UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

"SISTEMA CNC PARA EL APRENDIZAJE DEL MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTA"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Erika Daniela Freire Cuestas

DIRECTOR:

Ing.Víctor Alfonso Erazo Arteaga, MSc

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Freire Cuestas Erika Daniela

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Sistema CNC para el aprendizaje del mecanizado por arranque de viruta
AUTOR (ES):	Freire Cuestas Erika Daniela
FECHA: DD/MM/AAAA	28/07/2026
PROGRAMA:	■ GRADO ☐ POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR / ASESOR:	MSc. Erazo Arteaga Víctor Alfonso MSc. Mejía Echeverría Cosme Damián

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de julio de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ERIKA DANIELA
FREIRE CUESTAS

Erika Daniela Freire Cuestas

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 28 de julio de 2026

Ing. Víctor Alfonso Erazo Arteaga, MSc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
VICTOR ALFONSO ERAZO ARTEAGA

(f)……

Ing. Víctor Alfonso Erazo Arteaga, MSc
C.C.: 1719188029

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "Sistema CNC para el aprendizaje del mecanizado por arranque de viruta" elaborado por Erika Daniela Freire Cuestas , previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
VICTOR ALFONSO ERAZO ARTEAGA

(f)……

Ing. Víctor Alfonso Erazo Arteaga, MSc
C.C.: 1719188029

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
COSME DAMIAN MEJIA ECHEVERRIA

(f)……

Ing. Cosme Damián Mejía Echeverría, MSc
C.C.: 1002641281

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia para superar cada desafío y permitirme culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mis padres, por ser mi mayor apoyo y motivación, por cada sacrificio, consejo y palabra de aliento que me impulsaron a continuar y no rendirme. Gracias por confiar en mí, acompañarme en cada momento y estar presentes durante este camino, brindándome siempre su amor y comprensión.

A mi familia, por su cariño, apoyo y por acompañarme durante este proceso, compartiendo conmigo cada logro y motivándome a seguir adelante para alcanzar esta meta.

Erika Freire

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el ingeniero Víctor Erazo, por su acompañamiento constante, paciencia y compromiso durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por la confianza depositada en mí, por sus consejos, orientación y motivación para continuar avanzando hasta culminar esta investigación.

Agradezco al ingeniero Marco Ciaccia por su valiosa colaboración, predisposición y apoyo brindado. Gracias por compartir sus conocimientos, orientarme cuando lo necesité y brindarme la paciencia necesaria para fortalecer mi aprendizaje.

Agradezco al ingeniero Cosme Mejía por su disposición para ayudarme y compartir sus conocimientos. Al ingeniero Xavier Lima, por estar pendiente de mi avance y siempre brindarme su apoyo.

Extiendo mi agradecimiento a todos los ingenieros y docentes que compartieron sus conocimientos y estuvieron atentos a mi formación, aportando con su enseñanza y orientación a mi desarrollo profesional.

Agradezco también a todas aquellas personas especiales que Dios ha puesto en mi camino, quienes con su apoyo, cariño y palabras de ánimo estuvieron presentes durante este proceso, motivándome a seguir adelante y alcanzar este objetivo.

Erika Freire

RESUMEN

Se desarrolló un sistema CNC educativo acompañado de una fundamentación técnica estructurada que facilita la comprensión progresiva del fenómeno del mecanizado por arranque de viruta, orientado a estudiantes de nivel técnico y superior. El trabajo comprendió la determinación de las características técnicas de equipos CNC educativos e industriales, el diseño de una fresadora CNC y la simulación de su funcionamiento mediante software asistido por computador.

La configuración conceptual del sistema se definió mediante una evaluación ponderada de alternativas, mientras que el diseño mecánico fue validado mediante análisis estructural de los ejes y simulaciones. Además, se desarrolló una interfaz de usuario en MATLAB para el control básico del sistema y la generación de trayectorias de simulación.

La representación tridimensional de la fresadora se implementó en Unity mediante comunicación TCP/IP con MATLAB, y se complementó con un módulo ESP32 para la representación física del movimiento de los ejes mediante indicadores LED.

Palabras clave: Sistema CNC, mecanizado por arranque de viruta, simulación CNC, Matlab, Unity, fresadora CNC, cambio de herramienta, educativo.

ABSTRACT

An educational CNC system was developed, accompanied by a structured technical foundation that facilitates the progressive understanding of the machining process by chip removal, aimed at technical and higher education students. The work included the determination of the technical characteristics of educational and industrial CNC equipment, the design of a CNC milling machine, and the simulation of its operation using computer-aided software.

The conceptual configuration of the system was defined through a weighted evaluation of alternatives, while the mechanical design was validated through structural analysis of the axes and simulations. Additionally, a user interface was developed in MATLAB for basic system control and the generation of simulation trajectories.

The three-dimensional representation of the milling machine was implemented in Unity through TCP/IP communication with MATLAB and was complemented with an ESP32 module for the physical representation of axis movements using LED indicators.

Keywords: CNC system, chip removal machining, CNC simulation, MATLAB, Unity, CNC milling machine, tool change, educational.

INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR iii
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR iv
DEDICATORIA v
AGRADECIMIENTO vi
RESUMEN vii
ABSTRACT viii
INDICE DE CONTENIDOS ix
ÍNDICE DE FIGURAS xi
ÍNDICE DE TABLAS xv
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN 1
1.1 Planteamiento del problema 1
1.2 Objetivos 2
1.2.1 General 2
1.2.2 Específicos 2
1.3 Alcance y delimitación 2
1.4 Justificación 3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 4
2.1 Antecedentes 4
2.2 Bases Teóricas 8
2.2.1 Mecanizado por arranque de viruta 8
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO 46
3.1 Enfoque y tipos de investigación 46
3.2 Diseño de la Investigación 46
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y PROCESOS 51
4.1 Despliegue de la función de calidad (QFD) para la selección de alternativas 51
4.2 Análisis funcional 54
4.3 Análisis modular 56
4.4 Criterios ponderados – evaluación de soluciones 74
4.5 Arquitectura general de la máquina 82
4.5.1 Sistema estructural 85
4.5.2 Sistema de guiado lineal 86

4.5.3 Sistema de transmisión y accionamiento 87
4.5.4 Elementos adicionales 88
4.6 Selección del motor (spindle) para el eje Z 89
4.6.1 Determinación de las cargas aplicadas 91
4.6.2 Eje Z – Caso perforación 91
4.6.3 Eje Z – Caso inclinado 94
4.6.4 Eje Y – Caso perforación 95
4.6.5 Eje Y – Caso inclinado 96
4.6.6 Eje X – Caso perforación 98
4.6.7 Eje X – Caso inclinado 99
4.6.8 Cálculo del esfuerzo máximo 100
4.6.9 Selección de guías lineales 102
4.6.10 Determinación del diámetro del husillo de bolas 104
4.6.11 Selección del motor paso a paso 105
4.6.12 Factor de seguridad y vida útil de los rodamientos 106
4.6.13 Selección de acoples Lovejoy 109
4.7 Interfaz de usuario 111
4.7.1 Funcionalidades implementadas 112
4.7.2 Integración con Unity 113
4.7.3 Integración con el sistema físico 115
Conclusiones 117
Recomendaciones 118
Referencias 119
Anexos 126
Anexo A. Geometría y clasificación de herramientas de corte 126
Anexo B. Parámetros de corte para torneado 127
Anexo C. Parámetros de corte para fresado 128
Anexo D. Energía específica de corte 132
Anexo E. Parámetros de corte para taladro 134
Anexo F. Código fuente de la interfaz de usuario 134
Anexo G. Planos y lista de materiales de la fresadora CNC 135
Anexo H. Matriz QFD 168

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 Fresadoras CNC para enseñanza, a) Mini; b) Escritorio [6, 7]. 5
Fig.2 Fresadora CNC con cambio de herramienta. [9]. 6
Fig.3 Interfaz de usuario de máquina CNC virtual [10]. 7
Fig.4 Controladores de marcas, a) Siemens; b) Heidenhain [14, 15]. 8
Fig.5 Mecanizado por arranque de viruta 9
Fig.6 Ángulos de la herramienta de corte de torno. 9
Fig.7 Representación de una herramienta de corte para torno, a) Ángulos en las superficies de la herramienta 3D [16]; b) Superficies de herramienta 3D. 10
Fig.8 Ángulos de buril, a) Vista frontal; b) Vista lateral; c) Vista superior. 11
Fig.9 Ángulos de desprendimiento, a) Positivo; b) Negativo; c) ángulos conjuntos [16, 20]. 12
Fig.10 Comparación de herramienta de corte de torno [21]. 14
Fig.11 Clasificación ISO 513:2004 de metal duro. 15
Fig.12 Formas comunes de insertos y su relación con resistencia, potencia, vibración y versatilidad, a) Redondos; b) Cuadrados; c) Rombo; d) Hexágono; e) Triángulo equilátero; f) Rombo con dos ángulos de 55°; g) Rombo con dos ángulos de 35°[21]. 16
Fig.13 Proceso de torneado. 17
Fig.14 Operación de torneado, a) Parámetros de corte; b) Nomenclatura de variables *[21]*. 17
Fig.15 Velocidad de corte, a) Proceso de torneado 3D; b) Proceso de torneado 2D – Adaptado de: [17]. 18
Fig.16 Tipos de cortes, a) Ortogonal; b) Oblicuo [17]. 19
Fig.17 Fuerzas de corte sobre la viruta [21]. 20
Fig.18 Fuerzas de corte sobre la herramienta [21]. 21
Fig.19 Diagrama de fuerzas [16, 21]. 22
Fig.20 Diagrama de velocidades. 23
Fig.21 Nomenclatura de corte ortogonal en el torneado [21]. 25
Fig.22 Factor de corrección cuando $t0$ son diferentes de 0,25 mm [21]. 26
Fig.23 Efecto de tamaño de la viruta y parámetro de corte en la energía específica de corte. 27

Fig.24 Distribución de energía total de corte en función de la velocidad de corte [21]..... 27
Fig.25 Efecto de la velocidad de corte en la distribución de la energía específica de corte. 28
Fig.26 Principales mecanismos de desgaste en herramientas de corte, a) Adhesión; b) Abrasión; c) Difusión. 29
Fig.27 Tipos de desgaste en herramienta de torneado [21]. 30
Fig.28 Desgaste de flanco y cráter de la herramienta en función del tiempo de corte [16, 21]. 31
Fig.29 Criterio de vida de la herramienta, a) Desgaste del flanco a diferentes velocidades; b) Escala logaritmo-logaritmo [21]. 32
Fig.30 Proceso de fresado, a) Fresado frontal; b) Fresado periférico; c) Fresado terminal de cavidades [21]. 33
Fig.31 Ángulos de la herramienta de corte de fresadora, a) Fresa de vástago; b) Fresa modular (vista lateral); c) Fresa modular (vista frontal) [16, 19]. 34
Fig.32 Métodos de fresado, a) Fresado ascendente; b) Fresado descendente [21]. 36
Fig.33 Herramientas de corte de fresado, a) Fresas modulares HSS; b) Fresados de vástago HSS; c) Fresa de vástago con recubrimiento de carburo metálico; d) Fresa madre; e) Fresa cilíndrica de insertos intercambiables [16]. 37
Fig.34 Formas características de distintos tipos de fresas [16]. 38
Fig.35 Parámetros de corte de fresado periférico. 40
Fig.36 Parámetros geométricos de fresado frontal, a) Fresado frontal; b) Cortador centrado sobre la pieza; c) Cortador desplazado. 43
Fig.37 Metodología del proyecto. 46
Fig.38 Fresadoras CNC, a) Osnox 3060 [34]; b) Haas Mini Mill [36]. 53
Fig.39 Diagrama funcional – Nivel 0 54
Fig.40 Diagrama funcional – Nivel 1 55
Fig.41 Diagrama funcional – Nivel 2. 56
Fig.42 Análisis modular – Nivel 2. 57
Fig.43 Cambio de herramienta, a) Manual [44]; b) Automático: Rack lineal; b) Automático: Carrusel [45, 46]. 58
Fig.44 Cambio de herramienta, a) Portaherramientas manual; b) Brazo robótico [43, 51]. 59

