



“Estudio Técnico Económico para Implementación de Máquina CNC para Mecanizado de Madera”

**Nombres: Felipe Alarcón Fernández.
Pablo Matamala Escalona.**

**Profesor Guía: Ángel Rubio Rodríguez
Profesor Co-Guía: Luis Vera Quiroga**

Índice

Introducción	8
1- Estado del Arte	10
Tecnologías y Máquinas Actuales de Mecanizado de Partes.....	10
Configuración de una maquina CNC de mecanizado de madera.....	11
Procesos de arranque de viruta.....	12
Ejemplos de máquinas presentes en el mercado.....	13
Investigación tecnologías para el proceso de corte	22
Maquinaria Utilizada para Procesos de Corte y Mecanizado de Maderas en modo manual	29
Investigación de tecnologías para el control de movimiento en CNC.....	35
Tecnologías y Equipos de Control Numérico Computarizado.....	35
Control Numérico Computarizado o CNC	35
Funcionamiento de una maquina CNC	35
Comunicación entre PC y controlador	36
Dispositivos y partes tecnológicas.	37
Motores Paso a Paso: (Motion Control Products Limited, 2021).....	37
Servo Motores	39
Stepper de lazo cerrado (Linear Motion Tips, 2020).....	48
Stepper Drive	51
Servodrive	54
Closed-loop Stepper Drive	57
Controlador de Movimiento o Breakout Board	57
Breakout Boards CNC Paralelas.....	58
Breakout Boards USB	58
Emuladores de Teclado	59
Softwares y Lenguajes de Programación de Control Numérico Computarizado	59

Software CNC	59
Funcionamiento de un software CNC:	60
Principios de Programación CNC (CNC Cook Book, 2020)	61
BTL	64
2- Definición de máquina, especificación de Hardware y Software	66
Tamaño y Grados de Libertad Necesarios para la Máquina.	66
Hardware para accionamiento de la Máquina	67
Motores	67
Definición del controlador	74
Sensores y Accesorios	74
Software para Control de la Máquina	75
3- Diseño del Sistema	76
Diseño de Máquina	76
Funcionamiento del CT de Madera	77
Servo Motores	77
Drive	77
Controlador Masso G3	77
Sensores de fin de carrera	77
Conexión del controlador	78
4- Resumen Técnico y Económico	84
5- Conclusiones	88
Referencias	89
Anexos	92

Índice de figuras.

Fig. 1 Ejemplo de centro de mecanizado de madera. (IGUS Plastics For Longer Life, 2021)	11
Fig. 2 HOMAG CENTATEQ P-110	13
Fig. 3 Unidad de mecanizado con ejes rotacionales	14
Fig. 4 Configuración para cambio de herramientas de 31 husillos de perforación y una sierra	15
Fig. 5 Pantalla software WoodWOP	16
Fig. 6 Hundegger robot-drive	17
Fig. 7 Unidad de mecanizado de 5 ejes y rodillos de alimentación	18
Fig. 8 Ejemplos de herramientas y accesorios	19
Fig. 9 Pantalla software CAMBIUM	20
Fig. 10 Holz-her pro-master 7017 (Michael Weinig AG, 2021)	21
Fig. 11 Beisse rover as 15 cnc processing centre (BEISSE GROUP, 2022)	21
Fig. 12 Aserrado uniforme y prismático (INFOR, 1989)	23
Fig. 13 Superficies o zanas elementales de las piezas aserradas (INFOR, 1989)	23
Fig. 14 Ejemplo disco sierra circular	24
Fig. 15 Corte periférico	26
Fig. 16 Corte de ranura	26
Fig. 17 Ejemplo de fresas	27
Fig. 18 (engineeringarticles, 2022)	28
Fig. 19 Sierra circular de banco makita. (Makita, 2022)	30
Fig. 20 Sierra radial. (Stanley Black & Decker Inc., 2021)	30
Fig. 21 sierra vertical. La Cut 1254 (HOLZHER, 2021)	31
Fig. 22 sierra escuadradora. (Group, Griggio, 2021)	31
Fig. 23 Canteadora cepilladora Hammer A3 31 (Felder, 2022)	32
Fig. 24 Canteado	32
Fig. 25 Cepillado	32
Fig. 26 Cepilladora de banco Makita 2012NB (Makita, 2022)	33
Fig. 27 Torno (Area tecnologia, 2021)	34
Fig. 28 Router CNC pequeño de 3 ejes	35
Fig. 29 Configuración básica máquina CNC de 3 ejes	36
Fig. 30 Características velocidad-torque de un stepper Oriental Motor (Oriental Motor USA CORP., 2020)	37

Fig. 31 Motores paso a paso de distintos tamaños	38
Fig. 32 Servo motor con encoder.....	39
Fig. 33 Esquema de servo motor	40
Fig. 34 Características velocidad-torque de un servo Oriental motor (Oriental Motor USA CORP., 2020)	41
Fig. 35 Devanado acanalado (SEW EURODRIVE, 2020)	42
Fig. 36 Devanado sobre dientes (SEW EURODRIVE, 2020)	43
Fig. 37 Devanado bañado en resina (SEW EURODRIVE, 2020)	43
Fig. 38 Lógica de control (SEW EURODRIVE, 2020)	44
Fig. 39 Diagrama para elección de encoder (SEW EURODRIVE, 2020)	45
Fig. 40 Funcionamiento de los encoder (SEW EURODRIVE, 2020).....	46
Fig. 41 Acoplamiento de encoder con motor (SEW EURODRIVE, 2020)	46
Fig. 42 Perfil de movimiento (SEW EURODRIVE, 2020).....	47
Fig. 43 Stepper de lazo cerrado con encoder	48
Fig. 44 Stepper drive de la marca Leadshine	51
Fig. 45 Conducción de bobina hacia adelante y hacia atrás.	52
Fig. 46 Comparación de señales en fullstep, halfstep y microstep.....	53
Fig. 47 Ejemplo Servodrive industrial. (ATO, 2022).....	54
Fig. 48 Etapas de un servocontrolador	54
Fig. 49 Lazo de control de un servo drive.	55
Fig. 50 Diagrama señales CW y CCW.	56
Fig. 51 Diagrama señales sign y puls.	56
Fig. 52 Diagrama señales de fase.	56
Fig. 53 Closed-loop stepper driver de STEPPERONLINE	57
Fig. 54 Ejemplo de breakout board de 5 ejes.	58
Fig. 55 Pantalla de software CNC (Mach3)	60
Fig. 56 Pantalla de software CAD/CAM(BobCAD).....	60
Fig. 57 Ejemplo de líneas de código G.....	61
Fig. 58 Ejemplo de 3 ejes.	62
Fig. 59 Ejemplo 5 ejes.	63
Fig. 60 Descripción de parámetros Cut 2-010-X en BTL.	65
Fig. 61 Fragmento de archivo BTL donde se ven los parámetros de corte.	65
Fig. 62 Husillo de bola.	68
Fig. 63 Gráfico Torque (Nm) vs. Velocidad (rpm). (WTWH Media LLC and its licensors, 2021).....	68

Fig. 64 Ejemplo de servomotor similar a los requeridos.....	69
Fig. 65 Controlador CNC UC300.....	70
Fig. 66 Controlador CNC Wi-XHC MKX-IV	71
Fig. 67 Controlador CNC MASSO G3.....	72
Fig. 68 Controlador CNC HCNC-818D.....	73
Fig. 69 Ejemplo Interruptor de fin de carrera o limit switch ME-8107 (automationcontrols, 2020).....	74
Fig. 70 Imagen de referencia del diseño para el CT de Madera. (Vial, 2021)	76
Fig. 71 Imagen de referencia MASSO G3.	78
Fig. 72 Imagen de referencia de pantalla de controlador.	79
Fig. 73 Sensor fin de carrera ME series. (Moujen, 2021)	80
Fig. 74 Tabla encontrada en la pág. 4. ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)	81
Fig. 75 Tabla encontrada en la pág. 5. ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)	81
Fig. 76 Tabla encontrada en la pág. 12 ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)	82
Fig. 77 Diagrama encontrado en la pág. 14 ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)	82
Fig. 78 Características de servomotores. (ADTECH, 2021)	83
Fig. 79 Elementos a Comprar	84
Fig. 80 Servomotor 15[Nm] con freno magnético.	85
Fig. 81 Servodrive K1BS25AB.....	85
Fig. 82 Controlador MASSO G3.....	86
Fig. 83 Tablero de pruebas.	86
Fig. 84 Conexión de servodrive para control de posición. ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021).....	87

Índice de tablas

Tabla 1 Tabla comparativa entre dispositivos de realimentación (Alarcon & Matamala, 2022)	47
Tabla 2 Comparación de motores industriales (Alarcon & Matamala, 2022).....	50
Tabla 3 Comparación características de motores	50
Tabla 4 Elección de servomotores según sus torques.....	67

Introducción

En la industria de la re-manufactura, los procesos de fabricación de elementos para la implementación de casa-habitación, necesitan incluir formas geométricas específicas para proveer la facilidad de ensamble entre estas partes haciendo mortajas (fresado), espigas y taladrados.

Hoy la industria de fabricación de paneles, vigas y pilares, tecnología CLT y CLA que utiliza madera como base, se realiza en modo semi automático, dado que un operador utiliza herramientas eléctricas, generalmente manuales, para dar la forma requerida a una parte, esto da cabida a imperfecciones que pueden entorpecer o interferir en el ensamble final retrasando el proceso.

Esta labor solo permite un volumen bajo de producción. Dado el aumento de la demanda por este tipo de edificación, es necesario que se implemente un sistema de producción en línea de mayor automatización y más precisión, el objetivo es que el proceso de corte de las piezas mejore considerablemente y con esto también el proceso de ensamble y armado.

En este contexto, desde la empresa Betech Ltda. se propone hacer un estudio de factibilidad técnico-económica de desarrollar un prototipo de máquina que corte y frese en madera con arranque de viruta, que incluya tecnología de control numérico para el control de movimiento de distintos grados de libertad, para proveer la automatización de los cortes en distintas geometrías.

Este documento presenta una investigación sobre máquinas existentes en el mercado y las tecnologías utilizadas en estas para luego proponer una solución acorde a las necesidades y requerimientos propuestos para el sistema de control del prototipo.

OBJETIVO GENERAL:

Formulación de proyecto de ingeniería para la fabricación de prototipo CNC de múltiples grados de libertad.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 1- Investigar el proceso utilizado para la creación de partes en una empresa dedicada al rubro.
- 2- Determinar y proponer una máquina CNC para el mecanizado y cortado en madera.
- 3- Formular propuesta Técnica y Económica.

OJETIVO DE LA EMPRESA:

Diseñar una solución para el sistema de control del prototipo de centro de trabajo de madera, logrando el movimiento de cada uno de los grados de libertad de la máquina.

1- Estado del Arte

Tecnologías y Máquinas Actuales de Mecanizado de Partes.

Centros de Mecanizado para la industria de la madera: (IGUS Plastics For Longer Life, 2021)

La automatización controlada por computador se está volviendo muy importante para la tecnología de producción. Incluso en la industria de maderas procesadas, las máquinas CNC ("Computerized Numerical Control" o "Control Numérico Computarizado") están encontrando muchos más usos. Estos emplean una computadora para realizar todas las funciones de control para ejecutar los procesos de mecanizado. Se presentan centros de mecanizado CNC complejos e integrados que ejecutan los pasos de mecanizado en la pieza de trabajo, la que está asegurada y sujeta en una abrazadera. Torneado, aserrado, fresado, taladrado, lijado o pegar, todas estas actividades son realizadas en madera utilizando movimientos programados de herramientas. Los elementos de control convencionales, como los pedales, palancas o manivelas son eliminadas. El control de los movimientos es realizado con el teclado o un click del mouse, mientras se monitorea la operación y las funciones en un monitor o pantalla. Un computador controla el centro de mecanizado con los datos ingresados para ejecutar todos los movimientos y procesos. La intervención manual de un operador ya no es requerida. Gracias a estos centros de mecanizado CNC, la operación de manufactura puede llegar a precisiones de mecanizado y velocidades de mecanizado significativamente más altas, la frecuencia de defectos y el riesgo de errores o funcionamiento defectuoso es reducido. Además, las máquinas CNC son muy flexibles usando interfaces graficas o de texto para reprogramación, y pueden ser modificadas fácilmente para acomodarse a las necesidades específicas del usuario. La tecnología CNC generalmente establece una relación cercana con la ingeniería de diseño, se pueden usar aplicaciones de dibujo asistido por computador para desarrollar e implementar directamente los programas para la máquina CNC.

Dado a sus usos flexibles, las maquinas CNC se hacen más indispensables para las operaciones de procesado de madera, tanto para la industria como para talleres pequeños, las compañías comienzan a migrar a maquinas CNC en un esfuerzo para enfrentar las demandas y costos del mercado. Los centros de mecanizado CNC son particularmente usados cuando son varias las especies de madera que se necesita mecanizar, frecuentemente en combinación con otros materiales, como plásticos o metales. La madera sólida o los materiales de madera, como madera contrachapada, planchas de aglomerado, CTL o paneles MDF, pueden ser fresada, aserradas o lijadas de forma automática en producción en serie. Esto permite el uso de maquina CNC para producir elementos de construcción (puertas, ventanas, etc.), para procesado de madera solida (muebles, diseño de interiores), y para mecanizado de paneles, incluso resulta muy efectiva y satisfactorio en la producción de instrumentos musicales intrincados.

Configuración de una máquina CNC de mecanizado de madera.

Los centros de mecanizado para madera CNC generalmente consisten en 4 unidades: el marco o bastidor de la máquina, la ventosa con elementos de succión, la cama de mecanizado y la unidad de mecanizado. Para tener una idea de cómo es estructuralmente una máquina se muestra en la Fig.1 una central de mecanizado.

Bastidor de la máquina: es básicamente una unidad de la máquina donde están los paneles de control, el controlador de la máquina también está aquí generalmente. Las otras unidades de desplazamiento de la máquina se instalan con este bastidor como base.

Ventosa con elementos de succión: se usa para posicionar las piezas de trabajo de forma precisa y acorde con la herramienta. El ajuste de la ventosa se controla desde el computador o de forma independiente.

Cama de mecanizado: Las piezas de trabajo son fijadas en la cama de mecanizado o procesado para luego ser mecanizadas. Algunas máquinas son equipadas con múltiples estaciones de mecanizado que pueden operar independiente unas de las otras.

Unidad de Mecanizado: Las funciones de la máquina CNC están localizadas principalmente en la unidad de mecanizado. Se pueden ejecutar varios pasos de procesado, depende de las herramientas instaladas.

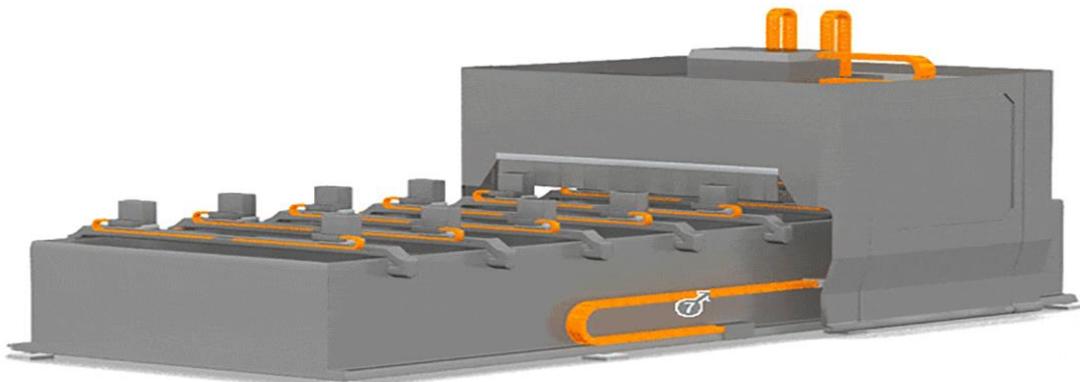


Fig. 1 Ejemplo de centro de mecanizado de madera. (IGUS Plastics For Longer Life, 2021)

Procesos de arranque de viruta

El cambiador de herramientas en la unidad de mecanizado permite a las máquinas CNC ejecutar una variedad de secuencias de procesado. La herramienta puede ser cambiada en segundo plano mientras la secuencia se completa, facilitando el ahorro de tiempo. Como la mayoría de los procesos remueven material de la pieza en forma de virutas, estas virutas son constantemente aspiradas del centro de mecanizado durante el proceso. Los siguientes son ejemplos específicos de procesos de mecanizado que pueden ser utilizados:

- **Taladrado:** proceso que genera viruta para crear y mecanizar agujeros cilíndricos en las piezas, o de forma más general, para crear o agrandar un agujero en un cuerpo sólido.
- **Fresado:** proceso que genera viruta en metales, madera, o plásticos usando herramientas de fresado, generalmente en una maquina fresadora o un centro de mecanizado. A diferencia del torneado, el movimiento de corte necesario para eliminar las virutas se logra con una rotación de la herramienta de corte con respecto a la pieza de trabajo, que se sujeta en una posición fija en la bancada de la máquina. Dependiendo del diseño, los movimientos de avance se pueden ejecutar en los ejes X, Y y Z (también en combinaciones), o a lo largo del respectivo eje de rotación.
- **Aserrado:** es un proceso que genera viruta con movimientos de corte circular o de línea recta. Se usa para hacer cortes en las piezas de trabajo o ajustar el largo de las piezas de trabajo, cortar aberturas en paneles, y también para cortar surcos y ranuras.
- **Lijado:** es un proceso de producción que genera viruta con distintas herramientas, cuyas superficies de corte geoméricamente aleatorias están formadas por una multitud de elementos de lijado incrustados hechos de agentes de lijado naturales o sintéticos. Remueve el material a altas velocidades.
- **Pegado de bordes:** implica fundir una superficie predefinida del material del borde por medio de rayos láser. El material del borde fundido penetra en la superficie de la pieza de trabajo cuando el material del borde se presiona contra la zona de presión, formando un contacto totalmente adherido entre la pieza de trabajo y el material del borde a medida que el material del borde se enfría.

Ejemplos de máquinas presentes en el mercado

Para entender cómo se ven y funcionan las máquinas CNC de mecanizado de madera ya existentes se hace una investigación al respecto con el fin de realizar una ingeniería inversa basándose en estas máquinas, lo cual guiará las decisiones al momento de diseñar el prototipo. Algunas de las máquinas CNC de mecanizado de madera que se investigaron se exponen a continuación.

- Centros de mecanizado CENTATEQ P-110 de HOMAG: (HOMAG Group, 2021)
Este centro de mecanizado que se ilustra en la Fig.2 , tiene una estructura como la descrita anteriormente, con un bastidor, unidades de aspirado, cama de mecanizado y unidad de mecanizado que se muestra en la Fig.3.



Fig. 2 HOMAG CENTATEQ P-110

Es una máquina relativamente pequeña y compacta, cuenta con soluciones 3, 4 y 5 ejes para mecanizado de muebles, madera maciza y soluciones para escaleras, ventanas y puertas. Accionamiento sincronizado y sistema de guía lineal. Todas sus funciones pueden ser programadas directamente desde una pantalla de control.

