivos del software controlador de la máquina.

Parámetros de salida:

- Requerimientos de hardware y software para correr el programa.

Adaptadores

Los adaptadores se hacen en función de las necesidades de los componentes seleccionados para alcanzar los objetivos de la conversión.

Parámetros de entrada:

- Espacio y dimensiones de los componentes.
- Necesidades de los componentes.

Parámetros de salida:

- Necesidades de incorporación.

Luego de definir los componentes a utilizar se debe verificar si se cumplen los objetivos deseados, realizar un análisis crítico de estos y elegir si mantenerlos o redefinirlos, luego se debe iterar la selección hasta alcanzar lo deseado.

Se debe tener presente que los parámetros de mecanizado de la máquina se alcanzan con todo el conjunto de componentes por lo que momento al momento de reemplazar un componente se debe tener presente la relación costo/beneficio asociado a ello.

4.5. Selección de detalle

Al tener la propuesta de montaje se puede continuar con la selección específica de los componentes ya mencionados anteriormente. Como se mencionó en el marco teórico, apartado 3.6 Componentes para máquinas CNC, estas máquinas utilizan componentes genéricos para su funcionamiento.

De acuerdo con la selección conceptual de componentes que se realizó en el proyecto anterior [8] (las cuales se encuentran en el Anexo B) a través de pesos ponderados se escogieron las opciones más adecuadas dentro de las alternativas existentes para los elementos del sistema de posicionamiento, unidad de control y programa de piezas, que serán utilizados también para este proyecto. Como el trabajo pasado ya se hizo la selección esta vez no se realizará, se continuará con las selecciones ya realizadas en el proyecto anterior.

Existen ciertos componentes que no fueron considerados en el proceso anterior, por obvias razones, puesto que contemplan procesos distintos (torneado y fresado) por lo cual se necesitarán algunos componentes diferentes que son necesarios para el proceso de fresado. Por lo cual, para su selección se realizará el mismo proceso, matrices de pesos ponderados y/o criterio intuitivo.

Para llevar a cabo la elección adecuada, es esencial tener en consideración varios parámetros que servirán como indicadores para determinar si las opciones de dispositivos son apropiadas para la conversión, mencionados en el apartado 4.4.1 Parámetros para componentes

4.5.1. Propuesta de montaje

Antes de llevar a cabo una selección detallada de los componentes, es esencial elaborar una propuesta de montaje para determinar la compatibilidad de los elementos seleccionados y verificar la viabilidad de su incorporación en la máquina, específicamente para lograr el movimiento vertical de la fresa.

El objetivo principal es automatizar el eje vertical mediante la instalación de un sistema de correa y poleas sincronizadoras. Este sistema estará conectado a un motor paso a paso que se montará en un lateral del cabezal de la fresa. Este motor proporcionará la potencia necesaria para impulsar el conjunto de fresado y taladrado, que incluye la corona y el sinfín, así como el eje de cremallera. Para una comprensión más clara y explicativa, se ha creado un modelo de esta propuesta en el software Inventor. Cabe destacar que este modelo no representa el resultado final, sino una idea de cómo podría llevarse a cabo el montaje.

En la Figura 40 se muestran fotografías del cabezal de la fresa y sistema de alimentación del eje Z, sin modificaciones. La Figura 41 se puede observar la propuesta para el eje Z, elaborada en Inventor, donde las flechas rojas muestran los componentes que se incorporarían, como el motor PAP, el acople flexible y la placa de montaje para el motor.



Figura 40: Imágenes del cabezal de la fresadora desde distintos puntos de vista, sin modificaciones. a) Muestra la palanca del avance macro b) Imagen desde otra perspectiva donde se puede ver la manilla (negra) de avance fino.

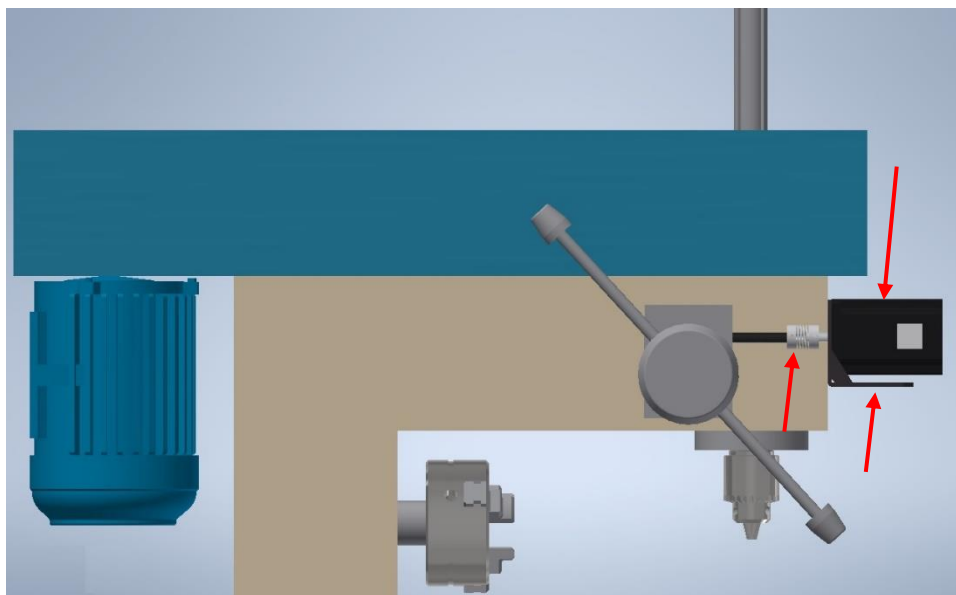
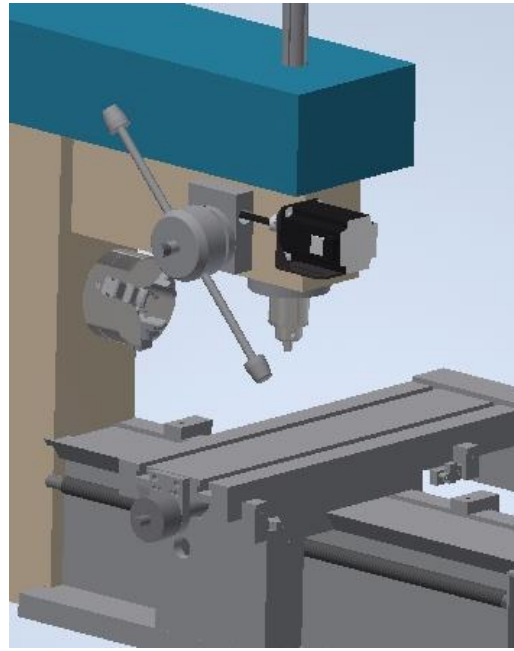


Figura 41: Modelado del equipo multipropósito en inventor con la propuesta para la automatización del eje vertical, vista frontal.



a)



b)

Figura 42: Comparación del a) sistema de alimentación antes de la propuesta, b) diseño en inventor de la propuesta de montaje

La Figura 42 a) ilustra una comparativa del equipo con su sistema de alimentación manual, antes de que sea intervenido, mientras que en la Figura 42 b) se muestra el diseño elaborado en inventor de la propuesta de montaje que se planea seguir en el futuro. se puede observar la propuesta para el eje Z, como se mencionó es solo demostrativo, ya que aún faltaría realizar los adaptadores para el montaje, los cuales no están incluidos en el inventor.

4.5.2. Diagramas de cuerpo libre

Para hacer la selección del motor PAP y la correa sincronizadora a utilizar se requiere calcular las fuerzas que actúan en el sistema y el torque necesario para poder mover y accionar todo el mecanismo.

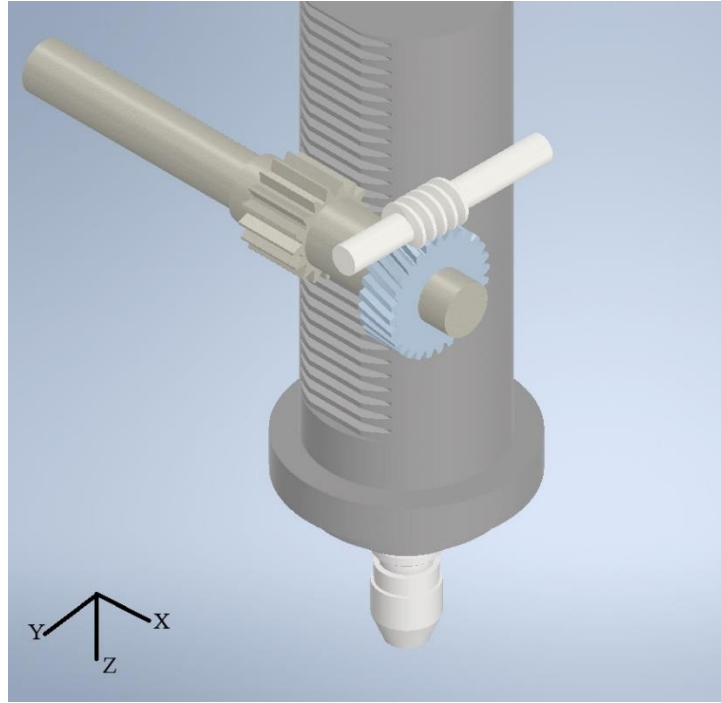


Figura 43: sistema de alimentación de la fresa compuesta por el sinfín (que es el que está conectado al avance micro del eje Z), la corona, piñón y cremallera.

La Figura 43 muestra al sistema al cuál se le desea realizar el diagrama de fuerzas y sumatorias de torque, para poder calcular el momento para poder iniciar el movimiento.

Antes de realizar el cálculo de torque con sumatorias de fuerza y sumatorias de torque, es primordial, tener los valores de aceleración lineal y rotacional que tendrán los distintos elementos.

Los parámetros de corte a utilizar en los cálculos que siguen pertenecen al fresado en plunge, que corresponde a la operación de fresado más exigente para el eje z de la máquina, pues impone utilizar todo el empañe de la herramienta durante el mecanizado ($ae = D_c$), lo que provoca un consumo de potencia elevado, incluso con un avance reducido.

Como se mencionó con anterioridad en el fresado en plunge se sugiere trabajar con una $Vc = 25[m/min]$, mientras que de la ecuación [23] se puede despejar la velocidad del husillo (n) y se logra la ecuación [24], ahora sustituyendo los valores se obtiene el resultado mostrado en la ecuación [33]:

$$n = \frac{Vc \cdot 1000}{D_c \cdot \pi} = \frac{25 \cdot 1000}{6 \cdot \pi} = 1326 [RPM] \quad [33]$$

Con valor de n recientemente obtenido, se reemplaza en la ecuación [26] se consigue el avance por minuto de la ec. [34]:

$$V_f = Z_n f_z n = 4 \cdot 0,015 \cdot 1326 = 79,577 \left[\frac{mm}{min} \right] \quad [34]$$

Donde Z_n corresponde al número de dientes que la herramienta ($Z_n = 4$ *dientes*) y f_z al avance por diente ($f_z = 0,015$ $[mm/diente]$). Este avance corresponde a la velocidad de descenso vertical (en dirección z de la máquina), que en unidades de metros por segundo será el obtenido en la ecuación [35]:

$$V_f = 79,577 \left[\frac{mm}{min} \right] = 0,0013 \left[\frac{m}{s} \right] \quad [35]$$

La aceleración de un sistema de posicionamiento se determina conociendo el tiempo que se demora el eje Z de la máquina en alcanzar la velocidad de avance requerida. Generalmente, la duración de una rampa de aceleración es de 0,1 [s], por lo que la aceleración lineal de la mesa en la dirección vertical está dada por la ecuación [36]:

$$a = \frac{V_f}{t} = \frac{0,0013}{0,1} = 0,013 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad [36]$$

Esta aceleración servirá para calcular las fuerzas inerciales que aparecen durante la rampa de aceleración de eje z de la fresadora.

La aceleración angular que tendrá el piñón será la misma aceleración angular para la corona, la cual viene proporcionada por la ec. [33], que en unidades [RPS]:

$$n_p = \frac{1326}{60} [RPS] = 22,10 [RPS] \quad [37]$$

Luego, la ecuación [37] se divide por el tiempo de duración de la rampa de aceleración, se obtiene la aceleración angular en revoluciones por segundo cuadrado:

$$n_p = \frac{22,10}{0,1} [RPS] = 221 \left[\frac{rev}{s^2} \right] \quad [38]$$

Convirtiendo la aceleración angular de la ec. [38] a unidades de radianes por segundo cuadrado, queda:

$$\alpha_p = 221 \cdot 2\pi = 1388,6 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad [39]$$

Finalmente, para la aceleración angular del sinfín dada en la ecuación [39], se tiene la relación mostrada en la ec. [40]:

$$\frac{n_g}{n_w} = 28 \quad [40]$$

Donde 28 es el número de dientes que tiene la corona, n_g corresponde a las revoluciones por minuto de la corona, las cuales son iguales a n_p , mientras que n_w son la revoluciones por minuto del sinfín, reemplazando los datos, se obtiene resultado mostrado en la ec. [41]:

$$n_w = \frac{n_g}{28} = \frac{1326}{28} = 47,3 \text{ [RPM]} \quad [41]$$

Realizando los mismos pasos anteriores, se logra la siguiente aceleración angular para el elemento sinfín, mostrados en las ecuaciones [42] y [43]:

$$n_w = \frac{47,3}{60} \text{ [RPS]} = 0,789 \text{ [RPS]} \quad [42]$$

$$\alpha_w = \frac{0,789}{0,1} = 7,89 \left[\frac{rev}{s^2} \right] \cdot 2\pi \text{ [rad]} = 49,6 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad [43]$$

Las aceleraciones angulares y aceleración lineal serán utilizadas en el cálculo del torque requerido en el motor de accionamiento del eje Z, acoplado al sinfín.[40]

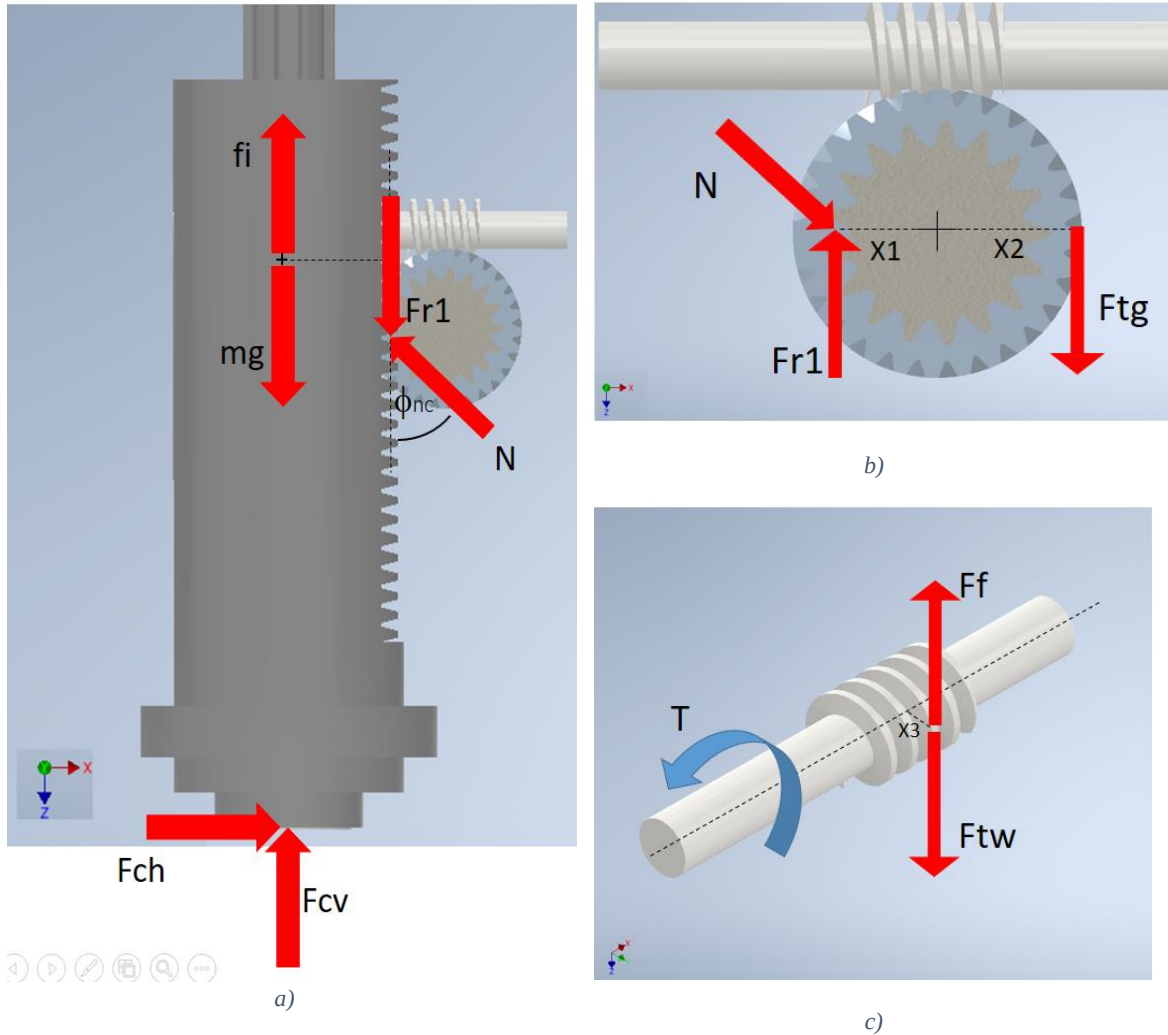


Figura 44: a) Fuerzas presentes en la cremallera b) Fuerzas presentes en el conjunto piñón-corona c) Fuerzas presentes en el componente sinfín con el toque incógnito.

A continuación, se describen las fuerzas involucradas en los diagramas de cuerpo libre del sistema de posicionamiento Z, mostradas en la Figura 44. La unidad de medida utilizada para ellas será el Newton [N]:

Fr_1 corresponde a la fuerza de roce presente entre piñón-cremallera cuando se produce el movimiento.

f_i corresponde a la fuerza inercial durante la etapa de aceleración.

N corresponde a la fuerza normal entre el piñón y la cremallera mientras que ϕ_{nc} corresponde al ángulo de presión de la cremallera.

F_{cv} corresponde a la fuerza de mecanizado vertical ejercida por la herramienta de corte en la pieza de trabajo, dirección axial del husillo. Para las condiciones de mecanizado utilizadas, el valor de F_{cv} no superara los 150 [N].

F_{ch} corresponde a la fuerza de mecanizado horizontal ejercida por la herramienta de corte en la pieza de trabajo, en dirección radial al husillo. Para las condiciones de mecanizado utilizadas, el valor de F_{ch} no superara los 50 [N].

Las fuerzas de mecanizado (vertical y horizontal) son difíciles de calcular por lo que se estos valores se obtuvieron de acuerdo con teoría de mecanizado y ensayos de laboratorios con condiciones de mecanizado similares. Para así obtener fuerzas de corte lo más verosímil al caso estudiado.

F_{tg} corresponde a la fuerza tangencial mínima para descender el sistema, esta actúa en la corona

F_{tw} corresponde a la fuerza tangencial mínima para descender el sistema, esta actúa en el sinfín

F_f corresponde a la fuerza de roce presente entre el conjunto sinfín-corona.

Para el dimensionamiento del motor se consideró el caso más extremo de funcionamiento de la máquina, en donde el husillo de trabajo debe acelerar desde el reposo, y a la vez la herramienta de corte debe mecanizar la pieza de trabajo descendiendo verticalmente. Lo que significa que, en el momento de iniciar el fresado, la herramienta se encuentra inmersa en el material. Las ecuaciones que describen esta situación son:

Realizando sumatoria de fuerzas en el Eje X, mostrada en la ec. [44], luego reemplazando las fuerzas (ec [45]) y despejando, se obtiene la ecuación [46]:

$$\sum F = 0 \quad [44]$$

$$F_{ch} = N \cos \phi_{nc} \quad [45]$$

$$N = \frac{F_{ch}}{\cos \phi_{nc}} \quad [46]$$

Realizando sumatoria de fuerzas en el Eje Z, mostrada en las ecuaciones [47] y [48]. Se despeja y se obtiene la ecuación [49]:

$$\sum F = fi \quad [47]$$

$$m_c g + Fr_1 - N \sin \phi_{nc} = F_{cv} + fi \quad [48]$$

$$Fr_1 = F_{cv} + m_c(a - g) + N \sin \phi_{nc} \quad [49]$$

Se realiza sumatoria de torque en el conjunto piñón-corona como lo muestran las ecuaciones [50] y [51], luego despejando se obtiene la ecuación [52]:

$$\sum T = I\alpha_p \quad [50]$$

$$F_{tg}x_2 + (N \sin \phi_{nc} - Fr_1)x_1 = (I_p + I_g)\alpha_p \quad [51]$$

$$F_{tg} = \frac{(I_p + I_g)\alpha_p - (N \sin \phi_{nc} - Fr_1)x_1}{x_2} \quad [52]$$

Sumatoria de torque en sinfín mostrado en la ecuación [53] para luego despejar y obtener la ecuación [54]:

$$\sum T = I\alpha_w$$

$$T + (F_f - F_{tw})x_3 = I_w\alpha_w \quad [53]$$

$$T = I_w\alpha_w - (F_f - F_{tw})x_3 \quad [54]$$

Donde F_f y F_{tg} se define respectivamente por las ecuaciones [55] y [56]:

$$F_f = F_{tg} \frac{\mu}{\mu \cos \lambda - \cos \phi_n \cos \lambda} \quad [55]$$

$$F_{tw} = F_{tg} \frac{\cos \phi_n \sin \lambda + \mu \cos \lambda}{\mu \sin \lambda - \cos \phi_n \cos \lambda} \quad [56]$$

Con x_1 , x_2 , x_3 , como las distancias perpendiculares de las fuerzas como se pueden ver en la Figura 44 a), b) y c). donde sus valores son:

- $x_1 = 0,0168 [mm]$
- $x_2 = 0,0225 [mm]$
- $x_3 = 0,0072 [mm]$

λ y ϕ_n corresponden a los ángulos de hélice y de presión del eje sinfín. Los cuales viene dados por su diseño de fábrica. Mientras que ϕ_{nc} corresponde al ángulo de presión de la cremallera.

m_c corresponde a la masa de la cremallera, la cual tiene un valor de 10[kg] e incluye el husillo, Chuck que sujeta la fresa, entre otros componentes.

En la Tabla 12 se muestran los resultados del par motriz mínimo requerido en el motor de accionamiento del eje z de la fresadora CNC, que corresponde al valor calculado de acuerdo a la ecuación [54].

Tabla 12: Parámetros para en el cálculo del par torsional requerido en el motor de accionamiento eje z.

$I_p \left[\frac{kg}{m^2} \right]$	$I_g \left[\frac{kg}{m^2} \right]$	$I_w \left[\frac{kg}{m^2} \right]$	$N [N]$	$Fr_1 [N]$	$F_{tg} [N]$	$F_f [N]$	$F_{tw} [N]$	$T [Nm]$
Inercia piñón	Inercia corona	Inercia tonillo sinfín	Fuerza normal	Fuerza de roce $\mu = 0,5$	Fuerza tangencial en corona	Fuerza de fricción	Fuerza tangencial en tornillo sinfín	Torque final requerido
8,9 $\cdot 10^{-5}$	3,32 $\cdot 10^{-5}$	1,93 $\cdot 10^{-6}$	51,53	64,5	46,4	24,9	28,22	0,38

De los cálculos se obtiene que el consumo de par total para el eje Z ($Par = 0,3827 [Nm]$)

4.5.3. Equipo de procesamiento

Motor: De acuerdo con tabla de ponderación realizada en el proyecto “Conversión de la operación de torneado en equipo multipropósito a control numérico computarizado” se concluyó que la mejor opción para la modificación es Motor paso a paso. (Anexo B1)

El motor seleccionado en base al toque obtenido es **Motor Stepper Nema 23**, si bien el torque es pequeño y se podría obtener un motor con torque menor, el cual ahorraría costos, los motores usados usualmente para este tipo de máquinas CNC son Nema23, Nema34, por esto se opta por un Nema23 por ser el más pequeño apto para este tipo de maquinarias. Los otros motores existentes en el mercado con torque bajo son usados usualmente para impresoras 3D.

Las Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15, mencionan las características generales de del motor Nema 23 en específico.