Fig.45 Dispositivos de ajuste, a) Indicador de carátula; b) Palpador de herramienta [52, 53]; c) Presetter automático; d) Ajuste mediante visión [54, 55]; e) Dispositivos de detección de desgaste [53].. 61
Fig.46 Métodos de fijación, a)Abrazaderas; b) Sistema de vacío [56]. 62
Fig.47 Métodos de fijación, a) Superglue; b) Fijación por mordazas [56]; c) Fijación magnética [60, 63]. 63
Fig.48 Métodos para establecer cero pieza, a) Mekanika EVO; b) Mach 4 [68, 70]. 64
Fig.49 Detección de cero pieza automático Red Fox 2 [71]. 65
Fig.50 Módulo 1: Preparación inicial. 66
Fig.51 Comunicación por protocolo de red y software de control. 67
Fig.52 Tarjetas controladoras CNC Mach3 de 3 ejes USB [80]. 68
Fig.53 Microcontroladores/Firmwares, a) Arduino Uno [93]; b) ESP32 [94]; c) TinyG [95]. 69
Fig.54 Transmisión de movimiento, a) Guía lineal [101]; b) Tornillo de bolas [103]; c) Rack & Pinion [104]. 71
Fig.55 Límites físicos, a) Final de carrera mecánico [109]; b) Sensor óptico [110]. 71
Fig.56 Módulo 2: Preparación de la máquina. 72
Fig.57 Módulo 3: Ejecución del trabajo CNC. 73
Fig.58 Fresadora CNC de referencia [112]. 83
Fig.59 Fresadora CNC desarrollada. 84
Fig.60 Sistema de coordenadas definitivo [115]. 84
Fig.61 Fresadora desarrollada – estructura. 85
Fig.62 Sistema estructural - Componentes utilizados. 86
Fig.63 Fresadora desarrollada – guiado lineal. 87
Fig.64 Fresadora desarrollada –transmisión y accionamiento. 88
Fig.65 Fresadora desarrollada – Elementos adicionales. 89
Fig.66 Eje Z. 92
Fig.67 DCL eje Z – Perforación, a) Sin resolver; b) Resuelto; c) Medidas. 92
Fig.68 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje Z – Perforación. 93
Fig.69 DCL eje Z – Inclinado, a) Sin resolver; b) Sin resolver- descomposición; c) Resuelto. 94

Fig.70 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje Z – Inclinado. 94
Fig.71 Eje Y. 95
Fig.72 DCL eje Y – Perforación. 95
Fig.73 DCL resuelto eje Y – Perforación. 95
Fig.74 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje Y – Perforación. 96
Fig.75 DCL eje Y – Inclinado. 96
Fig.76 DCL resuelto eje Y – Inclinado. 97
Fig.77 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje Y – Inclinado. 97
Fig.78 Eje X. 98
Fig.79 DCL eje X – Perforación, a) Sin resolver; b) Resuelto. 98
Fig.80 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje X – Perforación. 99
Fig.81 DCL eje X – Inclinado, a) Sin resolver; b) Resuelto. 99
Fig.82 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje X – Inclinado. 100
Fig.83 Perfil 4080 simulado (eje Y). 101
Fig.84 Gráfica de resultados de esfuerzos máximos simulados. 102
Fig.85 Orientación de fuerzas. 107
Fig.86 Esquema de rodamiento. 107
Fig.87 Interfaces desarrolladas, a) Siemens; b) Fanuc. 112
Fig.88 Inicio – Interfaz. 112
Fig.89 Vista de la trayectoria de la herramienta, a) Siemens; b) Fanuc. 113
Fig.90 Fresadora CNC – Importada en Unity. 114
Fig.91 Implementación Matlab – Unity. 115
Fig.92 Implementación Matlab – Unity – ESP32, a) Siemens (-Z); b) Fanuc (+Z). 116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Requerimientos explícitos e implícitos..... 52
Tabla 4.2 Comparación de fresadoras CNC. 52
Tabla 4.3 Requerimientos con mayor peso de influencia (QFD) 54
Tabla 4.4 Sección A — Colocar la herramienta. 58
Tabla 4.5 Sección A2 — Colocar la herramienta. 59
Tabla 4.6 Sección B — Ajustar la herramienta. 60
Tabla 4.7 Sección B2 — Ajustar la herramienta. 61
Tabla 4.8 Sección C — Fijar madera a la mesa de trabajo..... 62
Tabla 4.9 Sección C2 — Fijar madera a la mesa de trabajo. 63
Tabla 4.10 Sección D — Métodos para establecer el punto de origen (cero pieza). 64
Tabla 4.11 Sección D2 — Métodos para establecer el punto de origen (cero pieza). 65
Tabla 4.12 Sección E — Métodos para verificar comunicación. 66
Tabla 4.13 Sección E2 — Métodos para verificar comunicación. 67
Tabla 4.14 Sección F — Generar señales actuadores: Tarjetas controladoras CNC. 68
Tabla 4.15 Sección F2 — Generación de señales para actuadores: Tarjetas controladoras CNC. 68
Tabla 4.16 Sección F3 — Generación de señales/actuadores: Microcontroladores / Firmwares (intérpretes G-code libres). 69
Tabla 4.17 Sección F3 — Generación de señales/actuadores: Microcontroladores / Firmwares (intérpretes G-code libres). 70
Tabla 4.18 Sección G — Establecimiento del punto de origen (cero máquina): Transmisión de movimiento. 70
Tabla 4.19 Sección G2 — Establecimiento del punto de origen (cero máquina): Transmisión de movimiento. 71
Tabla 4.20 Sección G3 — Establecimiento del punto de origen (cero máquina): Límites físicos. 71
Tabla 4.21 Sección G4 — Establecimiento del punto de origen: Límites físicos. 72
Tabla 4.22 Sección H — Carga del código G. 72
Tabla 4.23 Sección H2 — Carga del código G. 73

Tabla 4.24 Soluciones de análisis modular. 74
Tabla 4.25 Evaluación del peso específico de criterios del módulo 1. 75
Tabla 4.26 Evaluación del peso específico del criterio Precio. 75
Tabla 4.27 Evaluación del peso específico del criterio Compatibilidad. 75
Tabla 4.28 Evaluación del peso específico del criterio Hw/Sw libre. 75
Tabla 4.29 Evaluación del peso específico del criterio Simulación. 76
Tabla 4.30 Evaluación del peso específico del criterio Mostrar coordenadas. 76
Tabla 4.31 Tabla de conclusiones – Módulo 1. 76
Tabla 4.32 Evaluación del peso específico de criterios del módulo 2. 77
Tabla 4.33 Evaluación del peso específico del criterio Precio. 77
Tabla 4.34 Evaluación del peso específico del criterio Seguridad. 77
Tabla 4.35 Evaluación del peso específico del criterio Mantenimiento. 78
Tabla 4.36 Evaluación del peso específico del criterio Precisión. 78
Tabla 4.37 Evaluación del peso específico del criterio Compatibilidad. 78
Tabla 4.38 Evaluación del peso específico del criterio Hw/Sw libre. 79
Tabla 4.39 Tabla de conclusiones – Módulo 2. 79
Tabla 4.40 Evaluación del peso específico de criterios del módulo 3. 80
Tabla 4.41 Evaluación del peso específico del criterio Precio. 80
Tabla 4.42 Evaluación del peso específico del criterio Precisión. 80
Tabla 4.43 Evaluación del peso específico del criterio Capacidad de herramientas. 81
Tabla 4.44 Evaluación del peso específico del criterio Seguridad. 81
Tabla 4.45 Evaluación del peso específico del criterio Fácil montaje. 81
Tabla 4.46 Evaluación del peso específico del criterio Escalabilidad. 81
Tabla 4.47 Tabla de conclusiones – Módulo 3. 82
Tabla 4.48 Datos considerados para el cálculo de potencia requerida y consumida por la máquina. 90
Tabla 4.49 Tabla de resumen de resultados del cálculo de potencia requerida y consumida por la máquina. 90
Tabla 4.50 Estimación de peso para el eje Z [119-122]. 91
Tabla 4.51 Datos empleados para esfuerzo máximo [123]. 100
Tabla 4.52 Resultado de esfuerzos máximos simulados. 101

Tabla 4.53 Resultado de error entre esfuerzo máximo calculado – simulado. 102
Tabla 4.54 Resumen de momentos – Caso inclinado 103
Tabla 4.55 Capacidades de carga y pares de torsión [121]..... 103
Tabla 4.56 Datos de husillo de bolas SFU [127, 128]. 105
Tabla 4.57 Diámetros de husillos calculados. 105
Tabla 4.58 Resultados obtenidos – selección del motor paso a paso. 106
Tabla 4.59 Resultados para tipo de rodamiento requerido. 107
Tabla 4.60 Datos considerados para rodamientos de bolas [130]. 107
Tabla 4.61 Resultados de cálculos de rodamientos. 108
Tabla 4.62 Resultado de vida útil de rodamientos para cada eje. 109
Tabla 4.63 Datos para selección de acoples [119, 131]..... 109
Tabla 4.64 Comparación de acoples [133]. 111
Tabla 4.65 Comparación de entornos para simulación del proceso [137-139]. 114
Tabla 4.66 Parámetros de corte para taladrado [142]. 134
Tabla 2.1 Aplicaciones de la clasificación ISO 513:2004 de metal duro [16]. 126
Tabla 2.2 Valores usando herramientas de corte afiladas y $t0$=0,25 mm [21]..... 127
Tabla 2.3 Valores de C y n para diferentes materiales de herramientas [26]. 127
Tabla 2.4 Valores indicativos para n°. de dientes y ángulos de corte en fresas de acero rápido parte I [142]. 128
Tabla 2.5 Valores indicativos para n°. de dientes y ángulos de corte en fresas de acero rápido parte II [142]..... 129
Tabla 2.6 Valores indicativos para n°. de dientes y ángulos de corte en fresas de acero rápido parte III [142]. 129
Tabla 2.7 Valores indicativos para n°. de dientes y ángulos de corte en fresas de acero rápido parte IV [142]. 130
Tabla 2.8 Velocidades de corte de fresado y avance por diente para diversos materiales de trabajo utilizando cortador HSS [26]. 130
Tabla 2.9 Datos de Fsc para materiales seleccionados según avances por diente especificados [26]. 131
Tabla 2.10 Tabla de energía específica de corte y rectificado Parte I [143]. 132
Tabla 2.11 Tabla de energía específica de corte y rectificado Parte II [143]. 133

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Según datos de la Secretaría de Educación Superior Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), el primer periodo de 2025 se registraron más de 35 000 estudiantes, en el Sistema de Educación Superior, de los cuales, aproximadamente 15 000 estudiantes se matricularon en carreras técnicas y tecnológicas como ingeniería mecánica, mecatrónica, electrónica y afines [1].

En las mencionadas profesiones, de una u otra manera el mecanizado por arranque de viruta forma parte de la malla curricular. Para su estudio, se requieren determinados equipos donde se pueda llevar la teoría a la práctica. Sin embargo, el problema radica en la carencia de máquinas CNC utilizadas en los laboratorios universitarios [2, 3].

Las máquinas CNC industriales tienen un costo que oscila entre $30,000 y $100 000 [4], ya que están diseñadas para trabajo pesado y de producción en serie. Por otro lado, las máquinas CNC destinadas a la enseñanza tienen un precio entre $4000 y $10 000 [5]. No obstante, estos equipos son idealistas, debido a que tienden a ocultar errores comunes que los estudiantes necesitan aprender a identificar. Además, el software y hardware de operación en estas máquinas suelen ser propios y se alejan de la realidad industrial en la que se desenvolverán los futuros profesionales de las áreas técnicas [6].

Por lo tanto, es necesario contar con equipos de laboratorio que permitan simular la operación de equipos industriales a bajo costo. En este contexto, se propone el desarrollo de una solución CNC específicamente diseñada para contextos educativos [2].

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Desarrollar un sistema CNC para la enseñanza de mecanizado por arranque de viruta para estudiantes de nivel técnico y superior.

1.2.2 Específicos

- Determinar las características técnicas de los equipos CNC educativos.
- Diseñar una máquina CNC fresadora con características técnicas y pedagógicas.
- Simular el funcionamiento de la CNC fresadora en un software asistido por computador.