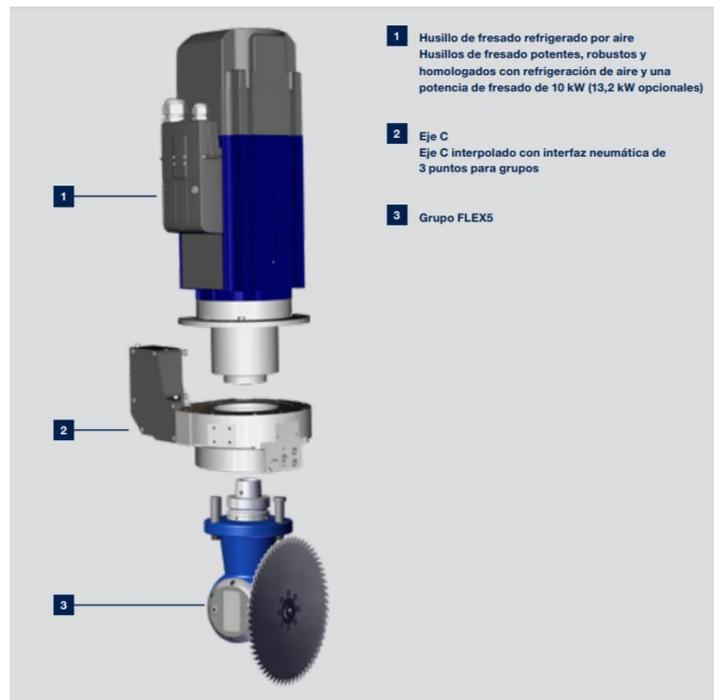


Fig. 3 Unidad de mecanizado con ejes rotacionales.

Tiene múltiples funciones de mecanizado como; aserrado, fresado, taladros, nesting, mecanizado 3D, entre otros y cuenta con distintas configuraciones para cambio de herramientas.

En la manufactura en plancha siempre el corte en dos dimensiones de la o las piezas a producir una de las primeras etapas. El programador utiliza un software para determinar la posición de cada pieza dentro de la plancha de materia prima. Este proceso es conocido como “nesting” (anidamiento) esto con el fin de dar mejor aprovechamiento a la materia prima.

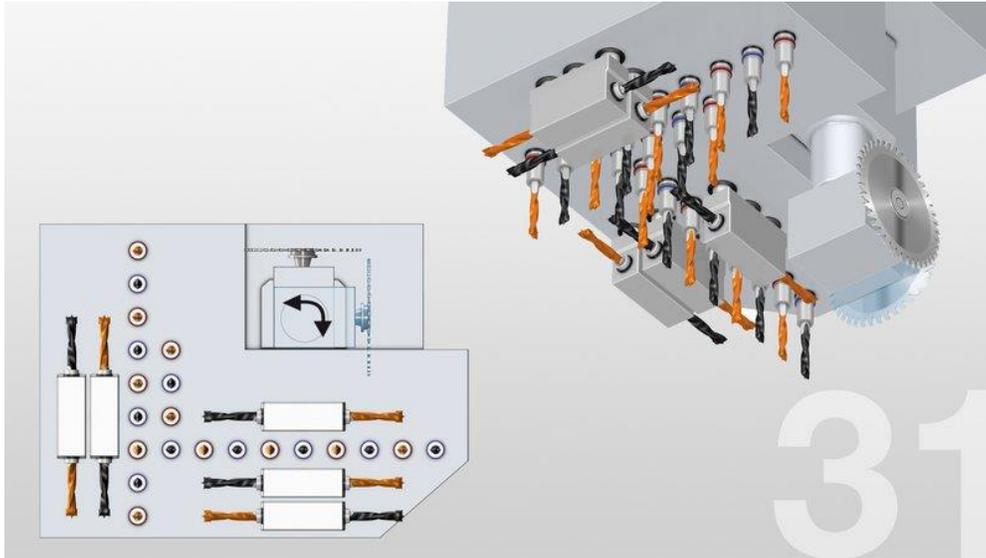
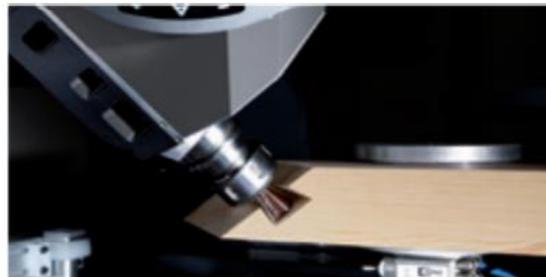


Fig. 4 Configuración para cambio de herramientas de 31 husillos de perforación y una sierra

Hay otros centros de mecanizado similares y de distintos tamaños fabricados por la misma marca como el CENTATEQ P-210, P-310, P-500/600, E-700 o el S-800/900.



Corte compuesto con gran profundidad de corte para piezas de marcos



Fresado de un conjunto de rebabas para la construcción de postes y pasadores



Fresado de la caja de cerradura



Taladrado escalonado para bisagras de clavija

Las máquinas de HOMAG utilizan un software CAD/CAM para el mecanizado llamado WoodWOP Fig.5, que fue desarrollado por ellos mismos que Mediante la introducción de parámetros de mecanizado puede programar de forma rápida y sencilla acciones como fresados, perforaciones o cortes de sierra y controlarlas en el acto a través del área gráfica. De esta forma obtiene la máxima seguridad durante la programación y un control permanente durante la creación de programas.

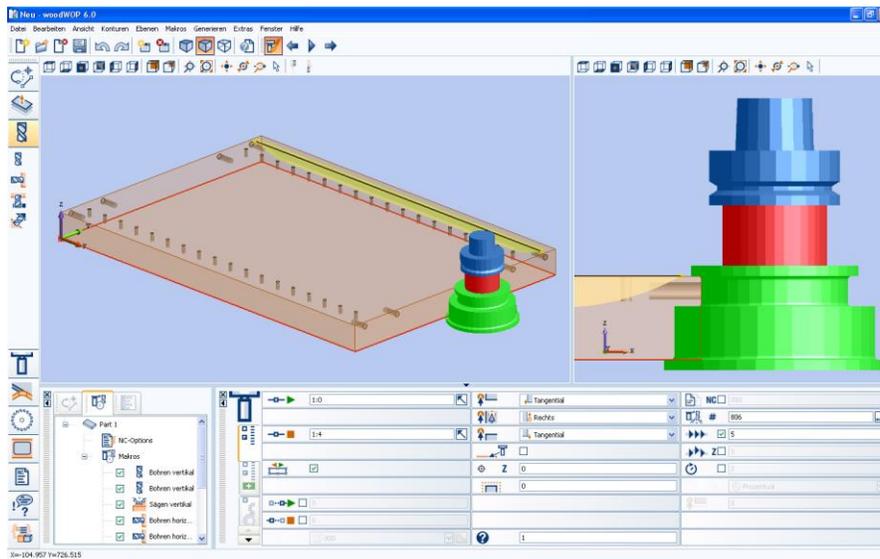


Fig. 5 Pantalla software WoodWOP

- **ROBOT-Drive de HUNDEGGER** (Hans Hundegger AG, 2020)

Esta máquina de la Fig.6 cuenta con un bastidor y unidad de mecanizado, pero no una cama de mecanizado. Tampoco tiene unidades de ventosa, fija las piezas con rodillos de alimentación, la viruta y madera sobrante cae en una cinta transportadora que los deposita en un contenedor de desechos de madera.



Fig. 6 Hundegger robot-drive

Tiene una estructura modular y ofrece opciones prácticamente ilimitadas para el mecanizado de madera usando una unidad robótica de 6 grados de libertad, que puede intercambiar entre 24 herramientas, en conjunto con una unidad de mecanizado de 5 ejes que aserra/ranura/marca que se muestra en la Fig.7.



Fig. 7 Unidad de mecanizado de 5 ejes y rodillos de alimentación.

Ofrece opciones adicionales de unidades de taladrado, cortaduras de surcos, sistema de etiquetado e impresión de etiquetas.

A continuación, en la Fig.8 se muestra algunos ejemplos de herramientas y accesorios utilizados por la maquina HUNDEGGER.



Fig. 8 Ejemplos de herramientas y accesorios.

Las maquinas HUNDEGGER utilizan un software CAD/CAM desarrollado por ellos mismos que sirve para programar y controlar el mecanizado, este software se llama CAMBIUM ilustrado en la Fig.9.

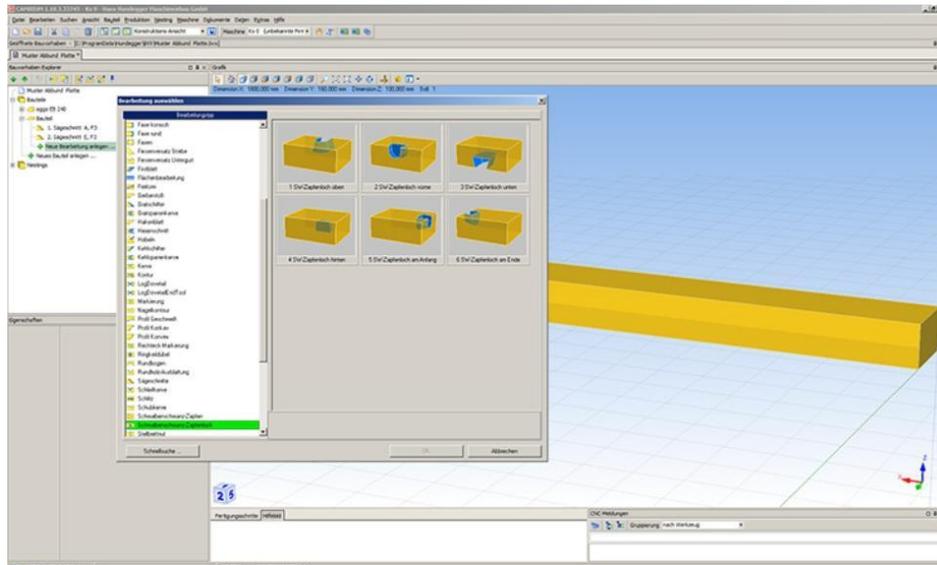


Fig. 9 Pantalla software CAMBIUM.

Existen muchas otras marcas que venden y desarrollan centros de mecanizado de madera, pero en general la mayoría se asemejan a la HOMAG mencionada anteriormente, con la configuración de bastidor, ventosa, cama para mecanizado y unidad de mecanizado de 3,4 y 5 ejes, todas necesitan un software específico desarrollado y vendido por sus fabricantes. A continuación, ejemplos en la Fig. 10 y 11.



Fig. 10 Holz-her pro-master 7017 (Michael Weing AG, 2021)



Fig. 11 Beisse rover as 15 cnc processing centre (BEISSE GROUP, 2022)

Investigación tecnologías para el proceso de corte

La madera es un material natural generalizado que está disponible comúnmente en casi todas las partes del mundo. Ha sido usada desde la prehistoria para fabricar una amplia variedad de objetos, desde pequeños objetos domésticos a grandes edificaciones. Desde los primeros días, la habilidad de cortar madera fácilmente en la forma deseada ha sido la característica principal que ha permitido que la madera sea usada para tan variados propósitos.

El mecanizado de madera tiene una larga historia que pone las bases para las técnicas de procesado utilizadas hoy. Sin embargo, esto no significa que las técnicas modernas estén datadas; al contrario, están utilizando ampliamente la automatización de vanguardia, detección por computador y control de procesos.

Los procesos utilizados para el procesamiento industrial de madera combinan técnicas ancestrales y técnicas modernas, con un grado de sofisticación que usualmente no es apreciado. Los visitantes a un aserradero tienden a tener la impresión de que los métodos son simples o crudos. Por lo general esto está lejos de la realidad. El desafío más grande al momento de trabajar con madera es que es un material natural y muy variable. Por esto, los métodos de procesado deben ser diseñados para aceptar un gran número de entradas y condiciones de operación y aun así seguir trabajando de forma robusta, confiable, rápida y precisa. (Schajer, 2015)

Procesos de aserrado

Aserrado:

Antes de entrar en el análisis, se mencionan algunos conceptos básicos y definiciones de la madera aserrada.

La producción de los aserraderos ya sea tablas, basas, vigas, tablones, etc. Se obtienen al aserrar los rollizos o troncos de diferentes tipos o especies madereras se denominan piezas aserradas, en ellas también se incluyen las formas intermedias como los lampazos, tapas, recortes de diferentes medidas, lo característico de las piezas aserradas es que a lo menos una de sus lados se obtiene mediante un corte longitudinal hecho con sierra. Imagen referencial de la una troza aserrada en la Fig.12 y 13.



Fig. 14 Ejemplo disco sierra circular.

Fresado (CusrtomPartNet, 2021)

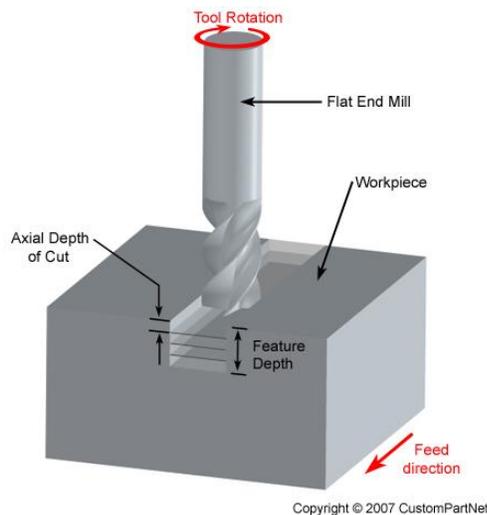
El fresado es la forma más común de mecanizado, un proceso de arranque de viruta, que puede crear una variedad de características en una pieza cortando el material no deseado. El proceso de fresado requiere de una maquina fresadora, una pieza de trabajo, un accesorio de fijación y un cortador. La pieza de trabajo es una pieza de material preformado que se fija al accesorio, que a su vez se fija a una plataforma dentro de la fresadora. El cortador es una herramienta cortadora con dientes afilados que también va asegurada en la fresadora y rota a altas velocidades. Al alimentar la pieza de trabajo en el cortador giratorio, el material se corta en forma de pequeñas virutas para crear la forma deseada.

El fresado se utiliza comúnmente para producir piezas que no son axialmente simétricas y tienen muchas características, como agujeros, espacios, huecos e incluso contornos en superficies tridimensionales. Las piezas que se fabrican completamente mediante fresado a menudo incluyen componentes que se utilizan en cantidades limitadas, tal vez para prototipos, como sujetadores o soportes de diseño personalizado. Otra aplicación para el fresado es la fabricación de herramientas para otros procesos.

Parámetros de corte

La velocidad y alimentación de la herramienta de corte, es especificada a través de varios parámetros. Estos parámetros son seleccionados para cada operación basándose en el material de la pieza de trabajo, material de la herramienta, tamaño de la herramienta, etc...

- **Alimentación de corte:** La distancia que recorre la herramienta de corte o la pieza de trabajo durante una revolución del husillo y la herramienta, se mide en IPR (Pulgadas por revolución) o IPT (Pulgadas por diente) según cada caso.
- **Velocidad de corte:** La velocidad de la superficie de corte respecto del borde de la herramienta durante un corte en SFM (Pies de superficie por minuto).
- **Velocidad de husillo:** La velocidad rotacional del husillo y la herramienta en RPM (Revoluciones por minuto).
- **Tasa de alimentación:** La velocidad del movimiento de la herramienta de corte mientras corta relativa a la pieza de trabajo. Se mide en pulgadas por minuto (IPM) y es el producto entre IPR y RPM.
- **Profundidad axial de corte:** La profundidad de la herramienta a lo largo de su eje en la pieza de trabajo mientras corta. Una gran profundidad axial de corte requerirá una baja tasa de alimentación, de otro modo resulta en una carga alta en la herramienta reduciendo su vida útil. Por esta razón, una característica es típicamente mecanizada en varias pasadas mientras la herramienta se mueve hacia la profundidad axial especificada con cada pasada.



- **Profundidad radial de corte:** La profundidad de la herramienta a lo largo de su propio radio en la pieza de trabajo mientras hace el corte. Si la profundidad radial del corte es menor que el radio de la herramienta, la herramienta está parcialmente enganchada y está haciendo un corte periférico.

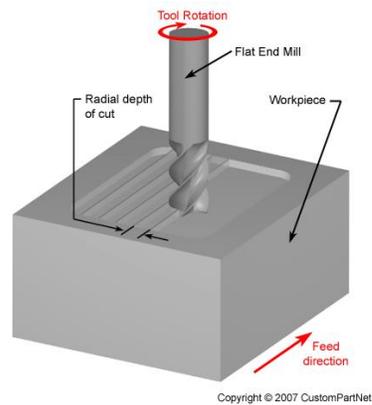


Fig. 15 Corte periférico.

Si la profundidad radial de corte es igual al diámetro de la herramienta, la herramienta está completamente enganchada con la pieza de trabajo y hace un corte de ranura.

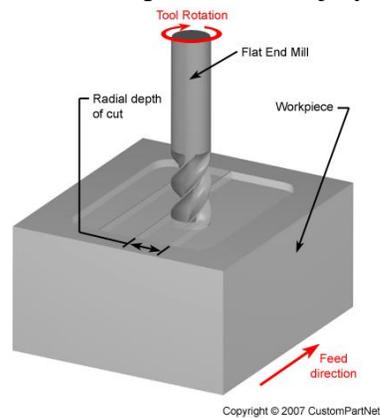


Fig. 16 Corte de ranura.

Existen muchos tipos de fresas que varían en tamaño y forma dependiendo del propósito de estas, en la figura 17 se pueden ver, a modo de ejemplo, algunos tipos de fresas.

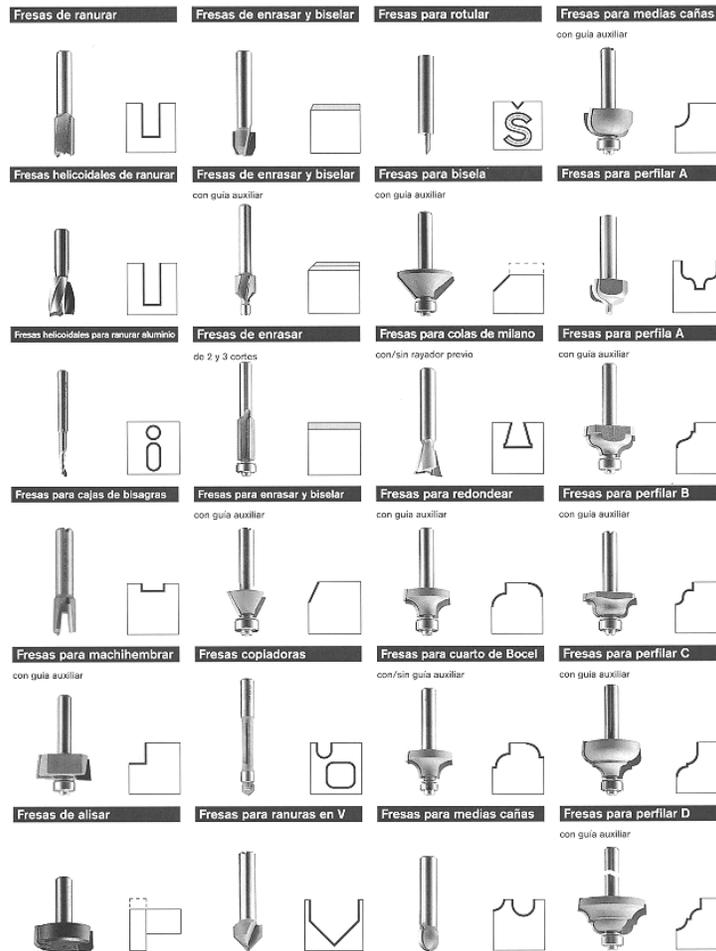


Fig. 17 Ejemplo de fresas.