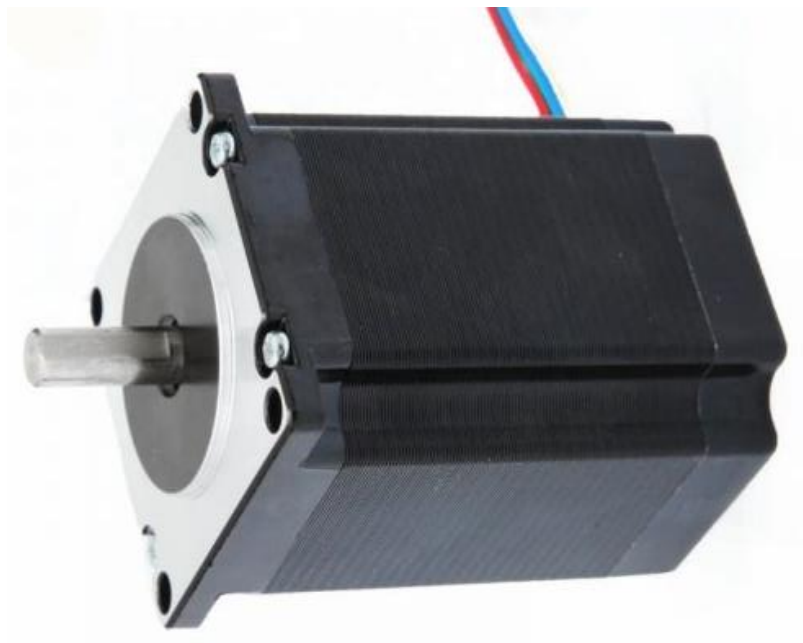


Figura 45: Motor stepper bipolar NEMA 23 (2.7V, 3A, 2N.m, 1.8°) [15]

Tabla 13: Especificaciones del motor. [15]

Tipo de motor	Paso a paso bipolar
Ángulo desplazamiento	1.8°/paso
Torque (Holding)	2 N.m
Voltaje de operación	3.06 V
Corriente máxima/fase	3 A
Resistencia de una fase	1 ohms
Inductancia	1.6 mH ± 20% (1KHz)
Número de cables	4

Tabla 14: Especificaciones físicas del motor. [15]

Bipolar NEMA	23
Largo (L)	75.8 mm
Ancho (W)	57 mm
Alto (H)	57 mm
Diámetro del eje (D)	8 mm

Largo del eje (l)	19.5 mm
Doble Eje	No
Número de cables	4
Largo de los cables (l)	1000 mm
Cable removible	No
Peso	1060 g

Tabla 15: Conexiones del motor NEMA 23. [15]

A+	Rojo
A-	Verde
B+	Amarillo
B-	Azul

Transmisión de movimiento: por conveniencia, se decide por un acople flexible de abrazadera, debido a que el toque necesario es muy pequeño está la opción de montar el Motor PAP directamente al tornillo sinfín, sin correas sincronizadoras. Por esto se escoge el acople flexible de aluminio el cual posee dos grandes ventajas: al ser flexibles, corrigen posibles desalineamientos existentes y también al ser de abrazadera genera un mejor agarre en los ejes.



Figura 46: Acople flexible de abrazadera. [15]

Tabla 16: especificaciones físicas de acople flexible. [15]

Largo:	25[mm]
Diámetro Externo:	19[mm]
Diámetro Interno (Lado motor):	8[mm]
Diámetro Interno (Lado Varilla):	10[mm] Para usar con Varilla roscada 10mm y motor con eje de 8 mm de diámetro.
Peso:	17 <i>gramos</i>

4.5.4. Unidad de control

Placa controladora del sistema: B2La elección de la placa se basa en la cantidad de motores que se desean supervisar y en su capacidad de ser compatible con un software de manejo accesible y de uso sencillo. En este contexto, se optó por una placa específica, denominada RNR MACH3, que se conecta mediante USB y tiene la capacidad de controlar hasta cuatro ejes en una máquina CNC. Como su nombre indica, esta placa es controlada a través del software MACH3. Vale mencionar que esta placa ya había sido seleccionada en un proyecto anterior y actualmente controla exitosamente los dos ejes utilizados en la función de torneado (longitudinal y transversal). Por lo tanto, es factible incorporar el eje Z de la fresadora y, potencialmente, incluso un cuarto eje utilizando esta misma placa.

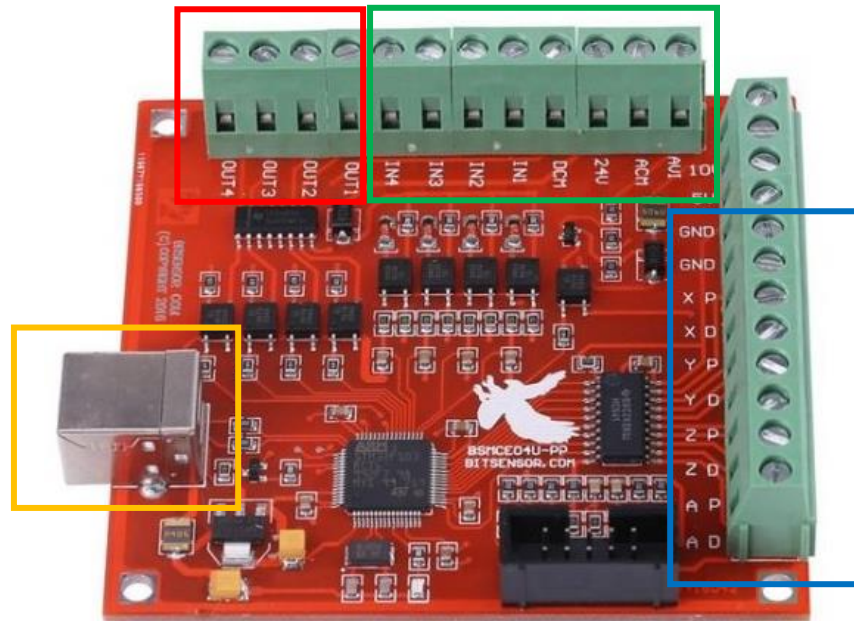


Figura 47: Placa controladora RNR MACH3. [15]

Por lo que placa seleccionada es:

Esta placa puede controlar hasta 4 ejes de una maquina CNC de los cuales 3 son independientes, y uno que es dependiente de uno de los primeros 3, también llamado clon ya que en él se replica el movimiento. Y es controlada por el software MACH 3.

Tabla 17: Características físicas y electrónicas de la placa controladora. [8]

Dimensiones	78 x 82 x 18 [mm]
Cantidad de ejes que controla	4
Voltaje de alimentación	12 y 24 [V]

La placa cuenta con 4 áreas de conexión o control:

- 1° corresponde a la conexión USB mediante un cable de transferencia de datos tipo A. (Rectángulo amarillo Figura 47)
- 2° Corresponde al control de los motores. (Rectángulo azul Figura 47)
- 3° Corresponde a la conexión de los finales de carrera, la parada de emergencia, el inversor de voltaje para el husillo y la sonda para la identificación de la pieza. (Rectángulo verde Figura 47)

4° Corresponde a la conexión de un control manual de los movimientos de los ejes de la maquina mediante un jogging o joystick. (Rectángulo rojo Figura 47)

Controlador de motor (driver): Por la facilidad de uso y configuración se escoge controlador con interruptores, siendo los analógicos más complicados de fabricar.

Ahora teniendo el motor seleccionado, se puede continuar con la selección del driver. El controlador debe poder soportar una corriente de 4[A].

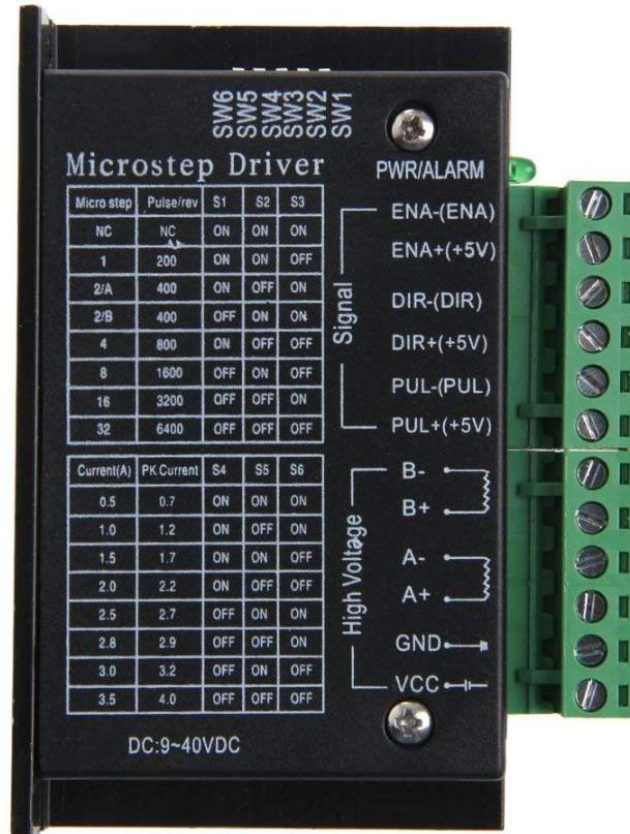


Figura 48: TB6600, driver motor paso a paso 3.5A con caja de protección. [15]

Tabla 18: Especificaciones físicas y eléctricas driver TB6600. [15]

Peso	0.15 kg
Dimensiones	9.1 × 9.1 × 9.1 cm
Fuente de alimentación	DC 9V – 42V
Voltaje de entrada	DC 12 ~ 48V
Temperatura de funcionamiento	–10 ~ 45°C
Temperatura de almacenamiento:	–40 ~ 70°C

Corriente máxima de accionamiento	4A
Frecuencia de corte	20KHZ

Fuente de poder: Se utilizará fuentes de poder de voltaje fijo, debido al resultado de la tabla de pesos ponderados (Anexo B2, fuentes de poder) Las fuentes de poder se seleccionan en base a las necesidades del controlador del motor y la placa controladora. El voltaje de operación debe ser entre 9-40 (VDC) y la corriente debe ser de por lo menos 3,5 (A) que es la corriente máxima a la que se configurará para el buen uso del motor. La placa controladora requiere de una fuente de poder externa para la operación de otros componentes además del motor. La corriente debe ser la necesaria para poder accionar todos los componentes que se incluirán en la conversión, como lo son los finales de carrera y la parada de emergencia. La fuente seleccionada es la Fuente de poder switching (Meanwell) 36V 5.9A 200W, ilustrada en la Figura 49 y las características generales de este elemento se adjuntan en la Tabla 19.



Figura 49: Fuente de poder switching (Meanwell) 36V 5.9A 200W. [15]

Tabla 19: Características físicas y eléctricas fuente de poder. [15]

Largo (L)	215 mm
Ancho (W)	115 mm
Alto (H)	30 mm

Output Voltaje	36 VDC
Corriente	5.9 A
Rango de Corriente	0~5.9 A
Potencia	212.4 W
Rango de Voltaje	32.4~39.6 V
Input Voltaje	180~264 VAC
Frecuencia	47~63 Hz
Eficiencia	89.5%

Computador: esta componente puede ser utilizado cualquiera que posea la capacidad para manejar los softwares CAD y CAM. Además de contar con puertos USB y con software compatible con la placa controladora. Los requisitos en específico se mencionan en la Tabla 20.

Tabla 20: requisitos necesarios para que los programas CAD/CAM sean compatibles con el computador. [16]

Sistema operativo	Versión de 64 bits de Microsoft® Windows® 10.
CPU	Recomendado: 3,0 GHz o superior, 4 o más núcleos Mínimo: 2,5 GHz o superior
Memoria	Recomendado: 32 GB o más de RAM Mínimo: 16 GB de RAM para ensamblajes de menos de 500 piezas

Parada de emergencia: Al ser un componente que fue utilizado en el proyecto anterior, se encuentra en la maquina se puede utilizar para este proyecto también, ya que, al conectarlo a la placa, una vez accionado detendrá todas las acciones de los componentes conectados a esta. Tabla 21 muestra las dimensiones del botón de emergencia y la Figura 50 es una imagen referencial del componente genérico.



Figura 50: Botón de parada de emergencia. [15]

Tabla 21: Especificaciones técnicas botón parada de emergencia. [15]

Área de cobertura	10x10 [cm] aprox
Material	Plástico
Diámetro botón	40 [mm]
Temperatura funcionamiento	−35 a 70 [°C]

4.5.5. Programa de piezas

Como se desea continuar en la misma línea que el trabajo anterior para que ambas intervenciones en el equipo sean utilizadas simultáneamente. Se usan los programas de piezas que ya habían sido escogidos. (Anexo B3)

Software de control de la placa controladora: MACH3. Este programa ha sido seleccionado debido a su compatibilidad con la placa controladora mencionada. MACH3 ofrece una versión de prueba y el costo de adquirir una licencia completa ronda aproximadamente los 150 USD. Figura 51 ilustra la interfaz gráfica de control para fresadora.

MACH3 presenta cuatro plataformas distintas para el control numérico de diversas máquinas. Estas incluyen MACH3 Mill, diseñada para fresadoras; MACH3 Turn, específica para tornos; MACH3 Plasma, destinada a cortadores láser; y MACH3 Loader, que permite la creación de un perfil personalizado para el control de una placa en las tres plataformas anteriores con su propia configuración. En el caso de la automatización de la máquina HQ500, se ha seleccionado MACH3

Loader como plataforma, ya que esta máquina multipropósito tiene capacidades tanto de torno como de fresadora.

Las funciones disponibles en MACH3 Turn incluyen:

1. Movimiento manual de la máquina mediante pulsos.
2. Escritura y lectura del código G utilizando la función MDI (Manual Data Input).
3. Cambio automático de herramienta.
4. Carga y lectura de código G generado en otras plataformas.
5. Simulación de la trayectoria de la herramienta en pantalla al cargar un código G.
6. Ajuste de retroceso a través del software.
7. Establecimiento de límites de carrera por medio de softwares (Softlimits).
8. Generación de código G mediante software.
9. Integración de un sensor de piezas.

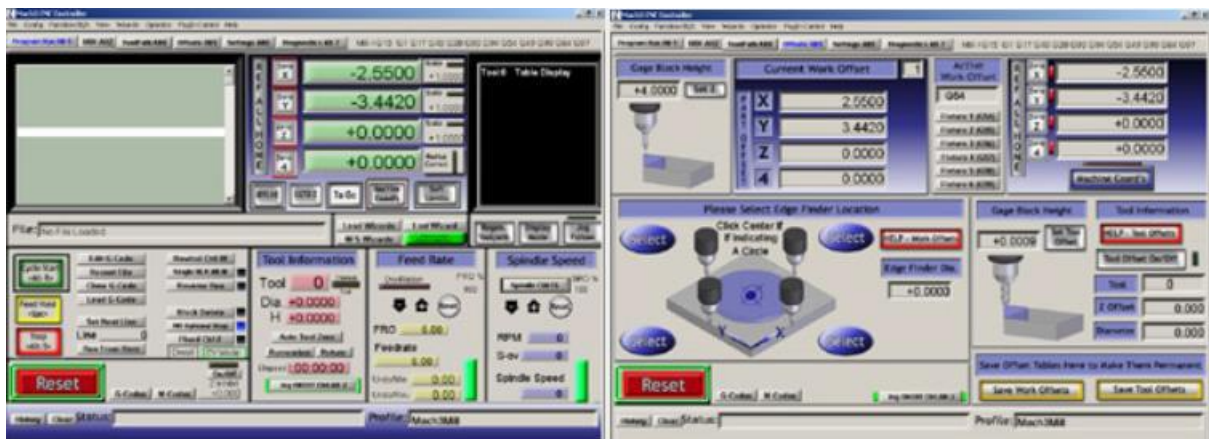


Figura 51: Interfaz gráfica software de control para fresadoras CNC, Mach3Mill.

Software CAD/CAM: El archivo de la pieza o ensamble creado en el software Inventor se ingresa al módulo CAM inserto en Inventor para utilizar dicha información como configuración geométrica en la programación de la trayectoria de la herramienta y pieza durante el mecanizado. El software CAM seleccionado para dicha tarea corresponde al módulo Inventor HSM Professional, que es un complemento totalmente integrado con Autodesk Inventor. (Figura 52)

Al iniciar Autodesk Inventor después de instalar Inventor HSM, se agrega una ficha CAM en la cinta de opciones de comandos de Inventor, estos comandos quedan visibles, activos y listos para utilizar después de crear o abrir un archivo de ensamblaje o de piezas de Inventor. Los archivos compatibles con Inventor HSM son los provenientes de los siguientes softwares de diseño: CATIA, SolidWorks, NX, Pro Engineer, SAT, STEP, IGES, entre otros formatos de archivo estándares.

Cuando un archivo de piezas o ensamblaje se carga y se selecciona una estrategia en la cinta (menú) de opciones de CAM, se activa el navegador de CAM y reemplaza al conocido navegador de modelo de Inventor. El navegador de CAM permite ver y modificar todos los datos relacionados con el mecanizado en la pieza o el ensamblaje actual. Las principales herramientas que posee Inventor HSM para generar una ruta de corte son:

- Selección de las estrategias de ruta de herramienta en la barra de herramientas de CAM. El tipo de ruta seleccionada dependerá de la geometría de la pieza o ensamblaje.
- Creación de una “configuración” que define las propiedades generales de un conjunto de operaciones de mecanizado, como: el sistema de coordenadas de trabajo (SCT), la geometría del material, los accesorios y las superficies de mecanizado. Si no se crea una configuración manualmente antes de añadir la primera operación, se crea automáticamente una configuración con los parámetros por defecto.
- Selección de la operación que se desea realizar en la pieza de trabajo: Cara, vaciado 2D, taladrar, rosca, contorno 2D, 2D adaptativo. El cuadro de diálogo “Operación” contiene una serie de secciones con parámetros que controlan diversos aspectos de la ruta de herramienta. Inventor HSM proporciona los valores de trabajo por defecto para todos los parámetros, siempre que sea posible.
- Selección de una herramienta, su orientación y la geometría que se va a mecanizar.
- Simulación de ruta de la herramienta.
- Simulación del material de la pieza de trabajo: Permite ver el material real que se va a eliminar de un bloque sólido de material.
- Posibilidad de inspeccionar y editar manualmente los archivos del programa de mecanizado (código de piezas).



a)



b)

Figura 52: a) Programa Inventor en su versión del año 2023, desarrollado por Autodesk. B) Inventor CAM, extensión del programa inventor que desarrolla el código G.

5. Capítulo 3. Instalación, montaje y puesta en marcha.

En este capítulo se hablan de los componentes comerciales que serán utilizados para el montaje y también se desarrolla el diseño de los componentes no comerciales, llamados por conveniencia adaptadores, que son necesarios para la incorporación de los componentes definidos en el capítulo anterior, para esto se considera la propuesta de montaje y las necesidades y restricciones de los componentes en su funcionamiento individual y conjunto.

Para el desarrollo de los adaptadores, se siguen los siguientes pasos:

1. **Definición de requisitos de diseño:** En esta etapa, se establecen las funciones que el adaptador debe desempeñar. Estas funciones se determinan según las necesidades específicas de los componentes con los que interactuará el adaptador. Además, se consideran los objetivos que se esperan lograr en la máquina final.
2. **Análisis de Integración:** Se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las posibilidades de ensamblaje de los componentes. Esto implica evaluar los espacios disponibles en la máquina, las dimensiones de los componentes que se integrarán y, finalmente, seleccionar una configuración que no afecte el funcionamiento ni las capacidades de la máquina.
3. **Elaboración de una propuesta de diseño inicial:** En esta fase, se presenta un diseño preliminar que cumple con los criterios mencionados anteriormente.
4. **Establecimiento de procedimientos de fabricación:** Se planifican los pasos necesarios para la fabricación del diseño del componente.
5. **Verificación:** Se lleva a cabo una verificación para determinar si el diseño es viable tanto en lo que respecta al funcionamiento de la máquina como a su integración en ella, así como a su factibilidad de fabricación.

5.1. Diseño de adaptadores

5.1.1. Eje extensor

Para el perfecto ensamble del motor y el tornillo sinfín, es necesario un eje extensor que logre transmitir el movimiento dado por el motor hacia el sistema. Por esto se diseña el siguiente adaptador. (Figura 53)

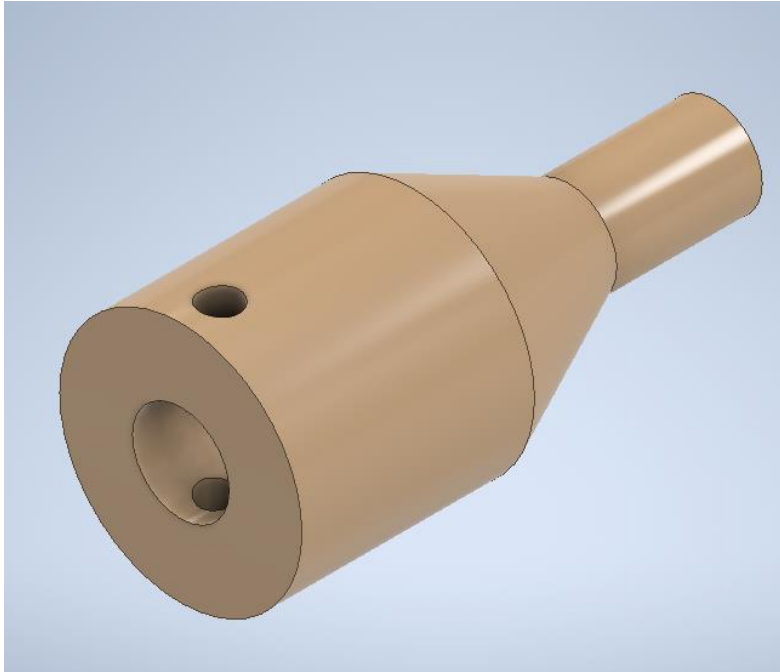


Figura 53: Diseño del eje extensor desarrollado en el programa Inventor

Se decide fabricar en bronce ya que, tiene diversas propiedades tales como es un material fácil de mecanizar y posee buen ajuste. Además, que en el taller metal mecánico hay excedente de bronce en el cual se puede trabajar y no es necesario costear otra pieza de trabajo.

La perforación axial es donde va ajustando el tornillo sinfín, mientras que la perforación transversal que se aprecia y de menor diámetro, será utilizada para acoplar el sinfín y el eje extensor mediante un pin elástico de 5 [mm] de diámetro, este componente es comercial por lo cual no es necesario fabricarlo. En el otro extremo se conecta con el motor paso a paso gracias al acople flexible. Lo anteriormente explicado se aprecia de mejor forma en la Figura 54

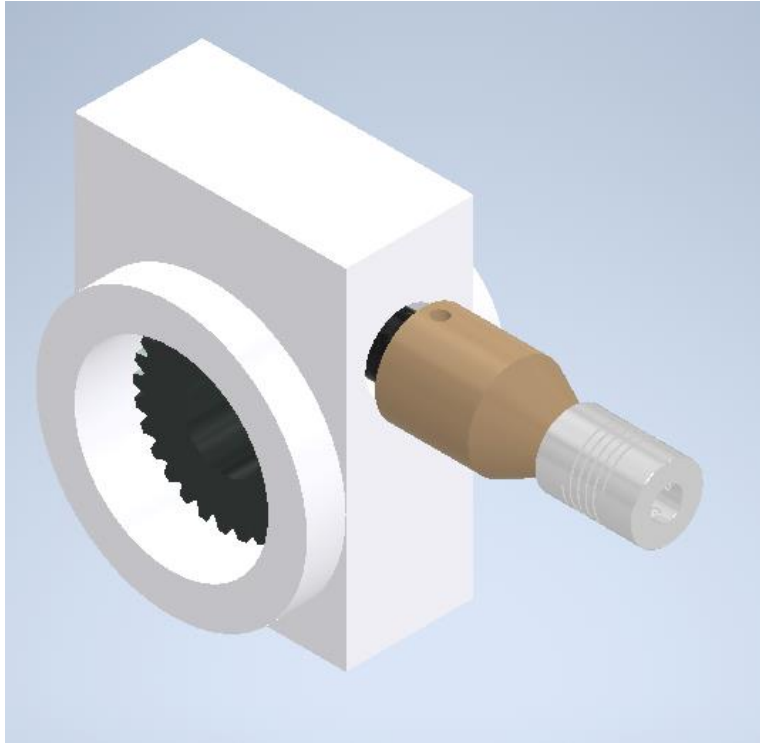


Figura 54: Diseño de caja contenedora del sistema sinfín-corona, mostrando el ajuste del eje extensor y el acople flexible

5.2. Componentes comerciales

5.2.1. Soporte motor

Este componente se decide utilizar por la facilidad de acceso a este mismo, además de ser de bajo costo. Se escoge un soporte liso debido a la geometría del cabezal del torno-fresador donde se desea montar y a su vez con ranuras horizontales alargadas, lo que permite convenir la distancia del motor para alinearlos con el tornillo sinfín. Las placas de montaje se compran de acuerdo con el motor a utilizar. La siguiente específicamente para Nema 23.

Imagen referencial de la placa seleccionada se encuentra en la Figura 55, mientras que la Tabla 22 adjunta las especificaciones físicas de la misma.



Figura 55: Placa Montaje Motor Nema 23 [15]

Tabla 22: Especificaciones físicas placa [15]

Material	Aleación de aluminio
Espesor	3[mm]
Tipo de motor a montar	Nema 23
Dimensiones	96,5 mm x 60 mm

5.3. Caja Hardware

Se requiere lo siguiente de la carcasa del hardware:

- Salvaguardar los elementos electrónicos de factores externos y posibles impactos.
- Facilitar la entrada de aire para lograr una efectiva disipación de calor.
- Posibilitar un acceso sencillo en caso de ser requerido para inspecciones y ajustes de configuración

Antes de elaborar un diseño propuesto, es fundamental evaluar las condiciones de la caja hardware que proviene del proyecto anterior. Esto implica determinar si es necesario construir una nueva caja para albergar los nuevos componentes o si el espacio disponible en la caja actual es suficiente para acomodarlos.