1.3 Alcance y delimitación

Se revisará literatura existente sobre modelos comerciales de fresadoras CNC y su aplicación en la enseñanza, que servirá de base para fundamentar el diseño con criterios técnicos y pedagógicos. Asimismo, se diseñarán los componentes mecánicos y estructurales de la fresadora, priorizando aspectos como seguridad, accesibilidad y funcionalidad para su uso en laboratorios educativos.

Posteriormente, se simulará en un software CAD/CAE que permita la visualización de parámetros y trayectorias. Es importante destacar que no se llevará a cabo la construcción física de la fresadora, centrándose el proyecto en el diseño y la simulación.

En el documento se incluirán los cálculos realizados para verificar la resistencia mecánica de los diferentes elementos que componen la propuesta, así como los cálculos para la selección de materiales. Además, se entregarán los planos de conjunto y de taller, junto con los diagramas eléctricos.

1.4 Justificación

En la educación superior existe carencia de equipos CNC para la práctica de mecanizado por arranque de viruta. Las máquinas CNC industriales tienen un alto costo, mientras que las que están destinadas para la enseñanza son idealistas y cuentan con un software y hardware especifico.

Por lo tanto, existe una necesidad de desarrollar equipos de laboratorio que simulen la operación de máquinas industriales a bajo costo.

Esta alternativa integrará el diseño mecánico con herramientas que faciliten la observación del funcionamiento de la máquina. Esto facilitaría el aprendizaje de la programación bajo código G y las prácticas de mecanizado, permitiendo experimentar de manera segura con variables operativas. Además, fomentaría la toma de decisiones y el desarrollo de competencias diagnósticas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos relacionados con el mecanizado por arranque de viruta que sustentan el desarrollo de la propuesta. Aunque el proyecto corresponde al diseño de una fresadora CNC, la explicación de los fenómenos del mecanizado se inicia mediante el modelo de corte ortogonal y operaciones de torneado, debido a que constituyen la aproximación clásica utilizada en la literatura especializada para describir la formación de la viruta, las fuerzas de corte, la mecánica del corte, la generación de calor y el desgaste de la herramienta. Los principios obtenidos son aplicables al fresado, aunque en este proceso intervienen condiciones cinemáticas adicionales asociadas al movimiento intermitente de la herramienta.

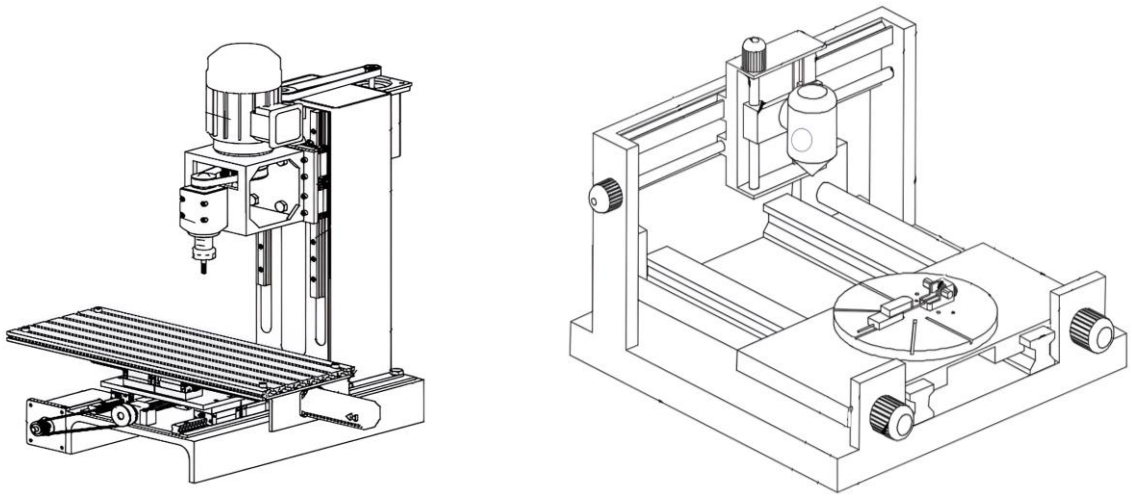
A partir de estos fundamentos, posteriormente se abordan los aspectos específicos del proceso de fresado y aquellos relacionados con el diseño y operación de sistemas CNC, necesarios para el desarrollo de la propuesta.

2.1 Antecedentes

El uso de máquinas CNC industriales dentro de la enseñanza técnica representa una oportunidad para que los estudiantes se familiaricen desde temprano con el entorno real de trabajo. No obstante, su implementación en instituciones educativas suele verse limitada por su tamaño y alto costo. A esto se suma la inversión adicional en la capacitación del personal encargado de operarlas, lo cual hace que muchas escuelas y centros de formación no puedan acceder fácilmente a este tipo de tecnología [6].

En respuesta a esta situación, se han desarrollado fresadoras CNC educativas de bajo costo, diseñadas para facilitar la enseñanza práctica del mecanizado sin requerir equipos industriales costosos. Estas máquinas están pensadas para instalarse fácilmente en diferentes áreas del

laboratorio, sin requerir modificaciones estructurales ni condiciones técnicas complejas [7, 8]. Algunas de ellas se pueden observar en la Fig.1



a) b)

Fig.1 Fresadoras CNC para enseñanza, a) Mini; b) Escritorio [6, 7].

Aunque estas máquinas representan una alternativa accesible para la enseñanza, muchas de estas suelen presentar limitaciones. Generalmente, solo cuentan con una herramienta, lo que obliga a los estudiantes a detener el proceso para realizar cambios manuales. Esto no solo interrumpe el trabajo, sino que también se aleja del funcionamiento real de las máquinas industriales.

Para superar esto, se ha desarrollado fresadoras CNC educativas con sistema de cambio automático de herramientas que ofrece una experiencia de aprendizaje más cercana a las condiciones reales de la industria (véase Fig.2) [9]. Sin embargo, sus fabricantes son los mismos que fabrican los equipos industriales lo que los limita a un solo tipo de controlador y dificulta su adquisición.

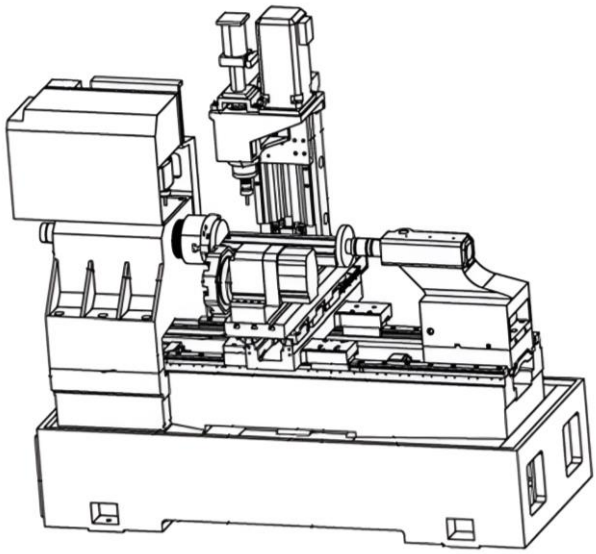


Fig.2 Fresadora CNC con cambio de herramienta. [9].

Ante esto, se observa la necesidad de contar con equipos educativos genéricos y configurables, que ofrezcan una formación más amplia, adaptable y alineada con la variedad tecnológica existente en el mercado.

Como respuesta a esto, se han desarrollado fresadoras CNC virtuales que simulan el funcionamiento de una máquina real mediante entornos interactivos. Un ejemplo de ello es una fresadora que se muestra en la Fig.3, la cual permite ingresar códigos G para simular el proceso de corte de piezas. Esto permite comprender el comportamiento básico de una máquina CNC y practicar su operación desde un entorno digital [10].

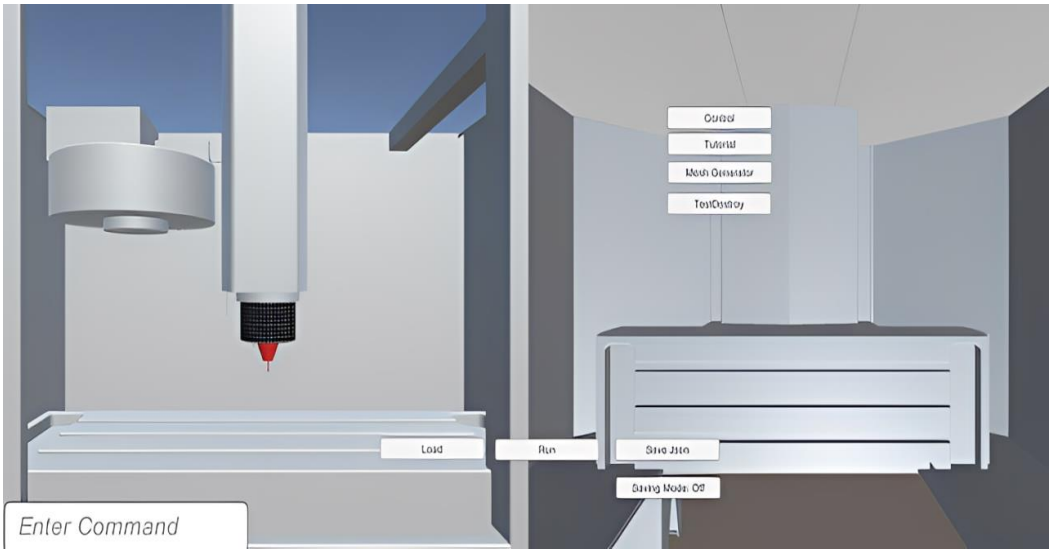


Fig.3 Interfaz de usuario de máquina CNC virtual [10].

Además, estos sistemas permiten analizar y reducir errores en el proceso de mecanizado antes de realizar pruebas reales en el taller, lo que disminuye costos y riesgos. Asimismo, resultan útiles en la formación técnica, ya que permiten a los usuarios adquirir experiencia práctica en la operación y supervisión de procesos de fabricación sin necesidad de requerir de una máquina física [11].

En este contexto, los controladores CNC son responsables de interpretar el código y convertirlo en movimientos precisos. Con los avances tecnológicos, estos controladores han mejorado en velocidad y precisión, permitiendo el mecanizado de piezas complejas y operaciones multieje [12].

Los controladores CNC pueden clasificarse en controladores basados en PC y controladores autónomos. Los primeros ofrecen mayor personalización y capacidad de procesamiento; entre ellos se encuentran sistemas como Mach4, Radonix y TexComputer. En cambio, los controladores autónomos son más compactos y adecuados para talleres pequeños o aplicaciones sencillas; algunos ejemplos son Masso G3 y SMC5-5-N [13].

Independientemente de esta clasificación, en el ámbito industrial existen diferentes fabricantes de sistemas de control CNC, entre los que destacan Fanuc, Siemens, Mitsubishi y Heidenhain. Sus

sistemas difieren en la configuración, la interfaz y las funciones incorporadas, por lo que su selección depende de los requerimientos de la aplicación y recursos disponibles [12]. En la Fig.4 se muestran ejemplos de controladores desarrollados por Siemens y Heidenhain.



a) b)

Fig.4 Controladores de marcas, a) Siemens; b) Heidenhain [14, 15].

2.2 Bases Teóricas

En esta sección se describen los conceptos relacionados con el mecanizado por arranque de viruta, abordando los aspectos necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

2.2.1 Mecanizado por arranque de viruta

El mecanizado por arranque de viruta es un proceso de fabricación que consiste en separar o eliminar material de una pieza. Durante este proceso una herramienta penetra en la pieza, causando

la deformación y posterior rotura de una capa de material que se separa en forma de viruta (véase Fig.5) [16].

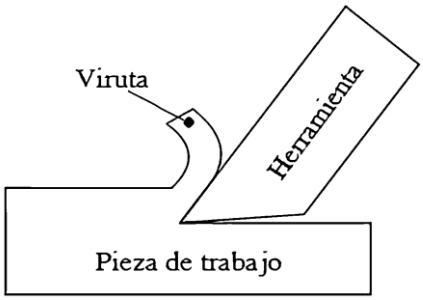


Fig.5 Mecanizado por arranque de viruta

Adaptado de: [16].