Torneado (Soluciones Globales y Gestión de Compras, 2021)

El torneado es un proceso de mecanizado por arranque de viruta y la máquina que lleva a cabo este proceso es el torno.

Etapas del proceso de torneado

- **Carga/Descarga:** Fijación de la pieza a trabajar en el torno. La duración de esta etapa depende del tamaño, peso y otras características de la pieza.

- **Corte:** Las herramientas de corte realizan los cortes necesarios para obtener la pieza deseada.
- **Sustitución de herramienta:** Es el tiempo empleado en cambiar una herramienta que ya ha excedido su vida útil

Después del proceso de torneado no suele ser necesario aplicar otros tratamientos de acabado, ya que se obtienen buenas calidades superficiales y tolerancias muy pequeñas. Durante este proceso pueden realizarse operaciones tanto internas como externas. Estas operaciones son:

- Cilindrado
- Refrentado
- Tronzado
- Ranurado
- Roscado interior
- Roscado exterior
- Taladrado
- Mandrinado
- Escariado
- Moleteado

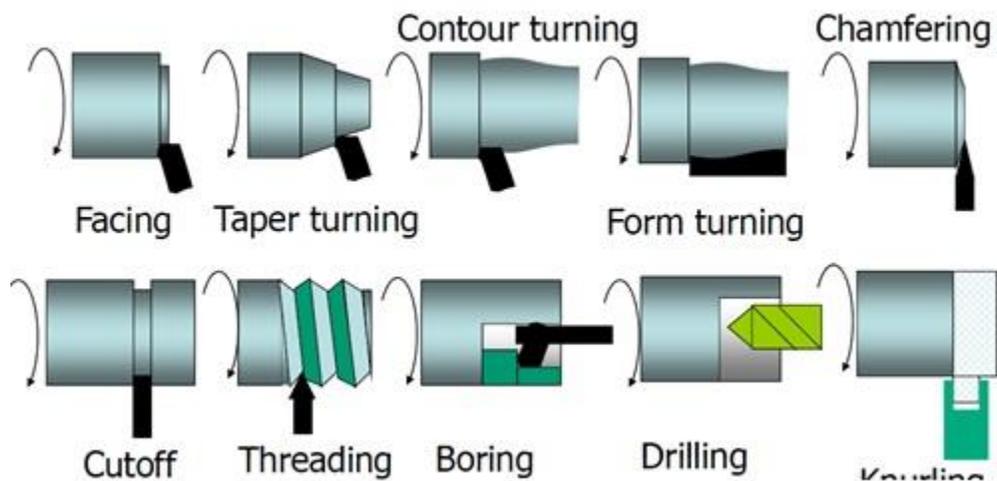


Fig. 18 (engineeringarticles, 2022)

El torno puede ser controlado por control numérico (CNC). En este caso los movimientos de la pieza y de la herramienta de corte están programados con anterioridad, produciendo así piezas con una gran precisión y minimizando los tiempos ociosos.

Entre las ventajas del torneado está el buen acabado superficial, requiere menos energía que otros procesos, el control de la viruta es sencillo. Entre las desventajas encontramos que la mayor parte de los defectos son imprecisiones de la superficie, las geometrías de revolución son limitadas y el desgaste de la herramienta es considerable.

Maquinaria Utilizada para Procesos de Corte y Mecanizado de Maderas en modo manual

La maquinaria que se utiliza en para procesos de corte y mecanizados para un trabajo de carpintería tanto como un taller de mediana envergadura, son herramientas que manejan niveles de potencia que van desde $\frac{1}{2}$ hp hasta los 5 hp dependiendo de que tan industrializada sea la herramienta.

Sierra circular de banco

Son utilizadas con frecuencia en cualquier taller de mueblería o fabrica hay ligeras y pesadas, las ligeras tienen la cualidad de poder trasladar de un lugar otro, por otro lado, las pesadas son ubicadas en un lugar fijo establecido para trabajo.

Es una máquina que puede cuadrada o rectangular con una base sólida que puede estar sujeta a un lugar establecido para trabajo, en su interior se aloja un motor que puede manejar potencias hasta los 5 hp, a su vez contiene mecanismos de transmisión de movimiento que hacen circular un disco de acero dentado de 10" o 12" de diámetros, estos discos de acero pueden variar su dimensión, tipos de dientes, números de dientes, etc. Para la elevación del disco dentado existe una manivela de elevación, también es posible realizar cortes con diferentes ángulos y longitudinales de una pieza de madera de diversos espesores y anchos dependiendo del tamaño de la sierra.



Fig. 19 Sierra circular de banco makita. (Makita, 2022)

Sierra Radial

La sierra radial es una sierra circular montadas sobre una estructura deslizante horizontal, es usada para cortar piezas madera a la longitud deseada, es posible hacer cortes transversales y longitudinales, el sistema de ángulos prefijados facilita el trabajo de ajustar con precisión la anchura.



Fig. 20 Sierra radial. (Stanley Black & Decker Inc., 2021)

Sierra vertical

Máquina de corte para dimensionamiento de tableros de triplay, MDF, enchapados. Los cortes que se pueden realizar son en sentido vertical u horizontal sobre un bastidor metálico con rodillos para facilitar su movimiento, el motor que está equipado junto a una sierra con dientes metálicos que puede alcanzar una potencia de 5 hp, una de las características principales es que su corte es tan limpio y no deja astilla en la madera



Fig. 21 sierra vertical. La Cut 1254 (HOLZHER, 2021)

Sierra escuadradora

Sierra Escuadradora para un corte preciso y limpio de los tableros, y la fabricación de muebles en madera. Equipada con carro escuadrador, sierra principal y sierra incisor.

Es una combinación de la sierra circular y radial, la maquina cuenta con una guía que permite corte limpio sin astilladuras de material, es una de las maquinas predecesoras de router cnc solo que esta ópera manualmente



Fig. 22 sierra escuadradora. (Group, Griggio, 2021)

Canteadora Cepilladora

Cantear es dejar el canto de la tabla a 90 grados con respecto a la cara plana. Al no elegir correctamente la medida del canto puede existir merma de material. estas máquinas requieren una potencia de tal manera de dejar un corte lo más limpio posible.

Esta máquina sirve para cantear la madera ya sea tabla, tablón, polines, vigas, por medio de unas guías de acero, permite las terminaciones de superficies de madera que sea plana, recta y que no presente deformaciones.

Una canteadora se puede dividir esencialmente en cuatro partes una plataforma de entrada, plataforma o superficie de salida, guía o tope y elemento cortante o chuchillo que está ubicado entre las dos plataformas, en algunos casos la canteadora se puede utilizar como cepilladora.



Fig. 23 Canteadora cepilladora Hammer A3 31 (Felder, 2022)



Fig. 24 Canteado



Fig. 25 Cepillado

Cepilladora de banco

Cepillo de banco es una herramienta esencial para rectificar o repetir caras de la madera que ya se encuentran relativamente planas, se compone de una plataforma móvil que se ajusta con una manivela esto para la medida de los cuchillos y rodillos. Estos rodillos tienen un movimiento giratorio ocasionado por un motor y a la vez hacen avanzar la madera en contra de los cuchillos.



Fig. 26 Cepilladora de banco Makita 2012NB (Makita, 2022)

Torno

Los tornos se fabricaron por la necesidad de hacer las cosas más rápido y eficientemente, el principio es hacer girar un trozo de madera que pueda tener diferentes características, por ejemplo, para crear una pata de una mesa, silla o también un soporte para escalera, etc.

Se encargan de hacer girar la pieza mientras las herramientas de corte son empujadas contra su superficie cortando las partes sobrantes en forma de viruta, se utiliza principalmente para operaciones de torneado rápido de metales, madera y plástico.

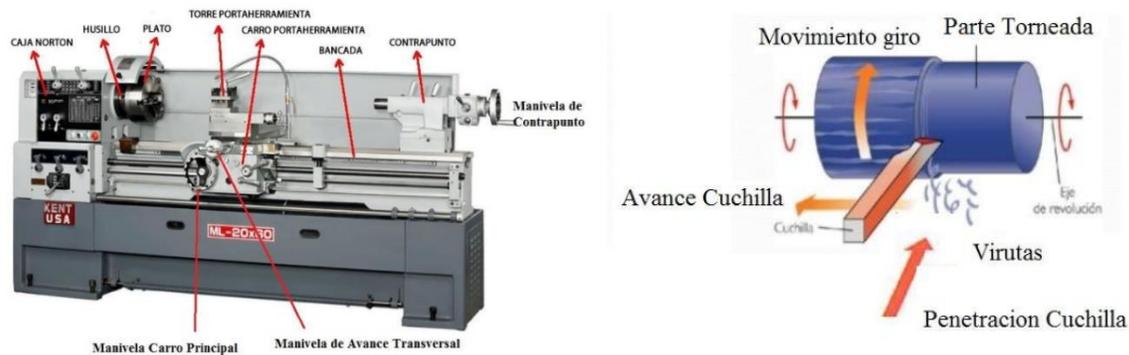


Fig. 27 Torno (Area tecnologia, 2021)

Investigación de tecnologías para el control de movimiento en CNC

Tecnologías y Equipos de Control Numérico Computarizado

Control Numérico Computarizado o CNC

El Control Numérico Computarizado es una estrategia de control de movimiento que permite controlar la posición de un elemento físico, generalmente es una herramienta montada en una máquina. Se controla la posición de un punto específico respecto a un origen mediante un programa y un conjunto de órdenes añadidas. Ej. de máquinas de control numérico; tornos, routers, cortadoras de plasma, cortadoras laser, fresadoras, etc....

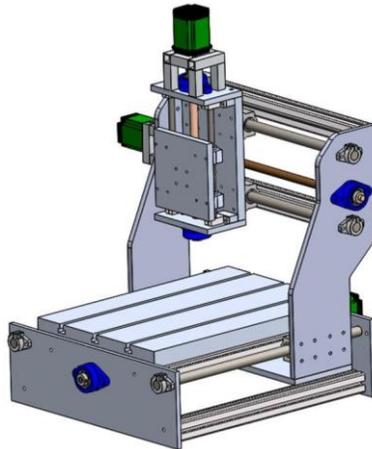


Fig. 28 Router CNC pequeño de 3 ejes.

Funcionamiento de una máquina CNC

Tomando datos digitalizados, un computador y un software CAM son usados para controlar, automatizar y monitorear los movimientos de una máquina. El controlador CNC funciona en conjunto con una serie de motores y drives para mover y controlar los ejes de la máquina, ejecutando los movimientos programados. En las máquinas industriales generalmente hay un sistema de retroalimentación que constantemente monitorea y ajusta la velocidad y posición de la herramienta cortadora.

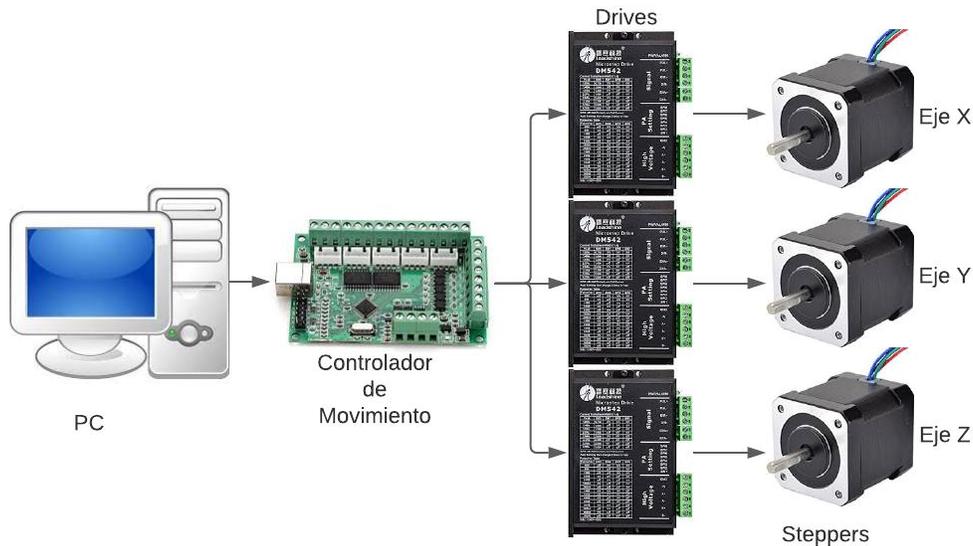


Fig. 29 Configuración básica máquina CNC de 3 ejes.

En la Figura, se puede ver a grandes rasgos los componentes de una máquina CNC de 3 ejes, donde un PC está conectado a un controlador de movimiento o breakout board que a su vez está conectado a 3 drives para controlar 3 motores de paso que corresponden cada uno a un grado de libertad o eje.

Comunicación entre PC y controlador .

El PC debe tener un software CNC, en el cual se ingresan las líneas de código que comandan las acciones de la máquina, este código se conoce como Código G o M. El controlador reconoce este código G y envía las señales correspondientes a cada uno de los drives para que los motores hagan el movimiento correspondiente, moviendo y posicionando la herramienta de corte.

El PC y el controlador están conectados mediante un cable serial, este cable puede ser Serial a Paralelo, USB a Paralelo, USB a USB, depende del controlador o breakout board.

Dispositivos y partes tecnológicas.

Motores Paso a Paso: (Motion Control Products Limited, 2021)

Un motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte impulsos eléctricos en movimientos mecánicos discretos. El eje o husillo de un motor paso a paso gira en incrementos de pasos discretos cuando se le aplican pulsos de comando eléctrico en la secuencia adecuada. La rotación de los motores tiene varias relaciones directas con los pulsos de entrada aplicados. La secuencia de los pulsos aplicados está directamente relacionada con la dirección de rotación del eje del motor. La velocidad de rotación de los ejes del motor está directamente relacionada con la frecuencia de los pulsos de entrada y la longitud de la rotación está directamente relacionada con el número de pulsos de entrada aplicados.

◇ Speed - Torque Characteristics [Motor frame size 60 mm (2.36 in.)]

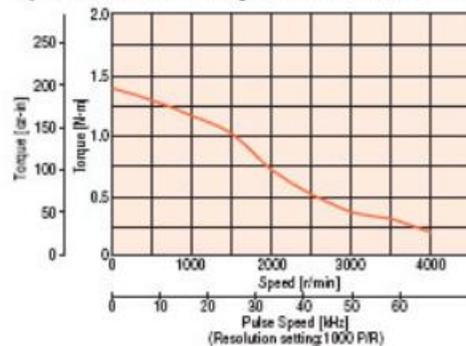


Fig. 30 Características velocidad-torque de un stepper Oriental Motor (Oriental Motor USA CORP., 2020)

Un motor paso a paso puede ser una buena opción siempre que se requiera un movimiento controlado. Se pueden utilizar en aplicaciones en las que necesite controlar el ángulo de rotación, la velocidad, la posición y el sincronismo.

Al seleccionar un motor paso a paso para su aplicación, hay varios factores que deben tenerse en cuenta:

- ¿Cómo se acoplará el motor a la carga?
- ¿Qué tan rápido debe moverse o acelerar la carga?
- ¿Cuánto torque se requiere para mover la carga?
- ¿Qué grado de precisión se requiere al posicionar la carga?



Fig. 31 Motores paso a paso de distintos tamaños

Pasos que se siguen normalmente al elegir un motor de paso:

1. Determinación del componente del mecanismo de transmisión

Primero, determine ciertas características del diseño, como el mecanismo, las dimensiones aproximadas, las distancias recorridas y el período de posicionamiento.

2. Calcule la resolución requerida

A partir de la resolución requerida, determine si se va a utilizar solo un motor o un motorreductor. Sin embargo, al utilizar la tecnología de microstep, alcanzar la resolución requerida se vuelve muy fácil.

3. Determine el patrón de funcionamiento

Encuentre el período de aceleración (desaceleración) y la velocidad del pulso de operación para calcular el par de aceleración.

4. Calcule el torque requerido

Calcule el torque de carga, el torque de aceleración y encuentre el torque requerido exigido por el motor.

5. Seleccione el motor

Realice una selección provisional de un motor en función del torque requerido. Determine el motor que se utilizará a partir de las características de velocidad-torque.

6. Verifique el motor seleccionado

Confirme la tasa de aceleración / desaceleración y la relación de inercia.

Servo Motores

Un servomotor es un dispositivo electromecánico que produce torque y velocidad en función de la corriente y el voltaje suministrados. Un servomotor funciona como parte de un sistema de circuito cerrado que proporciona torque y velocidad según lo ordena un servocontrolador que utiliza un dispositivo de retroalimentación para cerrar el circuito. El dispositivo de retroalimentación proporciona información como corriente, velocidad o posición al servocontrolador, que ajusta la acción del motor en función de los parámetros ordenados.

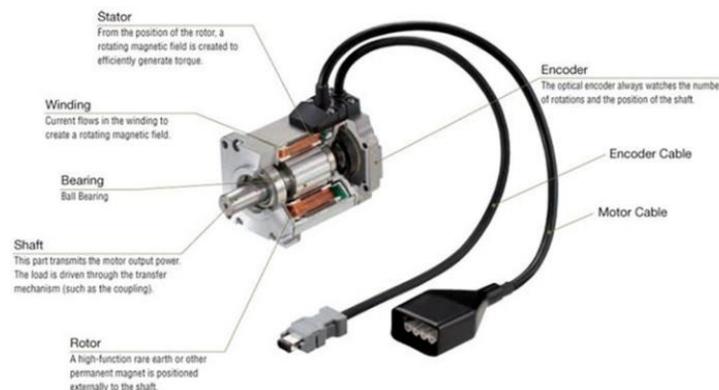


Fig. 32 Servo motor con encoder.

El motor puede ser AC o DC, cepillado o sin escobillas, rotativo o lineal, y de cualquier tamaño. El dispositivo de retroalimentación puede ser un potenciómetro, dispositivo de efecto Hall, tacómetro, codificador, transductor lineal o cualquier otro sensor, según corresponda. Completando el servo sistema está la electrónica de control que alimenta el motor y compara los datos de retroalimentación y la referencia de comando para verificar que el servomotor está funcionando como se le ordenó. Hay muchos tipos de aplicaciones de

servomotores, desde simples motores de CC utilizados en aplicaciones de hobby (como modelos de aviones) hasta sofisticados motores sin escobillas impulsados por complejos controladores de movimiento utilizados para centros de mecanizado de varios ejes.

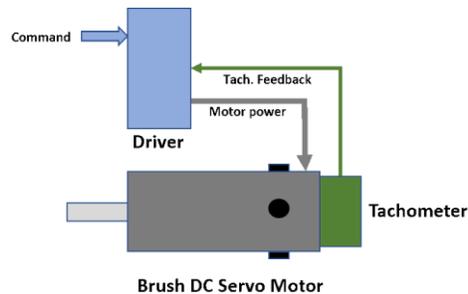


Fig. 33 Esquema de servo motor

Un servomotor industrial simple consta de un motor de DC de imán permanente con un tacómetro integral que proporciona un voltaje de salida proporcional a la velocidad. La electrónica de accionamiento suministra el voltaje y la corriente necesarios al motor en función del voltaje realimentado por el tacómetro. En este ejemplo, se establece una velocidad ordenada (representada como un voltaje de referencia de comando) en el controlador, luego el circuito en el controlador compara el voltaje de retroalimentación del tacómetro y determina si se ha logrado la velocidad deseada, lo que se conoce como bucle de velocidad cerrado. El bucle de velocidad monitorea la velocidad ordenada y la retroalimentación del tacómetro, mientras que el conductor ajusta la potencia al motor para mantener la velocidad ordenada deseada. El caso de un servo con encoder, se controla la posición del motor.