Es importante tener en cuenta que los elementos que se han agregado al proyecto son un driver y una fuente de poder, los cuales deben ser integrados dentro de la caja hardware. Estos componentes

específicos han sido dimensionados de acuerdo con las especificaciones detalladas en el capítulo 4.4.5 Unidad de Control. Por lo tanto, es esencial considerar las dimensiones de estos elementos al evaluar la caja actual y determinar si se requiere una nueva construcción.

Esta evaluación de las condiciones existentes y la compatibilidad con los nuevos componentes es un paso crucial para garantizar una implementación exitosa y eficiente de los elementos adicionales en el proyecto. De esta manera, se asegura que los componentes se integren de manera adecuada en la caja hardware sin generar problemas de espacio ni interferencias en el funcionamiento global del sistema.

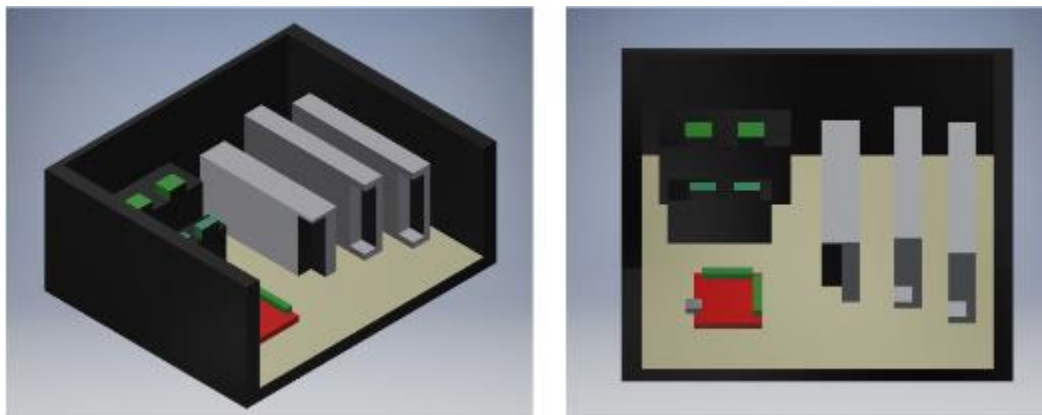


Figura 56: Diseño propuesto de la distribución de los componentes en el proyecto pasado, desde dos perspectivas. [8]

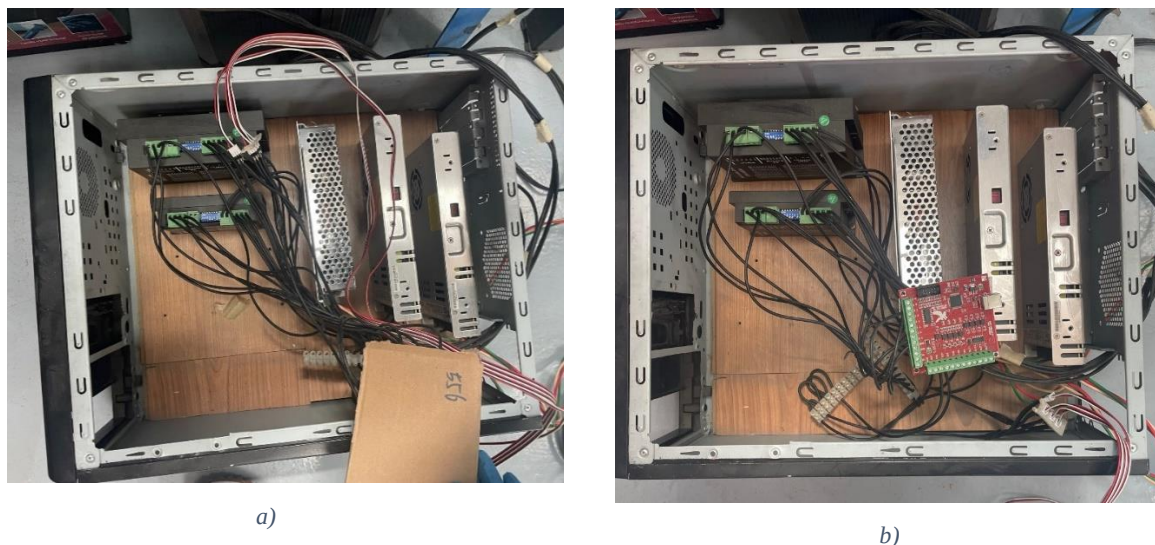


Figura 57: Resultado del ensamblaje de la caja hardware del proceso anterior a) placa controladora dentro de caja de cartón. b) con placa controladora a la vista

Como se puede apreciar en las imágenes de la Figura 56, se presenta el diseño original planteado en el proyecto anterior, mientras que el resultado final se exhibe en la Figura 57. La diferencia más

evidente a simple vista es que, en la implementación final, la placa controladora se encuentra alojada en una caja de cartón en lugar de estar acoplada al tablero.

Después de realizar un análisis exhaustivo para determinar la viabilidad de añadir más componentes a esta misma caja hardware, se ha llegado a la conclusión de que existe espacio suficiente para incorporar estos nuevos elementos. Además, dado que los componentes son de tamaño reducido, no se requiere una cantidad significativa de espacio adicional. El diseño propuesto en respuesta a esta consideración se presenta en detalle en el siguiente capítulo.

5.3.1. Diseño propuesto

La disposición de las fuentes de poder se ha diseñado pensando en la comodidad y eficiencia de la conexión de cables. Esto se logra al ubicar los terminales de las fuentes de poder de manera accesible, lo que facilita la tarea de conectar los cables utilizando un simple destornillador. Esta organización garantiza una instalación más sencilla y eficiente, reduciendo el tiempo necesario para realizar las conexiones y minimizando la posibilidad de errores.

En cuanto a los controladores de los motores, se ha prestado especial atención a su disposición. Están montados de manera que sus interruptores de configuración son fácilmente visibles y accesibles. Esto permite a los operadores realizar ajustes y configuraciones de manera rápida y precisa.

La placa controladora también ha sido ubicada de manera que sea accesible tanto para la conexión de cables como para su revisión. Esto resulta fundamental, ya que garantiza que los técnicos puedan acceder fácilmente a la placa en caso de necesitar hacer conexiones adicionales o realizar inspecciones de mantenimiento. La accesibilidad de la placa controladora agiliza cualquier tarea de diagnóstico o ajuste que sea necesario, lo que contribuye a la eficiencia y disponibilidad de la máquina.

Como ya se habló, hay espacio suficiente por lo que el diseño que se propone es el siguiente:

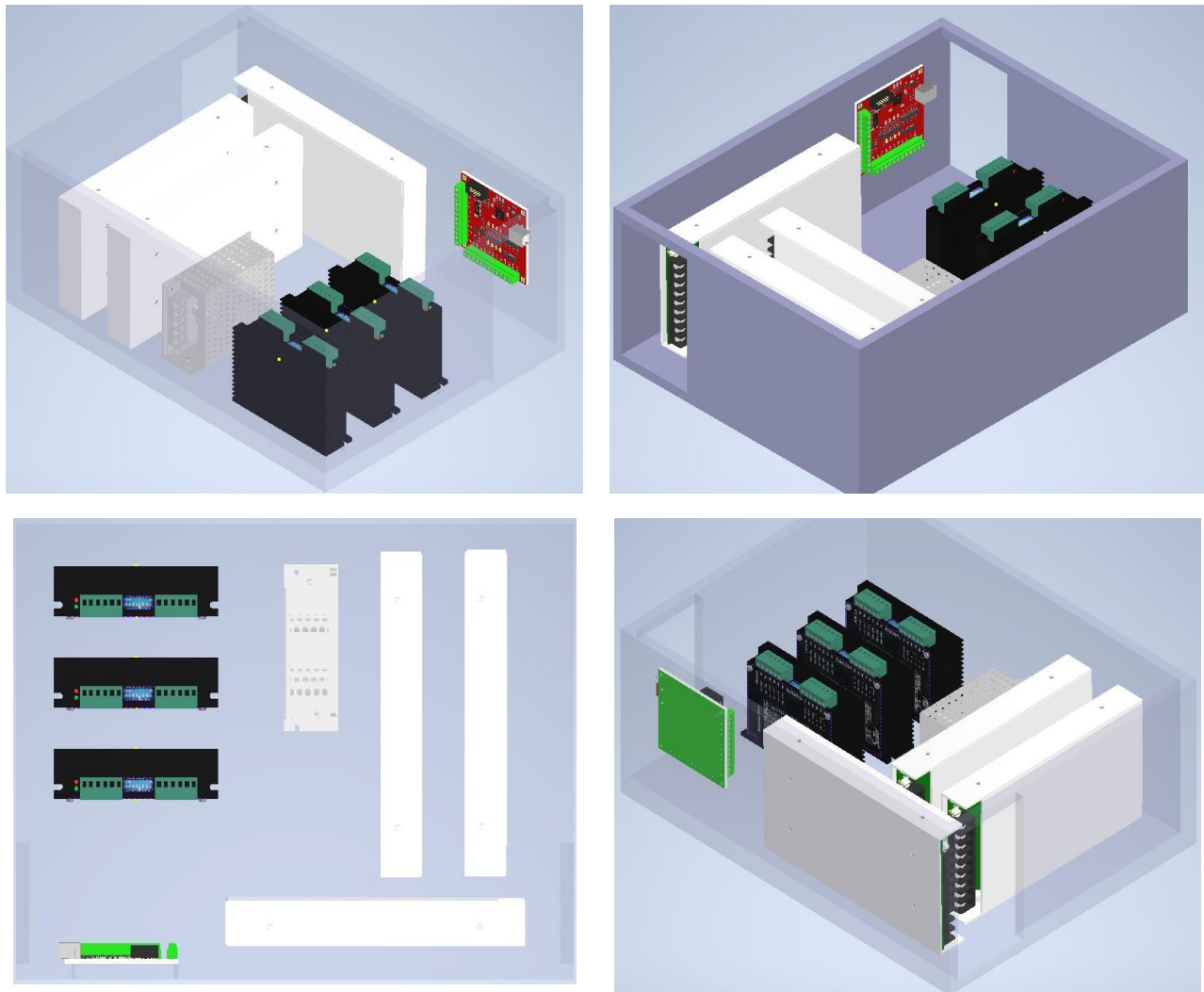


Figura 58: Diseño propuesto en este proyecto para la caja hardware incluyendo en su interior los nuevos elementos, desde distintas perspectivas.

Para optimizar la disposición de los componentes en la caja hardware, se han considerado varias vistas del diseño propuesto. Se ha optado por montar la placa controladora en la pared, como se muestra en la Figura 58. Esta ubicación estratégica coloca la placa cerca de la salida, lo que facilita la conexión del cable USB al computador, permite una rápida comprobación y revisión de las conexiones. Además, los terminales de la placa controladora se encuentran cercanos a los controladores de los motores, lo que simplifica aún más la gestión de las conexiones.

Las fuentes de poder se han instalado en la dirección opuesta, de manera que los enchufes tengan un acceso sencillo al alargador. Esta configuración garantiza una organización eficiente y facilita la operación y el mantenimiento de la máquina.

Cabe señalar que en las representaciones gráficas no se han incluido los cables, esto se hace de manera intencional para proporcionar una vista más clara y detallada de la distribución de los componentes en la caja hardware, facilitando la comprensión del diseño.

5.4. Estudio de prefactibilidad técnica

Para verificar la factibilidad de llevar a cabo la conversión de la operación de fresado, primero es esencial evaluar el estado actual de la máquina, la cual se encuentra en condiciones adecuadas para ser modificada.

Es necesario realizar perforaciones en la estructura del cabezal de la máquina con el fin de incorporar el soporte del motor. Esto no tiene ningún impacto en el funcionamiento ni en la estabilidad de la máquina, dado que el peso del soporte es insignificante en comparación con el del equipo.

Además, disponemos de los recursos necesarios, incluyendo materiales, maquinaria y, lo más importante, personal capacitado en el taller metalmecánico de la universidad, para llevar a cabo la fabricación de los adaptadores requeridos.

5.5. Estudio de prefactibilidad económica

Dado el enfoque educativo del proyecto, se presenta un desglose de los gastos relacionados con la conversión sin abordar su repercusión económica. En otros contextos, se sugiere efectuar una comparación con el valor de compra de máquinas de capacidades equivalentes. El costo abarca los elementos y suministros necesarios para la adaptación, sin considerar los gastos de mano de obra, dado que la universidad brindará los recursos correspondientes, además de la supervisión técnica brindada por profesores. Costos asociados en la Tabla 23.

Tabla 23: Compras de componentes mecánicos, eléctricos y electrónico

Componentes	Cantidad	Observación	Precio unitario	IVA total	Total
Motor Pap	1	2.7V, 3A, 2N.m, 1.8°	\$34.445	\$6.545	\$40.990
Acople flexible	1	Diámetros de 6,5mm y 10mm	\$3.353	\$637	\$3.990
Driver	1	TB6600 3.5A con caja de protección	\$14.277	\$2.713	\$16.990
Placa montaje motor	1	Para nema 23, perfiles V-slot	\$8.395	\$1.595	\$9.990
Fuente poder	1	Fuente de poder switching (Meanwell) 36V 5.9A 200W	\$27.723	\$5.267	\$32.990

Perno Parker	10	Métrico cabeza plana inox 304 5x16mm	\$130	\$247	\$1.547
Perno cocina	10	Métrico binding zing 3x10mm	\$10	\$19	\$119
Tuerca hexagonal	10	Métrica inoxidable 304 M5-0,8	\$74	\$140	\$875
Golilla	10	Plana inox 304 3/16	\$30	\$57	\$357
Cable 4 conductores	3	-	\$2.521	\$1.437	\$9.000
Cordón	2	3x1,5mm negro	\$1.848	\$702	\$4.398
cordón	1,5	4x1,5mm negro	\$2.521	\$718	\$4.500
regleta de conexión	1	6mm	\$1.260	\$239	\$1.499
Enchufe macho	1	Conv 2P+T 10A	\$1.512	\$287	\$1.799
Adaptador universal	1	10A	\$3.193	\$607	\$3.800
					\$132850

5.6. Implementación

5.6.1. Construcción

Este capítulo se centra en los resultados obtenidos al producir e integrar los componentes que fueron cuidadosamente escogidos y diseñados, abarcando las etapas de construcción, ensamblaje, configuración y pruebas de la máquina.

5.6.1.1. Construcción de adaptadores

A partir de una pieza de bronce que sobraba de un proyecto en el taller de metalurgia de la universidad, comenzamos el proceso de transformación. Inicialmente, se realizó un cilindrado para igualar el diámetro mayor especificado en el plano. Luego, se efectuó otro cilindrado para obtener el diámetro menor en el extremo opuesto, con una longitud de 20[mm]. A continuación, se llevó a cabo un cilindrado cónico en la zona de transición entre las secciones para evitar la concentración de esfuerzos. Este cónico abarcó desde un diámetro de 10[mm] en el extremo más pequeño hasta 25[mm] en el extremo más grande.

Posteriormente, perforamos la cara del diámetro mayor con una broca de 10[mm], alcanzando una profundidad de 20[mm]. Después, realizamos una perforación transversal de 5[mm] de diámetro,

destinada a alojar el pin elástico que atraviesa el sinfín. Con la pieza ya tomando forma, procedimos a realizar detalles adicionales, como chaflanes en los bordes, asegurando un ajuste perfecto. El plano de esta pieza se encuentra en Anexo E1.

El resultado final se presenta en las figuras a continuación, donde se muestra la pieza montada en un extremo con un acople flexible (Figura 59) y en el otro con el sinfín (Figura 60), logrando una integración precisa y funcional.

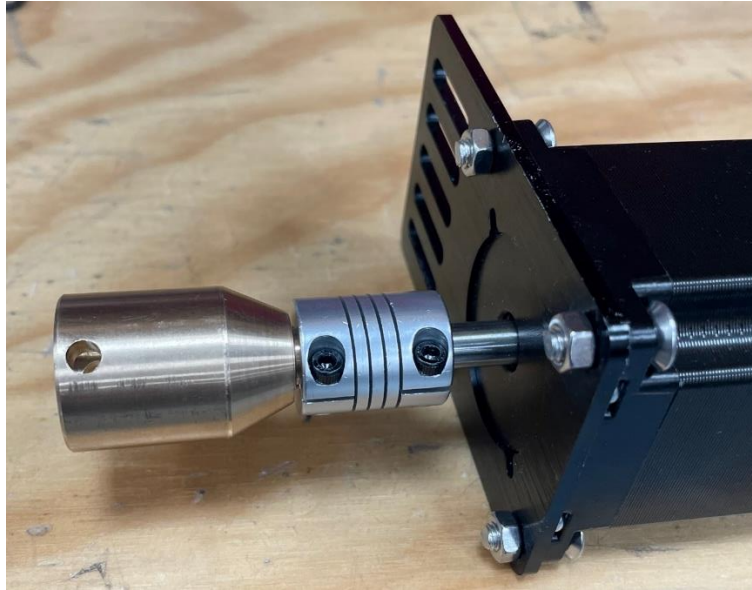
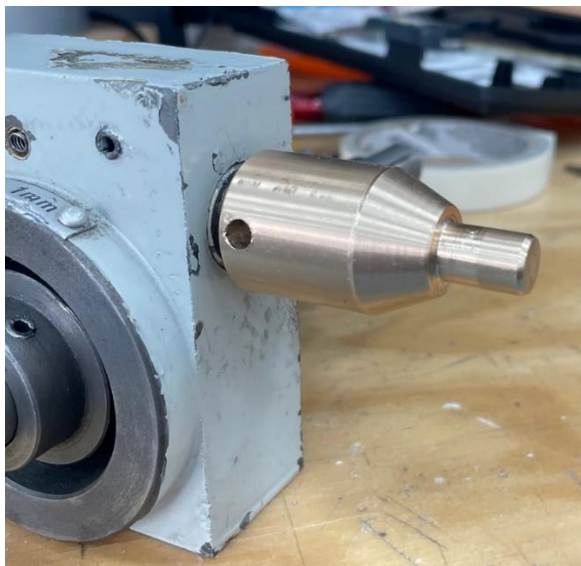


Figura 59: Eje extensor conectado al acople flexible y a su vez al motor, con el fin de comprobar el ajuste



a)



b)

Figura 60: Eje extensor probando el ajuste con el sinfín, incorporando el pin elástico de 5[mm]. a) montaje del adaptador sin el pin elástico. b) montaje ahora incluido el pin elástico.

5.6.1.2. Modificaciones en el equipo

Primero, procedemos a montar el conjunto motor-placa con el fin de identificar y confirmar la ubicación exacta de las perforaciones necesarias para fijar la placa y asegurar el motor en el futuro. Una vez que hemos determinado la ubicación adecuada, marcamos cuidadosamente los puntos donde se realizarán las perforaciones. Estas perforaciones se efectúan utilizando una broca de 4,2 [mm], ya que el motor, al estar en voladizo, requiere un soporte adicional.

Después de realizar las perforaciones, se procede a crear roscas macho para los pernos M5, que serán los encargados de sujetar de manera segura el conjunto motor-placa. Estos pasos se encuentran detallados de forma gráfica en la Figura 61, donde se muestran las etapas a), b), c), y d).

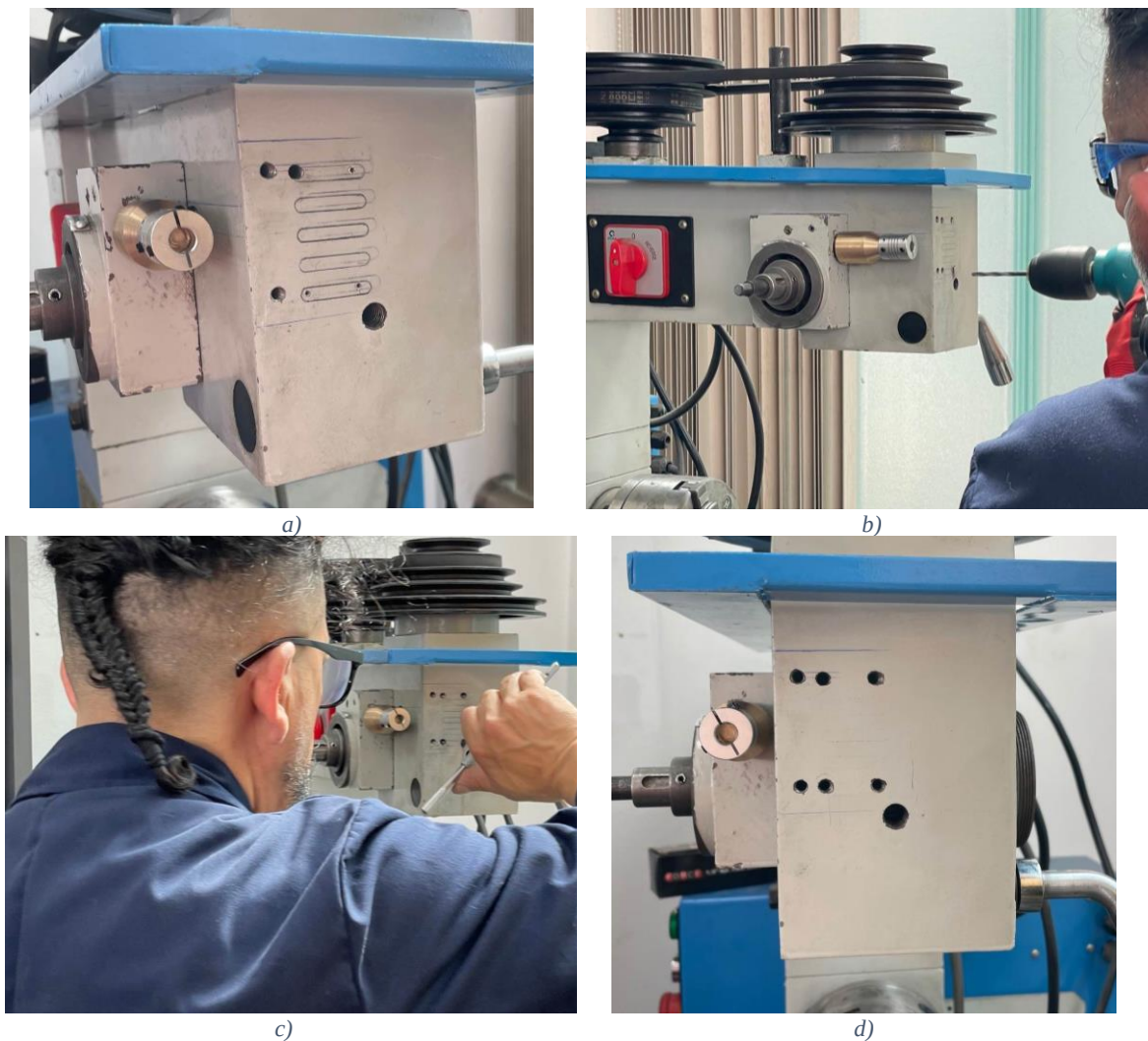


Figura 61: Paso a paso de las modificaciones al cabezal de la fresadora con el fin de montar la placa y el motor paso a paso. a) Paso 1; marcar los puntos para las perforaciones. b) Paso 2, perforaciones realizadas con taladro y broca 4,2 mm, por el profesor Claudio Aravena. c) Paso 3, realizando el hilo con macho 5. d) Perforaciones ya listas con sus respectivos hilos.

5.6.2. Montaje de componentes

El primer componente que debe ser ensamblado, teniendo en cuenta que el sistema sinfín-corona ya se encuentra en su posición correspondiente, es el eje extensor. Para lograr una alineación concéntrica entre las perforaciones transversales del sinfín y el eje extensor, se realiza un ajuste preciso. Una vez logrado este alineamiento, se inserta el pin elástico, que tiene una longitud de 20 [mm], de manera que atraviese ambos componentes y alcance una parte de la cara inferior del eje extensor.

Luego, se procede a la inserción del acople flexible en el extremo derecho del eje de bronce, asegurándolo firmemente y ajustando el prisionero al eje extensor. A continuación, se introduce el eje del motor en el extremo disponible del acople, repitiendo los pasos anteriores, y se cierra de manera firme y segura ajustando el prisionero.

Una vez completada esta etapa, se realiza un ajuste y alineación de la placa para asegurarse de que los ejes queden perfectamente alineados en una misma línea y no estén sujetos a fuerzas externas. Finalmente, se procede a la fijación de los pernos en las perforaciones del cabezal a través de las ranuras de la placa de montaje, utilizando sus respectivas golillas de presión. Estas golillas no solo absorben vibraciones, sino que también proporcionan un mayor nivel de ajuste, especialmente considerando que el motor está en una configuración en voladizo.