Para que el corte se produzca, la herramienta posee ángulos, en la Fig.6 se puede observar el ángulo de incidencia (α) que es el que alivia el rozamiento de la herramienta con la superficie ya mecanizada, minimizando así el desgaste de la herramienta. El ángulo de salida (γ) que es el que fomenta la salida de viruta, cuando la herramienta avanza hacia el espesor de viruta no deformado. El ángulo de talla (β) es el que brinda resistencia mecánica a la herramienta: si este ángulo es muy pequeño, la zona de corte se vuelve frágil y propensa a fracturarse; en cambio, si es demasiado grande, la herramienta pierde capacidad de penetración y aumenta el esfuerzo de corte [16].

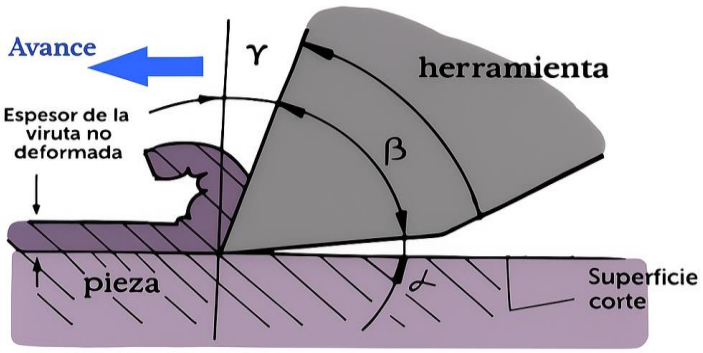
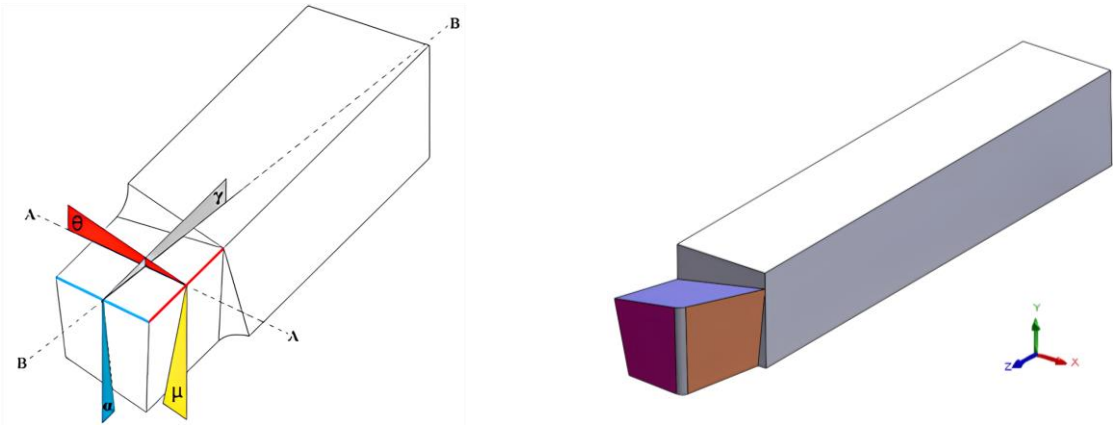


Fig.6 Ángulos de la herramienta de corte de torno.

Adaptado de: [17].

Esta representación constituye una forma básica de visualizar la herramienta con el fin de explicar el proceso de corte. No obstante, al tratarse de un cuerpo tridimensional, los ángulos se repiten alrededor de ella, como se muestra en la Fig.7a, la cual presenta diversas superficies que desemboca en un vértice denominado radio de herramienta, tal como se ilustra Fig.7b.

Entre estas superficies se encuentra el plano de salida de viruta (superficie morada), encargado de guiar la viruta una vez desprendida del material; El plano de alivio principal (superficie anaranjada) evita el contacto directo de la herramienta con la superficie recién mecanizada; y el plano de alivio secundario (superficie rosada) limita el roce lateral de la herramienta con la pieza durante el mecanizado [16, 18].



a) b)

Fig.7 Representación de una herramienta de corte para torno, a) Ángulos en las superficies de la herramienta 3D [16]; b) Superficies de herramienta 3D.

Al observar la Fig.8a desde la vista frontal (plano XY), se aprecia los ángulos θ y μ. El ángulo θ determina la dirección en la que se elimina la viruta. Por otro lado, el ángulo μ ajusta el contacto lateral entre la herramienta y la pieza [18].

En la Fig.8b, desde la vista lateral derecha (plano YZ), se observan los ángulos de incidencia (α), salida (γ) y talla (β). Estos ángulos ayudan a minimizar el rozamiento con la pieza, facilitar la

evacuación de la viruta y proporcionar la robustez necesaria al filo para soportar las fuerzas de corte [16].

Por último, la Fig.8c muestra la herramienta desde la vista superior (plano XZ), donde se observan los ángulos λ, ε y ρ. El ángulo λ complementa el ángulo de posición principal, ayudando a definir la interacción del filo con zonas específicas de la pieza a mecanizar. El ángulo ε complementa al ángulo de talla, ofreciendo un respaldo al filo frente a las fuerzas de corte cuando su valor es mayor. El ángulo ρ determina la orientación principal del filo respecto a la pieza [18, 19].

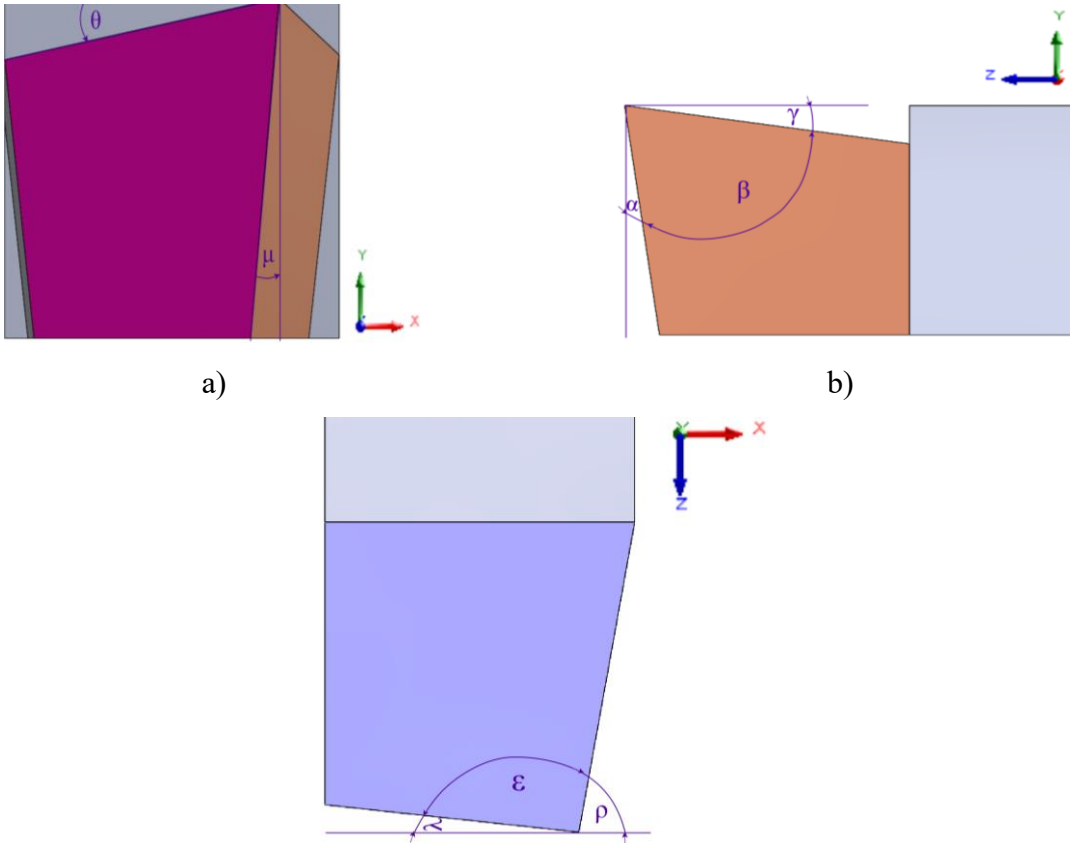


Fig.8 Ángulos de buril, a) Vista frontal; b) Vista lateral; c) Vista superior.

Donde

θ Ángulo de inclinación. γ Ángulo de salida o ataque.

μ	Ángulo de incidencia lateral.	ρ	Ángulo de posición principal.
α	Ángulo libre o incidencia.	ε	Ángulo de resistencia.
β	Ángulo de talla o filo.	λ	Ángulo secundario de posición.

Un aspecto que complementa la geometría de los planos y ángulos es el valor y signo del ángulo de salida o ángulo de ataque (γ), que puede ser positivo o negativo, como se observa en la Fig.9. Cuando es positivo (γ > 0), facilita la salida de la viruta, disminuye las fuerzas de corte y se utiliza comúnmente en materiales dúctiles. Generalmente alcanza hasta 30°, pudiendo llegar a 40° en el caso de aleaciones ligeras. Por otro lado, cuando el ángulo es negativo (γ < 0), se emplea en materiales frágiles, donde se requiere mayor robustez en el filo, y suele estar desde -10° [16].

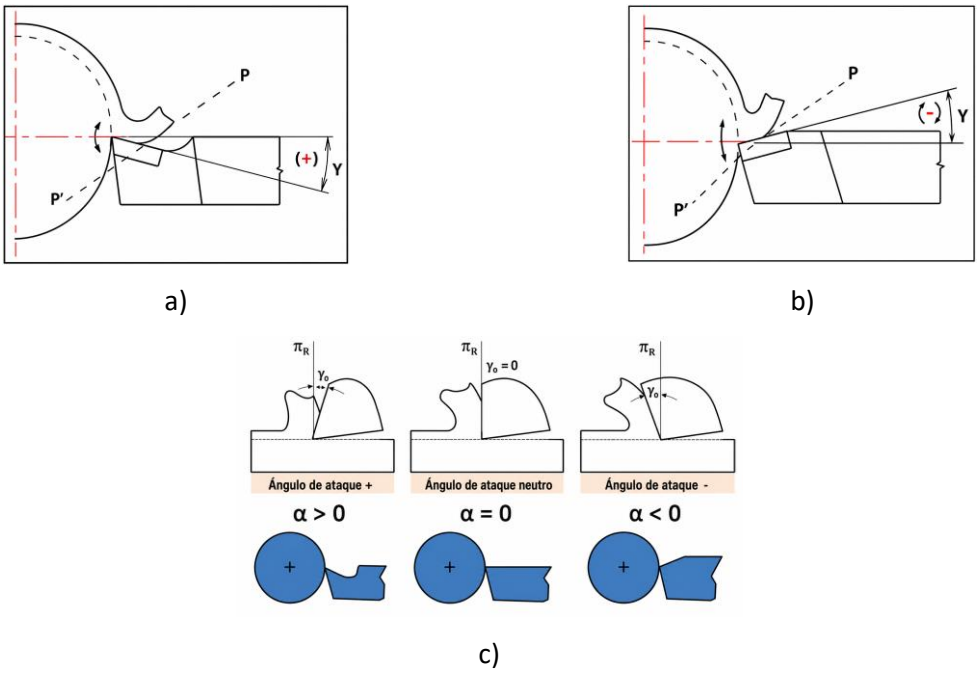


Fig.9 Ángulos de desprendimiento, a) Positivo; b) Negativo; c) ángulos conjuntos [16, 20].

Asimismo, los valores de γ también dependen del material de la herramienta. Por ejemplo, las herramientas de acero rápido (HSS) suelen fabricarse con ángulos positivos, normalmente entre 5° y 20°, aprovechando su resistencia y tenacidad. En cambio, los materiales más duros, como carburos cementados y cerámicas, requieren ángulos negativos o ligeramente positivos para que la

carga principal actúe por compresión, aprovechando su elevada resistencia a la compresión. Así, los carburos cementados se emplean con ángulos de -5° a 10°, mientras que los cerámicos varían entre -5° y -15°. Además, los ángulos de incidencia suelen reducirse a valores mínimos (aprox. 5°) para brindar mayor soporte al filo [21, 22].