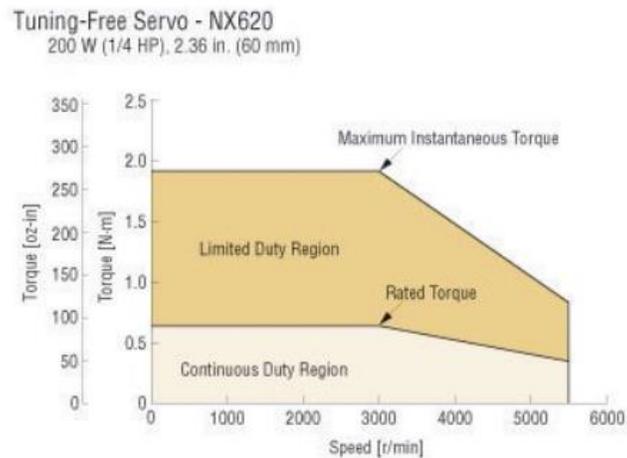


Fig. 34 Características velocidad-torque de un servo Oriental motor (Oriental Motor USA CORP., 2020)

Los servomotores son motores eléctricos especiales, principalmente diseñados para aplicaciones de control de torque control de velocidad y posición.

Por lo general se selecciona para aplicaciones de alta dinámica, de alta precisión y en el reemplazo de motores de tecnologías desfasadas

Por su velocidad sincrónica se clasifican en:

- Servomotor sincrónico
- Servomotor asincrónico

Aplicaciones de servomotores

- Aplicaciones de alta dinámica
- Aplicaciones de alta precisión
- Aplicaciones que presentan sobrecargas
- Aplicaciones: Robótica, empaque, llenado, corte, etiquetado, maquinaria, etc.

Ventajas

- Alta productividad y precisión
- Mínimo desgaste y mantenimiento
- Amplio rango de velocidad con un volumen de motor más pequeño
- Menor peso y menor volumen respecto a motores AC o DC

Desventajas

- Alto costo si se compara a un motor AC
- Siempre necesitara a un servocontrolador (no es posible el arranque en directo)
- Se necesita personal especializado para su puesta en marcha
- Falta mayor conocimiento en los centros de formación académica y profesional de técnicos e ingenieros

Estatores para un motor síncrono

Devanado acanalado (servos antiguos) que se representa en la Fig.35



Fig. 35 Devanado acanalado (SEW EURODRIVE, 2020)

Devanado sobre dientes Fig.36, servos actuales reducen el tamaño del servo, su costo de producción y su precio de venta.



Fig. 36 Devanado sobre dientes (SEW EURODRIVE, 2020)

Devanado bañado en resina Fig.37, la resina ayuda a transferir el calor interno hacia el exterior, como un disipador de calor.



Fig. 37 Devanado bañado en resina (SEW EURODRIVE, 2020)

Lógica de control de un lazo compuesto por servomotor y carga que se representa en la Fig. 38.

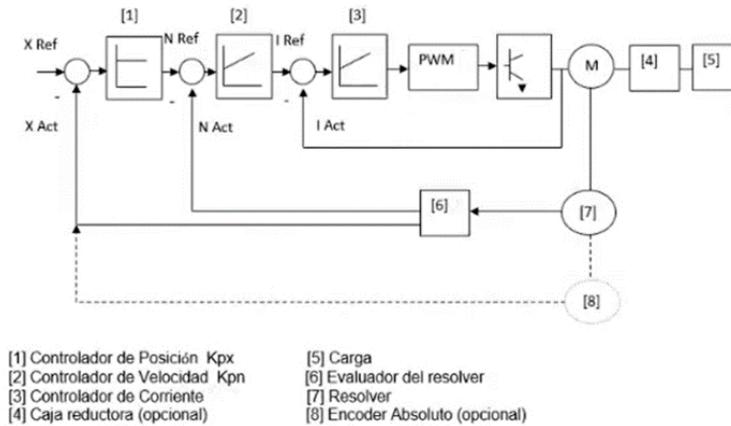


Fig. 38 Lógica de control (SEW EURODRIVE, 2020)

Realimentación en motores y servomotores

Para aplicaciones especiales en el control de motores

- Control de velocidad con bajo error
- Control de posición
- Control de torque

Para trabajos de posicionamiento

- Encoder incrementales
- Encoder absolutos
- Encoder externos

Lectura de la posición de un rotor

- En forma exclusiva con los servos síncronos

Selección de elemento de realimentación para servomotor

En la Fig.39 se puede visualizar un diagrama que nos orienta de como seleccionar un encoder y que preguntas debemos realizarnos a la hora de seleccionar.

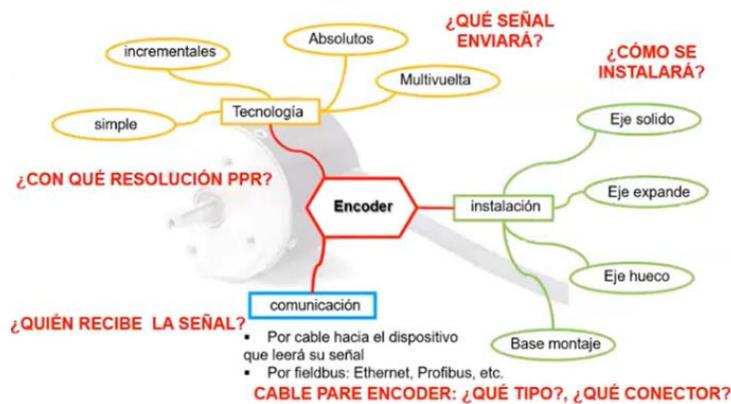


Fig. 39 Diagrama para elección de encoder (SEW EURODRIVE, 2020)

Señales que manejan los encoder

En la Fig.40 la señal TTL Transistor Transistor Logic o HTL High Voltaje Transistor Logic son señales de forma cuadrada que envían 6 canales de datos: A, B, C y sus negados.

La señal seno / coseno es una señal continua y al igual que TTL y HTL envían 6 canales de datos la información.

Canal A y canal B la cantidad de pulsos en sentido CW y CCW (horario y antihorario), canal C envía 1 pulso cada vez que se complete una vuelta de motor.

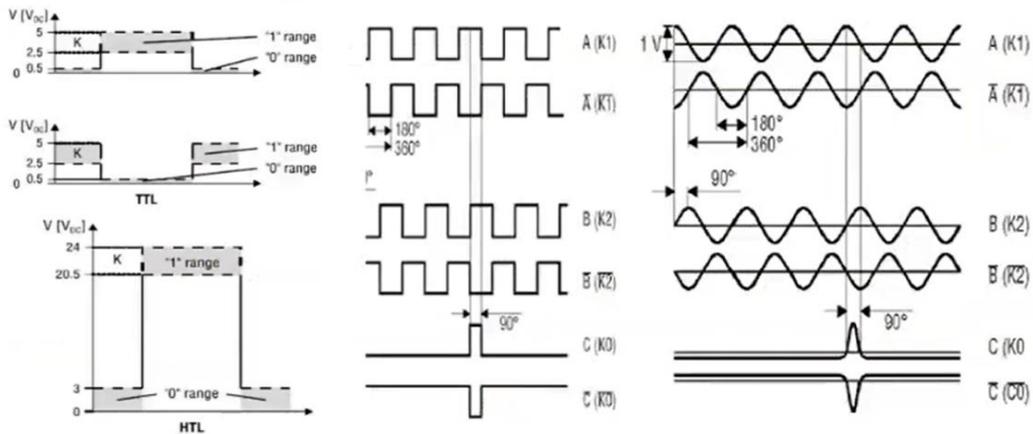


Fig. 40 Funcionamiento de los encoders (SEW EURODRIVE, 2020)

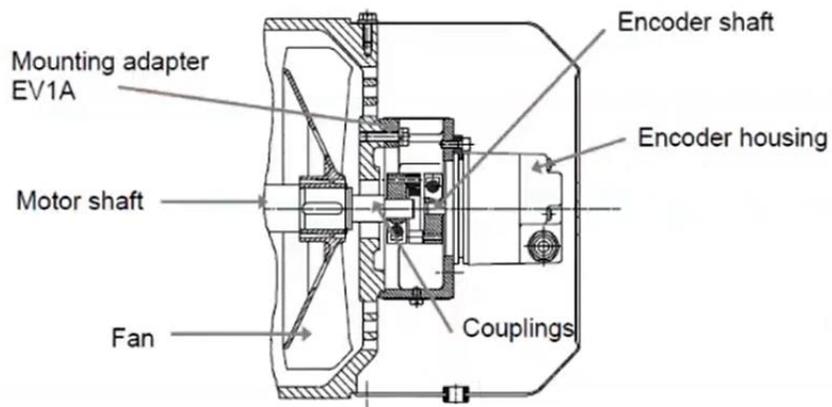


Fig. 41 Acoplamiento de encoder con motor (SEW EURODRIVE, 2020)

Montaje mecánico de un encoder con eje sólido junto a su acoplamiento y base de montaje se representa en la Fig.41.

Por su tamaño físico, no todos los modelos de encoder se usan en todos los tamaños de potencias de motores.

	Ventajas	Desventajas	Resolución	Costo
Encoder incremental	Carcasa robusta, IP alto diferentes montajes	Se pierde la data cuando no hay energía	1024 ppr	Medio
Encoder absoluto	Mantiene la data aun si se pierde la energía Altas resoluciones posibles	Costoso	1024/2048 ppr	Alto/ Muy Alto
Resolver	Alojamiento robusto. No le afecta la vibración ni la temperatura	Se pierde la data cuando no hay energía	1024 ppr	Incorporado al servo
Encoder Hiperface	Memoria de datos electrónica	Costoso	2048 ppr	Alto

Tabla 1 Tabla comparativa entre dispositivos de realimentación (Alarcon & Matamala, 2022)

Según la técnica de control usada control vectorial de corriente se puede lograr una precisión de 0.01% sobre una velocidad de 3000 rpm.

Escoger un encoder dependerá de la precisión que se necesite para la aplicación, de la robustez de este para el entorno donde va a trabajar ya sea temperatura, vibración, humedad, etc.

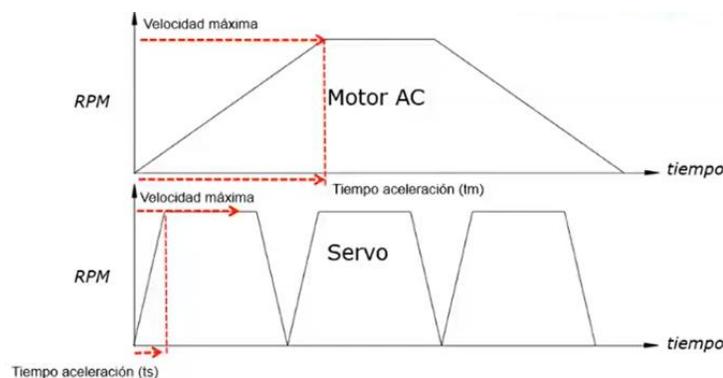


Fig. 42 Perfil de movimiento (SEW EURODRIVE, 2020)

Stepper de lazo cerrado (Linear Motion Tips, 2020)

Porque el conocimiento preciso de la posición del motor solo ocurre si el motor nunca pierde pasos. Y en el mundo real, existen múltiples situaciones que pueden hacer que el motor pierda pasos, por ejemplo, un atasco de la máquina que impide que el eje del motor gire.

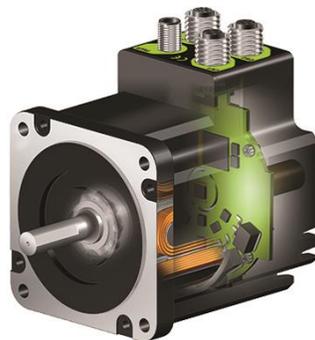


Fig. 43 Stepper de lazo cerrado con encoder

Para hacer frente a estas posibilidades, los motores paso a paso suelen estar sobredimensionados para manejar picos de torque, paradas u otras anomalías que de otro modo harían que el motor pierda pasos. Pero cuando los pasos perdidos pueden ser perjudiciales para la aplicación o el proceso, otra solución es operar el motor paso a paso en un sistema de circuito cerrado, con retroalimentación de posición para detectar y corregir errores de posicionamiento.

En general, existen tres tipos de control de circuito cerrado para motores paso a paso, cada uno de los cuales ofrece un nivel diferente de control de posicionamiento y complejidad.

El tipo más común de sistema paso a paso de circuito cerrado se basa en la compensación de pérdida de paso, también conocida como control de pérdida de paso o mantenimiento de la posición del paso a paso. En esta configuración, el variador opera en modo de micropasos y un codificador rastrea la posición del eje (o carga). Si se detectan pasos perdidos, según la posición ordenada (número de pasos multiplicado por el ángulo del paso) versus la posición real leída por el codificador, el controlador ordena pasos adicionales para que el motor (o la carga) alcance la posición deseada.

La compensación de pérdida de paso es el esquema de circuito cerrado más simple para motores paso a paso y, como se mencionó anteriormente, es el más ampliamente adoptado, pero su principal inconveniente es que solo compensa los pasos perdidos al final de un movimiento, no continuamente durante todo el proceso.

El control de posición de carga, también conocido como micropasos de circuito cerrado, monitorea continuamente la posición del eje (o carga) y genera una señal de error. El controlador utiliza esta señal de error para ajustar los comandos en tiempo real, durante todo el perfil de movimiento.

Con el control de la posición de carga, el sistema aún funciona como un sistema paso a paso en el modo de micropasos, pero el perfil de movimiento se sigue con mayor precisión, en lugar de permitir que el motor se desvíe durante el movimiento y emitir un comando de compensación de posición única al final del movimiento.

Servocontrol, el método de control paso a paso de circuito cerrado más avanzado es operar el motor como un motor bifásico sin escobillas (BLDC). (Tenga en cuenta que muchos motores paso a paso tienen dos fases compensadas en 90° , mientras que los motores de DC sin escobillas tienen tres fases compensadas en 120°). Este método se conoce como control servo paso a paso o control paso a paso de circuito cerrado.

Con el servocontrol para motores paso a paso, en lugar de que el variador proporcione la corriente completa al motor para producir movimiento, la retroalimentación de un codificador detecta la posición del eje y un bucle de control (generalmente un bucle PID) determina el torque exacto necesario para que el eje siga el perfil de movimiento. En otras palabras, el motor es impulsado por un comando de torque en lugar de por pulsos de corriente.

Tablas de características comparativas entre tipos de motores

	SERVO	DC	STEPPER	CLOSED LOOP STEPPER
Eficiencia energía	Alta	Media	Media	Alta
Torque	Alto	Alto	Media	Media
Velocidades rpm	1500-6000	1000-3600	1000	1000
Mantenimiento	Bajo	Frecuente	Usar y descartar	Frecuente
Soporte proveedor	Si	¿?	No	Si
Acople a caja reductora	Si	Si	No	Si
Tamaño/volumen	Medio/ Pequeño	Medio	Pequeño	Pequeño

Tabla 2 Comparación de motores industriales (Alarcon & Matamala, 2022)

Características	Motor DC	Motor AC+VDF	Motor AC+VDF+ encoder	Servomotor
Capacidad de carga	150 a 200 % Nm	150 % Nm	170 % Nm	400 % Nm
Ventilación forzada	Si	Si	Si	No suele usarse
Torque estático	Limitado	No	Limitado	Si
Frecuencia de Mantenimiento	Alta	Poco	Poco	Poco
Operación con grandes cargas	Excelente	Bueno	Bueno	Se debe pensar
Precisión en el posicionamiento	Depende del tacómetro	No tan bueno sin encoder	+/- 50 min angulares	+/- 5 min angulares

Tabla 3 Comparación características de motores (Alarcon & Matamala, 2022)

Stepper Drive. (Jure, 2021)

El stepper drive es un dispositivo electrónico usado para manejar un motor paso a paso, usualmente no hace nada por sí solo y debe ser utilizado con un controlador. Hay muchos tipos de stepper drive, pero en general todos hacen lo mismo, mover motores paso a paso.



Fig. 44 Stepper drive de la marca Leadshine

Los motores paso a paso requieren voltajes y/o corrientes que el controlador no puede producir por sí solo. Por lo tanto, necesitamos utilizar un stepper drive. Este dispositivo electrónico transformará nuestras instrucciones de movimiento de un controlador a una secuencia en la que el devanado del motor paso a paso se encenderá o apagará sin dejar de proporcionarle suficiente energía. La tarea básica del controlador es generar una señal adecuada a partir de los datos de entrada para mover el eje del motor.

La tarea básica del controlador es generar una señal adecuada a partir de los datos de entrada para mover el eje del motor. Un enfoque más común que conduce un motor paso a paso lo llamamos puente H. Los circuitos de puente H constan de 4 transistores FET con muy baja resistencia entre el drenaje y el contacto de la fuente (RDSon) cuando están en estado activo. En general, necesitamos al menos dos puentes H ya que el motor tiene un mínimo de dos bobinas. Con la combinación correcta de señales en la puerta de FET, controlamos la dirección de la corriente a través de la bobina del motor. La excitación alterna de dos devanados hace que el eje del motor se desplace.

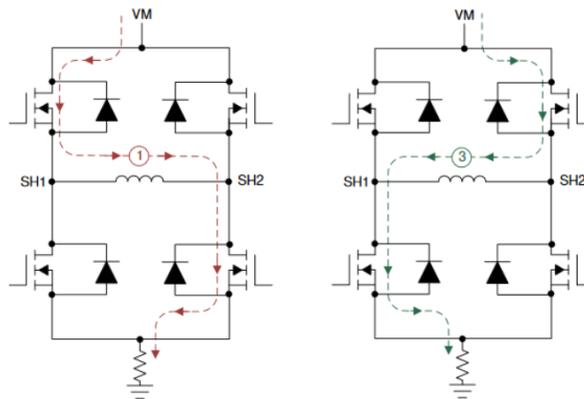


Fig. 45 Conducción de bobina hacia adelante y hacia atrás.

Cómo elegir un stepper drive

Al elegir el controlador adecuado para nuestro sistema, primero necesitamos información sobre los motores que usaremos. Ésta es la principal información importante. Tenemos que elegir el controlador de acuerdo con la potencia que el controlador paso a paso puede entregar al motor. Por ejemplo, un motor más grande como NEMA 34 tiene un valor de torque de retención más alto que el NEMA 17 más pequeño. Es por eso que un NEMA 34 consume más corriente y necesitamos un controlador con una característica de amperaje más alta.

Lo siguiente a considerar es cómo y qué nos gustaría controlar en un drive. Por lo general, hay configuraciones para la corriente máxima y microstep. Podemos tener la opción de configurar un controlador con puentes o más sofisticado con software que en la mayoría de los casos permite al usuario configurar también otras opciones especiales como parámetros de caída, límite de protección de temperatura, corriente inactiva, etc.

Algunos controladores los podemos usar solo con un controlador que genera señales de paso y dirección. Por otro lado, otros pueden manejar diferentes protocolos de comunicación.

Microstep

Los motores paso a paso se mueven en pasos que suelen ser de $1,8^\circ$, es decir, 200 pasos por revolución. Esto puede ser un problema cuando necesitamos pequeños movimientos. Una opción sería utilizar algún tipo de transmisión, pero también hay otra forma: microstepping. Microstep significa que podemos tener más de 200 pasos por revolución y, a su vez, tener movimientos más pequeños.