La Figura 64 ilustra el resultado final del montaje. Mientras que la Figura 62 y Figura 63 cada flecha indica los componentes nuevos en la máquina:

- Flecha roja: eje extensor (adaptador)
- Flecha verde: acople flexible
- Flecha azul: Motor PAP Nema23
- Flecha amarilla: Placa montaje motor Nema23

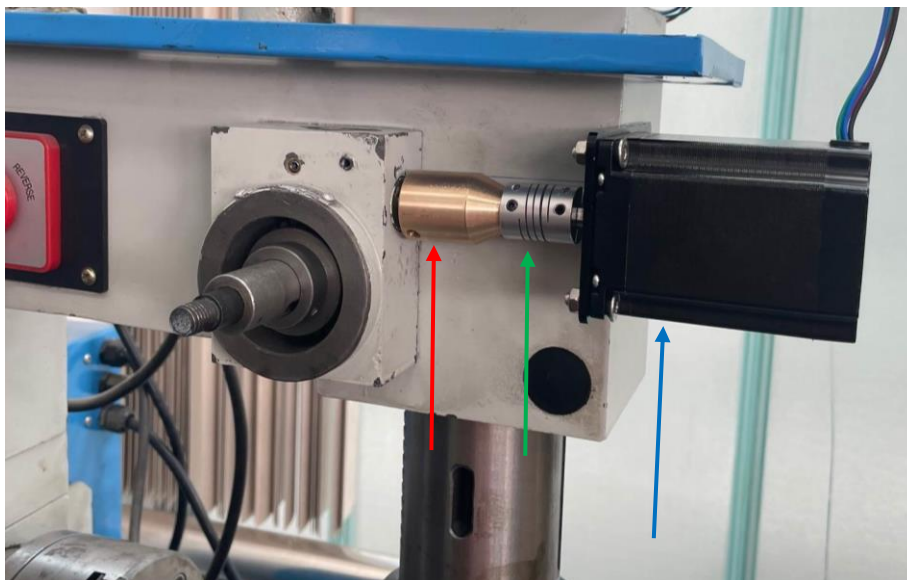


Figura 62: Montaje del eje extensor, acople flexible y motor PAP en el cabezal de la fresadora.

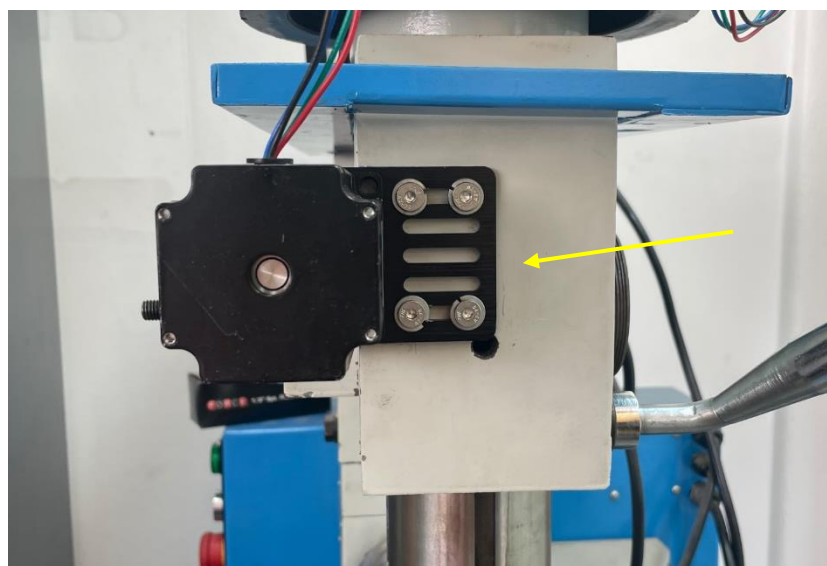


Figura 63: Vista lateral de la placa del motor y el motor ensamblados en el cabezal.

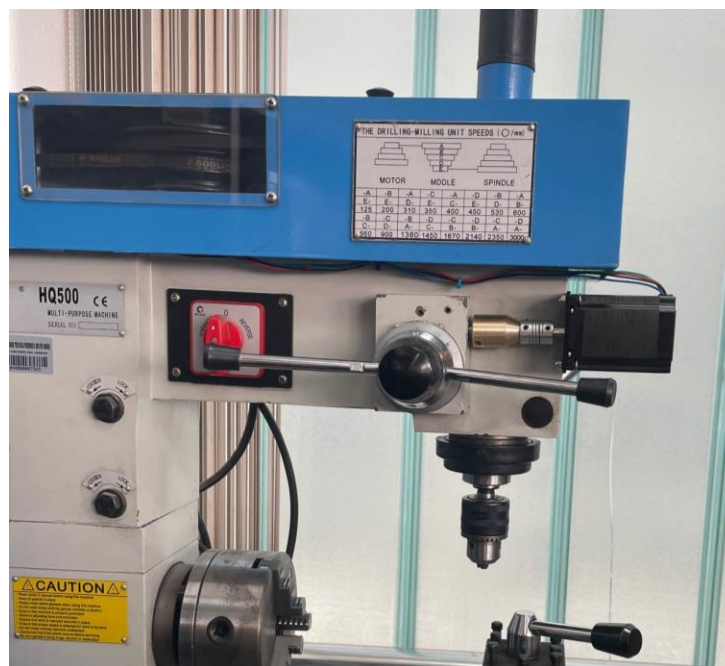


Figura 64: Vista del ensamblaje finalizado, con la respectiva palanca del movimiento macro.

5.6.3. Hardware del dispositivo

En una primera instancia, se procede a realizar una limpieza exhaustiva de la caja hardware, ya que esta había acumulado una cantidad considerable de polvo y suciedad. Este proceso es fundamental para garantizar un entorno de trabajo limpio y libre de posibles problemas derivados de la acumulación de residuos.

Además de la limpieza, se emprende una mejora en la disposición de los componentes internos de la caja. En particular, se aborda la sujeción de la placa controladora, que previamente no estaba firmemente fijada a ninguna superficie de soporte. Para abordar esto, se toma la decisión de acoplar un trozo de madera a una de las paredes de la caja, como se ilustra en la Figura 65 a). Este trozo de madera señalado en el rectángulo rojo se prepara mediante perforaciones estratégicamente ubicadas, con el propósito de ofrecer un soporte estable para la placa controladora. Esto asegura que la placa quede firmemente anclada en un lugar estratégico dentro de la caja, en proximidad a todas las conexiones necesarias y con una salida conveniente para el cable USB.

Como medida adicional, se incorporan golillas de goma que servirán para absorber cualquier vibración que pueda generarse en el funcionamiento de la máquina. Esta medida contribuye a prevenir y mitigar posibles interferencias no deseadas, optimizando así la calidad y eficiencia de la operación. La Figura 65 b) muestra el resultado de este proceso de mejora.

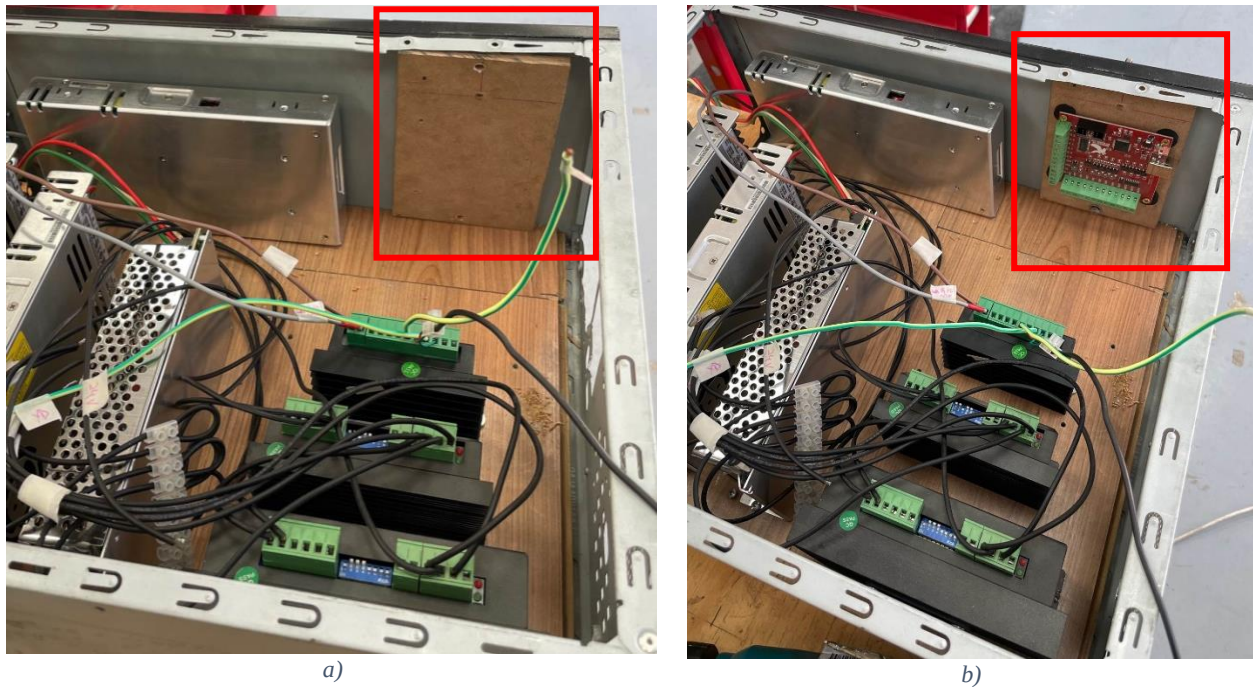


Figura 65: Implementacion de trazo de madera para incorporar la placa controladora a la pared de la caja hardware a) posisiomaniemto de el trpzo de madera b) la placa ya incorpodara.

Una vez completada la instalación de la placa en la pared de la caja hardware, se dispone de espacio adecuado para la colocación del controlador del motor y la fuente de poder. Con el fin de optimizar el aprovechamiento de este espacio, se procede al montaje del controlador del motor (driver) de manera paralela a los componentes previamente instalados (Rectángulo amarillo, Figura 66). En el caso de la fuente de poder, se opta por su montaje de forma perpendicular en relación con las otras fuentes, como se ilustra en el rectángulo verde en la Figura 66.

Este diseño estratégico permite una disposición eficiente y ordenada de los componentes electrónicos, garantizando su fácil acceso y mantenimiento, y evitando posibles interferencias o problemas de espacio. La orientación particular de la fuente de poder en particular se selecciona con cuidado para asegurar una óptima distribución de las fuentes en la caja hardware, lo que resulta en un aspecto más ordenado y una disposición más funcional de los elementos.

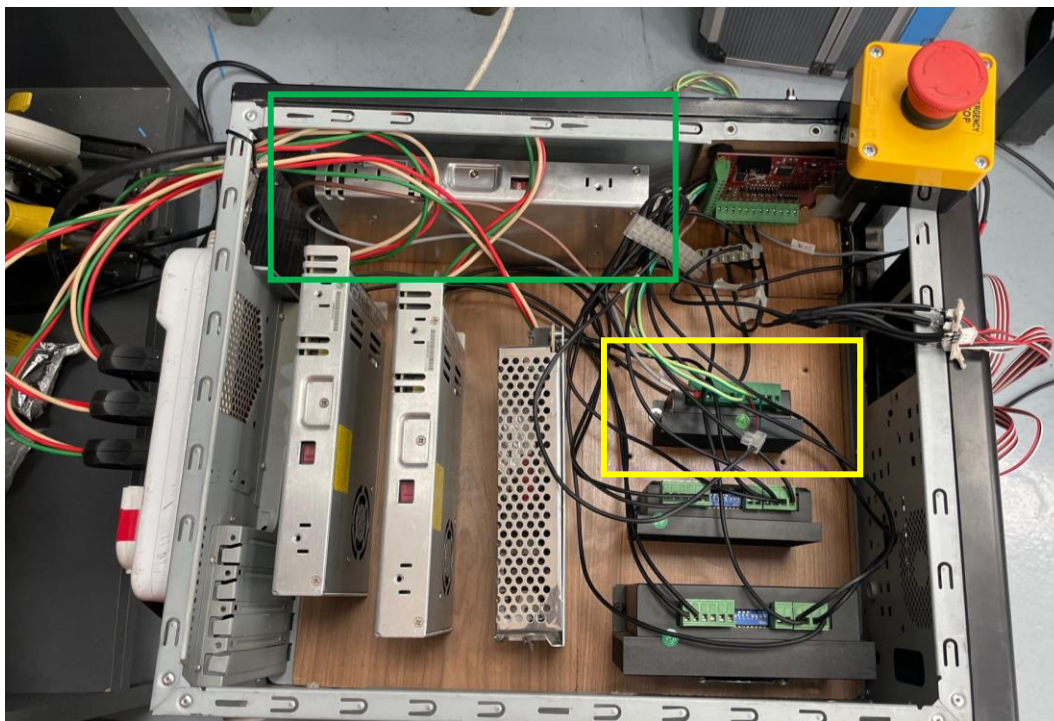


Figura 66: Resultado final del montaje de la caja hardware.

5.6.3.1. Cableado placa controladora

Se pueden identificar dos áreas principales en este diseño. La primera se refiere a la sección de control de los motores, que incluye un terminal común para los distintos controladores de motores y una fuente de alimentación de 5V (lado derecho de la placa mostrada en Figura 67).

La segunda área se relaciona con la integración de dispositivos de encendido y apagado, como los interruptores finales de carrera, la sonda de detección de piezas, el relé de seguridad, el botón de parada de emergencia y, por último, el control de la potencia del husillo. Este último se muestra con el inversor de voltaje, que actúa como su fuente de alimentación.

Dado que en la conversión se mantiene el husillo que mueve la pieza de trabajo y no se dispone de la función de posicionamiento "home" en ningún eje. Tampoco cuenta con stepper motor A (la implementación solo se considera ejes X, Y y Z) ni conexión a Relay output contact.

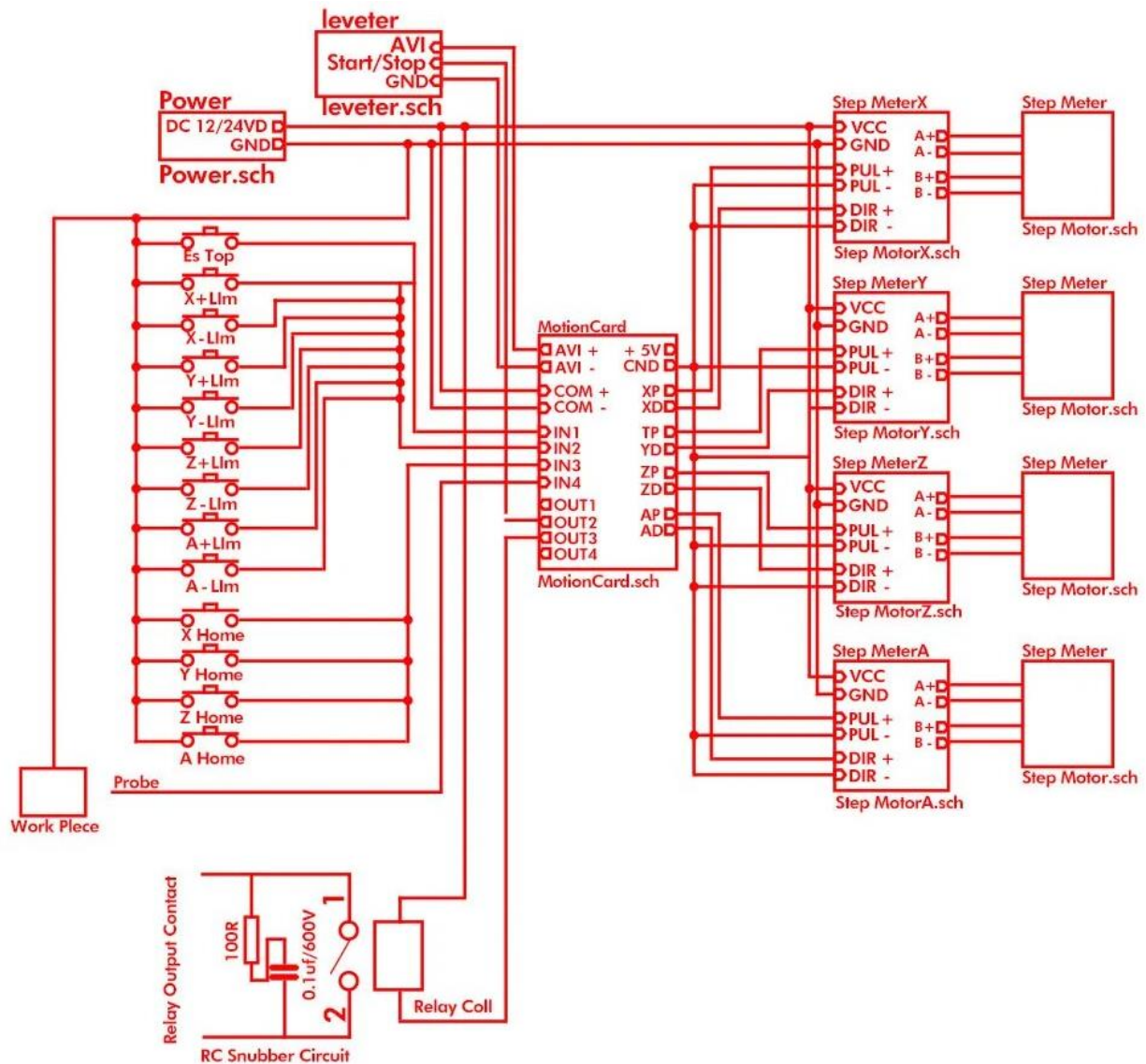


Figura 67: Cableado de la RRN motion controller indicado por el fabricante. [15]

5.6.3.2. Controlador del motor

El controlador del motor (Figura 68) requiere la configuración de dos parámetros fundamentales. El primero se refiere a la corriente máxima que fluye desde el controlador hacia el motor, y esta cantidad se establece en función de la capacidad nominal máxima del motor y su aplicación específica. La corriente suministrada incide directamente en el torque que el motor es capaz de proporcionar.

El segundo parámetro se relaciona con la cantidad de pulsos que se enviarán al motor por cada revolución. Esta configuración limita la precisión de los movimientos del motor y también utiliza la capacidad máxima de pulsos que la placa controladora puede generar.

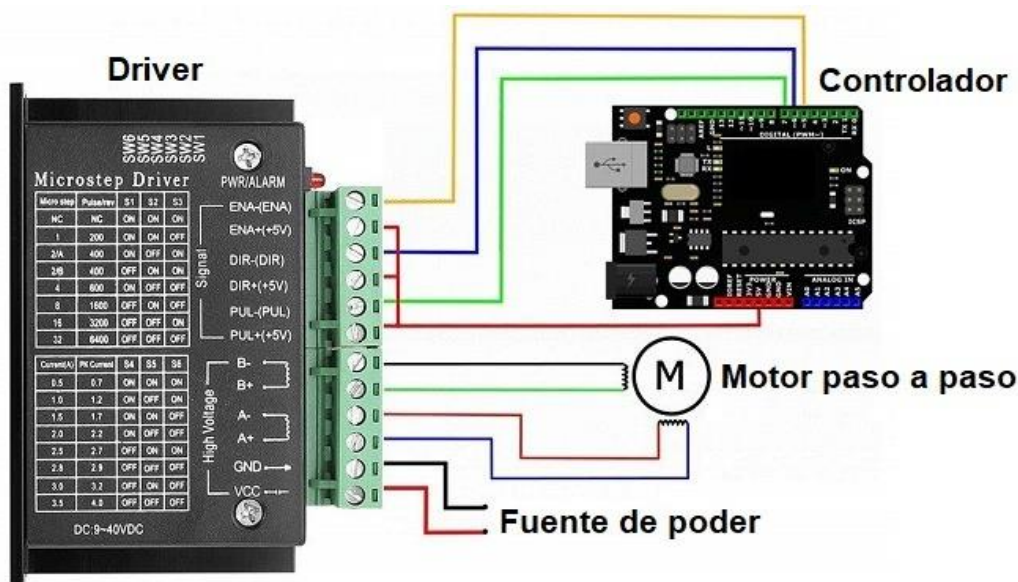


Figura 68: Conexiones del driver, indicado por el fabricante. [15]

- Pines de Conexión para Señales PUL y DIR: El controlador del motor paso a paso recibe señales de tensión como pulsos (PUL) para controlar los pasos del motor. En otras palabras, el desplazamiento rotativo del motor depende de la cantidad de pulsos, donde la velocidad se ajusta según la frecuencia de los pulsos. Además, el controlador recibe señales de nivel de tensión para controlar la dirección de giro del motor.
- PUL + se refiere al polo positivo del pin de entrada de pulsos, mientras que PUL- corresponde al polo negativo del pin de entrada de pulsos.
- DIR + representa el polo positivo del pin de entrada de dirección, y DIR- es el polo negativo del pin de entrada de dirección.
- Conexiones para la Señal EN: Estas conexiones se utilizan para habilitar o deshabilitar el controlador del motor paso a paso.
- EN + es el pin de entrada del extremo positivo de la señal EN y se utiliza para habilitar o deshabilitar el controlador.
- EN- se refiere al pin de entrada del extremo negativo de la señal EN, y por lo general, no se conecta.
- A+, A-, B+, B-: Estas son las conexiones que suministran energía a las bobinas del motor paso a paso híbrido bipolar, permitiendo secuenciar la energización de las bobinas de manera específica para controlar los movimientos del motor.
- DC+, DC-: Estas conexiones proporcionan la alimentación eléctrica necesaria al controlador.

En primera instancia, se procede a ajustar la corriente suministrada por el driver al motor Nema23. Dado que este motor tiene una corriente nominal de 4 amperios (A), y el controlador de motor utilizado tiene una capacidad máxima de 4 A, es crucial configurar los interruptores de manera que la corriente suministrada por el driver no exceda la corriente nominal del motor. Por lo tanto, se establece la posición "off" para los interruptores S4, S5 Y S6, garantizando que la corriente proporcionada no supere el valor nominal del motor. (Tabla 24 b)

Configuración de la cantidad de pasos por revolución (ns) del motor, por medio de switches (1, 2, 3) que regulan el ángulo de paso ($\alpha = 1,8^\circ/paso$) en fracciones de: 1, 1/2, 1/4, 1/8 y 1/16, obteniendo 200, 400, 800, 1600, 3200 y 6400 pasos por revolución, respectivamente (Tabla 24 a).

Tabla 24 a) Configuración pasos por revolución (ns) en motor de pasos, b) Configuración corriente de salida del driver.

Micro Step	Pulse/rev	S1	S2	S3
NC	NC	ON	ON	ON
1	200	ON	ON	OFF
2/A	400	ON	OFF	ON
2/B	400	OFF	ON	ON
4	800	ON	OFF	OFF
8	1600	OFF	ON	OFF
16	3200	OFF	OFF	ON
32	6400	OFF	OFF	OFF

a)

Current[A]	Peak Current	S4	S5	S6
0,5	0,7	ON	ON	ON
1,0	1,2	ON	OFF	ON
1,5	1,7	ON	ON	OFF
2,0	2,2	ON	OFF	OFF
2,5	2,7	OFF	ON	ON
2,8	2,9	OFF	OFF	ON
3,0	3,2	OFF	ON	OFF
3,5	4	OFF	OFF	OFF

b)

El gráfico mostrado en la Figura 69 ilustra la relación entre el torque sostenido del motor Nema 23 y su velocidad de rotación. A medida que las revoluciones por minuto (RPM) aumentan, se observa una disminución progresiva en el torque proporcionado por el motor. En este contexto, resulta esencial encontrar un equilibrio entre mantener las RPM a un nivel adecuado y no comprometer la capacidad de torque del motor. En otras palabras, se busca alcanzar un punto óptimo que permita un funcionamiento eficiente, evitando RPM excesivamente bajas sin sacrificar la potencia de torque del motor.

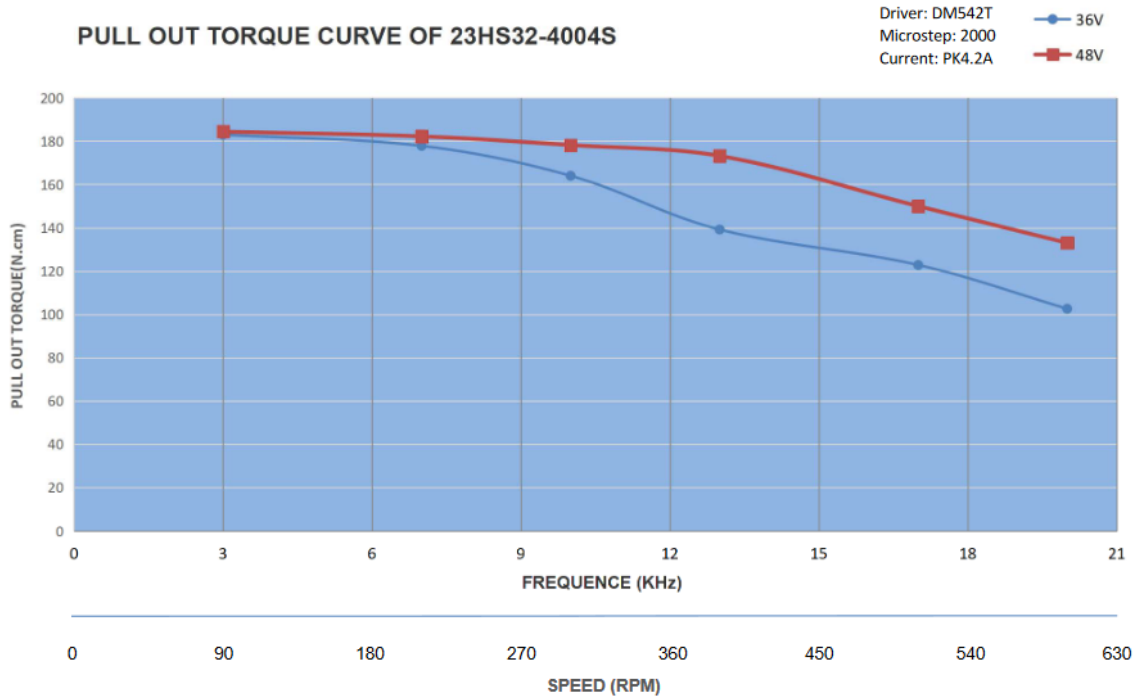


Figura 69: curva de torque vs RPM y frecuencia del stepper motor Nema 23.