De esta manera, estos ángulos y superficies indicadas se repiten en la mayoría de las herramientas de corte empleadas en los diferentes procesos de manufactura. Por ello, la geometría de una herramienta de corte se determina a partir de tres factores: el material de la pieza a mecanizar, el material de la herramienta y el proceso de mecanizado a realizar. La adecuada selección de estos parámetros garantiza un balance entre la capacidad de corte, la correcta evacuación de la viruta, la calidad del acabado superficial y la vida útil de la herramienta [16, 21].

En cuanto a la forma constructiva, las herramientas de HSS se fabrican talladas en una espiga sólida, como se puede apreciar en la Fig.10a [21]. Estos buriles, que se comercializan en forma de prismas rectangulares para ser afilados, se especifican principalmente por el tamaño de la base, la altura y la longitud [16]. Para materiales más duros se recurre al uso de insertos, ya sea soldados (véase Fig.10b) o fijados mecánicamente en un portaherramientas, como se observa en la Fig.10c. La fijación mecánica resulta especialmente ventajosa, ya que cada inserto dispone de varios filos cortantes: cuando uno se desgasta, puede girarse para usar el siguiente, y una vez agotados todos los filos, se reemplaza únicamente el inserto sin necesidad de cambiar todo el cuerpo de la herramienta, lo cual reduce costos y prolonga la vida útil del portaherramientas [21].

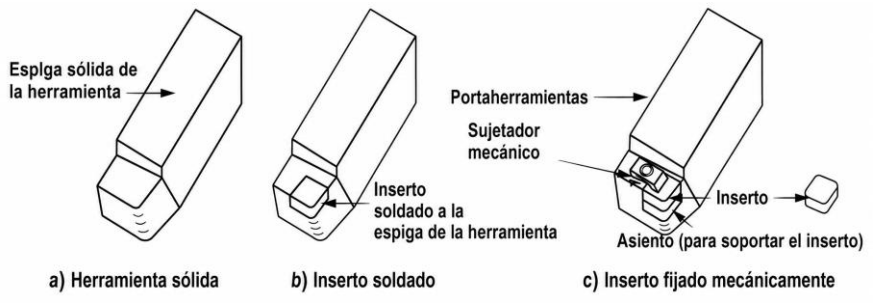


Fig.10 Comparación de herramienta de corte de torno [21].

Cabe destacar, además de los buriles y los insertos, los porta-insertos poseen su propia codificación, pues no todos los portaherramientas son compatibles con cualquier inserto. En el caso de los insertos de carburo cementado (carburos metálicos o metales duros), la norma ISO 1832 define un código alfanumérico que describe la forma, el ángulo de incidencia, la tolerancia, el sistema de sujeción, el rompevirutas, el tamaño del filo, el espesor y el radio de punta, lo que permite seleccionar insertos adecuados para operaciones como torneado, fresado, roscado o taladrado.

De manera complementaria, la norma ISO 513 utiliza un código de colores visible en las cajas de insertos para indicar los materiales que pueden ser mecanizados con cada tipo de herramienta, facilitando la identificación rápida de aplicaciones recomendadas (ver Fig.11 y Tabla 2.1) [16]. No obstante, es importante tener presente que la clasificación ISO no contempla algunas familias especiales como cerámicas, coronite, nitruro de boro cúbico (CBN) o diamante policristalino sintético (PCD) [23].

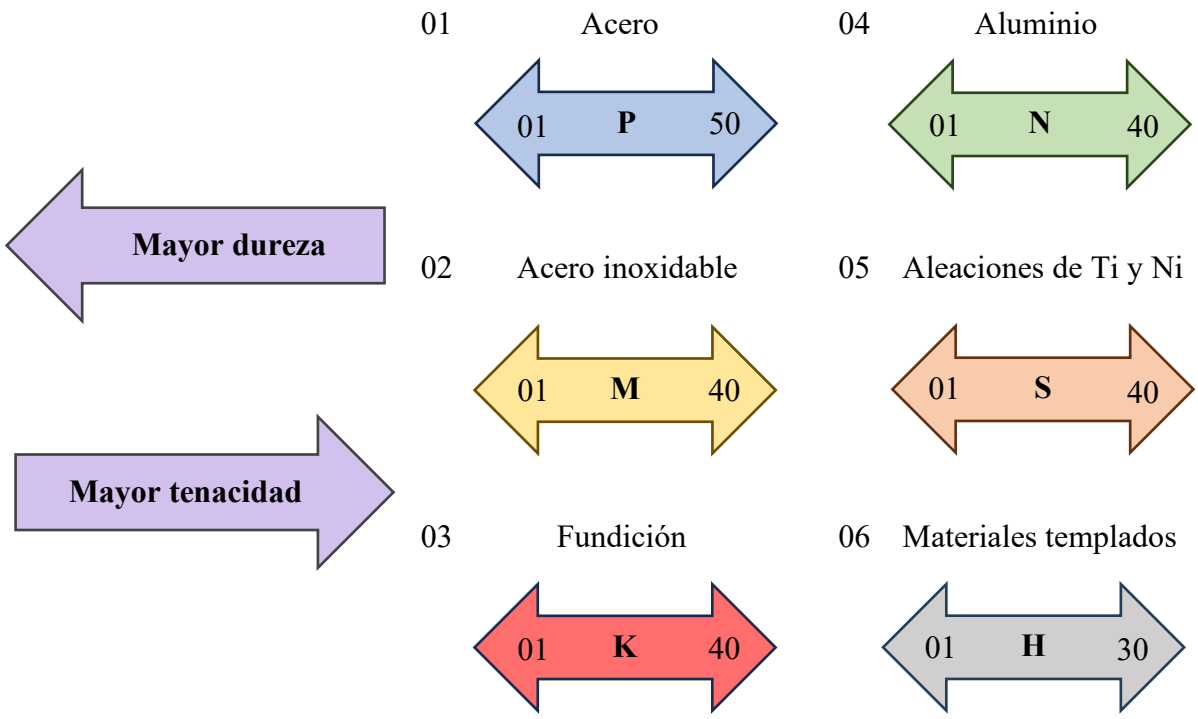


Fig.11 Clasificación ISO 513:2004 de metal duro.

Adaptado de: [16].

En cuanto a la interpretación de la Fig.11, los números del 01 al 06 situado en la esquina superior sirven únicamente para enumerar el orden de los grupos de materiales. Por otra parte, la aplicación específica se determina mediante las flechas dentro de cada grupo, las cuales parten desde el valor 1 hacia los rangos de 30, 40 y 50. En este sentido, se relaciona con la Tabla 2.1, ya que indica una transición de propiedades: a menor número, el inserto posee mayor dureza y menor tenacidad, siendo apto para operaciones de acabado con altas velocidades de corte y pequeñas secciones de viruta [21, 23].

En contraste, conforme aumenta el número hacia los rangos mencionados, la tenacidad se incrementa mientras que la dureza disminuye. Por consiguiente, estos valores más altos identifican herramientas diseñadas para operaciones de desbaste o maquinado burdo, que requieren velocidades más lentas y admiten secciones de viruta mayores [21, 23]. La tabla se presenta en el

Anexo A. Cabe señalar que este sistema de clasificación también puede utilizarse para indicar aplicaciones para cermets y carburos recubiertos [21].

En cuanto a la geometría práctica de los insertos, estos se fabrican en múltiples formas (cuadrada, triangular, redonda, rombo, etc.), como se puede apreciar en la Fig.12. Las formas con mayor ángulo de punta o mayor radio de nariz (por ejemplo, insertos redondos) son más resistentes y menos propensas a romperse, aunque requieren más potencia y pueden aumentar la vibración; las formas con más filos aprovechables (cuadradas, triangulares, rombos) ofrecen ventajas económicas, ya que cada filo del inserto puede ser utilizado sucesivamente al girarlo o indexarlo, antes de reemplazarlo por completo [21].

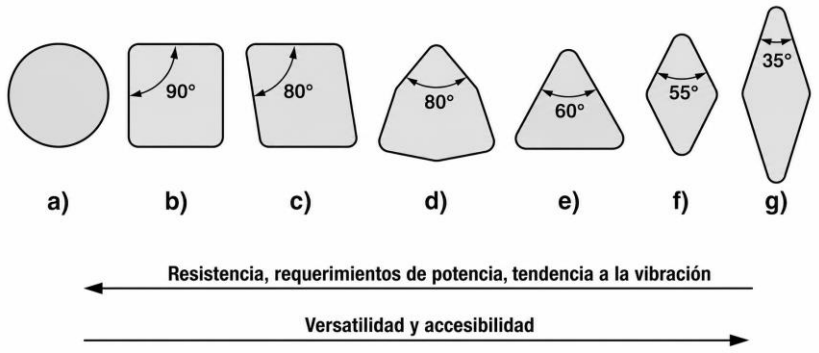


Fig.12 Formas comunes de insertos y su relación con resistencia, potencia, vibración y versatilidad, a) Redondos; b) Cuadrados; c) Rombo; d) Hexágono; e) Triángulo equilátero; f) Rombo con dos ángulos de 55°; g) Rombo con dos ángulos de 35°[21].

Dicho eso, la influencia de estas geometrías se puede apreciar en procesos de mecanizado como el torneado, que se utiliza para dar forma a superficies de revolución [24]. En este método, la pieza gira en su propio eje mientras la herramienta avanza longitudinalmente, como se observa en la Fig.13.

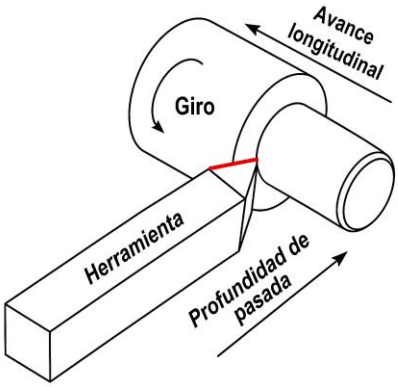
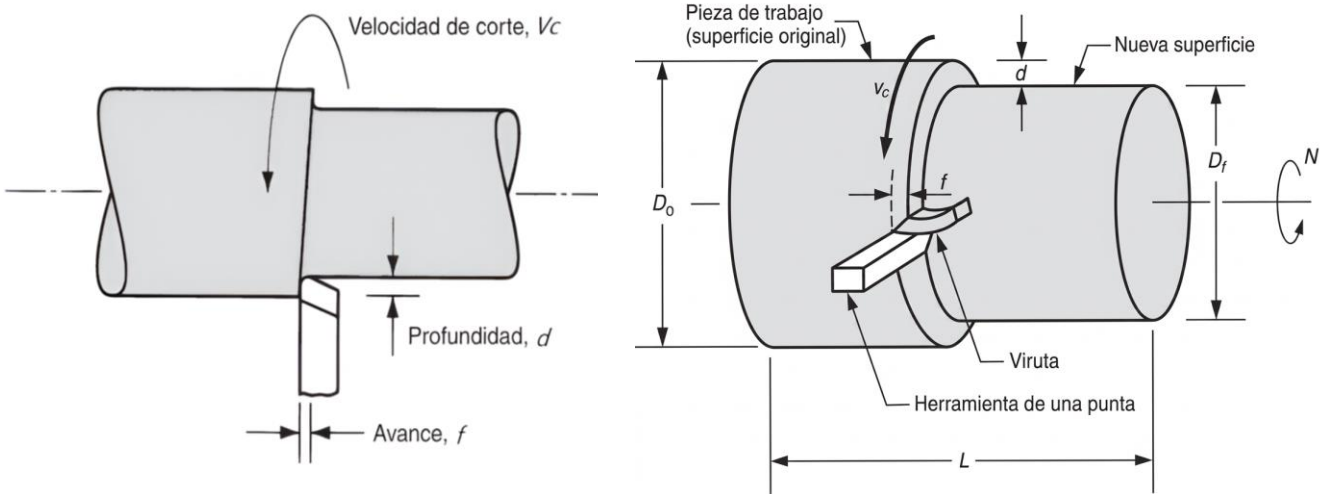


Fig.13 Proceso de torneado.