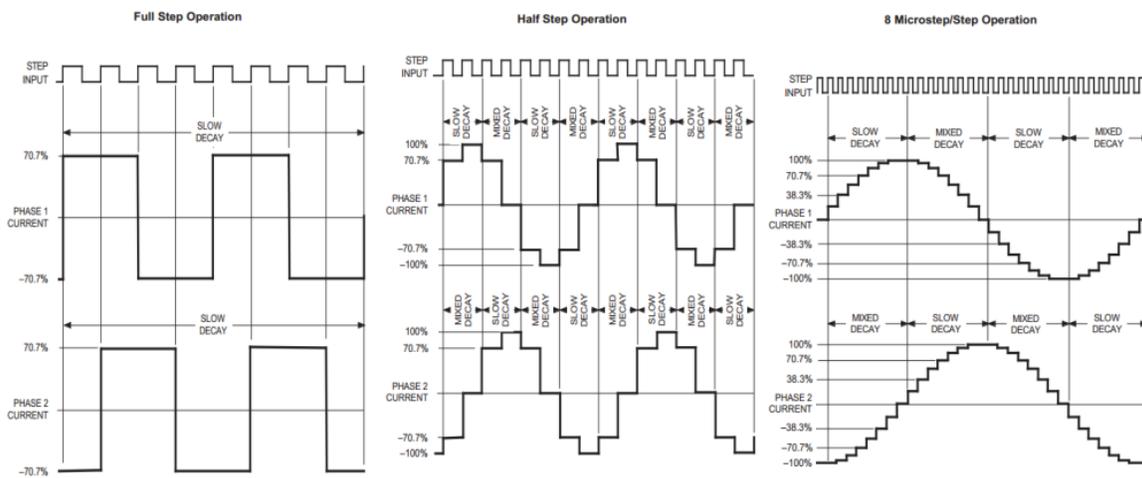


Fig. 46 Comparación de señales en fullstep, halfstep y microstep.

Micro-stepping nos dice cuántos “micropasos” debe realizar un paso a paso para producir un paso completo. El valor de 1/1 nos dice que el paso a paso debe hacer un “micropaso” para producir un paso completo. El valor de 1/2 se llama half-step y nos dice que el motor paso a paso debe realizar 2 “micropasos” para un paso completo. Esto significa que el motor paso a paso debe dar 400 pasos para una revolución completa. Un valor de 1/8 nos dirá que el motor debe realizar 8 “micropasos” para un paso completo y 1600 pasos para una revolución completa. El mismo principio se aplica a todos los valores de micro-stepping.

Servodrive (Morales & Ceballos, 2014)



Fig. 47 Ejemplo Servodrive industrial. (ATO, 2022)

Un servodrive es como un variador de velocidad diseñado específicamente para el control de los servomotores. Utiliza un convertor para la tensión de entrada y un inversor para la tensión de salida (aplicada al motor). La señal de salida es definida por el circuito de control (microprocesador) correspondiente. Mediante el servo drive se trabaja en lazo cerrado (realimentación), lo que permite detectar los posibles “errores” en el movimiento del motor y dar la oportuna orden de corrección de este. (C.I.P., 2022)

En la Fig. 48 se muestra las etapas que compone un servodrive, la etapa inicial de entrada corresponde a la alimentación trifásica del servodrive para posteriormente ser filtrada y acondicionada por la etapa de potencia y ser enviada como una señal modulada al servomotor, usando siempre un control vectorial de corriente.

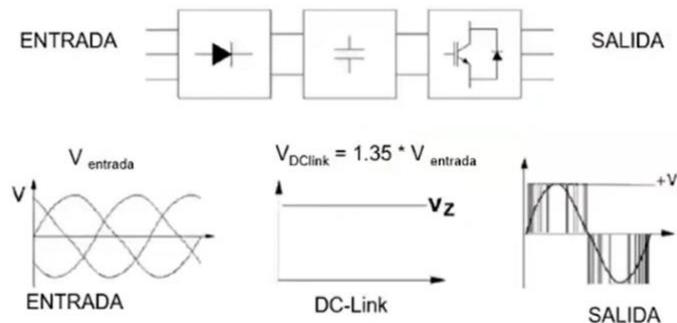


Fig. 48 Etapas de un servocontrolador

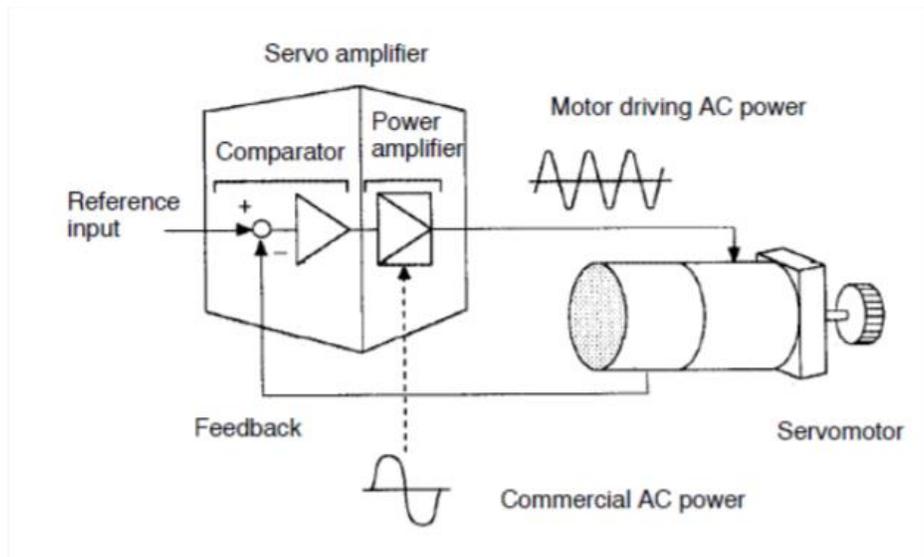


Fig. 49 Lazo de control de un servo drive.

El lazo de control puede ser de tres clases: Posición, Velocidad y Par.

- Lazo de par. Se utiliza para asegurar que se aplica al motor la correcta cantidad de par.
- Lazo de velocidad. Permite asegurar que el motor gira a la velocidad requerida. El control de velocidad y par en los servodrives, se suele efectuar normalmente, variando la consigna analógica de velocidad y par a través de un potenciómetro, dentro de un rango de valores permitido.
- Lazo de posición. Nos asegura que la carga está en la posición programada. El control de posición en los servodrives se realiza mediante la entrada de trenes de pulsos, los cuales pueden ser de diferentes tipos:
 - Señales CW + CCW (Avance y Retroceso). Ambas señales determinan la posición por el número de pulsos introducidos. El sentido de giro vendrá determinado por el uso de una u otra señal. Para el avance del motor se usará la señal CW y para el retroceso CCW

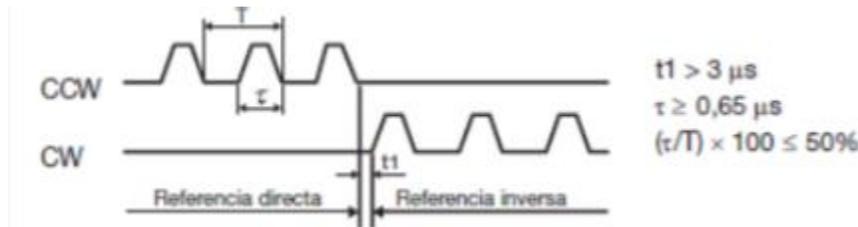


Fig. 50 Diagrama señales CW y CCW.

- Señales Pulse + Sign (Pulso y dirección). La primera señal determina la posición por el nº de pulsos introducidos, mientras que la segunda determina el sentido de giro del servomotor (avance o retroceso).

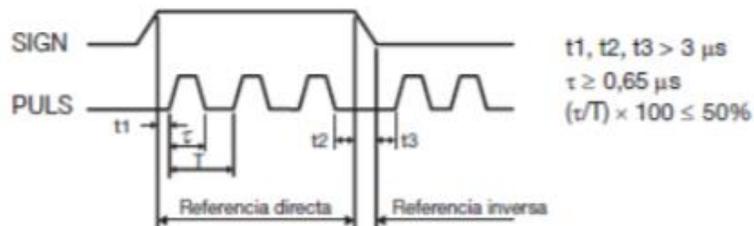


Fig. 51 Diagrama señales sign y puls.

- Señales de fases A y B. Ambas señales de pulsos mantienen un desfase constante de 90°. El sentido de giro lo determina el desfase de las señales. El sentido será el de avance si la fase B adelanta a la A, y de retroceso si la fase A adelanta a la B.

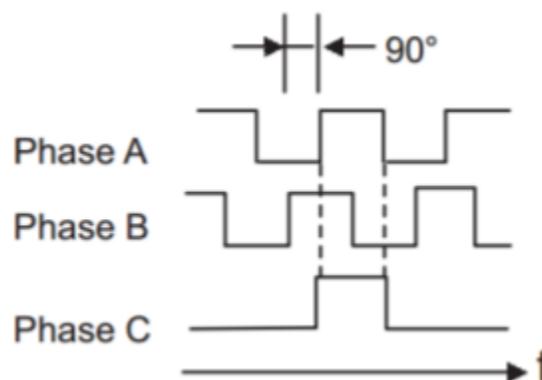


Fig. 52 Diagrama señales de fase.

Closed-loop Stepper Drive



Fig. 53 Closed-loop stepper driver de STEPPERONLONE

En esencia es un drive para un stepper de lazo cerrado, básicamente lo mismo que uno de un stepper normal, pero se le agregan entradas para recibir el feedback del encoder y controlar la posición del stepper, evitando pérdidas de pasos o saltos de pasos, similar a lo que pasa con un servo.

Controlador de Movimiento o Breakout Board (CNC Cook Book, 2020)

La breakout board CNC se utiliza para interactuar entre el PC y los diversos controles de motor, relés y otros dispositivos que desea controlar en una máquina CNC. Hay varios tipos diferentes de placas de conexión CNC y dispositivos relacionados que se utilizan para ofrecer esta capacidad de I/O, incluidas las placas de conexión CNC paralelas, las placas de conexión USB, los emuladores de teclado y las placas de control de movimiento. En pocas palabras, la placa de conexión CNC tiene dos funciones:

1. Traducir las señales utilizadas para hacer funcionar una máquina CNC hacia y desde las señales que espera una PC.
2. Aislar la placa madre del PC de los problemas eléctricos que, de otro modo, la estropearían.

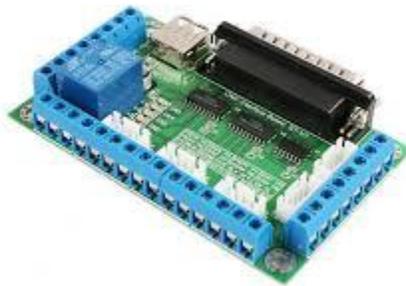


Fig. 54 Ejemplo de breakout board de 5 ejes.

Ambas son funciones muy importantes. Además, muchos se refieren a los controladores de movimiento USB, como el Smoothstepper, como “placas de conexión USB”. La función de un control de movimiento es aliviar el software de control de su PC de tener que hacer todo el trabajo y mover algunas de las partes más críticas de ese trabajo a un dispositivo de hardware dedicado. Dado que el controlador de movimiento no tiene distracciones (a diferencia de una PC) y puede concentrarse totalmente en el control de movimiento, esto permite un rendimiento mucho mayor.

Breakout Boards CNC Paralelas

Las breakout boards CNC paralelas se conectan al puerto paralelo de un PC y convierten esas señales que llegan a un empalme que luego puede usar en el cableado de punto a punto para conectar el resto de su sistema. Este es el tipo de placa de conexión más comúnmente utilizada. Son simples y relativamente económicos. Actualmente los puertos paralelos no son tan utilizados ya que ahora existen breakout boards usb y los computadores generalmente no cuentan con un puerto paralelo lo que implica la utilización de un adaptador o de una tarjeta externa que permita la conexión del puerto paralelo

Breakout Boards USB

Las breakout boards USB vienen en dos variedades. Primero están los controladores de movimiento a gran escala. En segundo lugar, están las placas que se utilizan para aumentar la capacidad de I/O más allá de lo que proporciona el puerto paralelo. Si bien hay placas que

pretenden simular un puerto paralelo con una conexión USB, no funcionan para aplicaciones CNC. La razón es que no tienen un rendimiento lo suficientemente alto como para mantener las relaciones de tiempo exactas necesarias para producir un tren de pulsos limpio para controlar múltiples servos o steppers. Desafortunadamente, aunque el USB es el reemplazo preferido del puerto paralelo, y tiene muchas ventajas, no está claro que aplicaciones como el CNC se hayan considerado para los puertos serie o paralelo cuando se diseñaron por primera vez. De hecho, se necesita una codificación muy inteligente para que software como Mach3 funcione en un puerto paralelo, y cada nueva versión de Windows parece hacerlo un poco más difícil.

Emuladores de Teclado

Los emuladores de teclado son otro enfoque para extender la I/O básica proporcionada por una breakout board de conexión en paralelo. Lo hacen convirtiendo las señales de entrada de ON/OFF en secuencias de teclas simuladas. Por ejemplo, puede conectar un interruptor con la etiqueta "Flood Coolant On" a una entrada en un emulador de teclado y cuando el switch se cierra, enviaría una secuencia de teclas a Mach 3 que podría interpretarse para encender el refrigerante. Los emuladores de teclado son fáciles de conectar: generalmente aceptan el enchufe de su teclado y usa un cable de extensión de teclado para ir del emulador a la toma de entrada de teclado normal de la PC.

Softwares y Lenguajes de Programación de Control Numérico Computarizado

Software CNC

El software CNC crea códigos de programa e instrucciones que controlan los movimientos físicos de las herramientas y la maquinaria de la fábrica.

El software CNC se puede utilizar para controlar una variedad de maquinaria, incluidas amoladoras, tornos, fresas y enrutadores y, al hacerlo, elimina las limitaciones del mecanizado manual tradicional, en términos de precisión, tasa de producción y velocidad. De hecho, el software CNC facilita la producción de piezas complejas, en metal y plástico, que serían casi imposibles de crear manualmente.

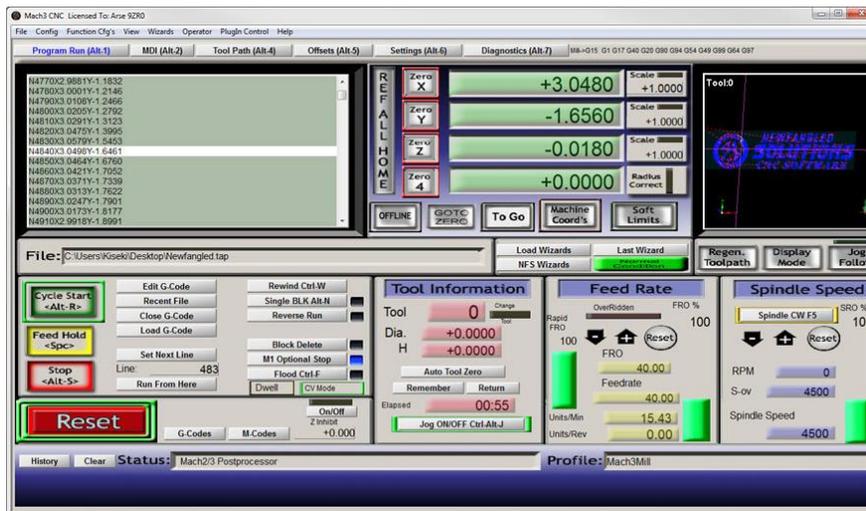


Fig. 55 Pantalla de software CNC (Mach3)

Funcionamiento de un software CNC:

El software de diseño asistido por computadora (CAD) crea un dibujo 2D o un modelo sólido 3D de la pieza que se va a crear, que se importa al software de fabricación asistida por computadora (CAM). El software CAM, a su vez, genera trayectorias de herramientas, en otras palabras, una serie de coordenadas cartesianas a través de las cuales viajará la punta de la herramienta de corte y las convierte en una serie de instrucciones simples en lenguaje de programación. El lenguaje de programación estándar es el código G o el código ISO, y es este código el que permite un control preciso del equipo de fabricación. El software CNC interpreta el código G y activa una serie de instrucciones secuenciales numeradas para mecanizar la pieza deseada, que sigue la máquina CNC.



Fig. 56 Pantalla de software CAD/CAM(BobCAD)

Principios de Programación CNC (CNC Cook Book, 2020)

Un programa de CNC es un archivo de texto que contiene código G.

El código G es el lenguaje de programación que se usa para controlar máquinas CNC, es el tipo de programación CNC que usan los programadores, el otro tipo es la programación CAM. Los softwares CAM generan código G desde un dibujo CAD, pero el resultado sigue siendo código G.

Para hacer una pieza con una maquina CNC, le dices como hacer esa parte usando un programa de código G.

```
N148 G1 Y1.12  
N150 G3 X2.245 Y1.37 R.25  
N152 G1 X.755  
N154 G3 X.505 Y1.12 R.25  
N156 G1 Y.63  
N158 G3 X.755 Y.38 R.25  
N160 G1 X2.245  
N162 G3 X2.495 Y.63 R.25  
N164 G1 Y.875  
N166 G2 X2.745 Y1.125 R.25  
N168 G1 X2.865  
N170 Z.1 F6.42  
N172 G0 X0. Y.125  
N174 G1 Z-.0625
```

Fig. 57 Ejemplo de líneas de código G.

Hay distintos estándares y dialectos de código G, no cambian mucho de entre controladores, pero hay que tener claro cuál es el dialecto específico de cada uno, por ejemplo, si se usa Mach3 o Fanuc.

Los dialectos de código G se diferencian en varias formas. La mayoría de los fabricantes han añadido pequeñas cosas para hacer su propio dialecto por razones competitivas y de marketing, pero en general estas son las categorías de diferencias que vemos entre los dialectos:

- No todos los controladores son compatibles con todos los códigos G, por ejemplo, un torno no soporta algunas tareas que un CNC de 5 ejes.
- A veces la misma función será compatible con distintos números de código en distintos controladores.
- Muchos códigos G necesitan información adicional para hacer su trabajo, así que usan distintas palabras o letras para recolectar información. Exactamente qué palabras recolectan qué información puede variar de un controlador a otro.
- El formato. Algunos controladores permiten G0 o G00, algunos insisten en G00, algunos permiten números con decimales y otro exigen los decimales. “1”, “1.” y “1.0” son todas variaciones que pueden ser aceptadas, rechazadas o requeridas cuando se especifica el número 1.

Cada maquina tiene su orientación específica propia de ejes, y se necesita estar familiarizado con ellos.

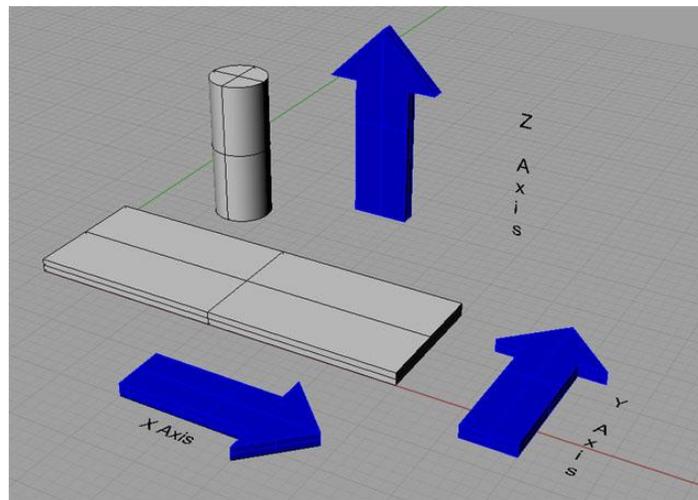


Fig. 58 Ejemplo de 3 ejes.