La cantidad de pulsos por revolución (Pulsos/revolución) se configura en 6400 al ser el menor control de micro pasos ya que de esta manera el motor tiene un rango más amplio de velocidades por la placa controladora.

5.7. Resultados de operación

5.7.1. Preparación del trabajo

Para iniciar el proceso de mecanizado con todas las demás variables listas, es esencial preparar adecuadamente el material de trabajo. Para esto, se requiere una prensa capaz de sostener la pieza durante la operación.

La torreta, que es parte del portaherramientas, cuenta con una prensa diseñada para montar piezas, pero su peso considerable (9 kg) no es soportado eficientemente por los carros. La solución adoptada fue el uso de dos pernos M12 de 130 [mm] de longitud, más adaptadores que sirven de sujeción del material (piezas de color negro sobre el trozo de material blanco en la Figura 70)

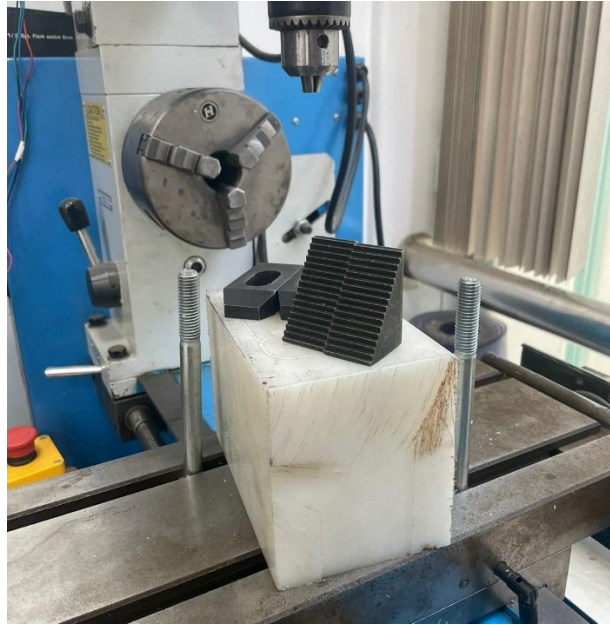


Figura 70: Elementos utilizados para el montaje del material.

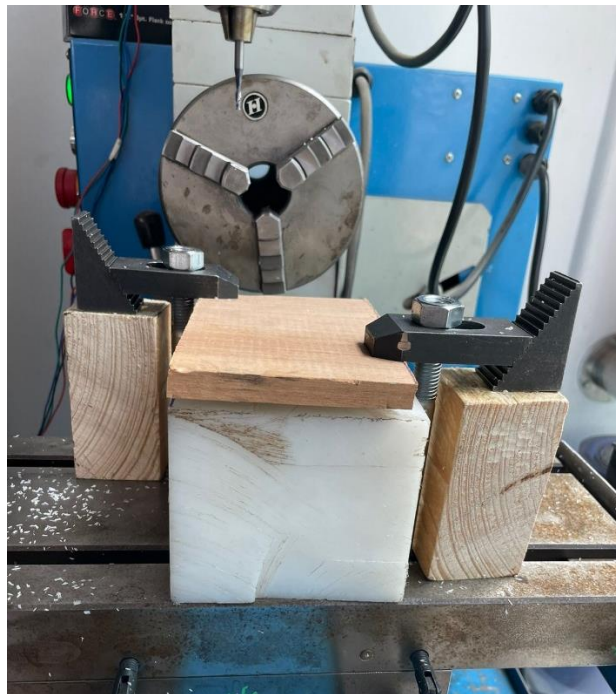


Figura 71: Pieza de madera ya montada con los elementos usados como prensa.

Es posible emplear diversos tipos de sujeción, como mordazas o placas de sujeción. Es fundamental elegir un método que se ajuste al mejor a la forma y tamaño de la pieza. Se debe tener en cuenta que el recorrido máximo del eje Z es de 110 [mm], por lo tanto, no alcanza la mesa de trabajo. Para superar esta limitación, se requiere un adaptador, se sugiere que sea ligero, que eleve la pieza,

permitiendo que la fresa pueda mecanizar el material. En las pruebas realizadas, se utilizó un bloque de acrílico (Figura 71) como elevador para la pieza, logrando así el mecanizado deseado.

Se configuran las correas de las poleas que dan la velocidad del husillo de acuerdo con el material que se desea trabajar.

5.7.2. Pruebas en vacío

En el proceso de implementación y optimización de una fresadora CNC, las pruebas en vacío desempeñan un papel fundamental. Estas pruebas, llevadas a cabo sin la presencia de la pieza de trabajo, permiten evaluar y ajustar diversos aspectos de la máquina para garantizar su funcionamiento preciso y eficiente. En esta etapa, se verifican aspectos como la sincronización de los ejes, la precisión de los movimientos, la alineación de las herramientas y otros parámetros clave. Exploraremos a fondo el significado y la importancia de las pruebas en vacío en el contexto de una fresadora CNC, destacando cómo contribuyen a la preparación y calibración efectiva de la máquina para tareas de mecanizado más complejas.

En primera fase, se verifica el rendimiento del eje Z, ya que es el enfoque principal de este proyecto. Se procede a ajustar automáticamente los pasos por unidad mediante las utilidades "Configuración Automática de Pasos por Unidad" del software Mach3, utilizando un reloj comparador con el fin de verificar de que el avance sea el correcto (se proporcionará una descripción más detallada de este procedimiento en el posterior Capítulo 4: Manual de Usuario). Una vez logrado este paso se escribe un código G sencillo directamente en el software Mach3 para realizar las pruebas.

Se procede inicialmente a evaluar el movimiento vertical de la cremallera en conjunto con la fresa, siendo este el movimiento más evidente y palpable. Se instruye según el código G, fijando el origen en el punto donde la cremallera no ha descendido, es decir, cuando alcanza el tope en el que no puede ascender más en el cabezal de la fresadora. Se establece la trayectoria de descenso como positiva y el retroceso como negativo.

Posteriormente, se ejecuta el código, realizando pruebas con las siguientes instrucciones G indicadas en la Tabla 25.

Tabla 25: Código G de prueba en eje Z con respectivo significado.

Código G	Significado
G91	Indica distancias absolutas
Z50	Avanza eje Z 50 mm en sentido positivo

Z-50	Retrocede eje Z 50 mm en sentido negativo
------	---

Llegando al punto de origen, se verifica que el avance coincida con lo indicado por el programa. Se llevan a cabo pruebas adicionales con diferentes avances, confirmando que se logra sin complicaciones y cumpliendo las expectativas.

Con el eje Z funcionando correctamente, se procede a incorporar los demás ejes (X e Y) para realizar pruebas con códigos más complejos. Se experimenta con movimientos longitudinales y transversales antes de agregar el eje Z utilizando el siguiente código mostrado en la Tabla 26:

Tabla 26: Código G de prueba en ejes X e Y con respectivo significado.

Código G	Significado
G91	Indica distancias absolutas
X0Y0	Ejes X e Y en origen
X10	Avanza eje X 10 mm en sentido positivo
Y10	Avanza eje Y 10 mm en sentido positivo
X-10	Retrocede eje X 10 mm en sentido negativo
Y-10	Retrocede eje Y 10 mm en sentido negativo

Las distancias recorridas por cada eje son correctas, lo que permite cargar códigos más complejos para probar el conjunto de ejes como si estuviera trabajando realmente con la fresadora CNC.

Sin embargo, al cargar una configuración más compleja con un rango de distancia mayor en todos los ejes y un tiempo de trabajo prolongado, se presentan imprevistos en el movimiento del carro principal (eje X). En varios puntos del recorrido, el sinfín se atasca durante el avance, y estas detenciones no son detectadas por el programa, lo que afecta el movimiento y provoca la pérdida de coordenadas en los ejes. Este problema será examinado con mayor detalle en las pruebas con material.

5.7.3. Mecanizado en piezas de trabajo

Luego de realizar exhaustivas pruebas y ajustes en la fresadora CNC, es imperativo llevar a cabo una evaluación detallada de sus capacidades finales y analizar minuciosamente su desempeño. En esta fase crítica, se examinarán los resultados obtenidos durante el mecanizado de diversos materiales, destacando aquellas características clave que definen el rendimiento de la máquina. Adicionalmente, se ofrecerán observaciones fundamentales sobre aspectos como la precisión, la estabilidad y cualquier

detalle notable que haya surgido durante el proceso de mecanizado. Esta evaluación final proporcionará una comprensión integral tanto del alcance como de las limitaciones de la fresadora CNC, generando información valiosa para su implementación en futuros procesos de mecanizado.

El diseño cargado en el programa para su mecanizado incorpora cuatro perforaciones circulares de 10 [mm] de diámetro y un contorno con el ancho de la fresa utilizada (diámetro de 2 [mm]). Para las perforaciones son 4 pasadas lo que alcanza una profundidad de 4 [mm] mientras que en el contorno se configuran 2 pasadas, alcanzando una profundidad de 2 [mm]. A continuación en la Figura 72, se muestra el diseño 2D con sus respectivas dimensiones.

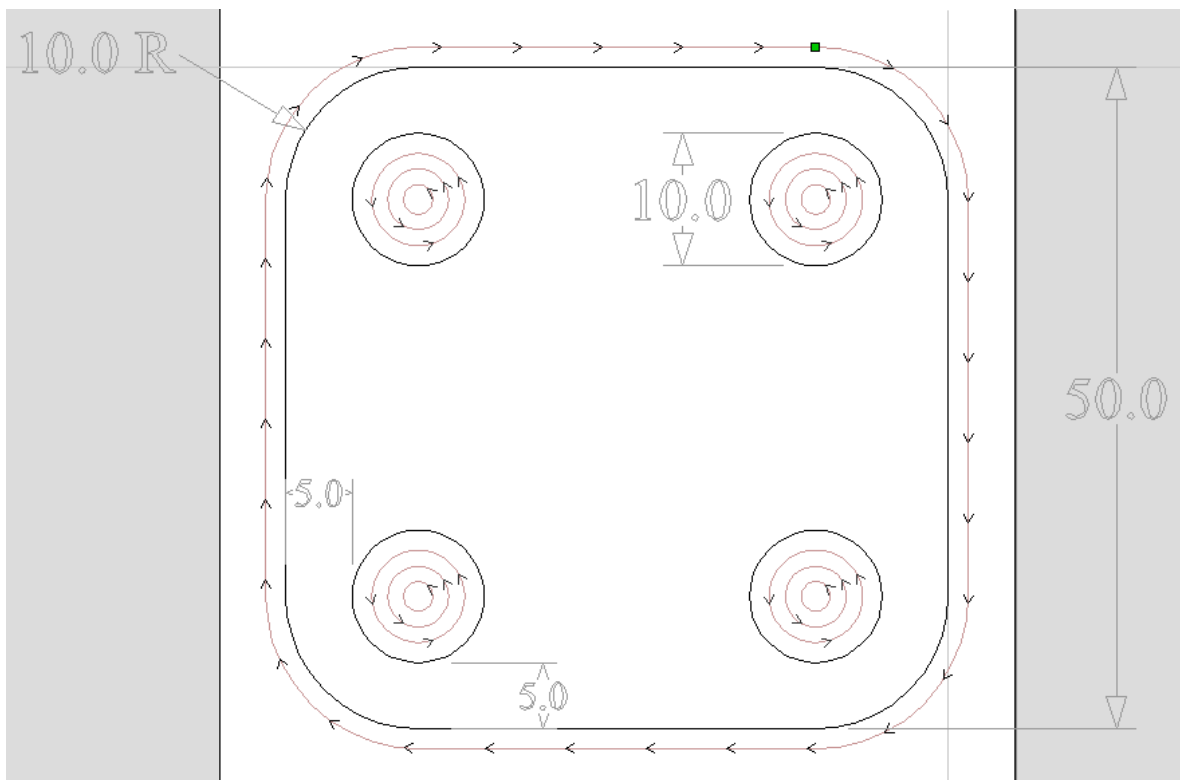


Figura 72: diseño original que se mecaniza en las piezas de trabajo con sus respectivas dimensiones en milímetros.

La primera tarea es llevar a cabo la configuración de las correas, las cuales determinan las revoluciones por minuto a las que operará el husillo. Es importante señalar que las RPM están directamente ligadas al material que se va a mecanizar. A continuación, se detallan las pruebas realizadas en distintos materiales, ajustando progresivamente el valor de las RPM para explorar el mecanizado eficiente:

- Technyl a 2140 RPM
- UHMW (polietileno de peso molecular ultra alto) a 2350 RPM
- Ertacetal a 3000 RPM

- Madera a 3000 RPM

Durante diversas instancias de mecanizado, como se evidencia en la Figura 73, se observó que el eje sinfín del eje longitudinal experimentó atascos no en un punto específico del trayecto, sino de manera aleatoria. Este fenómeno ocurre en cualquier momento y provoca una descoordinación entre la máquina y el programa, ya que el programa no detecta la falla de la máquina y continúa su ejecución. Una vez que la máquina se libera, prosigue en las coordenadas programadas, generando desfases en el resultado final de la pieza. Este inconveniente se replicó en todas las pruebas, variando la duración del atasco en cada ocasión y generando un mayor desfase en algunos casos. Este aspecto representa una limitación importante que debe abordarse para optimizar el rendimiento de la fresadora CNC.



Figura 73: Pruebas de mecanizado simple en distintos materiales a distintas revoluciones por minuto.

Tabla 27: Dimensiones tomadas a cada pieza mecanizada después de finalizar el trabajo, con el fin de evaluar su precisión.

Dimensiones de:	Technyl	UHMW	Ertacetal	Madera	Teórica
Diámetro perforación 1	8,61 – 9,86[mm]	8,82 – 10,00[mm]	8,65 – 9,96[mm]	8,69 – 9,88[mm]	10 [mm]
Diámetro perforación 2	8,64 – 9,79[mm]	8,79 – 10,09[mm]	8,73 – 9,84[mm]	8,67 – 9,93[mm]	10 [mm]

Diámetro perforación 3	8,71 – 9,89[mm]	8,69 – 9,99[mm]	8,74 – 9,84[mm]	8,78 – 9,95[mm]	10 [mm]
Diámetro perforación 4	8,63 – 9,87[mm]	8,77 – 10,02[mm]	8,65 – 9,82[mm]	8,73 – 9,97[mm]	10 [mm]
Profundidad perforación 1	3,00 [mm]	3,57[mm]	4,83[mm]	3,42[mm]	4 [mm]
Profundidad perforación 2	3,33[mm]	4,06[mm]	4,65[mm]	3,88[mm]	4 [mm]
Profundidad perforación 3	2,97[mm]	3,57[mm]	4,66[mm]	2,81[mm]	4[mm]
Profundidad perforación 4	3,08[mm]	3,81[mm]	4,36[mm]	2,95[mm]	4[mm]
Espesor contorno	2,00[mm]	2,01[mm]	1,93[mm]	1,99[mm]	2[mm]
Profundidad contorno	1,01[mm]	1,94[mm]	1,51[mm]	0,99[mm]	2[mm]

Para evaluar la precisión de la máquina, se tomaron mediciones de las dimensiones del diseño fresado, parte de este proceso se ilustra en la Figura 74, mientras que el valor de las dimensiones finales de cada pieza se enseña en la Tabla 27.

Durante las mediciones realizadas en todas las pruebas, se observó que las perforaciones no cumplían con el diámetro especificado de 10 [mm]. En lugar de eso, se midieron de la manera que se muestra en la Figura 74, dando como resultado valores que rondan entre 8,61 [mm] y 10,02 [mm] midiendo de manera vertical y horizontal.

En cuanto a la profundidad configurada de las perforaciones (4 [mm]), las dimensiones medidas oscilaron entre 2,81 [mm] y 4,66 [mm]. Por otro lado, el contorno medido varió en un rango de 1,93 [mm] a 2,01 [mm]. Esto puede ser provocado por la configuración de la herramienta, ya que esta se debe ubicar en leve contacto con la pieza de trabajo, y en las pruebas esta ubicación puede haber variado perjudicando el mecanizado, además la superficie del trozo de madera en el que se realizó la prueba no estaba completamente lisa por eso las medidas son más lejanas que los otros materiales.

Para el contorno como ocurrieron atascos en la mayoría de las pruebas no se pudo terminar el mecanizado, lo que se ve reflejado en las medidas tomadas ya que no son cercanas a la teórica.

Estas variaciones en las medidas muestran ciertas discrepancias entre el diseño original y las piezas mecanizadas. Es esencial considerar estas diferencias al evaluar la precisión y la consistencia de la fresadora CNC, ya que permiten identificar áreas de mejora y ajuste para optimizar futuros procesos de mecanizado.



Figura 74: mediciones de las perforaciones circulares de diámetro 10 [mm]. a) medición de la longitud de perforación de manera horizontal. b) medición de la longitud de perforación de manera vertical (posición de la imagen esta rotada en 90 para que se aprecie la medición con el pie de metro)

5.7.4. Capacidades finales y observaciones

En esta sección, exploraremos las capacidades finales y observaciones detalladas de la fresadora CNC que ha sido objeto de análisis y ajustes en los capítulos anteriores. Al examinar su desempeño durante el mecanizado en diferentes materiales y evaluando aspectos clave como la precisión y la estabilidad, obtendremos una comprensión completa de las características distintivas de esta máquina. Estas observaciones finales proporcionarán información valiosa para su implementación en futuros procesos de mecanizado, destacando tanto sus logros como posibles áreas de mejora.

La máquina al ser modificada puede procesar códigos creados y programación manual en la interfaz de usuario, el dominio de código es “.nc” ya que es de lectura para Mach3.

Los valores de rpm para la velocidad de corte quedan condicionados por la transmisión mecánica original de la máquina.

Observaciones:

- Debido a la inclusión de los soportes de los motores y los sistemas anti-retroceso se tiene una disminución del rango de trabajo, de aproximadamente de 40 mm para el eje X y de 100 mm para el eje Z. [8]
- La correa de sincronización aguanta las desviaciones posibles entre los ejes de los motores y los tornillos motrices, pero tiene riesgo trepamiento. [8]
- Cambiar transmisión de rosca de potencia por husillo de bolas, ya que debido al chavetero de los tornillos motrices la tuerca incorporada en el proyecto anterior para evitar el backlash, podría perder su precisión y causar atascos en el giro del tornillo motriz en el eje X
- Eje Z cumple su objetivo, cumple con las indicaciones del dadas por el programa, pero el conjunto de los 3 ejes no funciona correctamente debido a los atascos del eje longitudinal lo que provoca fallas en el mecanizado.
- Hay que mencionar que existen vibraciones en el motor PAP del eje Z (Nema23) cuando este ejecuta el retroceso de la cremallera y husillo, los que son menores y al ir en reversa no afecta de mayor forma el mecanizado, pero aun así hay que tenerlo en consideración.

6. Capítulo 4: Manual de Usuario

Para poder utilizar el equipo ya CNC es necesario el software instalado en el computador que será conectado a la placa, ya sea, portátil o un pc fijo exclusivo para la maquina multipropósito.

6.1. Instalación e inicio del software Mach3

Después de completar la instalación de Mach 3, se generarán cuatro accesos directos a diferentes componentes del software: Mach3 Mill, Mach3 Turn, Mach3 Plasma y Mach3 Loader. Este último permite la selección de un perfil de entrada para las opciones mencionadas anteriormente, lo que permite guardar una configuración de trabajo personalizada.

Para que Mach 3 pueda identificar y trabajar con la placa controladora, es necesario instalar un complemento (conocido como "plug-in") específico de la placa. Este complemento es un archivo que contiene las funciones esenciales para el control de la placa, con el nombre "RNRmotion.dll".

El proceso de instalación del complemento implica copiar el archivo "RNRmotion.dll" en la carpeta "plug-in" de Mach 3. Esta carpeta se encuentra en la siguiente dirección: "C:/Usuarios/ArchivosDePrograma/Mach3/Plugins". Una vez completados estos pasos, al iniciar cualquier módulo de trabajo en Mach 3, se podrá seleccionar la placa controladora, ya que el software la identificará automáticamente, como se ilustra en la Figura 75.



Figura 75: Ventana de reconocimiento de la placa controladora y máquinas conectadas al computador.

Para comenzar, es esencial crear un perfil de trabajo personalizado. Para hacerlo, se inicia el programa a través de Mach3 Loader, se elige la opción de crear un nuevo perfil, se selecciona “clonar” de Mach3Mill, y se le asigna al nuevo perfil el nombre deseado, tal como se muestra en la Figura 76.

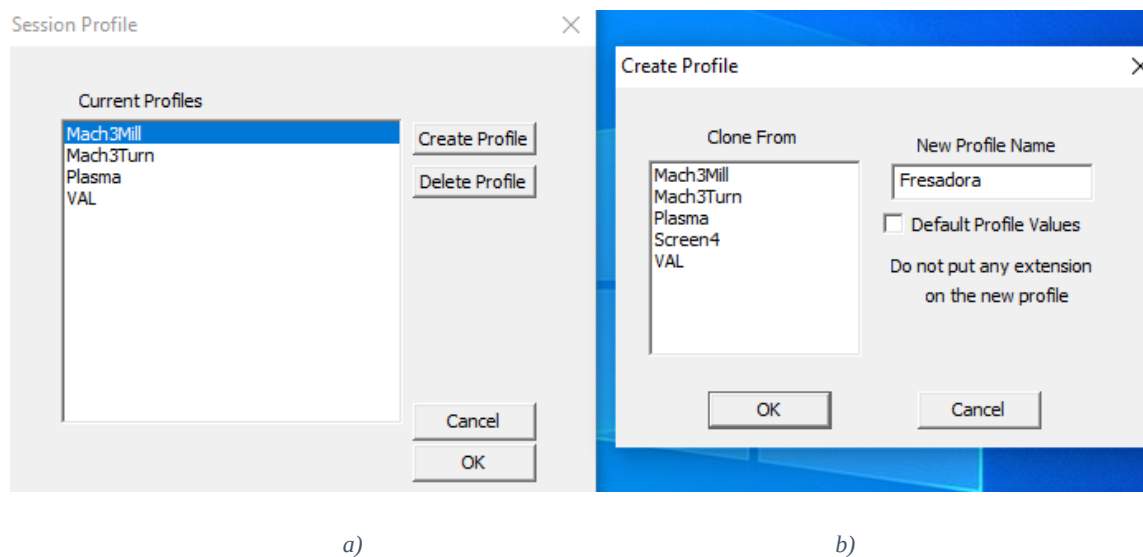


Figura 76: Ventanas emergentes al seleccionar Mach 3 Loader. a) Ventana de inicio, b) Ventana para crear un nuevo perfil de trabajo.

Luego de seleccionar el perfil el programa se abrirá, aquí se selecciona la placa controladora como en la Figura 77.



Figura 77: Interfaz inicial de trabajo de Mach3

6.2. Configuración de Software Mach3

6.2.1. Native units

Se accede a la interfaz "config" con el fin de abrir el menú de configuración. Para lograrlo, se dirige a la opción "select native units" y se elige la unidad de medida en milímetros (mm), tal y como se muestra en la Figura 78.