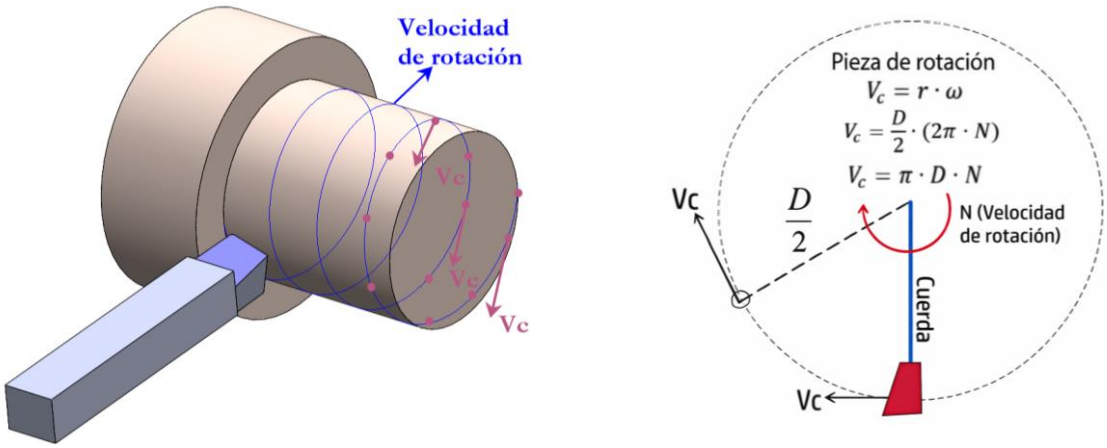
Adaptado de: [16].

Además, en el mecanizado no solo se considera la geometría de la herramienta, sino también los parámetros de corte representados en la Fig.14. La velocidad de corte (V_c) representa la distancia recorrida por el filo de la herramienta sobre la superficie de la pieza. Es decir, corresponde a la velocidad tangencial del filo de corte de la herramienta con respecto a su centro de rotación, por lo que se relaciona directamente con la velocidad angular (w) y el radio (r) de esta (véase Fig.15).



a) b)

Fig.14 Operación de torneado, a) Parámetros de corte; b) Nomenclatura de variables *[21]*.



a) b)

Fig.15 Velocidad de corte, a) Proceso de torneado 3D; b) Proceso de torneado 2D – Adaptado de: [17].

La velocidad de corte depende del material de la pieza, la herramienta de corte, del tipo de operación a realizar. También puede obtenerse de tablas estandarizadas proporcionadas por los fabricantes [16]. Estas tablas se obtienen mediante ensayos experimentales en los que se mantienen constantes variables como el avance, la potencia y la vida útil de la herramienta. Con los resultados obtenidos se determinan las velocidades de corte recomendadas según el tipo de herramienta y el material a mecanizar.

Asimismo, la fórmula (1) permite calcular una estimación para este parámetro [16, 19, 25].

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_o \cdot N}{1000} \qquad (1)$$

Donde

V_c Velocidad de corte (m/min).

D_o Diámetro inicial de la pieza de trabajo (mm).

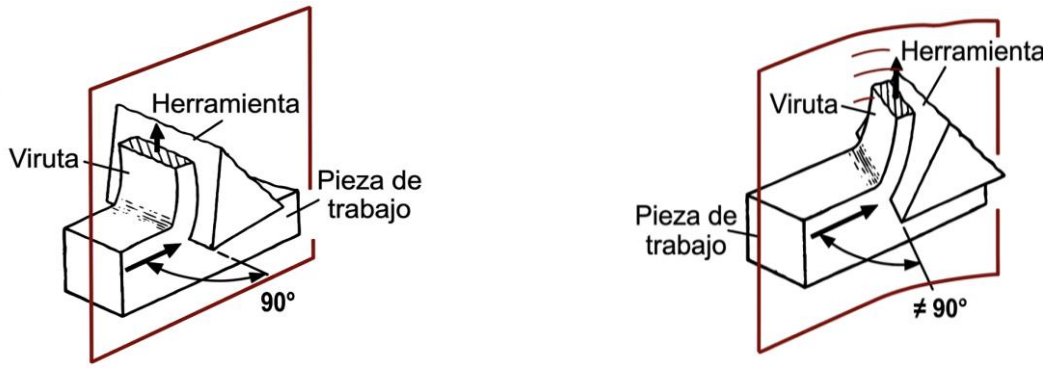
N Velocidad de rotación de la pieza (rpm).

En la operación del torneado, la velocidad de corte se relaciona con la velocidad de rotación de la pieza, como se expresa en la ecuación (2) [19, 21].

$$N = \frac{V_c}{\pi \cdot D_o} \qquad (2)$$

Hasta este punto, se ha descrito cómo la forma de la herramienta y las condiciones de corte influyen en la formación de la viruta. Sin embargo, para comprender en mayor profundidad este fenómeno es necesario adentrarse en la mecánica del corte, que explica cómo interactúan las fuerzas y las velocidades durante el mecanizado.

La acción de corte puede clasificarse en ortogonal u oblicua, como puede apreciarse en la Fig.16. El corte ortogonal, en el que el filo de la herramienta es perpendicular al movimiento de corte, se utiliza frecuentemente en estudios teóricos por su simplicidad, aunque es poco común en la práctica. El corte oblicuo, en cambio, representa la mayoría de operaciones industriales, pues refleja con mayor realismo lo que ocurre en la práctica [17].



a) b)

Fig.16 Tipos de cortes, a) Ortogonal; b) Oblicuo [17].

En el corte ortogonal, se identifican cuatro fuerzas que actúan sobre la viruta. Para mayor entendimiento puede observarse en la Fig.17 [17, 21].

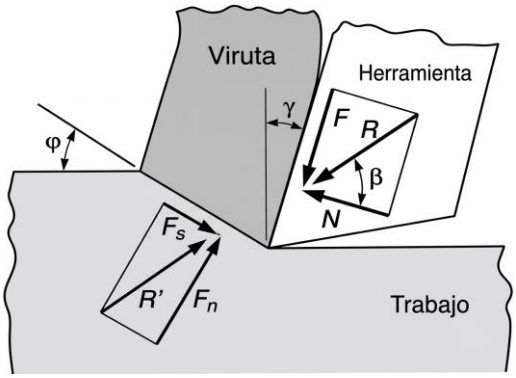


Fig.17 Fuerzas de corte sobre la viruta [21].

- La fuerza de fricción (F), que resiste el desplazamiento de la viruta sobre la cara de la herramienta.
- La fuerza normal a la fricción (N), perpendicular a F, que presiona la viruta contra la herramienta.
- La fuerza cortante (F_s), que actúa en el plano de corte y causa la deformación del material.
- La fuerza normal a la cortante (F_n), que estabiliza dicho plano.

Ahora bien, aunque estas cuatro fuerzas son importantes para el análisis del mecanizado, no pueden medirse directamente durante la operación, ya que sus magnitudes y direcciones varían de manera constante según las condiciones de corte y la geometría de la herramienta [21].

Por este motivo, en la práctica experimental se emplea un dinamómetro, el cual permite medir de forma directa dos componentes principales: la fuerza de corte (F_c) y la fuerza de empuje (F_t). La primera actúa en la dirección de la velocidad de corte, mientras que la segunda es perpendicular a ella y se relaciona con el espesor de la viruta, para tener una mejor idea puede observarse en la Fig.18 [21].

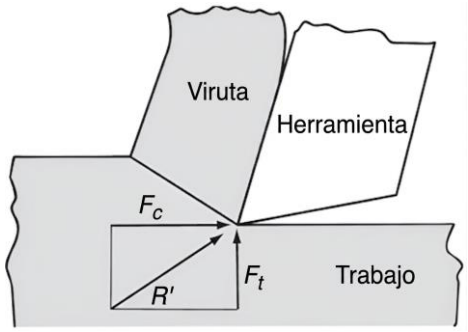


Fig.18 Fuerzas de corte sobre la herramienta [21].

A partir de estas dos fuerzas medidas, es posible determinar el resto de los componentes que intervienen en la formación de la viruta. Utilizando el diagrama de fuerzas de la Fig.19, se obtienen las relaciones trigonométricas desde (3) a (6) [16, 21]:

$$F = F_c \, sen\, \gamma + F_t \, cos\, \gamma \quad (3)$$

$$N = F_c \, cos\, \gamma - F_t \, sen\, \gamma \quad (4)$$

$$F_s = F_c \, cos\, \varphi - F_t \, sen\, \varphi \quad (5)$$

$$F_n = F_c \, sen\, \varphi + F_t \, cos\, \varphi \quad (6)$$

De este modo, aun cuando las fuerzas internas como la fricción y la cizalla no puedan medirse directamente, las mediciones de F_c y F_t permiten, mediante estas relaciones, obtener una descripción completa de las interacciones que tienen lugar en el proceso de mecanizado [16].

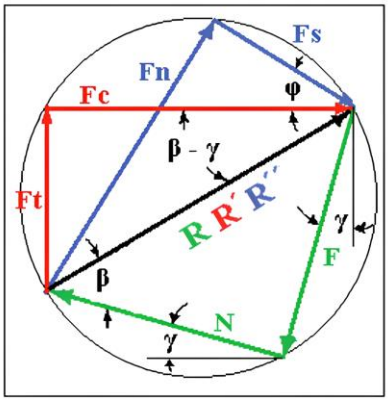


Fig.19 Diagrama de fuerzas [16, 21].

Donde

γ Ángulo de salida o ataque.

β Ángulo de fricción.

φ Ángulo de cizallamiento.

A_s Área del plano de corte [mm^2].

t_0 Espesor de la viruta no cortada [mm].

Con las expresiones (7) y (8) puede definirse el esfuerzo cortante a lo largo del plano de corte [16]:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \qquad (7)$$

$$A_s = \frac{t_0 \cdot d}{sen\ \varphi} \qquad (8)$$

Mientras que el coeficiente de fricción entre viruta y herramienta se obtiene mediante la ecuación (9) [16, 21]:

$$\mu = \frac{F}{N} \qquad (9)$$

O también con la ecuación (10)

$$\mu = \tan\beta \qquad (10)$$

De manera complementaria, el movimiento también puede analizarse desde la cinemática del corte. En el triángulo de velocidades intervienen tres componentes (véase la Fig.20) [17]:

- La velocidad de corte (V_c) corresponde a la velocidad tangencial del filo de la herramienta respecto a la pieza de trabajo.
- La velocidad de deslizamiento de la viruta (V_f) describe el movimiento de la viruta a lo largo de la cara de la herramienta después de formarse, reflejando la fricción y la evacuación del material.
- La velocidad de cizalladura (V_s) es la velocidad a la que ocurre la deformación interna del material en el plano de corte, directamente relacionada con el esfuerzo cortante.

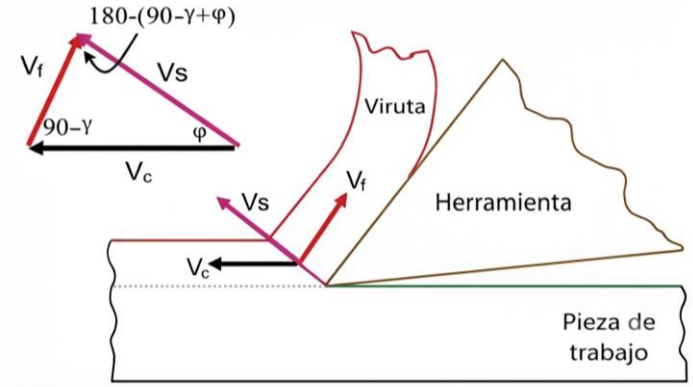


Fig.20 Diagrama de velocidades.

Adaptado de: [17].

Sobre esta base, Eugene Merchant propuso que el ángulo de cizalladura (φ) es aquel que minimiza la energía de corte, y lo expresó en la ecuación (11) [21]:

$$\varphi = 45° + \frac{\gamma}{2} + \frac{\beta}{2} \quad (11)$$

Esta formulación, intenta describir el corte de metales de manera simplificada. Su principal limitación es que considera la resistencia del material como un valor fijo, sin tomar en cuenta que esta puede variar con la velocidad de deformación o el aumento de temperatura durante el proceso. A pesar de estas simplificaciones, sigue siendo un punto de referencia importante para comprender los fundamentos del mecanizado [16].