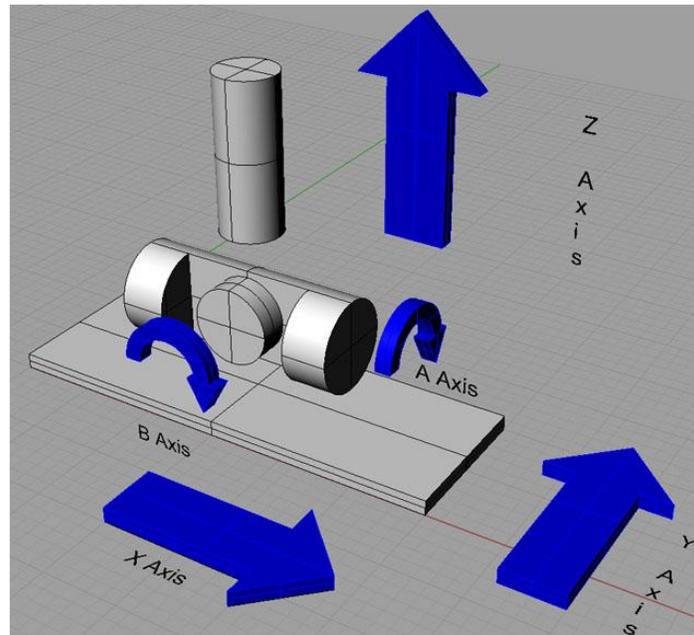


Fig. 59 Ejemplo 5 ejes.

Para expresar las coordenadas en código G debes tomar la letra correspondiente al eje y agregar el valor, los espacios entre la letra y su valor son opcionales. Por ejemplo, una posición a 1 cm de 0 en X, 2 cm en Y y 3 en Z se escribe: X1Y2Z3, X1 Y2 Z3 o X 1 Y 2 Z 3.

El ejemplo dado está en centímetros, pero se puede utilizar sistema métrico o imperial. Para los ejes rotacionales, que solo se usan en máquinas de 4 o 5 ejes, se usan ángulos, típicamente en grados, es posible que para rotar el cuarto eje en 90° se escriba como A90, por ejemplo.

Las coordenadas pueden ser absolutas o incrementales, las coordenadas absolutas se dan respecto del sistema de referencia de la máquina y las incrementales se dan mediante valores relativos respecto del último punto a programar, a veces puede ser más conveniente usar incrementales y no absolutas.

En la actualidad los centros de mecanizado de madera tienen un software para generar el código G que hace posible el mecanizado de las piezas, cada una de las marcas tiene su propio software, pero están sujetos a un formato diseño estándar, este formato es el BTL.

BTL (design2machine, 2021)

Los formatos BTL y BTLx *entregan una descripción paramétrica de la geometría de los componentes de una construcción de madera y sus mecanizados como también información para prefabricación y ensamblado*. El formato BTL surge de una cooperación de diseñadores de máquinas y desarrolladores de software para máquinas CNC para construcciones de madera, techos y construcciones de casas de madera.

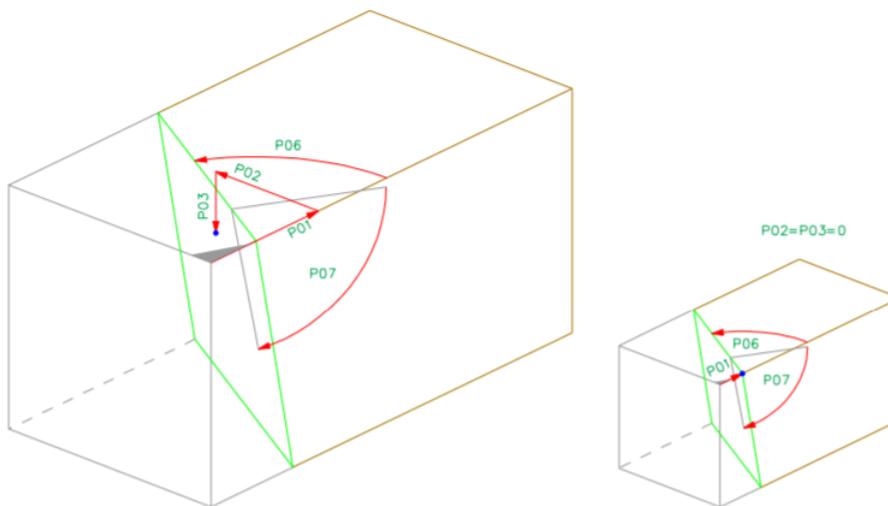
Desde el año 1992, la interfaz fue utilizada por varios diseñadores de máquinas y desarrolladores de software. En los años siguientes, los pasos necesarios de desarrollo fueron realizados de forma independiente por SEMA y CADWORK, dos de las empresas líderes en el desarrollo de software de diseño para carpinteros e industrias de la madera. Por lo tanto, en 2006, había dos dialectos diferentes. BTL V9.x fue utilizado por SEMA y BTL V5 fue utilizado por CADWORK.

En 2006, CADWORK, SEMA y LIGNOCAM comenzaron una cooperación para crear un formato estándar de la industria para la transferencia de datos entre el software de diseño y máquinas CNC. Al principio, ambas empresas unificaron los dos dialectos del formato BTL. El resultado fue la interfaz común BTL V10. El estándar BTL V10 demostró ser un gran éxito y fue adoptado por muchas empresas en el sector de software de diseño y máquinas CNC en todo el mundo.

Desde entonces, la cooperación entre CADWORK, SEMA y LIGNOCAM continuó con éxito y se lanzaron varias actualizaciones de BTL. En esas actualizaciones, el estándar BTL se mejoró considerablemente y se agregaron nuevas funciones para adaptarse a las demandas actuales de los diseñadores de máquinas y desarrolladores de software. Con el BTL V10.4, se realizaron importantes ampliaciones del estándar para adaptarse a las necesidades de la industria de las casas prefabricadas.

En 2015, CADWORK, SEMA y LIGNOCAM lanzaron la primera versión del esperado formato BTLx. BTLx es una modernización basada en xml del formato BTL que incorpora varias mejoras mayores y menores en comparación con el estándar anterior y sienta las bases para desarrollos futuros.

Cut 1-010-X and 2-010-X
 2-010-X



Parameter	Min/Max	Presetting	Description
P01	+/- 99999	0	Distance from beam start to the reference point
P02	0/50000	0	Distance from the reference edge to the reference point
P03	0/50000	0	Distance from the reference side to the reference point (orthogonal)
P06	0.1 / 179.9	90	Angle between cut edge and reference edge
P07	0.1 / 179.9	90	Inclination between face and reference side

Fig. 60 Descripción de parámetros Cut 2-010-X en BTL.

```

LENGTH:          00024638
HEIGHT:           00001800
WIDTH:            00000800
PLANINGLENGTH:    00014610
STARTOFFSET:     00000200
ENDOFFSET:       00000200
UID:              200
TRANSFORMATION:  OX:00011577  OY:00-46867  OZ:00000550  XX:00000000  XY:00008192  XZ:00005736  YX:00000000  YY:000-5736  YZ:00008192
PROCESSINGQUALITY:  AUTOMATIC
PROCESSKEY:       1-010-2      Cut
PROCESSPARAMETERS: P01:00024638 P02:00000000 P03:00000000 P06:00000550 P07:00000450
PROCESSIDENT:    1
    
```

Fig. 61 Fragmento de archivo BTL donde se ven los parámetros de corte.

En la imagen de la Fig.61 se puede ver una parte del archivo BTL que describe un corte “Cut”, al principio se describen las dimensiones de la pieza (LENGTH, HEIGHT y WIDTH) y luego abajo se ven los parámetros del corte (P01, P02, P03, P06 y P07) que describen como debe quedar la pieza luego del corte.

2- Definición de máquina, especificación de Hardware y Software

Tamaño y Grados de Libertad Necesarios para la Máquina.

Desde la empresa BETECH, para el proyecto “Centro de Trabajo de Madera”, en el cual se construye un prototipo de una máquina de control numérico para mecanizado de madera, se nos solicita, como Ingenieros de Control y Automatización, se haga un estudio técnico-económico y se proponga una solución para los siguientes requerimientos:

Se requiere una máquina de control numérico que procese madera y sea capaz de realizar los siguientes procesos de forma preliminar:

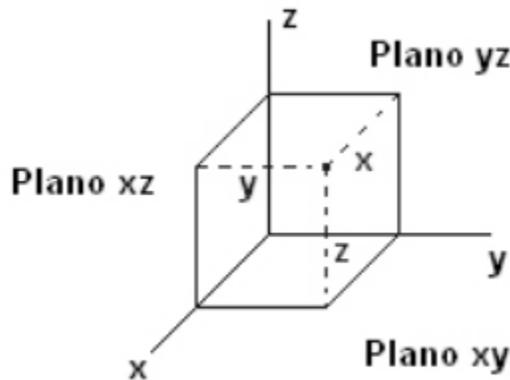
- a) Corte con sierra circular.
- b) Vaciado con fresa
- c) Proceso de perforación con taladro o similar

Esta máquina procesará tablas de pino radiata de una densidad de 413[kg/m³] (Muñoz & Gonzales, 2007) con volumen máximo de 150*100*4000[mm] y una masa máxima de 25[kg] aprox.

Para lograr esto se propone una máquina de 5 grados de libertad, los movimientos a realizar son:

- 1) Dy = Desplazamiento horizontal del eje “y” (Avance longitudinal de tablas).
- 2) Dx = Desplazamiento horizontal del eje “x”
- 3) Dz = Desplazamiento vertical del eje “z”
- 4) Rz = Rotación en el eje “z”
- 5) Rx = Rotación en el eje “x”

De esta forma la máquina puede hacer los movimientos necesarios para los procesos requeridos, los 3 de libertad en los ejes X, Y y Z le permiten movimiento en 3 dimensiones y los grados de libertad rotacionales en X y Z le permiten cambiar la orientación de la herramienta, porque para lograr los cortes con sierra y vaciados con fresa necesita la capacidad de acceder a la pieza por sus distintos lados en distintos planos.



Características necesarias para los motores en cada eje

Hardware para accionamiento de la Máquina

Motores

Primero se eligieron los motores, estos deben tener la capacidad necesaria para soportar la carga y deben girar a los rpm suficientes para mover la carga. En la siguiente tabla se muestran los requerimientos por cada grado de libertad, que desde el departamento de mecánica de Botech fueron calculados y entregados a nosotros para proceder a elegir los motores.

Item	Mov.	Torque eje [Nm]	Torque motor [Nm]	Rel. Trans.	Vel. [mm/min]	RPM eje	RPM motor	Masa [kg]	Factor seg.
1	Dy	40	15	[8/3]	3500	5,73	15	25	1,5
2	Dx	24,8	24,8	N.A	4000	800	800	150	1,2
3	Dz	19,85	19,85	N.A	4000	800	800	120	1,2
4	Rz	57	19	[3/1]	4000	12	36	125	[-]
5	Rx	51	17	[3/1]	4000	10	10	70	[-]

Tabla 4 Elección de servomotores según sus torques

Los requerimientos son bastante elevados y un motor paso a paso no es capaz de mantener el torque a revoluciones por minuto elevadas, por lo tanto, se opta por usar servomotores, uno de 15 [Nm] para el movimiento en el eje Y, motores de 25 [Nm] para el resto de los movimientos. Las revoluciones por minuto elevadas son necesarias para los movimientos

con husillo de bolas, que es un actuador lineal mecánico que convierte el movimiento de rotación en movimiento lineal con bajas pérdidas por fricción.

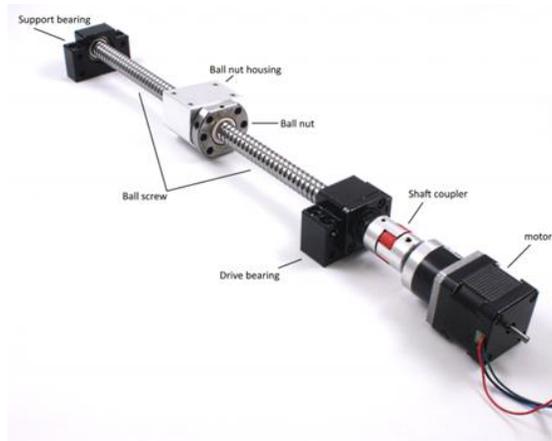


Fig. 62 Husillo de bola.

Al momento de seleccionar un motor, de paso o servo, se deben tomar en cuenta sus características principales, torque nominal, torque máximo, rpm y potencia, tienen más características, pero esas son las que tomaremos en cuenta. Se buscan opciones entre motores paso a paso y servomotores.

Un motor paso a paso pierde su capacidad de torque muy rápido a medida que aumenta sus rpm, en cambio un servo mantiene su capacidad de torque aun cuando está girando a altos rpm, en la Fig. 62 se ve un gráfico de torque vs rpm que compara las capacidades de los dos tipos de motores en un caso de bajo torque. T_c es el torque nominal del motor y para el caso del servo T_{pk} es el toque máximo, el cual es aproximadamente 3 veces el torque nominal.

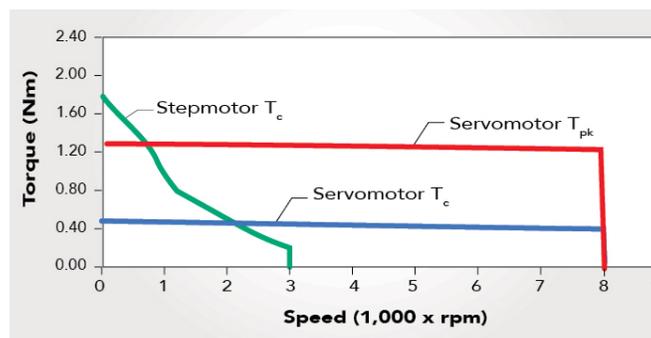


Fig. 63 Gráfico Torque (Nm) vs. Velocidad (rpm). (WTWH Media LLC and its licensors, 2021)

El gráfico anterior muestra una comparación entre un motor stepper y un servo de bajo torque, pero esta situación se repite para torques elevados, la línea verde representa al motor stepper, la azul al torque nominal del servomotor y la roja el torque máximo del mismo servomotor, que es aproximadamente 3 veces el torque nominal, este torque máximo lo puede soportar por pequeños lapsos de tiempo.

Por estas razones se decide utilizar servomotores y no stepper, ya que estos motores deben mover cargas a velocidades considerables sin perder su capacidad de torque. Los motores, además de ser servomotores y funcionar con un encoder, deben contar con un freno magnético para que al detenerse pueda mantener su posición y no se mueva por el peso de la carga.

Se cotizan alternativas en Chile y en el extranjero, los proveedores de China resultaron tener los mejores precios.



Fig. 64 Ejemplo de servomotor similar a los requeridos.

Controlador.

Se elije un controlador CNC con capacidad para al menos 5 motores, se encontraron varias opciones, entre las cuales se destacan los siguientes:

UC300:

- 3 a 6 ejes (X, Y, Z, A, B, C).
- Comunicación USB o Ethernet con software MACH 3.
- Funciona con 24VDC.
- 12 entradas digitales y 10 salidas.
- Puerto análogo para VDF.
- Señal tipo Pulse & Direction.
- Puerto para MPG.

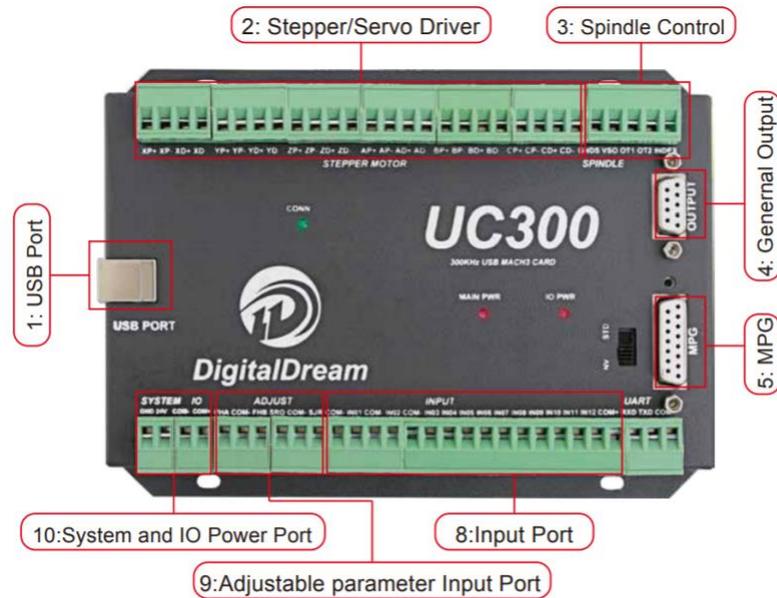


Fig. 65 Controlador CNC UC300

WiXHC USB Motion Card:

- Hasta 6 ejes (X, Y, Z, A, B, C).
- Comunicación USB o Ethernet con software MACH 3.
- Funciona con 24VDC.
- 16 entradas y 8 salidas.
- Puerto análogo para VDF.
- Señal tipo Pulse & Direction



Fig. 66 Controlador CNC Wi-XHC MKX-IV

MASSO G3:

- Hasta 5 ejes (X, Y, Z, A, B).
- Tiene su propio software CNC integrado.
- Traspaso de datos via WiFi.
- Funciona con 24VDC.
- 24 entradas y 18 salidas.
- Puerto análogo para VDF.
- Señal tipo Pulse & Direction.
- Pantalla opcional.



Fig. 67 Controlador CNC MASSO G3

HCNC-818D:

- Hasta 5 ejes simultáneos en el mismo canal, 9 en total (X, Y, Z, U, V, W, A, B, C).
- Software CNC integrado.
- Traspaso de datos vía WiFi.
- Max. 2048 entradas y salidas.
- Puerto para VDF, hasta 4 simultáneos.
- Varios tipos de señal.
- Pantalla y botonera integradas.



Fig. 68 Controlador CNC HCNC-818D

Definición del controlador

Finalmente, dentro de los controladores que se investigaron y cotizaron, se decide que para este proyecto es más adecuado elegir el MASSO G3, este controlador cumple con las características adecuadas, soporta hasta 5 ejes, cuenta con WiFi, no necesita un computador externo si no que tiene su propio procesador y además es de calidad industrial, lo que es lo más importante para soportar las horas de trabajo pesado. Además de lo mencionado, el precio del **MASSO G3** es razonable e incluso de bajo costo en comparación con el controlador CNC HCNC-818D.

Sensores y Accesorios

Para efectos de control de movimiento de los motores se utilizarán sensores para delimitar el movimiento de estos, esto es con fines de protección y seguridad de la máquina en sí para que los motores no sigan girando cuando no deben sin dañar la estructura.