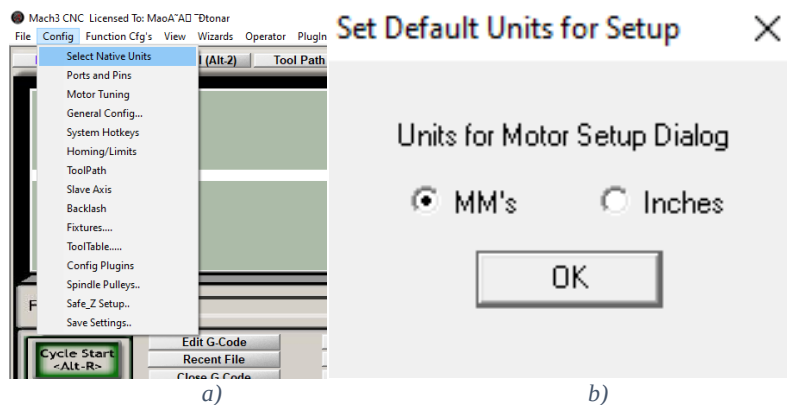
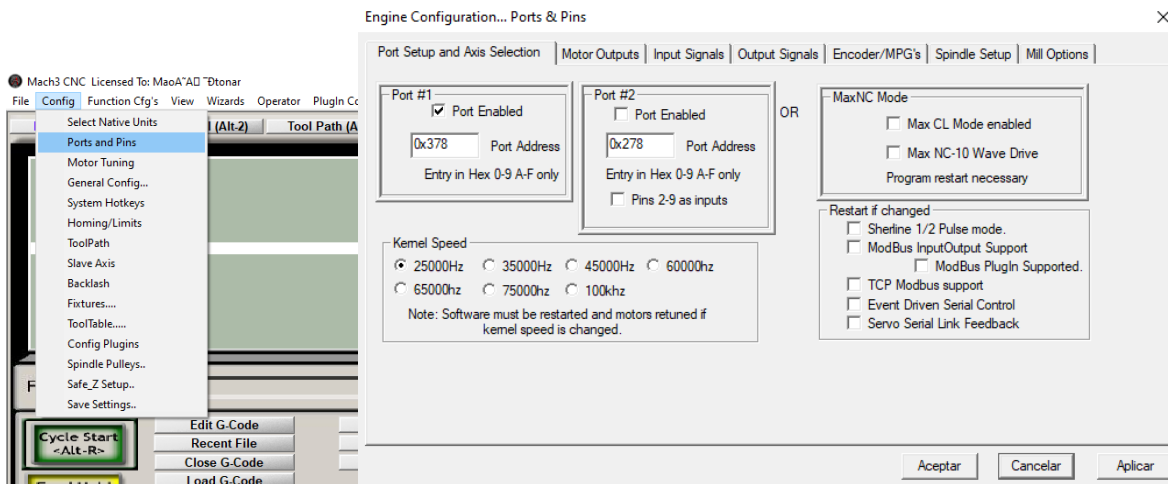


Figura 78: Selección de configuración de unidades de medida de trabajo a) Selección del menú de configuración, b) Selección de la unidad de trabajo.

6.2.2. Ports and pins

La configuración inicial se centra en el software Mach3 Mill. Una vez que el programa está en funcionamiento, se accede al cuadro de diálogo "Config > Ports and Pins" (ver Figura 79 a) y se procede a introducir los parámetros fundamentales que se detallan en la Figura 79 b). Posteriormente, para guardar estos ajustes, se debe seleccionar la opción "Aplicar" haciendo clic en el botón correspondiente.



a)

b)

Figura 79: a) Acceso a configuración Mach3 Mill b) Parámetros básicos de configuración Mach3 Mill

El controlador Mach3 tiene la capacidad de operar en un rango de frecuencias que varía desde 25,000 Hz hasta 100,000 Hz, dependiendo de la velocidad de procesamiento de la computadora. La frecuencia por utilizar está relacionada con la frecuencia máxima de pulsos requerida para controlar cualquier eje a su máxima velocidad. En este sistema de motor paso a paso, se ha establecido una frecuencia de 75,000 Hz.

Una vez que se ha configurado la configuración básica en Mach3 Mill, el siguiente paso implica la definición de las señales de entrada y salida en la tarjeta controladora. La Figura 80 muestra el cuadro de diálogo "Motor Output," el cual se emplea para configurar las señales de salida hacia los controladores, especificar los ejes coordenados a utilizar y establecer las señales para el variador de frecuencia en caso de ser controlado desde Mach3 (columna "Enabled"). Luego, se procede a definir los pines que transportarán la información para estos componentes (Step pin# y Dir Pin#).

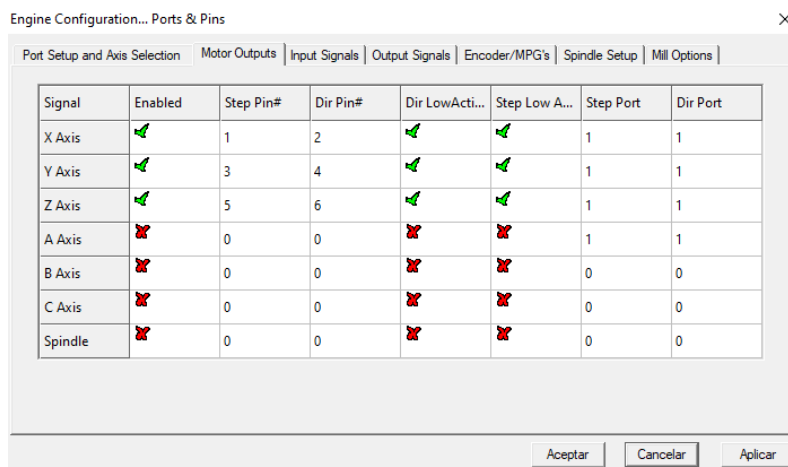


Figura 80: Configuración de salidas al motor.

En la Figura 81, se presenta el cuadro de diálogo “Input Signals”, el cual se utiliza para realizar la configuración de las señales de entrada en la tarjeta relacionadas con los “Limit switch”.

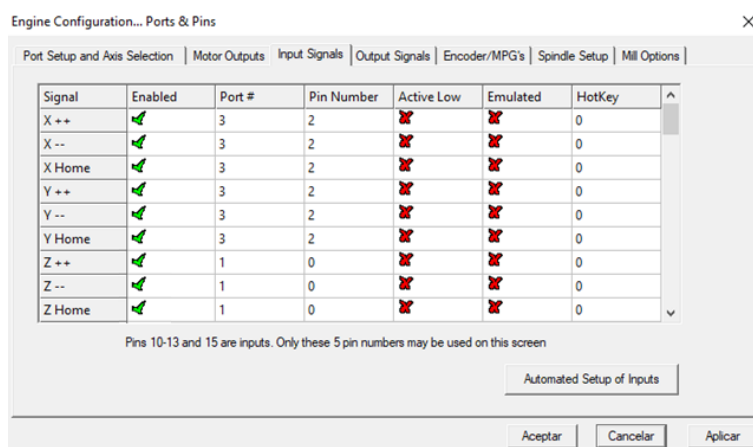


Figura 81: Configuración de señales de entrada.

Dentro de las señales de entrada, se activan los interruptores de final de carrera para los ejes X, Y y Z al seleccionar los puertos numerados como 3 y los pines numerados como 2, que son los valores reconocidos por la placa controladora. Si se desean incluir interruptores seleccionados para establecer un punto de inicio en la máquina, se activan los interruptores "Home," como se muestra en la Figura 81.

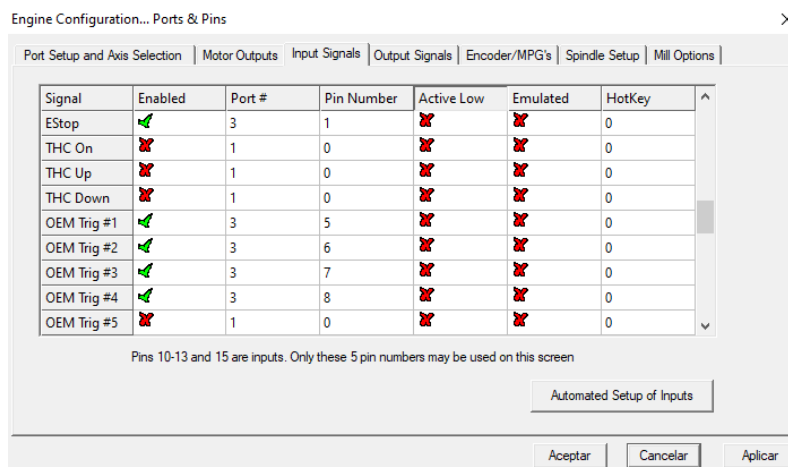


Figura 82: Configuración señales de entrada, parte dos.

Continuando con la configuración de las señales de entrada, se activa la función de parada de emergencia, como se muestra en la Figura 82.

Dado que no se utilizará el husillo original, este último se desactiva en el programa, como se representa en la Figura 83

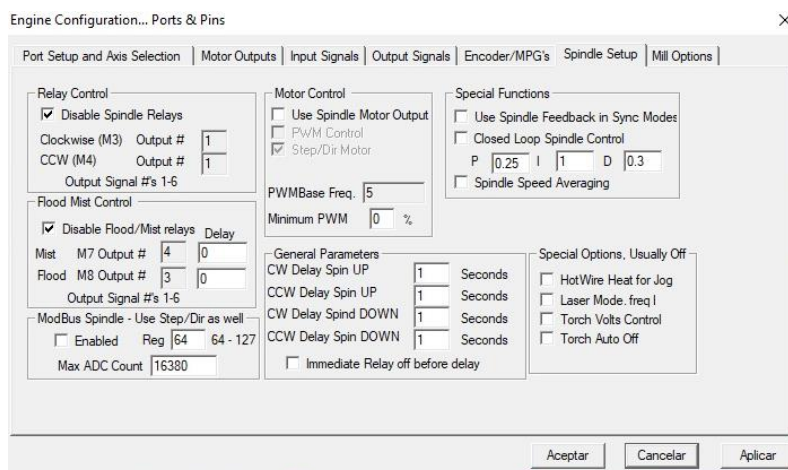


Figura 83: Pestaña de opciones del husillo.

La pestaña final en Config>Ports & Pins es opciones de la fresadora (Mill Options). Véase la Figura 84.

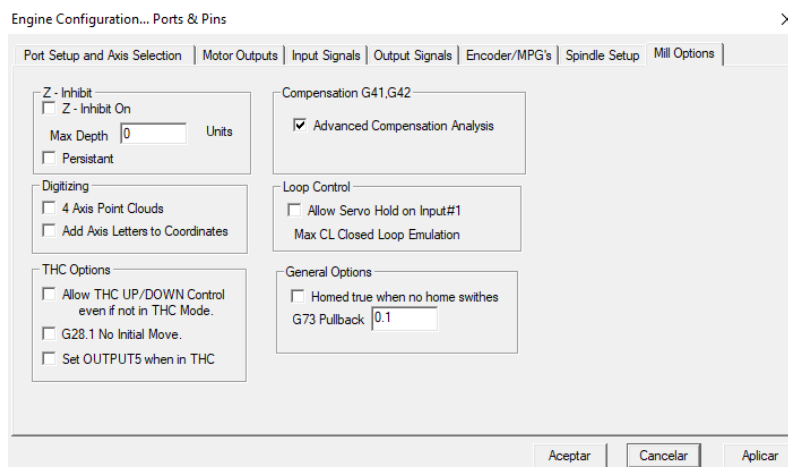


Figura 84: Pestaña para configurar Mill opciones.

Z-inhibit. El cuadro de verificación “Z-inibit On” habilita esta función. Max Depth da el valor más bajo de Z al que el eje se moverá. El cuadro de verificación “Persistant” recuerda el estado (que puede cambiarse por una palanca de pantalla) desde una ejecución a otra de Mach3.

Digitising: El cuadro de verificación “4 Axis Point Clouds) habilita la grabación del estado del eje A así como X, Y y Z. El cuadro de verificación “Add Axis Letters to Coordinates antepone los datos con el nombre de eje en el archivo “point cloud”.

Compensation G41, G42: El cuadro de verificación de análisis de compensación avanzado gira sobre un muy completo análisis que reducirá el riesgo de excavar al compensar el diámetro del cortador (usando G41 y G42) en formas complejas.

Homed true when no Home switches: Hará que el sistema aparezca para ser referenciado (e.g. LEDs verdes) todo el tiempo. Esto debería ser usado solamente si no hay interruptores de inicio definidos en la orejeta Ports & Pins Inputs

6.2.3. Motor tuning

Para que el software se ajuste adecuadamente a las capacidades de la máquina, es necesario establecer los parámetros de operación de los motores, incluyendo la velocidad, la aceleración y el avance. Esto se logra seleccionando la opción "motor tuning," la cual despliega la siguiente interfaz de usuario para la configuración, tal como muestra la Figura 85.

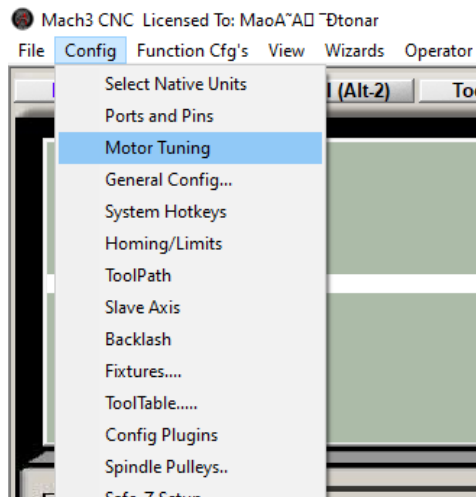


Figura 85: Pestaña config>Motor tuning

Seleccionada la opción Motor tuning, se elige el eje que se desea configurar y se introduce la cantidad de pasos que el motor de accionamiento debe ejecutar para desplazar el eje en un milímetro en la casilla "Step per"(paso por unidad) como se ve en la Figura 86, (1564,8 [pasos/mm], Ver cálculo en Anexo D2), este valor es solo para el eje Z, ya que, los demás ejes se usan los valores del proyecto anterior (X: 266,6 [pasos/mm], Y: 200 [pasos/mm]). También se especifica una velocidad media para el motor y su correspondiente aceleración (estos valores son ajustables al finalizar la calibración). Finalmente, se almacenan las modificaciones en la casilla "Save axis settings".

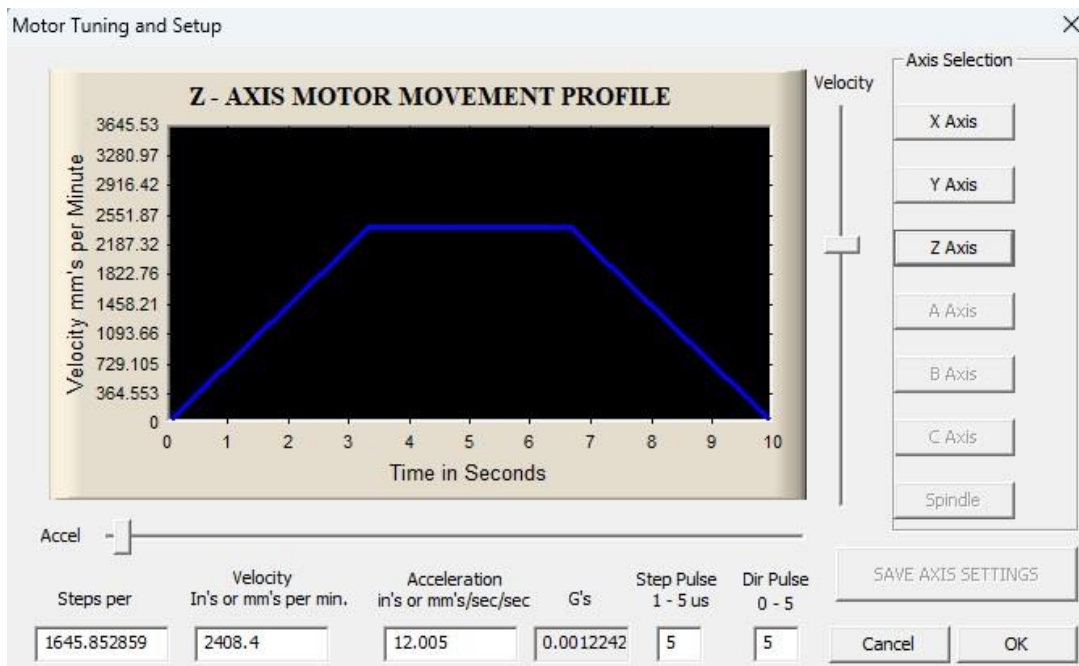


Figura 86: Pestaña configuración motor eje Z

6.2.4. Settings

Para mejorar el proceso de calibración de los ejes lineales, se realiza una configuración automática de los pasos por unidad con la ayuda de las herramientas “Automatic Settings of Step per Unit” del software Mach3, y un reloj comparador con resolución de una centésima de milímetro.

Se monta el reloj comparador sobre una superficie inmóvil de la máquina de tal forma que el palpador quede paralelo a la trayectoria del eje a calibrar, como se muestra en la Figura 87.

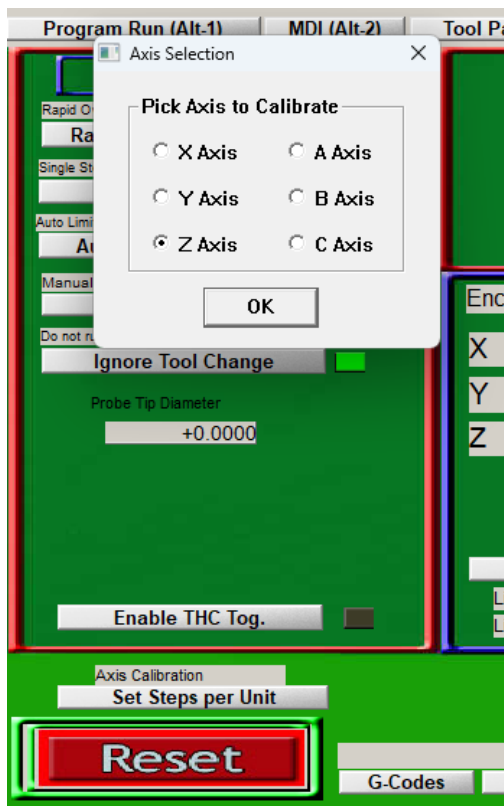


Figura 87: Proceso de calibración eje Z, mediante reloj comparador y función Settings de Mach3

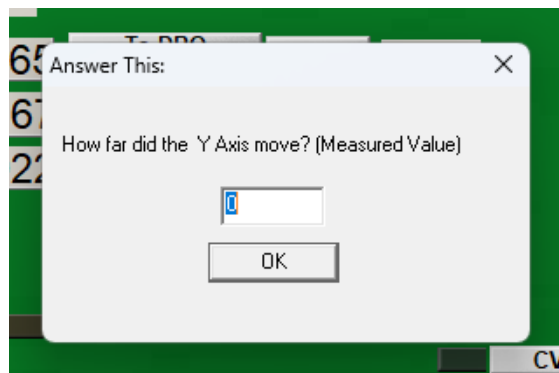
Luego, en la pantalla principal de Mach3 Mill se selecciona las pestañas Alt6 > Set Step per unit, y se selecciona el eje (X, Y o Z) a calibrar en el menú emergente (Figura 88 a). En el siguiente menú emergente (Figura 88 b), se ingresa una distancia de movimiento con el objetivo de comprimir el palpador del reloj.

Finalmente, se realiza la prueba de los motores paso a paso. Mach3 acciona al motor provocando un desplazamiento lineal del eje en función de la configuración actual, se mide la distancia real con la ayuda del reloj comparador, y se ingresa el valor en el siguiente menú emergente (Figura 88 c). La

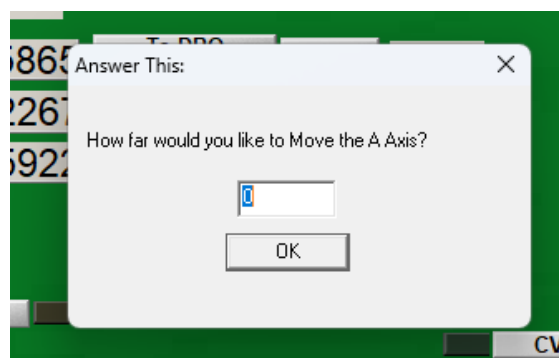
exactitud de este método se corrobora ingresando y ejecutando códigos de desplazamiento lineal en la pantalla principal de Mach3



a)



b)



c)

Figura 88: Cuadros de diálogo en Mach3 Mill para calibración sistemas de posicionamiento, a) Pestaña para seleccionar el eje a calibrar, b) Distancia de movimiento de prueba, c) Distancia de movimiento real

Una vez logrado estos pasos, el programa con los datos otorgados calcula nuevos pasos por milímetros, los que se actualizan automáticamente para que el sistema funcione correctamente y sus movimientos sean precisos.

De manera corroborativa, se realiza el mismo procedimiento para los otros ejes (X e Y).

6.2.5. Creación código G mediante CAM

Para generar el código G que es necesario para generar el proceso de mecanizado, es obtener la geometría deseada en Inventor.

Se mencionarán los pasos a seguir de forma general ya que es muy variable a la hora de crear la pieza, las trayectorias, selección de herramientas, etc.

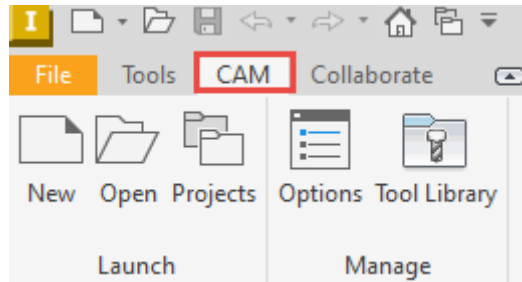


Figura 89: Pestaña donde se puede encontrar la herramienta CAM de Inventor.

Para generar el código G en Inventor CAM, sigue estos pasos generales:

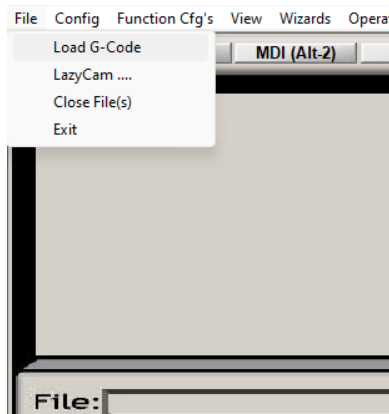
1. **Diseño de modelo en Autodesk Inventor:** Se debe crear el modelo 3D o pieza en Inventor. Asegurándose que el diseño esté completo y listo para la fabricación.
2. **Preparación del modelo:** Se debe definir las operaciones de mecanizado en Inventor CAM (Figura 89). Esto incluye seleccionar las herramientas de corte, definir las trayectorias de herramientas y establecer parámetros de mecanizado.
3. **Generación de trayectorias de herramientas:** Una vez que hayas configurado todas las operaciones de mecanizado en Inventor CAM, se debe generar las trayectorias de herramientas. El software calculará automáticamente las rutas y movimientos de las herramientas de corte necesarios para mecanizar la pieza.
4. **Simulación y verificación:** Antes de generar el código G final, es importante simular y verificar las trayectorias de herramientas para asegurarte de que no haya colisiones o problemas en el mecanizado. Se utilizan las herramientas de simulación en Inventor CAM para esto.
5. **Generación de código G:**
 - En Inventor CAM, selecciona la operación o el conjunto de operaciones para las que deseas generar el código G. Esto puede ser una operación de desbaste, contorneado, taladrado, etc.
 - Accede al "Editor de operaciones" o la "Configuración de operaciones", donde encontrarás la opción para generar el código G. Generalmente, esta opción se llama "Postprocesador" o "Generar código".
 - Selecciona el postprocesador adecuado para tu máquina CNC. El postprocesador es un archivo de configuración que traduce las instrucciones de mecanizado en código G específico para tu máquina.
 - Elige la ubicación donde deseas guardar el archivo de código G y dale un nombre.
 - Haz clic en "Generar" o "Aceptar" para que Inventor CAM procese y genere el código G.

6. **Verifica el código G generado:** Antes de enviar el código G a tu máquina CNC, es fundamental revisarlo para asegurarte de que sea correcto y se adapte a tu máquina. Puedes abrir el archivo de código G en un visor de código G o en el control de tu máquina CNC para verificarlo.
7. **Envío a la máquina CNC:** Cuando estés seguro de que el código G es correcto y no presenta errores, puedes cargarlo en tu máquina CNC para que inicie el proceso de mecanizado.

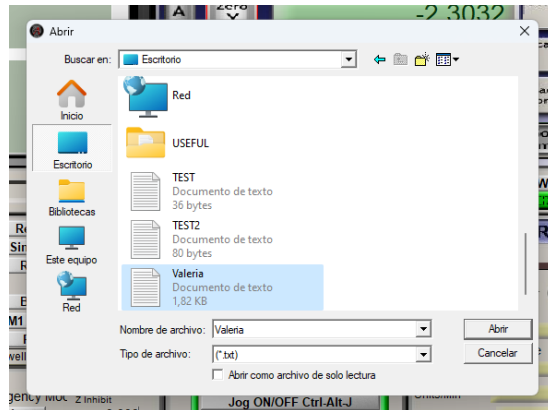
Recuerda que la generación de código G en Inventor CAM depende en gran medida de cómo hayas configurado tus operaciones y qué postprocesador utilices. Asegúrate de estar familiarizado con tu máquina CNC y las especificaciones del fabricante para garantizar una producción segura y precisa.

6.2.6. Load G-code

Después de generar el archivo, se procede a guardar en formato .txt para garantizar su reconocimiento por el posprocesador Mach3D. Al iniciar el programa Mach3Mill, se accede a la opción "File" y se elige "Load G-code" (ver Figura 90 a) para cargar el archivo previamente creado con el código G.



a)



b)

Figura 90 a) pestaña del programa mach3 mill para cargar el código G b) pestaña para seleccionar el código G que se quiere mecanizar.