Por otro lado, la mecánica del corte no puede separarse de la energía que el proceso exige. Entre el espesor inicial t_0 y el espesor de la viruta formada t_c se sitúa la zona primaria de corte, como se puede apreciar de mejor manera en la Fig.21, donde la intensa deformación plástica y las elevadas temperaturas requieren un suministro constante de energía desde la máquina-herramienta [16]. Esta transferencia se cuantifica a través de la potencia de corte (P_c), definida por la expresión (12) [21, 23, 25]:

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad (12)$$

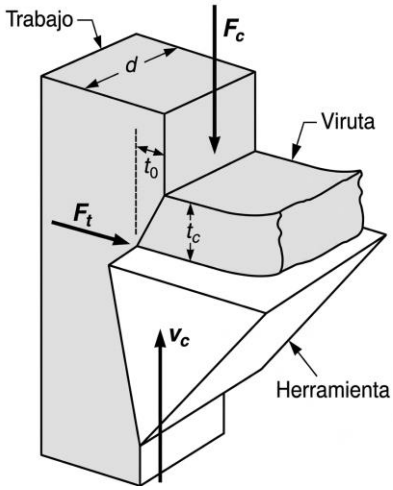


Fig.21 Nomenclatura de corte ortogonal en el torneado [21].

Y a partir de este concepto se introduce la energía especifica de corte (E_s) o también se la conoce como potencia unitaria (P_u) o caballos de fuerza unitarios (HP_u), que se define como la relación entre la potencia necesaria para efectuar la remoción de material y la tasa de remoción de material (MRR) o caudal, de acuerdo con las ecuaciones (13) y (14) [16, 18, 25]

$$E_s = \frac{P_c}{MRR} \tag{13}$$

$$MRR = t_0 \cdot d \cdot V_c \tag{14}$$

Donde al reemplazar la ecuación (12) y (14) en (13) se tiene (15) y (16) [18, 21]:

$$E_s = \frac{F_c \cdot V_c}{t_0 \cdot d \cdot V_c} \tag{15}$$

$$E_s = \frac{F_c}{t_0 \cdot d} \tag{16}$$

El valor de E_s depende del material, de las condiciones de la herramienta y, de manera muy sensible, del espesor de la viruta, pues al reducirse t_0 se incrementa la energía específica, fenómeno conocido como efecto de tamaño [18]. En relación con esto, los valores de E_s y HP_u en la Tabla 2.2, presentada en el Anexo B, se pueden usar para estimar los caballos de fuerza unitarios y la energía, incluso cuando el espesor de la viruta antes del corte (t_0) no es igual a 0,25 mm. En esos casos, se recurre a un factor de corrección, mostrado en la Fig.22, que ajusta los resultados en función de dicho espesor. De este modo, los valores de la tabla deben multiplicarse por el factor correspondiente siempre que (t_0) difiera de 0,25 mm [21].

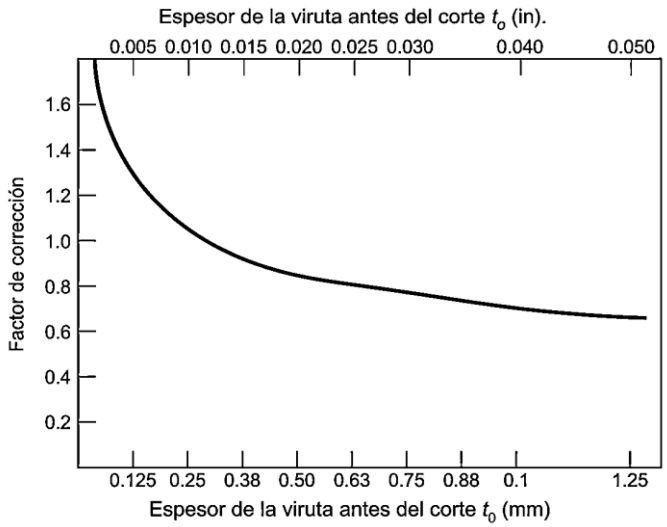


Fig.22 Factor de corrección cuando t_0 son diferentes de 0,25 mm [21].

Es importante destacar que los caballos de fuerza unitarios y la energía específica no dependen únicamente del afilado de la herramienta o del tamaño de la viruta. También influyen otras condiciones de corte, como el ángulo de inclinación, la velocidad de corte y el uso de fluidos. En términos generales, cuando aumenta el ángulo o la velocidad, o cuando se aplica un fluido de corte, tanto E_s como HP_u tienden a reducirse ligeramente (ver Fig.23) [16, 21].

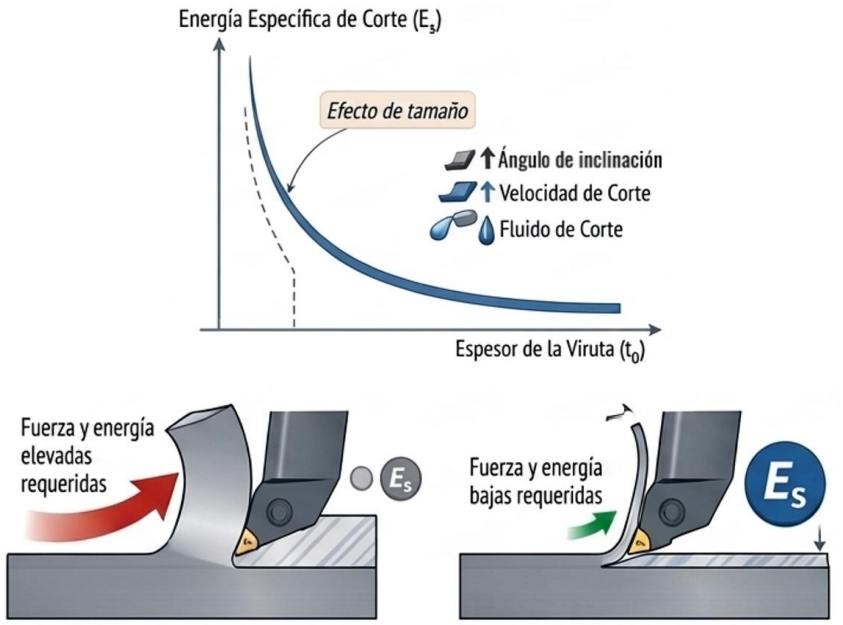


Fig.23 Efecto de tamaño de la viruta y parámetro de corte en la energía específica de corte.

La forma en que se distribuye la energía de corte varía con la velocidad. A bajas velocidades, una parte considerable de la energía se transfiere a la herramienta. Sin embargo, conforme la velocidad aumenta, la viruta se desplaza más rápido y se lleva consigo la mayor parte del calor generado, lo que disminuye la fracción absorbida por la herramienta [16, 21], como lo indica la

Fig.***24***.

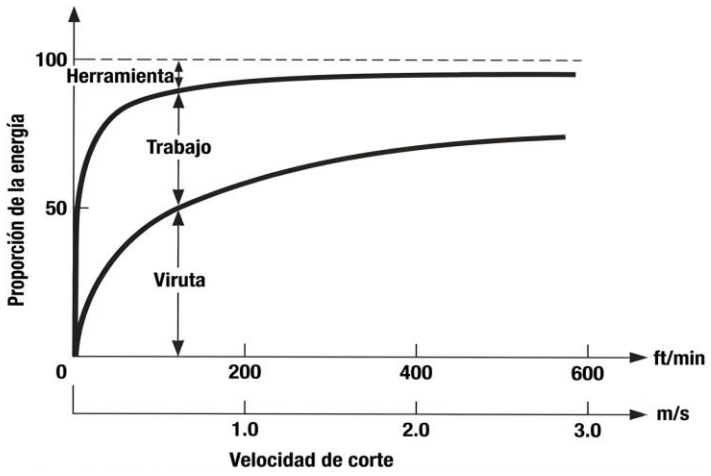


Fig.24 Distribución de energía total de corte en función de la velocidad de corte [21].

Los resultados experimentales confirman este comportamiento. En concreto, muestran que la energía específica de corte es elevada cuando la velocidad es baja, pero disminuye progresivamente a medida que esta aumenta, hasta estabilizarse en un valor prácticamente constante, como se aprecia en la Fig.25 [18].

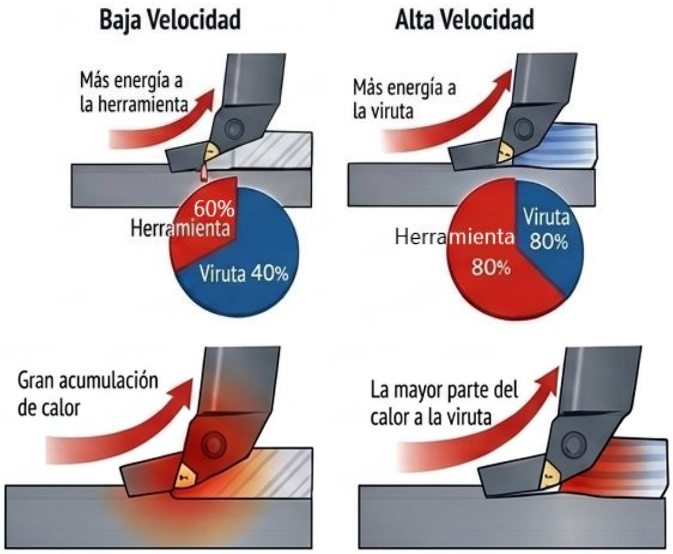


Fig.25 Efecto de la velocidad de corte en la distribución de la energía específica de corte.

Comprender el desgaste de las herramientas de corte resulta importante, ya que está estrechamente relacionado con la fuerza de corte y las condiciones de mecanizado. Este se define como la pérdida progresiva de material causada por la fricción y las altas temperaturas generadas durante el proceso, lo cual modifica la geometría del filo y reduce su capacidad de corte hasta comprometer su funcionamiento efectivo [16, 18]. Es decir, la herramienta está expuesta a diferentes condiciones. Por un lado, las fuerzas de corte elevadas pueden generar fracturas inmediatas, y por otro, las altas temperaturas pueden ablandar el material, deformar el filo o provocar su falla. Sin embargo, incluso cuando estas situaciones no causan un daño repentino, la interacción constante entre la herramienta, la pieza y la viruta provoca un desgaste progresivo que, con el tiempo, termina deteriorando el filo y disminuyendo su rendimiento de corte [21].

Los mecanismos que originan el desgaste son principalmente tres: adhesión, abrasión y difusión. En primer lugar, la adhesión ocurre cuando, debido a la alta presión y temperatura en la zona de corte, se forman microsoldaduras entre la viruta y la superficie de la herramienta; al deslizarse la viruta, estas uniones se rompen arrastrando pequeñas partículas del filo, como se observa en la Fig.26a. En segundo lugar, la abrasión se presenta cuando el material de trabajo contiene partículas duras que rayan la superficie de la herramienta, desprendiendo fragmentos microscópicos (véase la Fig.26b). La difusión tiene lugar a temperaturas elevadas, cuando los átomos de los elementos de aleación de la herramienta migran hacia la viruta, empobreciendo la superficie y debilitando su estructura, como lo indica la Fig.26c [16, 18, 21].

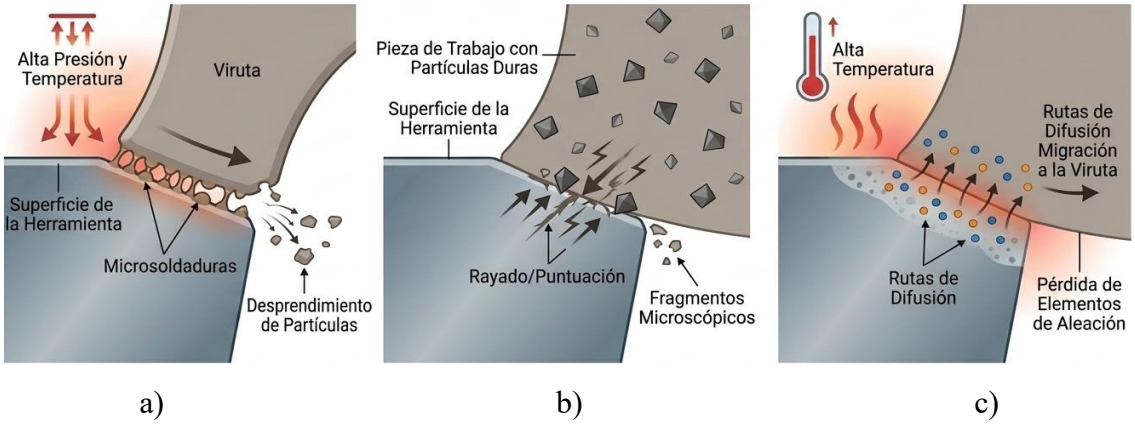


Fig.26 Principales mecanismos de desgaste en herramientas de corte, a) Adhesión; b) Abrasión; c) Difusión.