Limit Switch o Interruptor de Fin de Carrera



Fig. 69 Ejemplo Interruptor de fin de carrera o limit switch ME-8107 (automationcontrols, 2020)

Son sensores de contacto que muestran una señal eléctrica, ante la presencia de un movimiento mecánico. Son utilizados ampliamente en ambientes industriales para censar la presencia de objetos en una posición específica. Se utilizan en diversas aplicaciones. Pueden determinar la presencia, ausencia, paso y posicionamiento de un objeto. En un comienzo se los utilizaba para definir el final del recorrido de un objeto, de ahí que se llamen "*interruptores de final de carrera*". Internamente pueden contener interruptores normalmente abiertos (NA o NO en inglés), cerrados (NC) o conmutadores dependiendo de

la operación que cumplan al ser accionados. Existen los de lengüeta, bisagra, palanca con rodillo, varilla, palanca metálica con muelle, de pulsador, etc. (ceiisa, 2015)

Para evitar daños y errores durante el funcionamiento del centro de trabajo de madera, se utilizan interruptores de fin de carrera por cada uno de los grados de libertad para evitar que pasen más allá de lo permitido por la estructura, estos sensores van conectados directamente al controlador y se programa su funcionamiento desde el software integrado del controlador MASSO G3. Cuando se activa el interruptor o switch este envía una señal al controlador y el controlador detiene al motor correspondiente. Estos sensores también se pueden utilizar para hacer el homing, homing es una rutina de posicionamiento en donde la herramienta se mueve a la posición inicial o home de la máquina de control numérico.

También se pueden utilizar sensores de proximidad para cumplir la misma función de un interruptor de fin de carrera.

Software para Control de la Máquina

Existen softwares capaces de tomar un diseño hecho en un software CAD y generar un código G para el control de una maquina CNC, hay algunos como el SolidWorks, FreeCAD o Fusion360 que son softwares CAD/CAM que hacen esta transformación, hacen algunas preguntas o piden algunos parámetros y datos previos, como los grados de libertad de la máquina, las dimensiones de la herramienta, el tipo de material a mecanizar, entre otras, luego con estos datos genera las rutas de corte para crear la pieza. Esto en general funciona para maquinas CNC estandarizadas como un router y para cierto tipo de mecanizados como fresado o torneado.

Para otras máquinas CNC no estandarizadas se necesitan softwares especializados o personalizados para esas máquinas en específico. En el caso de los centros de trabajo de madera como los mencionados anteriormente, cada marca tiene su propio software, por ejemplo, en el caso de la HOMAG se utiliza un software llamado WoodWOP que sirve para generar las rutas de corte y mecanizados, en el caso de HUNDEGGER está el software CAMBIUM, las maquinas BEISSE y HOLZ-HER utilizan también sus propios softwares para hacer los mecanizados. La mayoría de estos softwares y máquinas utilizan el formato BTL o similares.

La definición de software se realizará más adelante.

3- Diseño del Sistema

Diseño de Máquina

El diseño de la máquina que se ilustra en la Fig. 69 se compone de 5 servomotores, 3 servomotores son para los grados de libertad lineales x, y, z. Los dos restantes son para grados de libertad rotacionales con el fin de lograr posicionar el elemento de corte. El motor que contiene el elemento de corte es un motor AC que eventualmente estaría controlado por un variador de frecuencia.

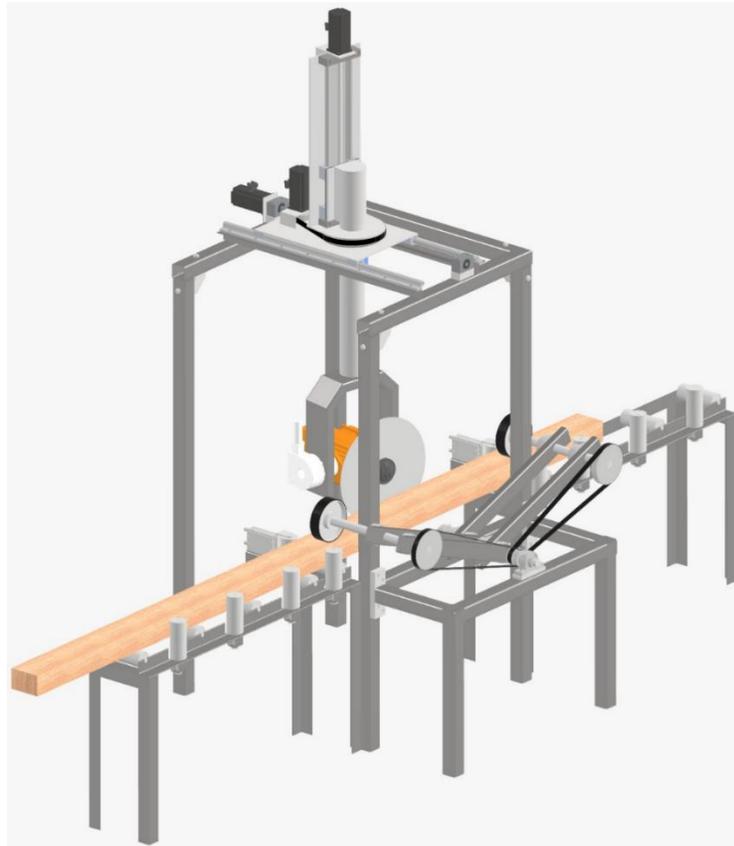


Fig. 70 Imagen de referencia del diseño para el CT de Madera. (Vial, 2021)

Funcionamiento del CT de Madera

Servo Motores

Los servomotores son los encargados de mover mecánicamente los grados de libertad de la máquina, reciben las señales de pulso desde el drive y su eje gira de acuerdo con esto, los giros pueden ser en sentido horario o antihorario y cuentan con un freno magnético que los mantiene en su posición cuando no están en movimiento. Los servomotores tienen un encoder integrado que retroalimenta los giros al drive. De estos 5 motores, 3 van acoplados a actuadores lineales y 2 van acoplados directamente en los grados de libertad rotacionales.

Drive

El drive, o los drives, reciben las señales de pulso enviadas desde el controlador, las amplifican y luego las envían al motor correspondiente para que este se mueva de acuerdo con lo especificado en el código interpretado por el controlador. Recibe también, desde el motor, señales del encoder del motor, esto le da retroalimentación al drive de los giros del motor para verificar que este giró de acuerdo con la señal de pulsos enviada, si no es así el drive corrige la posición del motor.

Controlador Masso G3

El operador carga un archivo “.txt” directamente al controlador usando un pendrive o vía Wifi, el software del controlador interpreta el código contenido en este archivo y hace que el controlador envíe las señales de pulso para el movimiento a cada uno de los drives, que en este caso son 5, se le puede agregar también un variador de frecuencia para el motor de la herramienta de corte. En el controlador también van conectados sensores de fin de carrera, 1 o 2 por cada eje, cuando recibe una señal de un sensor de final de carrera se detiene el motor correspondiente al mismo grado de libertad en donde está ubicado del sensor, esto para no forzar ni dañar la máquina. El controlador requiere de un monitor, un teclado y un mouse para funcionar.

Sensores de fin de carrera

Ven conectados directamente al controlador y sirven para detener el movimiento de los motores cuando estos van a salirse de los límites permitidos por la máquina y su estructura, de esta forma se evitan errores y daños. También sirven para demarcar la posición inicial de la máquina.

Conexión del controlador

Controlador MASSO G3 (MASSO, 2022)

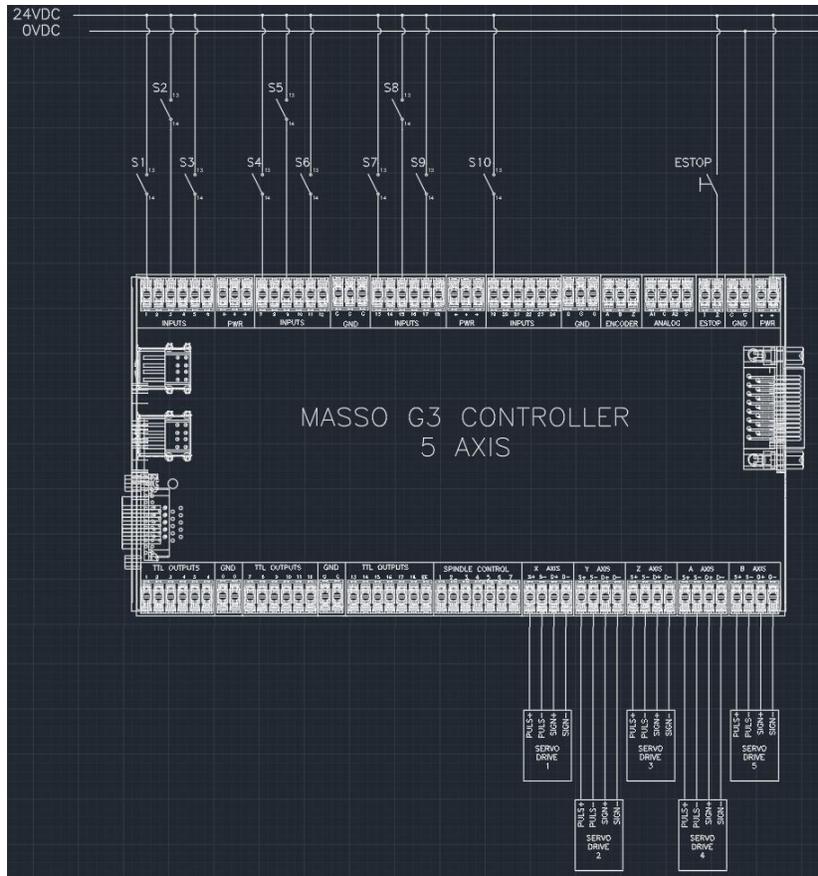


Fig. 71 Imagen de referencia MASSO G3.

Un controlador CNC de fresado/enrutador simple e independiente con hardware y software completamente integrados, especialmente diseñado para ejecutar máquinas CNC independientemente de una PC. No necesita instalar controladores o tarjetas de movimiento, es necesario enlazar el controlador a el servodrive de motor e ingrese los valores de calibración para comenzar a mecanizar.

MASSO G3 viene con hardware y software Wi-Fi que permite transferir archivos “gcodes” a la máquina y monitorear el estado de la máquina/trabajo de forma inalámbrica usando una red Wi-Fi.

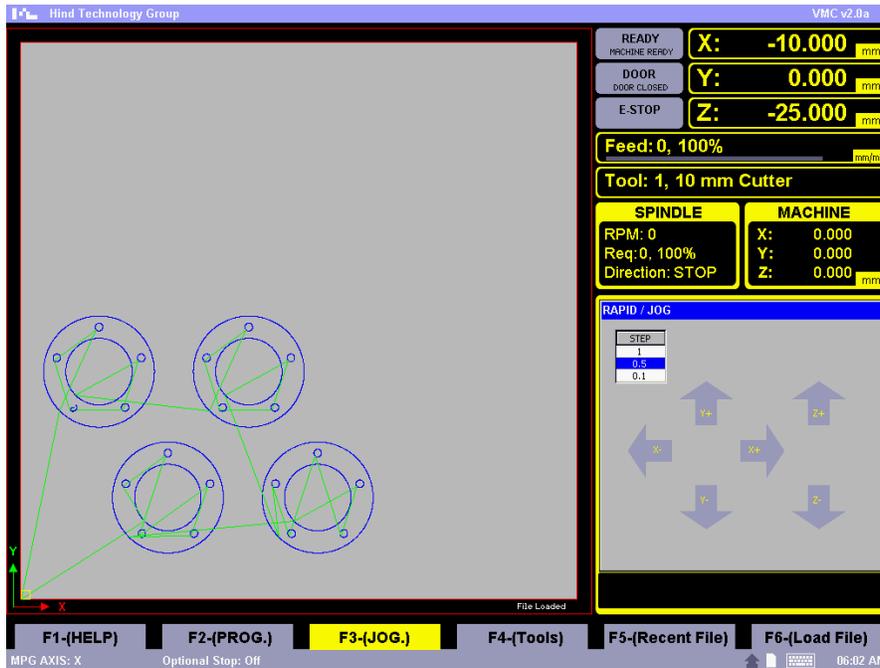


Fig. 72 Imagen de referencia de pantalla de controlador.

Características del controlador CNC de fresado/enrutador:

- 4 veces más rápido que los controladores de Generación 2.
- 4 puertos USB V2 para conectar directamente el teclado, el mouse, la pantalla táctil y la memoria USB sin necesidad de un concentrador USB.
- 24 entradas aisladas
- 18 salidas
- 2 entradas analógicas (12 bits)
- Señales de paso y dirección para motores paso a paso o servo
- Control directo del husillo con 0-10 voltios, CW, CCW y PWM
- Compatibilidad con dial de volante MPG

Para más información se puede consultar la documentación de MASSO directamente desde la página <https://docs.massoc.com.au>.

Limit Switch ME SERIES

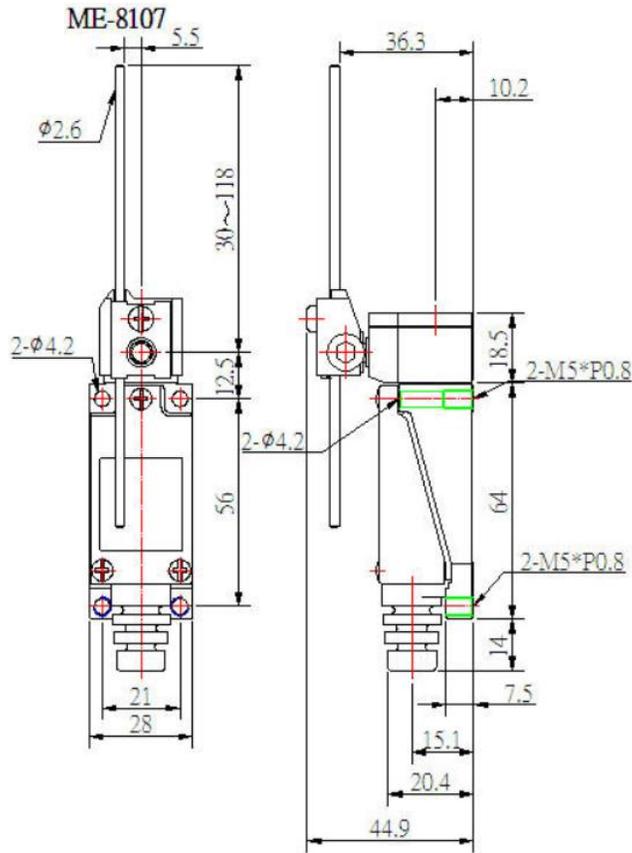


Fig. 73 Sensor fin de carrera ME series. (Moujen, 2021)

K1 Series AC Servo Driver

AC 220V (kW)	0.4	0.75	1.5	2.2	3	5
Output current (A)	2.8	5.5	10	12	16	25
AC 380V (kW)	1.8	3	3.8	5.5	7.5	-
Output current (A)	5	8	12	16	20	-
Control mode	Position control, JOG running, speed contact, etc.					
Encoder feedback	2500-line incremental standard and 17 bit incremental encoders					
Use conditions	Ambient/storage temperature	Ambient temperature: 0~+50°C; storage temperature: -20~+85°C				
	Ambient/storage humidity	Under 90%RH (no freezing or condensation)				
	Vibration/impact resistance strength	4.9m/s ² /19.6m/s ²				
Analog speed reference input	Reference voltage	DC±10V				
	Input impedance	Appx. 20KΩ				
Analog torque reference	Reference voltage	DC±10V				
	Input impedance	Appx. 20KΩ				

Fig. 74 Tabla encontrada en la pág. 4. ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)

input		8 points
IO input signal	Point	8 points
	Function (distributable)	Servo ON (/S-ON), P action (/P-CON), positive-side over travel prohibited (/P-OT), negative-side over travel prohibited (/N-OT), alarm reset (/ALM-RST), positive-side torque limit (/P-CL), negative-side torque limit (/N-CL), position deviation clear (/CLR), internal set speed switch, etc. Distribution of above signals and change of positive/negative logics are available
IO output Signal	Point	6 points
	Function (distributable)	Servo alarm (ALM), position complete (/COIN), velocity compliance detection (/V-CMP), servo motor rotation detection (/TGON), servo ready (/S-RDY), torque limit detection (/CLT), breaker (/BK), encoder zero point output (PGC) Distribution of above signals and change of positive/negative logics are available
Encoder divided frequency output		A-phase, B-phase and C-phase: linear drive output; divided pulse count: can be set freely
RS-485 communication	Communication protocol	MODBUS
	I:N communication	N = 127 stations at maximum
	Axial address setting	Set by parameters
CAN communication	Communication protocol	CANOpen (DS301 + DS402 guild regulations)
	I:N communication	N = 127 stations at maximum
	Axial address setting	Set by parameters
Display functions		CHARGE indicator, 7-segment digital tube 5 bit
Regeneration processing		Built-in or external regeneration resistor (optional)
Overtravel (OT) prevention function		Dynamic breaker (DB) stop, deceleration stop or free running stop during P-OT or N-OT input action
Protection functions		Overcurrent, overvoltage, undervoltage, overload, overspeed, regeneration failure, encoder feedback error, etc.
Monitoring functions		Rotation speed, current position, reference pulse accumulation, positional deviation, motor current, operating status, input and output terminal signal, etc.
Auxiliary functions		Gain adjustment, alarm record, JOG running, origin search, inertia detection, etc.
Intelligent function		Built-in gain auto tuning function
Applicable load inertia		Less than 5 times of the motor inertia
Position control	Feed-forward compensation	0~100% (set unit: 1%)
	Input pulse type	Sign + pulse sequence, CW+CCW pulse sequence, 90 ° phase difference two-phase pulse (A phase + B phase)
	Input pulse type	Linear drive and open connector supported
	Maximum input pulse frequency	Linear drive: Sign + pulse sequence, CW+CCW pulse sequence: 500Kpps 90 ° phase difference two-phase pulse (A phase + B phase): 500Kpps Open connector: Sign + pulse sequence, CW+CCW pulse sequence: 200Kpps 90 ° phase difference two-phase pulse (A phase + B phase): 200Kpps

Fig. 75 Tabla encontrada en la pág. 5. ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)

(2) Introduction of the main circuit terminal of K1series 380V driver

Terminal	Functions	Precautions for operation
U, V, W	Terminal of motor power line	Connected to servo motor
L1, L2, L3	Input terminal of main circuit power	Three phase 380VAC (-15%~+10%) (50/60Hz)
24V, 0V	Input terminal of control power	20~32VDC
B1, B2	Terminal of bleeder resistor	Resistor should be connected to B1 and B2 if external connection for bleeder resistor is required
PE	Earthing Terminal	Earthing measures should be carried out for connection of power earthing terminals and motor earthing terminals

Fig. 76 Tabla encontrada en la pág. 12 ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)