La selección del archivo a ejecutar se realiza de manera sencilla, tal como se muestra en la Figura 90 b). Una vez completados estos pasos, el archivo está cargado y listo para su ejecución.

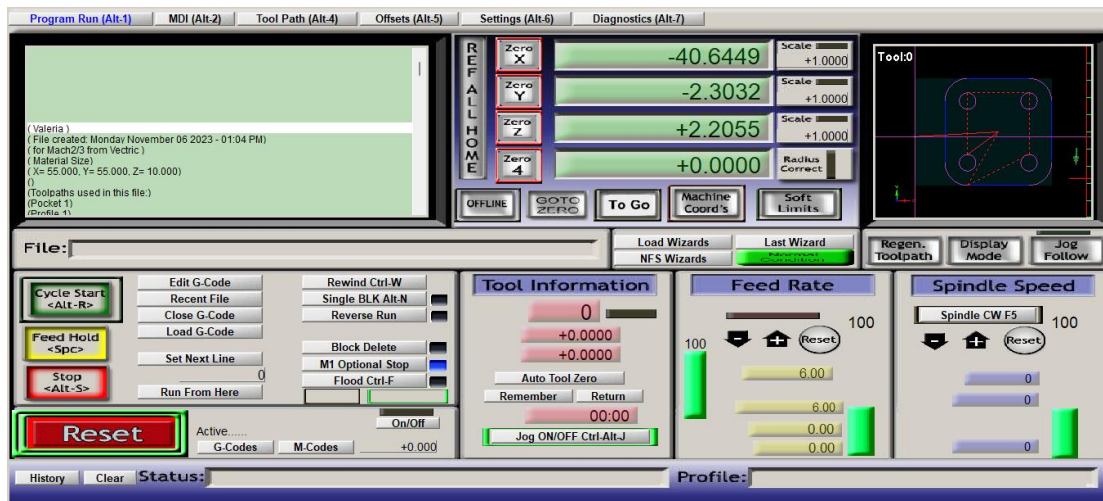
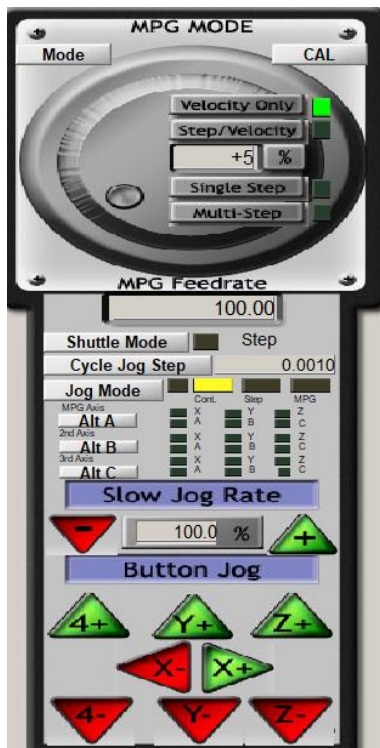


Figura 91: ventana del programa mach3 luego de cargar archivo

En la ventana superior izquierda de la Figura 91, se visualiza el código G, mientras que en la ventana negra de la derecha se muestra una imagen referencial de la figura a mecanizar.

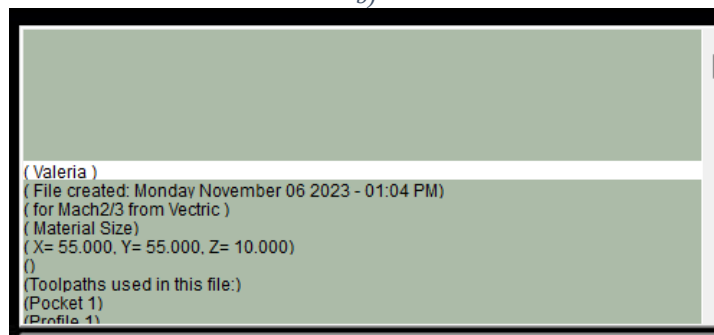
Previo al inicio, se posiciona la herramienta de corte (fresa) en el centro de la pieza, marcado anteriormente, mediante el desplazamiento de los ejes con las teclas Button Jog de la Figura 92 a) abarcando los tres ejes. MPG MODE surge presionando la tecla Tab del teclado.



a)



b)



c)

Figura 92 a) MPG MODE donde se pueden mover los ejes a libertad mediante los Button Jog, b) Ventana del programa mach3 donde se puede leer el código G ya cargado, c) Posicionamiento de cada eje medido en mm

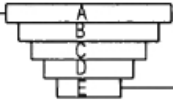
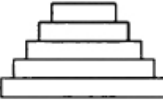
Posteriormente, se seleccionan las opciones Zero X, Zero Y y Zero Z, ubicadas en la parte superior media de la ventana Figura 92 b). Esto se realiza con el propósito de establecer el origen en el programa.

Con todos estos pasos completados, se inicia el trabajo pulsando la tecla Cycle Start. En caso de necesitar detener la operación, se cuenta con las opciones Stop o Reset para gestionar el proceso de manera efectiva.

6.3. Configuración velocidad husillo

La configuración de las RPM en el husillo de la máquina no es automatizada, lo que implica ajustar manualmente las revoluciones por minuto moviendo las correas de las poleas, según las RPM deseadas. En la Tabla 28 se detalla la configuración de las correas, que abarca un rango amplio, desde 125 hasta 3000 revoluciones por minuto.

Tabla 28: Pociões de las correas en las poleas dependiendo en que RPM se desee trabajar. [14]

THE DRILLING-MILLING UNIT SPEEDS (◯ /min)							
							
MOTOR		MIDDLE		SPINDLE			
— A	— B	— A	— C	— A	— D	— B	— A
E —	E —	D —	E —	C —	E —	D —	B —
125	200	310	350	400	450	530	600
— B	— C	— B	— D	— C	— D	— C	— D
C —	D —	A —	C —	B —	B —	A —	A —
660	900	1380	1450	1670	2140	2350	3000

Es crucial determinar la velocidad adecuada, y esta elección está estrechamente ligada al material a mecanizar y al tipo de fresa a utilizar. Cada material posee velocidades de corte específicas. Para calcular las revoluciones necesarias, se emplea la ecuación [24] del capítulo "Parámetros de corte en fresado en CNC", $n = \frac{V_c \cdot 1000}{D_{cap} \cdot \pi} [RPM]$, Mediante esta ecuación, se sustituyen los valores pertinentes para obtener las RPM idóneas para la tarea.

Con el fin de simplificar este proceso, se han creado dos tablas anexas que contienen las RPM adecuadas para distintos materiales, considerando diversos diámetros de fresas. Estas tablas se encuentran adjuntas para su consulta. (Anexo F)

7. Conclusiones

En el capítulo final, se exponen las conclusiones derivadas de la ejecución del proyecto de titulación, basadas en la experiencia adquirida durante las fases de construcción, ensamblaje y activación, así como en las restricciones y logros que sugieren nuevas oportunidades de investigación y desarrollo. Estas conclusiones se han organizado de acuerdo con su relevancia con respecto a los objetivos establecidos al inicio del documento.

EL primer objetivo es estudiar el funcionamiento del equipo multipropósito a convertir y las tecnologías de Control Numérico Computarizado, por lo que, en esta fase del proyecto, se investigó la función de fresado de la máquina y se llevaron a cabo análisis de los factores que inciden en el proceso de mecanizado. Es esencial resaltar que, aunque todas las fresadoras operan bajo parámetros similares, los componentes pueden variar significativamente, lo que tiene un impacto directo en el rendimiento de la máquina y en su capacidad para ser automatizada.

A modo de ejemplo, el sistema de avance vertical del husillo en la operación de fresado emplea un mecanismo sinfín-corona, en el cual la corona está conectada a un piñón que, al girar, inicia el movimiento vertical del husillo al estar enlazado con una cremallera. Además, es relevante mencionar que varios componentes de la máquina cumplen roles múltiples, como la torreta del torno, cuya base funciona tanto como carro auxiliar como prensa mecánica para la función de fresado.

En cuanto al control numérico, existen programas especializados diseñados para diversos propósitos, y es esencial que estos sean compatibles con el hardware de control de la máquina. Además, hay hardware específico diseñado para diferentes aplicaciones, como los sistemas de transmisión mediante poleas y correas utilizados en cortadoras láser, que priorizan la velocidad sobre la fuerza, o los sistemas de transmisión mediante tornillos motrices empleados en fresadoras y tornos CNC, que ponen énfasis en la fuerza en lugar de la velocidad.

Para el segundo objetivo del proyecto, especificar y evaluar variables en el proceso de conversión de fresado manual a automático por CNC, se ha logrado una definición precisa de las variables involucradas en la conversión, considerando las condiciones específicas de fresado, las capacidades originales de la máquina y diversas variables que afectan a los componentes.

En el ámbito del fresado CNC, es crucial reconocer que los parámetros de operación de la máquina están intrínsecamente ligados a todos los componentes del sistema de posicionamiento y la unidad de control. En este sentido, al seleccionar o modificar un componente para mejorar alguna capacidad específica, es esencial evaluar cuál sería la mejor alternativa en función del conjunto de componentes

restantes. Esta evaluación debe considerar las restricciones y necesidades particulares de cada componente, garantizando una integración coherente y eficiente.

Además, la estructura del equipo juega un papel fundamental en este proceso de conversión. La configuración del sistema de avance del eje Z, ya sea mediante corona sinfín, piñón-cremallera u otras opciones, se presenta como una variable significativa que influye directamente en el rendimiento y la precisión del fresado CNC. Los motores utilizados y su capacidad también son aspectos críticos que deben ser considerados en esta evaluación exhaustiva.

En resumen, la conversión de fresado manual a automático por CNC requiere una evaluación holística que abarque no solo las variables relacionadas con el proceso de fresado, sino también factores estructurales clave, sistemas de avance y motores. Este enfoque integral garantiza una toma de decisiones informada y la selección estratégica de componentes, conduciendo a mejoras efectivas en la capacidad y eficiencia del fresado CNC.

En el viaje hacia la implementación exitosa de un sistema de mecanizado CNC, se ha logrado definir la tecnología de control que dirigirá las acciones en este proyecto, el cual es el tercer objetivo específico. Esto, no solo se basa en la identificación de los componentes clave del equipo multipropósito, sino que también se sustenta en una comprensión profunda de las restricciones intrínsecas de dichos componentes.

Se llevó a cabo un análisis detallado de las restricciones asociadas con cada componente de nuestro sistema de mecanizado CNC. Desde la unidad de control hasta los motores y sistemas de avance, cada elemento ha sido evaluado en términos de sus capacidades, limitaciones y requerimientos específicos. Este enfoque nos ha permitido identificar las áreas críticas que requieren una atención particular y adaptar nuestra tecnología de control en consecuencia.

La definición de la tecnología de control también se ha beneficiado de la evaluación de supuestos significativos. Hemos identificado y examinado cuidadosamente los supuestos que subyacen en las especificaciones de cada componente y en las recomendaciones generales para el mecanizado. Esto nos ha brindado una perspectiva más clara sobre los posibles escenarios y nos ha permitido ajustar nuestra tecnología de control para adaptarse a diferentes situaciones.

En resumen, al definir la tecnología de control para el equipo de mecanizado CNC, hemos sentado las bases para un desarrollo eficiente y efectivo. Este logro representa un paso crucial hacia la implementación exitosa de un sistema que no solo cumple con las especificaciones técnicas, sino que también está alineado con nuestros objetivos estratégicos. La definición de esta tecnología de control

sienta las bases para las fases posteriores del proyecto, donde se materializarán y optimizarán las operaciones de mecanizado CNC.

Diseñar y seleccionar los componentes estructurales, mecánicos y electrónicos para la fresadora CNC, actúa como el cuarto objetivo y en la fase de diseño es esencial mantener en mente los objetivos establecidos, identificar las necesidades que deben satisfacerse y considerar las restricciones presentes. Además, se debe promover un proceso de diseño que incorpore la retroalimentación, ya que las decisiones tomadas en una etapa pueden impactar otras partes del proyecto.

Durante la implementación, se encontraron detalles en los diseños que requirieron rediseño por varias razones, lo que proporcionó una valiosa retroalimentación para el proceso de diseño. Idealmente, estas modificaciones deben abordarse antes de iniciar la mecanización. Al incorporar elementos a una máquina previamente construida, es esencial considerar las restricciones tanto dimensionales como las que puedan afectar su funcionamiento. Los componentes añadidos deben operar en armonía con la máquina existente.

En cuanto al dimensionamiento de los motores de accionamiento de la fresadora, se determinó que la mayor demanda de par motriz se relaciona con la fuerza de mecanizado durante el corte de la pieza de trabajo. Los valores de fuerza de mecanizado se extrajeron de ensayos experimentales bajo parámetros de corte similares a los utilizados en este proyecto. Sin embargo, se sugiere investigar modelos matemáticos que relacionen los parámetros de corte, el material de la pieza de trabajo y la fuerza de mecanizado para obtener dimensionamientos más precisos en futuros proyectos relacionados con fresado.

También es importante destacar que la selección de componentes electrónicos como drivers de motores, cables eléctricos, tarjetas controladoras y fuentes de poder se realizó considerando los requerimientos de corriente y voltaje de los motores paso a paso. Esto garantiza una operación segura y confiable del sistema electrónico y mecánico.

La implementación exitosa de componentes estructurales, mecánicos y eléctricos, a pesar de no haber sido inicialmente contemplada como parte de los objetivos específicos, emerge como un logro fundamental que ha enriquecido significativamente el desarrollo de nuestro proyecto de mecanizado CNC. La inclusión de componentes estructurales ha sido esencial para garantizar la estabilidad y resistencia del sistema. La adecuada selección de materiales y la disposición estratégica de estos componentes han contribuido directamente a la solidez y durabilidad del equipo. Este logro proporciona la base fundamental para un buen funcionamiento y una mayor capacidad de carga, lo cual es esencial para operaciones de mecanizado precisas y efectivas.

La creación de un manual de usuario para el equipo multipropósito de un funcionamiento manual a un control numérico computarizado (CNC) con el uso del programa Mach3 representa un logro esencial en la búsqueda de eficiencia y accesibilidad para los futuros alumnos interesados

Este manual no solo sirve como una guía detallada para los operadores que la usarán en la actualidad, sino que también sienta las bases para futuros usuarios. Proporciona instrucciones claras y procedimientos paso a paso que garantizan una operación precisa y segura, lo que a su vez minimiza errores y riesgos potenciales.

La implementación del programa Mach3 como parte de esta transformación ofrece una mayor flexibilidad y versatilidad en el funcionamiento de la máquina, lo que se traduce en una mayor eficiencia y calidad en la producción. Los operadores, tanto actuales como futuros, se beneficiarán de la interfaz intuitiva de Mach3 y de las capacidades de control numérico que ofrece.

Este manual no solo es un recurso de aprendizaje valioso, sino que también representa un compromiso con la mejora continua y la adopción de tecnologías avanzadas en nuestro entorno de trabajo. Este manual es un testimonio de nuestro compromiso con la educación y el aprendizaje continuo. Al alentar a los futuros usuarios a atreverse a utilizar esta maquinaria, estamos creando una cultura de innovación y creatividad. Los estudiantes y aprendices tendrán la oportunidad de comprender los conceptos detrás de la automatización y la programación CNC, lo que les proporcionará una base sólida para futuras carreras en ingeniería y fabricación.

8. Recomendaciones

Para comenzar, es esencial finalizar la implementación de la memoria del proyecto anterior [8] que abarca desde la incorporación de los finales de carrera hasta la instalación de adaptadores y paradas de emergencia. Hasta el momento, algunas tareas permanecen pendientes y deben ser completadas.

Al analizar los sistemas de transmisión, independientemente de cuál elijamos, es imperativo asegurarnos de que estén debidamente cerrados o protegidos de manera que se minimice su exposición al polvo, humo o residuos que puedan afectar su funcionamiento.

En lo que respecta a las mesas de corte, muchas de ellas están diseñadas con sistemas de extracción de desechos, que generalmente se dividen en dos categorías: mesas de aspiración y mesas con agua. Estas últimas, además de su función principal, también tienen la ventaja de enfriar el material durante el proceso de corte. Sin embargo, cuando se configuran adecuadamente, ambos tipos de sistemas pueden realizar una eficiente extracción de residuos.

Otro aspecto importante que considerar es el reemplazo de los descansos del mandril del taladro en el futuro, ya que no poseen la precisión necesaria. Actualizar estos componentes contribuirá a mantener un alto nivel de precisión en las operaciones de mecanizado.

También es crucial prestar atención a la protección de los cables expuestos, ya que pueden estar expuestos a daños o desgaste. Cubrirlos adecuadamente ayudará a mantener un funcionamiento seguro y confiable de la maquinaria.

En cuanto a la automatización de equipos manuales, se debe considerar que los componentes no están diseñados con la misma precisión que las máquinas CNC. Automatizarlos podría introducir cierto juego en los componentes, lo que afectaría la precisión de las piezas fabricadas. Para eliminar este juego, sería necesario reconstruir completamente los componentes de la máquina, lo que puede ser costoso y complejo.

Por último, en la actualidad, con el acceso a tecnologías avanzadas y maquinaria CNC disponible, la adquisición de este tipo de máquinas se presenta como una opción más eficiente y precisa. En las máquinas CNC comerciales, no existe el juego asociado a los componentes manuales, lo que garantiza una mayor precisión en la fabricación de piezas. Además, se ahorra tiempo y esfuerzo en la conversión de máquinas manuales a automatizadas. Por lo tanto, se recomienda considerar la adquisición de máquinas CNC en lugar de automatizar equipos manuales, aprovechando así los avances tecnológicos y las ventajas que ofrecen estas máquinas.

Anexos

A. Información de los componentes [8]

A1 Motores paso a paso

Los motores paso a paso son una categoría de motores de corriente continua que controlan el movimiento mediante la emisión de una serie de pulsos que desplazan una cantidad específica de pasos en un círculo al activar distintos electroimanes ubicados en el rotor y el estator del motor. Estos motores presentan varias características notables:

1. **Independencia de la carga:** Los motores paso a paso son capaces de girar a una velocidad establecida, siempre y cuando la carga no exceda el torque máximo que pueden proporcionar.
2. **Compatibilidad con sistemas de control de ciclo abierto:** Cuando funcionan dentro de su capacidad de torque especificada, la posición del motor es conocida con precisión, lo que elimina la necesidad de retroalimentación de posición en el sistema de control.
3. **Torque mantenido (holding torque):** Los motores paso a paso pueden mantener su posición cuando están energizados, lo que es útil en aplicaciones que requieren la retención de una posición específica.
4. **Respuesta eficiente a cambios de movimiento:** Los motores paso a paso responden bien a cambios, ya sea al arrancar, detenerse o cambiar de dirección de giro.
5. **Libres de mantenimiento:** Al carecer de escobillas de carbono, los motores paso a paso no requieren el reemplazo periódico de estos componentes.
6. **Costo razonable:** En comparación con otras opciones, como los servomotores, los motores paso a paso suelen ser una alternativa más económica en aplicaciones de posicionamiento.

Estos motores se pueden clasificar según su construcción en:

- **Motores de reluctancia variable:** Estos motores cuentan con entre 3 y 5 devanados en su estator conectados a un terminal común. El rotor tiene dientes de hierro dulce y se alinea con el campo magnético de los devanados, lo que determina la cantidad de pasos del motor según el número de dientes.
- **Motores de imán permanente:** Estos motores pueden tener estatores con devanados unipolares, bipolares y bifilares. El rotor contiene un imán permanente y se dividen en motores unipolares, bipolares, bifilares e híbridos.

- **Motores paso a paso con mayor cantidad de cables:** Algunos motores tienen más cables y ofrecen opciones de configuración que les permiten funcionar como motores paso a paso unipolares o bipolares, en serie o paralelo, lo que les brinda versatilidad en cuanto al torque y la aplicación.

En cuanto al torque, los motores paso a paso pueden dividirse en cuatro tipos: torque mantenido (holding torque), torque de entrada (pull-in torque), torque de salida (pull-out torque) y torque detenido (detent torque), cada uno con una función específica en el motor.

Es importante destacar que, a diferencia de los motores de corriente continua, los motores paso a paso presentan una característica especial: su torque en reposo es mayor que el torque en movimiento, y este último disminuye a medida que aumenta la velocidad de giro. La resolución de un motor paso a paso se refiere a la cantidad de pasos o grados que necesita para completar una vuelta.

A la hora de seleccionar un motor paso a paso, es fundamental considerar aspectos como la cantidad de grados por paso, el torque requerido para la carga y la corriente máxima que el motor puede soportar sin sufrir daños. Estos motores son especialmente adecuados para sistemas de ciclo abierto donde la retroalimentación de posición no es esencial y se puede garantizar que el motor se encontrará en una posición conocida siempre que funcione dentro de sus especificaciones.

A2Placa controladora de sistema

Se ha realizado una tabla de ponderación para seleccionar los componentes de accionamiento, teniendo en cuenta tanto la ventaja mecánica (que implica el aumento o disminución de la fuerza en el sistema) como la velocidad de transmisión de la información.

Respecto a las placas controladoras del sistema, existen dos categorías principales: aquellas que reciben información desde el ordenador a través de un puerto paralelo o mediante un puerto USB, como se ilustra en la Figura 93: Placa controladora, a) placa por puerto paralelo, b) placa por puerto USB. La elección entre estos dos tipos de conexión influye en la velocidad de transmisión de datos y otras características.



a)



b)

Figura 93: Placa controladora, a) placa por puerto paralelo, b) placa por puerto USB. [8]

La capacidad de una placa controladora se determina por su capacidad para procesar una cierta cantidad de pulsos por segundo, medida en KHz. Al seleccionar una placa controladora, es crucial considerar varios factores, como el número de ejes que se desea controlar, la compatibilidad con el software utilizado, la velocidad de procesamiento de pulsos por segundo y si necesita una fuente de alimentación externa para su funcionamiento.

En este contexto, se recomienda optar por una placa con puerto USB, ya que los ordenadores con puerto paralelo se están volviendo obsoletos y su acceso es cada vez más limitado.

A3Controladores de motores

En el mercado, existen dos tipos de controladores de motores. El primer tipo se caracteriza por configurar la corriente y los micro pasos mediante interruptores, lo que implica tener rangos definidos y preestablecidos. En contraste, el segundo tipo de controlador ajusta la corriente a través de un potenciómetro y controla los micro pasos de manera digital utilizando software, como se representa en la Figura 94



a)



b)

Figura 94: Controladores de motores, a) regulado mediante potenciómetro, b) regulado por interruptores. [8]

Los controladores también pueden estar integrados en las placas controladoras, aunque esta opción suele ser menos flexible. Sin embargo, puede resultar beneficiosa en situaciones donde se requiere economizar espacio físico y la función a realizar está bien definida, como se ejemplifica en la Figura 95.



Figura 95: Placa controladora con controladores de motores incluidos. [8]

Al seleccionar un controlador para un motor, se deben considerar varios factores. Esto incluye el rango de voltaje de entrada del motor, los rangos de corriente de salida que el controlador puede proporcionar, la compatibilidad del controlador con la placa controladora y los motores que se

utilizarán, tanto en términos de conexiones como en rangos de pulsos por revolución. Otros aspectos importantes a tener en cuenta son el tipo de sistema de refrigeración que ofrece el controlador y su montaje físico.

En este contexto, se opta por el controlador regulado mediante interruptores debido a sus sistemas de seguridad, diseñados para proteger los motores de posibles sobretensiones, y su capacidad para controlar motores de 4 amperios o más.

A4Fuente de poder de voltaje fijo

Una fuente de poder, en su esencia, cumple la función de reducir el voltaje. Se conecta inicialmente a la red eléctrica, que suministra un voltaje alterno, y su propósito es proporcionar un voltaje continuo con una corriente máxima que se adapte a las necesidades. En el mercado, existen diversas opciones de fuentes de poder, que van desde transformadores convencionales hasta fuentes especializadas capaces de ajustar el voltaje de salida y adaptarse a diferentes redes, como se ilustra en la Figura 96.



Figura 96: Tipos de fuentes de poder existentes en el mercado a) transformador de voltaje fijo, b) fuente de poder regulable, c) fuente de poder de voltaje fijo. [8]

Las fuentes de poder, especialmente al trabajar a altas potencias, pueden generar un nivel apreciable de interferencia electrónica. La mayoría de estas fuentes, al no ser transformadores convencionales, suelen incorporar un interruptor que les permite operar tanto en una red de 110 V y 60 Hz como en una de 220 V y 50 Hz.

Cuando se decide seleccionar una fuente de poder, se deben considerar varios factores importantes. Esto incluye el tipo de red eléctrica a la que se puede conectar, el voltaje de salida que la fuente proporciona y la corriente máxima que puede suministrar, teniendo en cuenta el propósito para el cual se utilizará. También es relevante evaluar el sistema de enfriamiento que posee y las dimensiones físicas de la fuente.

A5 Software CAD/CAM

El software utilizado para modelar las piezas que serán mecanizadas por la fresadora CNC es el Autodesk Inventor Professional 2023 o sus versiones anteriores. Este software, desarrollado por Autodesk, es ampliamente accesible para estudiantes y es la elección principal del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad. Entre las alternativas de software de diseño asistido por computadora que compiten con Inventor se encuentran SolidWorks, Pro/ENGINEER, CATIA y Solid Edge.

El software Autodesk Inventor ofrece una solución profesional para el diseño, simulación, visualización y documentación en 2D y 3D. Está basado en técnicas de modelado paramétrico, lo que significa que permite modelar la geometría, dimensiones y material de una pieza de tal manera que, si se modifican estos parámetros, la geometría se actualizará automáticamente con base en los nuevos datos. Algunas de las herramientas clave que ofrece Inventor incluyen la creación de bocetos en 2D, extrusión para dar volumen a piezas, perforación, geometrías diversas como roscas, chaflanes y nervios, así como la creación de planos auxiliares. Además, cuenta con capacidades de análisis de tensiones por elementos finitos, análisis dinámicos y la creación y análisis de estructuras, piping y cableado.

Inventor también facilita la generación de archivos de ensamblado y permite restricciones entre superficies de piezas ensambladas. El programa es capaz de crear planos de fabricación en 2D y es compatible con múltiples formatos de archivo CAD para facilitar la colaboración y el intercambio de datos.

El archivo de la pieza o ensamblaje diseñado en Inventor se utiliza en el módulo CAM incorporado en Inventor para programar la trayectoria de la herramienta y la pieza durante el mecanizado. El software CAM seleccionado es Inventor CAM (antes llamado HSM), un complemento totalmente integrado con Autodesk Inventor.

Iniciando Autodesk Inventor después de instalar Inventor CAM, se añade una pestaña CAM a la cinta de opciones de comandos de Inventor (Figura 97). Esto activa comandos específicos de CAM para la creación de trayectorias de herramienta. Los archivos compatibles con Inventor CAM incluyen aquellos generados por software de diseño como CATIA, SolidWorks, NX, Pro Engineer, SAT, STEP, IGES, entre otros.



Figura 97: Cinta de opciones de comandos Autodesk Inventor HSM. [8]

Inventor CAM es una solución de software de fabricación asistida por computadora (CAM) desarrollada por Autodesk. Está diseñada para trabajar en conjunto con Autodesk Inventor, un software de diseño mecánico en 3D. Inventor CAM permite a los usuarios crear trayectorias de herramientas para máquinas CNC (Control Numérico por Computadora) y controlar el proceso de fabricación directamente desde sus modelos 3D en Inventor. Aquí hay algunas características y capacidades clave de Inventor CAM:

- Integración con Autodesk Inventor: Inventor CAM está estrechamente integrado con Autodesk Inventor, lo que significa que los cambios de diseño realizados en Inventor se actualizan automáticamente en Inventor CAM, reduciendo la necesidad de transferencia manual de datos y asegurando la consistencia entre diseño y fabricación.
- Mecanizado 2.5D y 3D: Inventor CAM admite operaciones de mecanizado 2.5D y 3D. Esto incluye tareas como desbaste, contorneado, fresado en cavidades y mecanizado de superficies 3D complejas. Los usuarios pueden definir trayectorias de herramientas y estrategias para mecanizar piezas de manera eficiente.
- Simulación y Verificación: El software ofrece herramientas de simulación y verificación para comprobar y validar las trayectorias de herramientas antes de enviarlas a la máquina CNC. Esto ayuda a detectar y prevenir errores o colisiones que podrían dañar la máquina o la pieza de trabajo.
- Postprocesamiento: Inventor CAM genera código G específico de la máquina CNC utilizando postprocesadores. Los usuarios pueden configurar estos postprocesadores para que coincidan con los requisitos específicos de sus máquinas CNC.
- Optimización de Trayectorias de Herramientas: Incluye características para optimizar las trayectorias de herramientas con el fin de minimizar el tiempo de mecanizado, reducir el desgaste de las herramientas y mejorar el acabado de superficies. Esto ayuda a aumentar la productividad y reducir los costos.
- Mecanizado de Múltiples Ejes: Para tareas de mecanizado más avanzadas, Inventor CAM admite mecanizado de múltiples ejes, lo que permite operaciones complejas como el fresado de 4 ejes y 5 ejes. Esto es especialmente útil para mecanizar formas y contornos complejos.

- **Gestión de la Biblioteca de Herramientas:** El software proporciona una biblioteca de herramientas donde los usuarios pueden definir y gestionar sus herramientas de corte. Esto ayuda a seleccionar las herramientas adecuadas para operaciones de mecanizado específicas.
- **Edición de Trayectorias de Herramientas:** Los usuarios pueden editar manualmente las trayectorias de herramientas si es necesario, lo que permite ajustes y personalización del proceso de mecanizado.
- **Documentación:** Inventor CAM puede generar documentación, como hojas de preparación y listas de herramientas, para ayudar a los operarios y mecánicos en la configuración y operación de las máquinas CNC.

A6 Mach3

El código generado por el software CAM se introduce en el posprocesador o software de control para su conversión a un formato legible por la tarjeta de control. Inventor CAM proporciona una variedad de configuraciones de posprocesador genéricas, cada una de las cuales puede personalizarse para requisitos específicos. Algunos de los posprocesadores genéricos disponibles incluyen Fanuc, Heidenhain, Haas, Hurco, Mazak, MillPlus, Okuma, Siemens, Yasnak, Mach3Mill, entre otros.

Para el control de la máquina se utiliza el software Mach3Mill, desarrollado por Artsoft, una división de la empresa Newfangled Solutions. La elección de este software se basa en su amplia popularidad y facilidad de uso, lo que lo convierte en una opción atractiva tanto para aficionados como para profesionales en el campo de las máquinas herramientas. Mach3Mill transforma un computador convencional en un controlador CNC de 6 ejes y es compatible con la mayoría de las computadoras con sistema operativo Windows. Entre sus principales características se incluyen:

- Conversión de una computadora estándar en un controlador CNC de 6 ejes completo.
- Capacidad de entrada manual de datos (MDI) para programar códigos de piezas manualmente y realizar modificaciones o optimizaciones.
- Visualización en tiempo real del movimiento de la herramienta y los códigos que se están ejecutando.
- Asistente CAM que permite automatizar tareas complejas, solicitando información relevante al usuario.
- Función de parada de emergencia para garantizar la seguridad en el proceso.
- Control sobre los ejes lineales y rotativos de la fresadora, tanto en modo manual como automático.
- Regulación de la velocidad de rotación del husillo de fresado.

- Control de las rampas de aceleración y velocidad de los motores para gestionar el avance y la aceleración de los ejes y reducir las fuerzas inerciales.
- Importación directa de archivos en formatos como DXF, BMP, JPG y HPGL.

Mach3Mill opera en computadoras de escritorio con al menos un puerto paralelo, y es compatible con sistemas operativos de 32 bits, como Windows 2000, Windows XP, Windows Vista o Windows 7 (las versiones de 64 bits no son compatibles). Los requisitos del sistema incluyen una CPU de 1 GHz, 512 MB de RAM y una tarjeta de video no integrada con al menos 32 MB de RAM, aunque para archivos de código G más grandes o 3D se recomienda una tarjeta de video con 512 MB de RAM o superior.

B. Selección pesos ponderados [8]

B1 Equipo de procesamiento

Motor: proceso de selección mediante tabla de pesos ponderados (Tabla 29) donde se concluyó que la mejor alternativa es Motor paso a paso.

Tabla 29: Tabla de ponderación de selección de motor. [8]

Criterio de selección	Ponderación	Motor paso a paso		Servomotor	
		Nota	Peso Ponderado	Nota	Peso Ponderado
Costo	0,2	5	1	3	0,6
Calidad	0,2	4	0,8	5	1
Seguridad	0,25	5	1,25	5	1,25
Operación	0,25	5	1,25	4	1
Mantenimiento / reemplazo	0,1	5	0,5	5	0,5
Total	1		4,8		4,35

B2 Unidad de control

Placa controladora: Por conveniencia se decide por utilizar placas con conexión por puerto USB ya que ofrece una mayor disponibilidad de computadores para el interfaz usuario máquina.

Controladores de los motores (Drivers): por la facilidad de uso y configuración se eligen los controladores con interruptores, siendo los analógicos más complicados de fabricar y adaptar a la necesidad.

Computador: se tiene presente este componente como uno de capacidades genéricas que pueda soportar los programas de control seleccionados.

Fuente de poder: proceso de selección mediante tabla de pesos ponderados (Tabla 30) donde se concluyó que la mejor alternativa es Fuente de poder de voltaje fijo.

Tabla 30: Tabla de selección tipo de fuente de poder. [8]

Criterio de selección	Ponderación	Transformador		Voltaje regulable		Voltaje fijo	
		Nota	Peso Ponderado	Nota	Peso Ponderado	Nota	Peso Ponderado
Costo	0,2	5	1	3	0,6	5	1
Calidad	0,2	3	0,6	5	1	5	1
Seguridad	0,25	3	0,75	5	1,25	5	1,25
Operación	0,25	3	0,75	4	1	5	1,25
Mantenimiento / reemplazo	0,1	5	0,5	2	0,2	4	0,4
Total	1		3,6		4,05		4,9

B3 Programa de piezas

Programa generador de código G: se utilizará el programa inventor con su módulo HSM ya que es de fácil acceso para los alumnos de la carrera.

Programa interfaz usuario máquina: se utilizará el programa que tenga compatibilidad con la placa controladora, y el post procesador de inventor para la lectura del código G.

C. Recomendaciones de parámetros de corte

Antes de adentrarnos en la elección de detalles, es fundamental establecer ciertas suposiciones que servirán como base para los futuros cálculos.

En primera instancia, la potencia consumida durante la etapa de mecanizado se refiere al desembolso energético en la fase de corte del material, transmitiéndose en forma de energía rotacional a través del husillo hacia la herramienta de corte. Los parámetros de corte seleccionados inciden directamente

en la potencia consumida por el husillo de fresado, lo que implica que a medida que estos parámetros se vuelven más exigentes, se necesitará una potencia mayor en el husillo.

Por otro lado, la herramienta de corte está asociada con ciertos parámetros de corte definidos por el fabricante. Estos parámetros tienen como propósito prolongar la vida útil de la fresa, asegurar un acabado superficial óptimo en la pieza, prevenir vibraciones y evitar sobrecargas que podrían ocasionar daños en la herramienta. Por estas razones, el cálculo de la potencia de mecanizado se realizará utilizando parámetros de corte conservadores, con el objetivo de minimizar el consumo de potencia, prevenir vibraciones y maximizar la eliminación de virutas.

La profundidad de corte (ap) y el ancho de corte (ae) varían según el tipo de fresado realizado. En la Tabla 31, se detallan los tipos de fresado frontal que se llevarán a cabo con la fresadora CNC, junto con los valores máximos recomendados para los parámetros de corte (ap y ae). Estos valores se obtuvieron a partir de ecuaciones y recomendaciones establecidas en los capítulos 3.5.2 Parámetros de corte en fresado CNC y 3.5.3 Operaciones de fresado frontal.

A continuación, se proporciona una descripción de las principales características geométricas de la herramienta, se presentan en detalle los parámetros de corte recomendados y se ofrece información sobre el material que será mecanizado por la fresadora CNC.

- Diámetro herramienta $D_c = 6[mm]$.
- El cuerpo de la herramienta es recto en toda su longitud.
- La geometría de la punta de la herramienta es recta.
- El ángulo de posición Kr es de 90° .
- Número de dientes $Z_n = 4$ (la más utilizada).
- El avance por diente f_z recomendado para esta herramienta específica varía en función del número de dientes y del tipo de fresado a realizar (ver Tabla 31).
- Material a mecanizar: Acero con un máximo de 0,5% de carbono, no aleado, con menos de 1,65% de Manganeso, hasta 190 HB de dureza, y resistencia al corte de hasta $K_c = 1700[N/mm^2]$. Principalmente acero AISI/SAE 1020 y AISI/SAE 1045.
- En herramientas enterizas para ranurar de acero rápido se recomienda una velocidad de corte máxima de $V_c = 80 [m/min]$, fresando sobre acero al carbono ISO P.
- Para fresado axial en plunge se recomienda una velocidad de corte de $V_c = 25 [m/min]$, como máximo.

Tabla 31: Parámetros de corte en fresado con herramienta enteriza de ranurar de diámetro 6 [mm]. [11]

	n RPM	fz mm/diente	Vf mm/min	ap mm	ae mm	Q cm3/min	hm mm	hm mm	Kc N/mm2	mc	Kct N/mm2	Pc W
	Velocidad Husillo	Avance por diente	Velocidad mesa	Profundidad de corte	Ancho de corte	Velocidad arranque viruta	Esesor medio de viruta, fresado de paneado	Esesor medio de viruta, fresado lateral	Resistencia al corte del material	Constante del material	Fuerza de corte especifica	Potencia neta requerida, eficiencia del 86%
Fresado en escuadra	3638	0,03	437	2,10	1,40	1,28	-	0,0129	1700	0,25	5040	125
Planeado	3638	0,04	582	2,10	1,40	1,71	-	0,0173	1700	0,25	4691	156
Fresado de ranuras	3638	0,04	582	0,56	7,00	2,28	0,0255	-	1700	0,25	4256	188
Fresado axial en plunge	1137	0,015	68	0,00	7,00	0,48	-	-	1700	-	-	110
Fresado circular exterior	3638	0,04	582	2,10	1,40	1,71	-	0,0173	1700	0,25	4691	156
Fresado circular interior	3638	0,04	582	2,10	1,40	1,71	-	0,0173	1700	0,25	4691	156
Fresado de cavidades	3638	0,04	582	2,10	1,40	1,71	-	0,0173	1700	0,25	4691	156

D. Cálculos

D1 Calculo avance cremallera por giro de sinfín.

$$n_1 \cdot e_1 = n_2 \cdot Z_2 \quad [57]$$

- n_1 : Número de revoluciones del sinfín
- e_1 : número de entradas del sinfin
- n_2 : número de revoluciones de la corona
- Z_2 : número de dientes de la corona

Reemplazando los datos de la ecuación [57] de obtiene la cantidad de revoluciones que dará la corona con una vuelta del sinfín (una vuelta del motor)

$$1 \cdot 1 = n_2 \cdot 28$$

$$\frac{1}{28} = n_2$$

0,035 rev de la corona con 1 rev del sinfín

Cremallera piñón

Al estar conectados, el piñón y la corona funcionan como un solo componente. Cada vuelta de la corona se traduce en un giro del piñón. Es necesario realizar un cálculo preciso para determinar cuánto avanza la cremallera en el movimiento vertical con cada revolución del motor, el cual se representa en la ecuación [58]:

$$L = p_x \cdot n_z \cdot Z_p \quad [58]$$

Donde:

- L : avance en mm de la cremallera
- p_x : paso axial piñón [mm]
- Z_p : número dientes piñón

Reemplazando los datos se obtiene:

$$L = 6,75 \cdot 0,035 \cdot 17 = 4,09[mm]$$

Por lo tanto, una revolución del motor PAP, la cremallera avanzará verticalmente 4,09 [mm]

D2Avance por pulso

Este parámetro se refiere a la cantidad de mm que avanza la máquina por cada pulso que es entregado por la placa controladora. Se calcula de la forma expresada en la ecuación [59]:

$$\frac{Avance}{Pulso} = \frac{\frac{Pulsos}{Rev}}{\frac{Avance}{Rev}} \quad [59]$$

En donde los pulsos por revolución son configurados previamente en el controlador del motor, mediante los interruptores de control de micro pasos, estos se dejaron en 6400 $\left[\frac{pulsos}{rev}\right]$.

El avance por revolución es entregado por el sistema de transmisión de la máquina, correspondiendo a cuantos mm se desplaza por cada revolución completa del motor, en este caso el valor es igual a 4,09[mm]

$$\frac{Avance}{Pulso} = \frac{6400 \left[\frac{pulsos}{rev}\right]}{4,09 \left[\frac{mm}{rev}\right]} = 1564,8 \left[\frac{pulsos}{mm}\right]$$

E. Planos

E1 Plano eje extensor

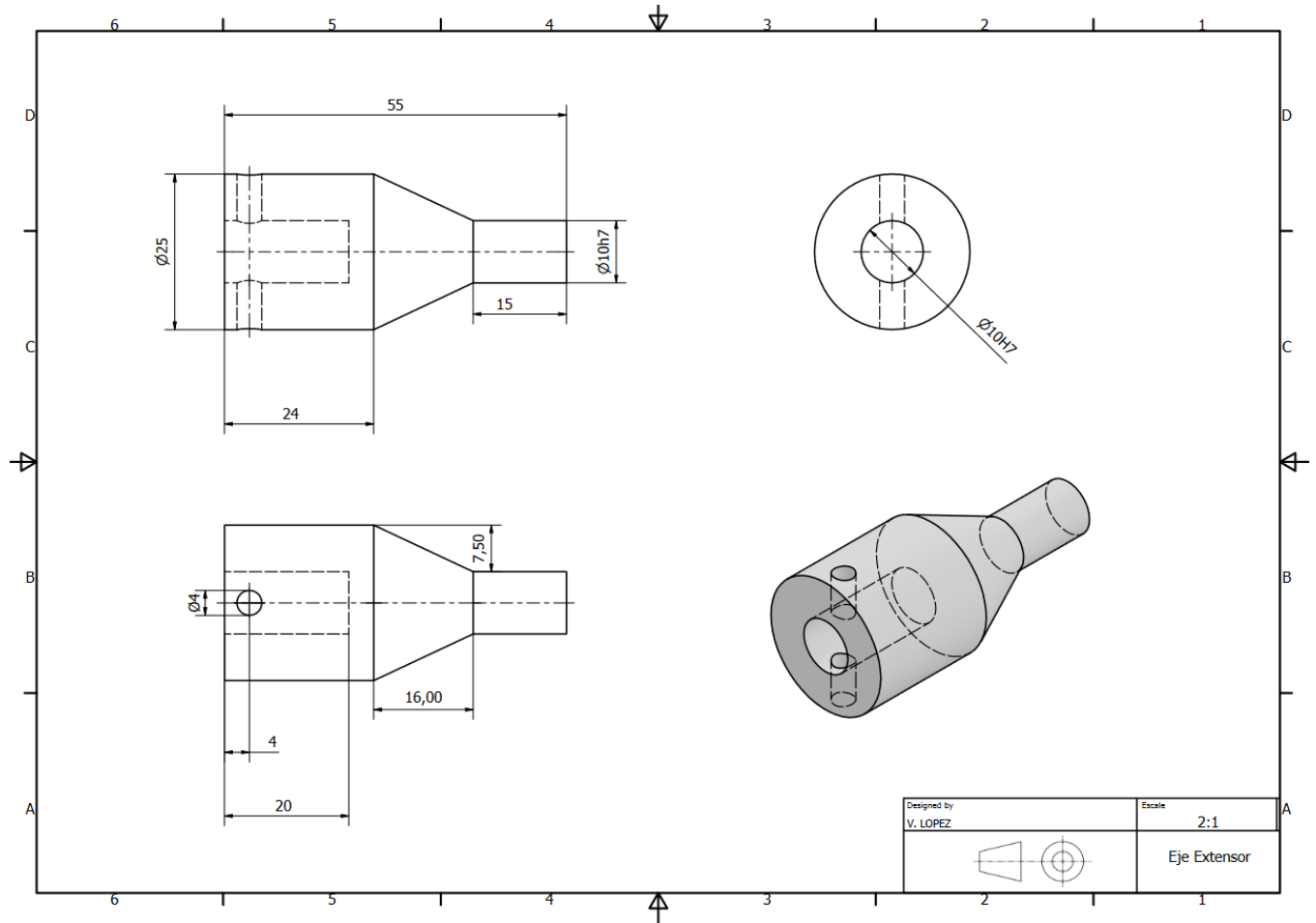


Figura 98: Plano eje extensor.

F. Recomendaciones de RPM para fresas enterizas.

Para calcular las RPM adecuadas para el mecanizado depende de varios factores tales como: el material a mecanizar, el tipo de fresa que se empleará, así como de acero rápido o metal duro, que tipo de mecanizado, desbastado o afinado, entre otros. En la siguiente sección se muestran dos tablas realizadas para guiar al futuro estudiante que quiera mecanizar y sea más fácil su labor. Se dividen en dos partes una tabla para proceso de afinado (Tabla 32) y otra para desbastado (Tabla 33). Las fresas a las que apuntan a utilizar debido a la estructura del mandril serán fresas de vástago, (enteriza) por ende de HSS, por ser de diámetros pequeños, entre un rango de 1,5 [mm] a 10 [mm]. Tener en cuenta que la máxima configuración de revoluciones por minuto que ofrece el equipo es de 3000 [RPM].

F1 Afinado

Tabla 32: RPM de referencia específicas para cada material y respectivo diámetro de fresa, para proceso de afinado.

MATERIAL	Vc [m/min]	DIAMETROS FRESAS HSS[mm]											
		1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10
Acero sin alear hasta 640 N/mm ²	22	4669	3501	2801	2334	2001	1751	1401	1167	1000	875	778	700
Acero aleado, recoc. Hasta 740 N/mm ²	19	4032	3024	2419	2016	1728	1512	1210	1008	864	756	672	605
Acero aleado, bonificado. Hasta 980 N/mm ²	17	3608	2706	2165	1804	1546	1353	1082	902	773	676	601	541
fundición gris, hasta 180 HB	19	4032	3024	2419	2016	1728	1512	1210	1008	864	756	672	605
Latón	55	11671	8754	7003	5836	5002	4377	3501	2918	2501	2188	1945	1751
Metal ligero	180	38197	28648	22918	19099	16370	14324	11459	9549	8185	7162	6366	5730
RPM													

F2 Desbastado

Tabla 33: RPM de referencia específicas para cada material y respectivo diámetro de fresa, para proceso de desbastado.

MATERIAL	Vc [m/min]	DIAMETROS FRESAS HSS[mm]											
		1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10
Acero sin alear hasta 640 N/mm2	17	3608	2706	2165	1804	1546	1353	1082	902	773	676	601	541
Acero aleado, recoc. Hasta 740 N/mm2	15	3183	2387	1910	1592	1364	1194	955	796	682	597	531	477
Acero aleado, bonificado. Hasta 980 N/mm2	13	2759	2069	1655	1379	1182	1035	828	690	591	517	460	414
fundición gris, hasta 180 HB	15	3183	2387	1910	1592	1364	1194	955	796	682	597	531	477
Latón	35	7427	5570	4456	3714	3183	2785	2228	1857	1592	1393	1238	1114
Metal ligero	160	33953	25465	20372	16977	14551	12732	10186	8488	7276	6366	5659	5093
RPM													

Referencias

- [1] M. P. Groover, «Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas,» 3ra ed ed., The McGraw-Hill, 2007, p. 522.
- [2] M. P. Groover, «Fundamentos de la manufactura moderna: materiales procesos y sistemas,» The McGraw-Hill, 2007, pp. 526-529.
- [3] M. P. Groover, «Fundamentos de la manufactura moderna: materiales procesos y sistemas,» 3ra ed ed., The McGraw-Hill, 2007, pp. 522-525.
- [4] F. Cofre, «Diseño y construccion de fresadora CNC 3 ejes para utilización docente,» Santiago, 2018.
- [5] Sandvik Coromant, «Sandvik Coromant,» [En línea]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es>.
- [6] Sandvik Coromant, «Sandvik Coromant,» [En línea]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/tools/digital-machining/coroplus-tool-guide>.
- [7] M. P. Groover, «Fundamentos de la manufactura moderna: materiales procesos y sistemas,» 3ra ed ed., The McGraw-Hill, 2007, pp. 525-526.
- [8] R. Ávila, «Conversión de la operación de torneado en un equipo multipropósito a control numérico,» Santiago, 2020.
- [9] Plastigen, «Plastigen,» [En línea]. Available: www.platigen.cl.
- [10] M. P. Groover, «Fundamentos de la manufactura moderna: materiales procesos y sistemas,» 3ra ed ed., The McGraw-Hill, 2007, pp. 887-900.
- [11] F. Cofré, «Diseño y construccion de fresadora CNC 3 ejes para utilizacion docente,» Santiago, 2018.

- [12] Sandvik Coromant, «Sandvik Coromant,» [En línea]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/milling-formulas-definitions>.
- [13] A. d. 3. d. grado, «Fresas,» Ferrol, 2013.
- [14] WMT CNC Industrial Co., Multipurpose Machine Operator's Manual HQ500.
- [15] Cimech3D, «www.cimech3d.cl,» [En línea]. Available: <https://www.cimech3d.cl/producto/motor-stepper-bipolar-nema-17-67n-cm/>. [Último acceso: 23 8 2023].
- [16] Autodesk, «<https://www.autodesk.es/>,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.autodesk.es/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/System-requirements-for-Autodesk-Inventor-2021.html>. [Último acceso: 2023].
- [17] F. Cofre, «Diseño y construcción de fresadora CNC 3 ejes para utilización docente,» Santiago, 2018.