3.3.1 Position control mode

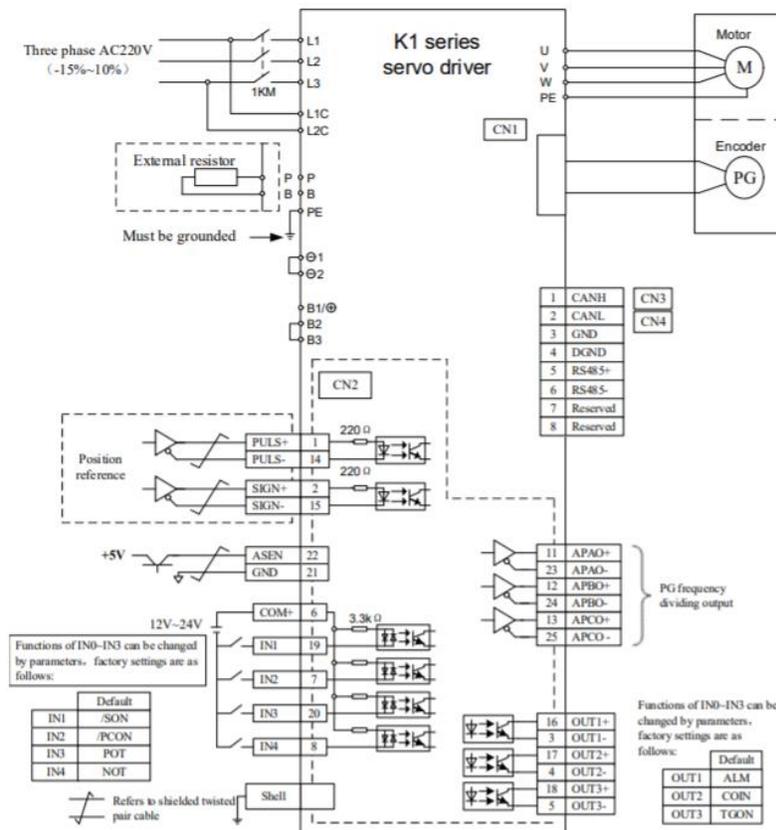


Fig. 77 Diagrama encontrada en la pág. 14 ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)

Motores

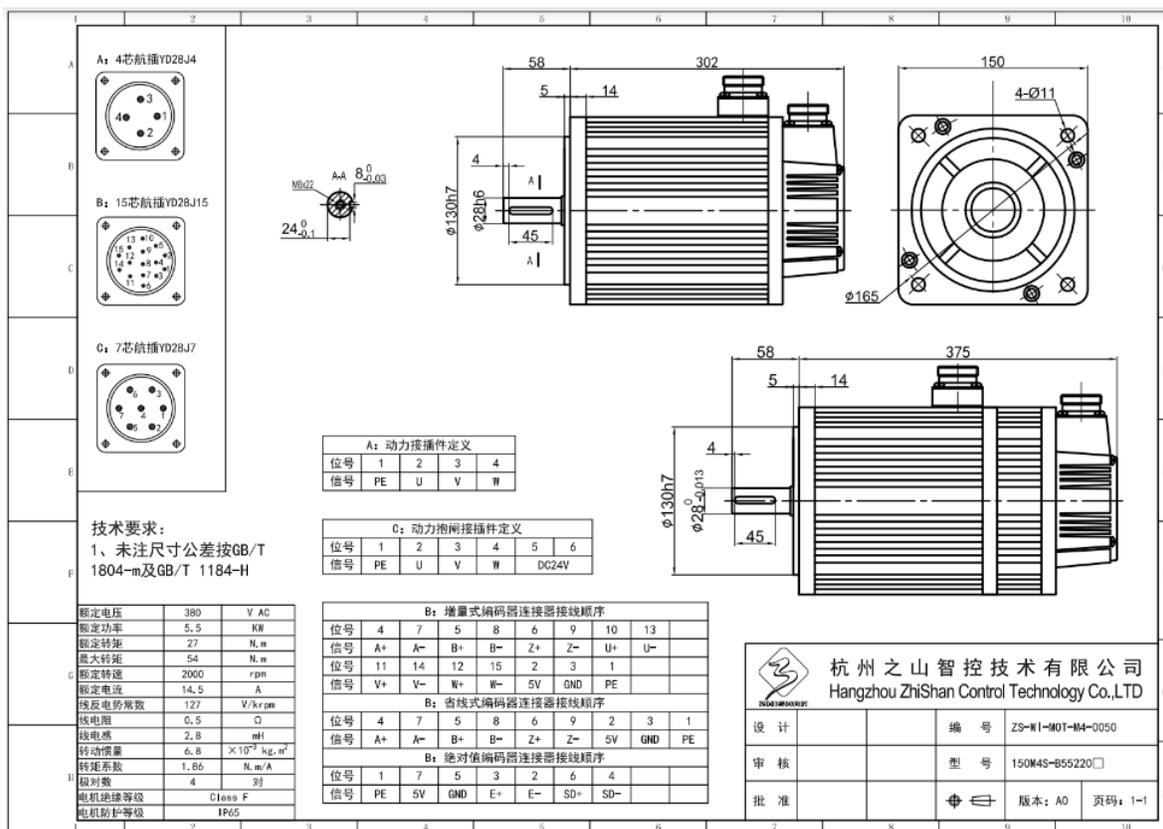


Fig. 78 Características de servomotores. (ADTECH, 2021)

4- Resumen Técnico y Económico

En este capítulo se presenta un presupuesto generado para la compra de los componentes necesarios para el sistema de control del Centro de Trabajo de Madera de acuerdo con los requerimientos presentados por BETECH. A modo de síntesis se presentará una sola tabla que incluye servomotores, servo drives, controlador, interruptores de fin de carrera, cables y otros elementos pertenecientes al tablero de control.

COMPRAS					\$7814.09
N°	Item	Descripción	Cantidad	Precio Unitario US\$	Total US\$
1	Servo System 1	Servomotor 15Nm + Servo Drive + Cables	1	\$ 796.00	\$ 796.00
2	Servo System 2	Servomotor 27Nm + Servo Drive + Cables	4	\$ 1206.00	\$ 4824.00
3	Sensor de fin de carrera	Limit Switch ME-8107	10	\$ 35.20	\$ 352.00
4	Controlador CNC	MASSO G3 Mill/Router 5 Axis	1	\$ 742.00	\$ 742.00
5	Monitor	Monitor VGA Multimarca	1	\$ 49.50	\$ 49.50
6	Teclado + Mouse	Kit Teclado + Mouse Logitech	1	\$ 37.00	\$ 37.00
7	Parada de emergencia	Parada Emergencia CHINT Tipo Hongo 40mm 1NC	1	\$ 7.22	\$ 7.22
8	Selector	Selector de 2 Posiciones	5	\$ 5.00	\$ 25.00
9	Fuente 24V	Fuente AC/DC 24Vac SPB-120-24 Autronics	1	\$ 100.70	\$ 100.70
10	Repartidor	Repartidor Tetrapolar 15 Posiciones Por Barra	1	\$ 15.00	\$ 15.00
11	Cableado	Cable Araflex RV-K 2.5mm	15	\$.74	\$ 11.10
12	Cableado	Cable Libre Hal. RZ1-K 4x4 mm2 0.6/1 KV	3	\$ 3.81	\$ 11.43
13	Cableado	Cable UTP 4 Pares Cat 6A Unifilar	5	\$ 1.44	\$ 7.20
14	Protecciones	Fusibles, Contactores Electromagnéticos, Interruptores y Otros	n.a.	-	\$ 500.00
15	Gabinete Tablero Eléctrico	Kit Armario Metálico C/Chasis 800 x 600 x 250 mm	1	\$ 325.68	\$ 325.68
16	Enchufe 3P	Macho Volante 3P+N+T 32A 380V IP67 Ekoline	1	\$ 10.26	\$ 10.26
17	Riel Din	Riel Din 1 m Simétrico Ekoline	3	\$ 2.68	\$ 8.04

Fig. 79 Elementos a Comprar

En la imagen anterior se puede ver una lista con los componentes necesarios para suplir los requerimientos de Betech para controlar los 5 servomotores, la lista incluye los motores con sus drive y cables, el controlador y los componentes necesarios para armar un tablero eléctrico que alimente los componentes anteriormente nombrados, todo esto suma alrededor de US\$ 8000, no se incluye la mano de obra de implementación. La cotización de los elementos se hizo con proveedores de distintos países y para simplificar la suma de precios, los precios que se ven en la Fig. 79 están todos expresados en dólares de Estados Unidos con el valor que tenía a la fecha 25-01-2022.

Betech hoy en día está en proceso de compra y se espera que a mediados del 2022 este los elementos comprados en su totalidad. En este proceso de compra, ya se compró un servomotor de 15[Nm] con su drive correspondiente, el controlador MASSO G3 y algunos

elementos para hacer un tablero de pruebas con el fin de validar su funcionamiento en conjunto y confirmar su uso en el proyecto para proceder a la compra del resto de elementos. A continuación, se muestran imágenes con las respectivas pruebas.



Fig. 80 Servomotor 15[Nm] con freno magnético.

En la Fig. 80 se muestra un servomotor de 15[Nm] con freno magnético que fue importado desde china y se utilizará en el eje Y del prototipo de centro de mecanizado de madera, este motor fue conectado su drive para hacer pruebas de funcionamiento.

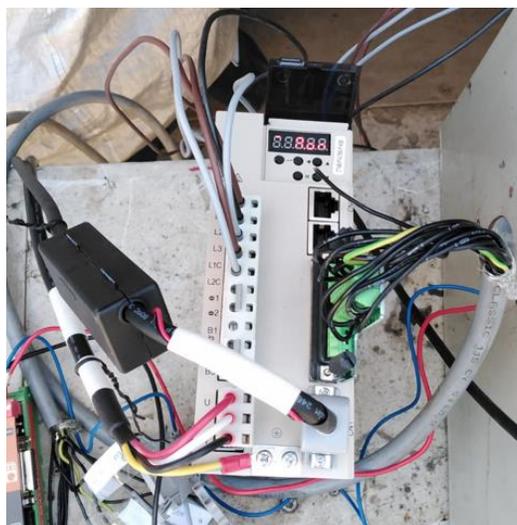


Fig. 81 Servodrive K1BS25AB.

En la figura 81 se puede ver un servodrive que en su pantalla muestra “- A.on”, lo que significa que está listo para funcionar y mover el motor de la figura 86, el drive también lleva conectado un conector DB25 que es por donde recibe las señales de control desde el controlador MASSO G3.



Fig. 82 Controlador MASSO G3.

Se muestra el controlador MASSO G3, en la figura 82, con el drive de la Fig. 81 conectado en la salida correspondiente al eje X y conectado también a una parada de emergencia.

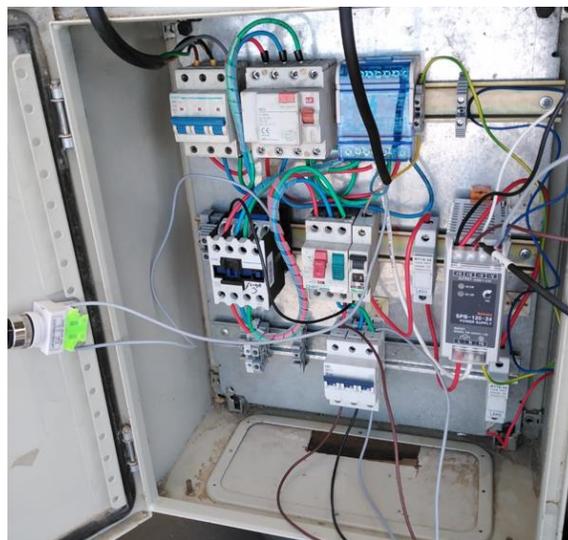


Fig. 83 Tablero de pruebas.

Se armó un tablero para pruebas, este se puede ver en la Fig. 83 y contiene 2 interruptores magnéticos trifásicos, 1 diferencial tetrapolar, barras repartidoras de 4 polos, 1 contactor electromagnético trifásico, 1 guarda motor, 1 interruptor monofásico, 2 portafusibles con fusible, 1 fuente AC/DC 24V y 1 selector de 2 posiciones. Las conexiones para el DB25 se hicieron de acuerdo con la página 50 del “K1 series AC Servo Driver User’s Manual” en donde se muestra lo que se ve en la figura 84.

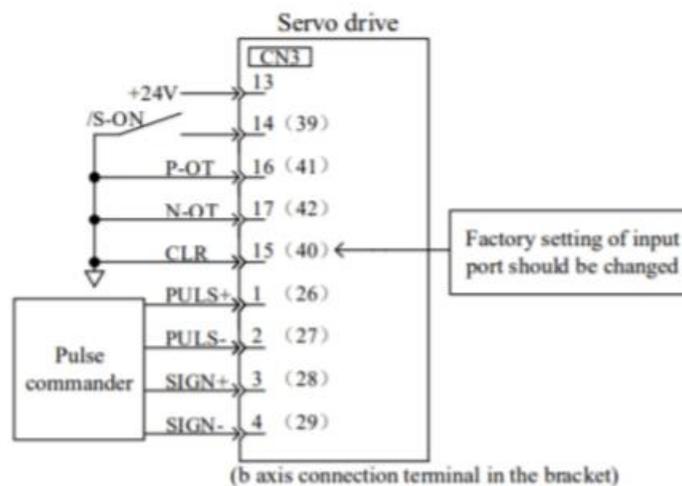


Fig. 84 Conexión de servodrive para control de posición. ("K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6", 2021)

Se ajustaron los parámetros del drive para el control de posición y se probó con un código G que moviera el motor, a lo que la respuesta fue exitosa y los resultados fueron los esperados ya que el motor hizo exactamente los movimientos que se le comandaron. De esta forma se validó el uso de estos elementos para el proyecto.

5- Conclusiones

- Se investigó la maquinaria utilizada para el mecanizado de madera, tanto la maquinaria manual convencional, como algunas similares a las que se encontraron en la Universidad del Bío-Bío, también se investigó sobre máquinas de control numérico, sus variantes y los centros de mecanizado de madera existentes en el mercado.
- Desde la empresa BETECH se propuso una máquina CNC para el mecanizado de vigas de madera, algo similar a la ROBOT Drive de HUNDEGGER, que es un centro de mecanizado de vigas, esta tuvo algunas modificaciones menores a medida que se avanzaba con la investigación y la máquina consiste en una CNC de 5 grados de libertad, 3 lineales y 2 rotacionales.
- Esta propuesta económica surge luego de investigar y cotizar distintos equipos con distintos proveedores. El precio de la propuesta económica presentada aumentará al incluir gastos de envío e impuestos de aduana, pero representa un presupuesto aproximado que se encuentra muy cercano a lo que realmente podría costar la compra de los equipos. Este presupuesto NO incluye mano de obra ni horas de trabajo en la implementación y puesta en marcha del sistema de control.
- Para terminar con el estudio económico es necesario experimentar con la máquina ya construida y funcionando, para ver sus capacidades, velocidades y tipos de corte que será capaz de realizar, esto ya que dependiendo de esas variables cambiará el enfoque de la máquina, puede ser veloz, puede ofrecer más variedad de cortes o puede estar justo en el medio. En definitiva, para este prototipo se necesitan pocos cortes que serán repetitivos, por lo tanto, es probable que velocidad de la máquina sea su principal característica y la que más valor le dé.

Referencias

- "K1 Series AC Servo Driver User's Manual 2021 V1.6". (2021).
- ADTECH. (2021). *Catálogo de servomotores ADTECH*.
- Alarcon, F., & Matamala, P. (2022).
- Area tecnologia. (2021). Retrieved from www.areatecnologia.com
- aserradero, P. d. (1989). *INFOR*.
- ATO. (2022, enero). Retrieved from <https://www.ato.com/ac-servo-drive-for-200w-400w-servo-motor>
- automationcontrols*. (2020). Retrieved from <https://www.automationcontrols.com.pk/product/limit-switch-me-8107-rotatable-lever-arm-type-pack-of-2-pcs/>
- BEISSE GROUP. (2022). *BEISSE*. Retrieved from <https://www.biesse.com/es/madera/cnc-centros-de-trabajo>
- C.I.P. (2022). *ETI TUDELA*. Retrieved from Servoaccionamientos: <http://www.etitudela.com/celula/downloads/servoaccionamientos.pdf>
- Cadwork*. (n.d.). Retrieved from <https://www.cadwork.com/indexL1a.jsp>
- ceiisa*. (2015, Noviembre 9). Retrieved from <http://ceiisa.blogspot.com/2015/05/interruptores-de-final-de-carrera-limit.html#:~:text=Existen%20los%20de%20lengüeta%2C%20bisagra,muelle%2C%20de%20pulsador%2C%20etc.>
- CNC Cook Book*. (2020). Retrieved from CNC Cook Book Breakout Boards: <https://www.cnccookbook.com/cnc-breakout-boards/>
- CusrtomPartNet. (2021). *custompartnet*. Retrieved from <https://www.custompartnet.com/wu/milling>
- design2machine*. (2021). Retrieved from <https://www.design2machine.com/index.html>

- engineeringarticles*. (2022, enero). Retrieved from [engineeringarticles: https://www.engineeringarticles.org/lathe-lathe-operations-types-and-cutting-tools/](https://www.engineeringarticles.org/lathe-lathe-operations-types-and-cutting-tools/)
- ESA S.p.A. (2020). *esa-automation*. Retrieved from <https://www.esa-automation.com/en/what-is-a-servo-drive-and-how-does-it-work/>
- Felder. (2022). Retrieved from www.felder-group.com
- Group, Griggio. (2021). *Ortizco Maquinarias & Equipos Industriales*. Retrieved from <http://www.ortizco.cl>
- Hans Hundegger AG. (2020). *HUNDEGGER*. Retrieved from <https://www.hundegger.com/es-es/>
- HOMAG Group. (2021). *HOMAG*. Retrieved from <https://www.homag.com/en/products/cnc-machining-centers>
- IGUS Plastics For Longer Life*. (2021). Retrieved from IGUS: <https://www.igus.eu/info/industries-cnc-machines-woodworking>
- Jure. (2021, marzo 26). *poscope.com*. Retrieved from <https://blog.poscope.com/stepper-motor-driver/>
- Linear Motion Tips*. (2020). Retrieved from <https://www.linearmotiontips.com/how-does-closed-loop-stepper-control-work/>
- Makita. (2022). *Makita*. Retrieved from <http://www.makita.cl/>
- MASSO. (2022). Retrieved from <https://www.massos.com.au/product/mill-router-cnc-controller-g3/>
- Michael Weinig AG. (2021). *HOLZHER*. Retrieved from <https://www.holzher.es/es/>
- Morales, J. L., & Ceballos, J. A. (2014, DICIEMBRE). MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA EL CONTROL DE POSICION DE VALOCIDAD DE SERVOMOTORES MEDIANTE PLC CON INTERFAZ SCADA. ESPAÑA.
- Motion Control Products Limited. (2021). *Selection Guide for Stepper Motors*. Retrieved from Motion Control Products:

<https://www.motioncontrolproducts.com/applications/selection-guide-for-stepper-motors/>

Moujen. (2021). *Moujenswitch*. Retrieved from <https://www.moujenswitch.com/product/me-8107/>

Muñoz, G. R., & Gonzales, J. D. (2007). CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO PROCEDENTE.

Oriental Motor USA CORP. (2020). *Orientalmotor*. Retrieved from <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/index.html>

Schajer, G. S. (2015). Wood machining: Past achievements, present capabilities, future opotyunities. *Wood Material Science & Engineering*.

SEW EURODRIVE. (2020). SERVOACCIONAMIENTO INDUSTRIALES .
SERVOACCIONAMIENTO INDUSTRIALES .

Soluciones Globales y Gestión de Compras. (2021). *Gestion de Compras*. Retrieved from <https://www.gestiondecompras.com/es/productos/mecanizado/torneado>

Stanley Black & Decker Inc. (2021). *DEWALT*. Retrieved from <https://www.dewalt.es>

Vial, J. (2021). *CT de Madera*. Concepción.

WTWH Media LLC and its licensors. (2021). *Motion Control Tips*. Retrieved from <https://www.motioncontroltips.com/stepper-motor-servomotor/>

Anexos

Debido a que los manuales contienen un alto contenido de información técnica se adjuntara los links de los manuales tanto para servodrive y controlador MASSO.

<https://docs.massoc.com.au/Welcome>

<http://www.zscnc.cn/english/managesystem/uploadfiles/2020031701.pdf>