A estos mecanismos se suman otros fenómenos que contribuyen al deterioro, como la oxidación química, que resulta de las reacciones a altas temperaturas entre la herramienta y la viruta, y la deformación plástica, que se produce cuando las fuerzas de corte deforman el filo, haciéndolo más vulnerable a la abrasión [16]. En consecuencia, la velocidad de corte, la temperatura y la afinidad entre los materiales influyen directamente en la rapidez con que avanza el desgaste [21]. El desgaste gradual se concentra principalmente en dos áreas de la herramienta: el flanco y la cara de desprendimiento (véase Fig.27) [21, 26]. En el flanco, la fricción con la superficie mecanizada

provoca un desgaste del filo, que reduce progresivamente su capacidad de corte y afecta la precisión dimensional de la pieza.

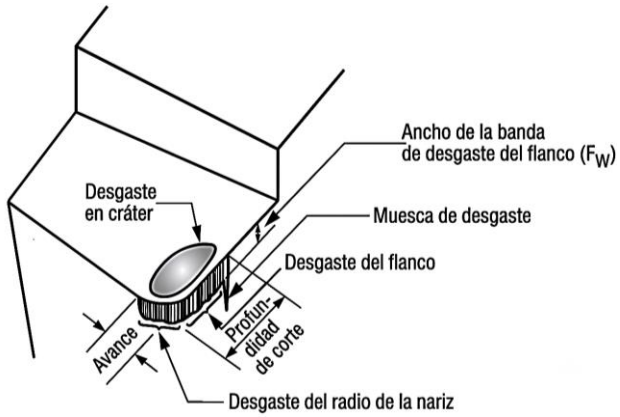


Fig.27 Tipos de desgaste en herramienta de torneado [21].

Para ampliar información sobre este tema, se recomienda consultar la norma ANSI/ASME B94.55M o la ISO 3685:1993 (segunda edición), ambas enfocadas *en "tool-life testing with single-point turning tools"* [16, 27]. Cabe señalar que, además del desgaste gradual, la herramienta puede experimentar fallas repentinas por fractura o por ablandamiento debido a altas temperaturas [21]; sin embargo, estos modos no son el foco de este análisis.

A medida que avanza el maquinado, el desgaste de la herramienta evoluciona en tres etapas sucesivas. En primer lugar, se produce un rompimiento inicial, en el que el borde nuevo pierde material rápidamente al comenzar a cortar. Luego, se desarrolla una etapa estable, donde el desgaste progresa de manera lenta y uniforme, manteniendo una velocidad de deterioro casi constante. Posteriormente, se alcanza la región de falla, en la cual el desgaste se acelera bruscamente por el incremento de la temperatura y la pérdida de dureza del material, lo que marca el fin de la vida útil de la herramienta [21], esto se puede apreciar de mejor manera en la Fig.28.

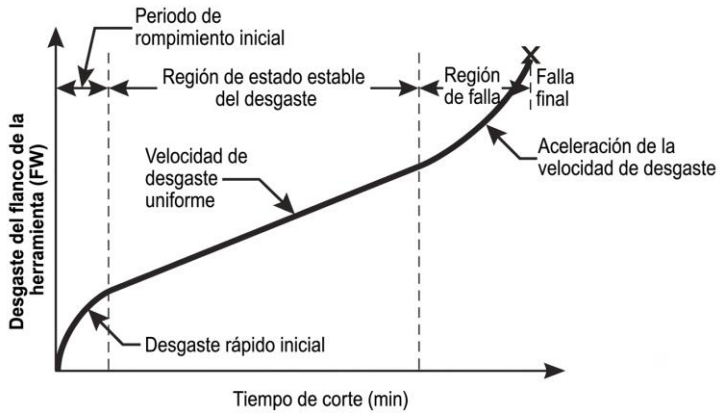


Fig.28 Desgaste de flanco y cráter de la herramienta en función del tiempo de corte [16, 21].

Por ello, la Ecuación de Taylor permite cuantificar cómo la velocidad de corte influye en la vida útil de la herramienta, considerando únicamente la etapa de desgaste estable. Según la ecuación (17), esta relación puede calcularse, aunque se determina que no es dimensionalmente homogénea, razón por la cual se introduce el término adicional mostrado en la ecuación (18) [16, 21, 26].

$$V_c \cdot T^n = C \tag{17}$$

$$V_c \cdot T^n = C(T_{ref})^n \tag{18}$$

Donde

V_c Velocidad de corte [m/min].

T Vida de la herramienta [min].

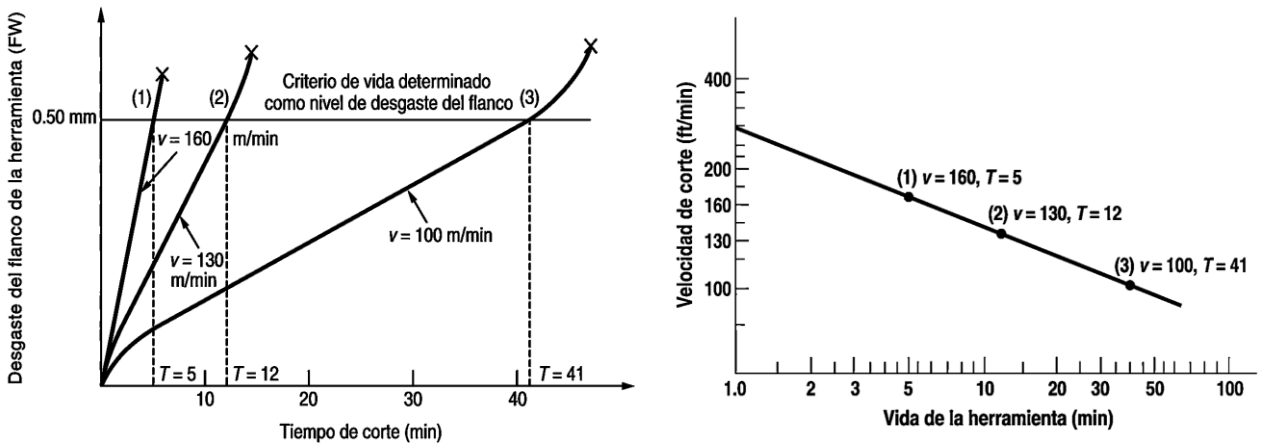
n, C Constantes que dependen del avance, de la profundidad de corte, del material de corte, del material de la herramienta y del criterio usado para la vida de la herramienta.

T_{ref} Constante de homogenización, la cual se toma como 1 min.

Asimismo, esta relación puede expresarse mediante la ecuación (19), lo que permite estimar la vida útil de la herramienta T [16]. Los valores de C y n pueden consultarse en la Tabla 2.3, presentada en el Anexo B, donde se presentan para materiales de herramientas de corte comúnmente usados [26].

$$T = \left(\frac{C}{V_c}\right)^{1/n} \qquad (19)$$

Además, como se evidencia en la Fig.29, al aumentar la velocidad de corte, la herramienta se desgasta más rápido y su vida útil disminuye, información relevante para planificar su uso de manera eficiente durante los procesos de producción [21].



a) b)

Fig.29 Criterio de vida de la herramienta, a) Desgaste del flanco a diferentes velocidades; b) Escala logaritmo-logaritmo [21].

En la práctica, determinar la vida útil de la herramienta mediante la medición directa del desgaste no siempre es viable. Por ello, en producción se aplican diversos criterios prácticos de reemplazo, tales como la observación visual del borde, la prueba al tacto, los cambios en el sonido del corte,

la alteración del acabado superficial, el aumento del consumo de potencia, el conteo de piezas mecanizadas o el tiempo acumulado de corte. Estos métodos permiten identificar el momento adecuado para sustituir la herramienta antes de que alcance la región de falla y comprometa la calidad del proceso [16].

En complemento al proceso de torneado, otro de los métodos del mecanizado por arranque de viruta es el fresado, empleado ampliamente para la generación de superficies planas, ranuras o perfiles complejos. A diferencia del torneado, en el fresado la herramienta realiza un movimiento rotativo, mientras que el desplazamiento relativo entre herramienta y pieza puede lograrse ya sea por el avance de la mesa o por el movimiento de los ejes de la máquina (véase Fig.30). De esta manera, se obtiene una gran flexibilidad en la ejecución del corte [18, 26].

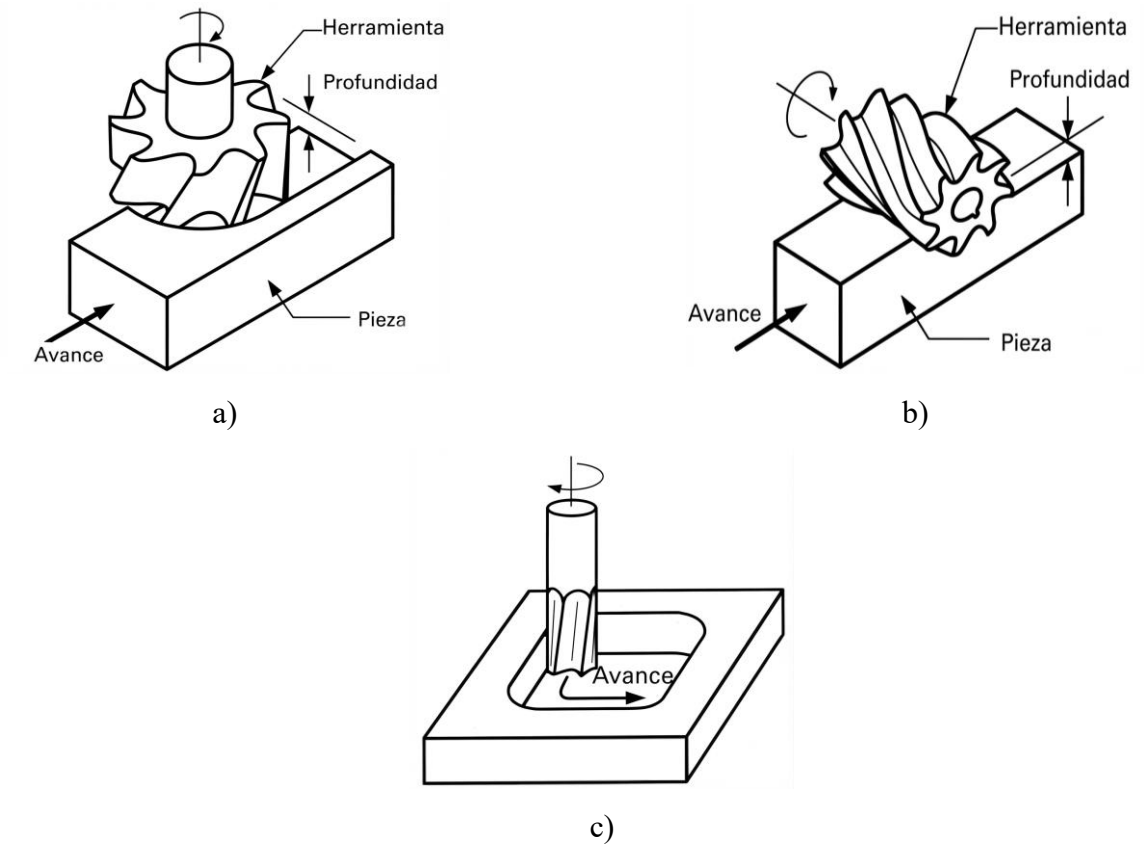
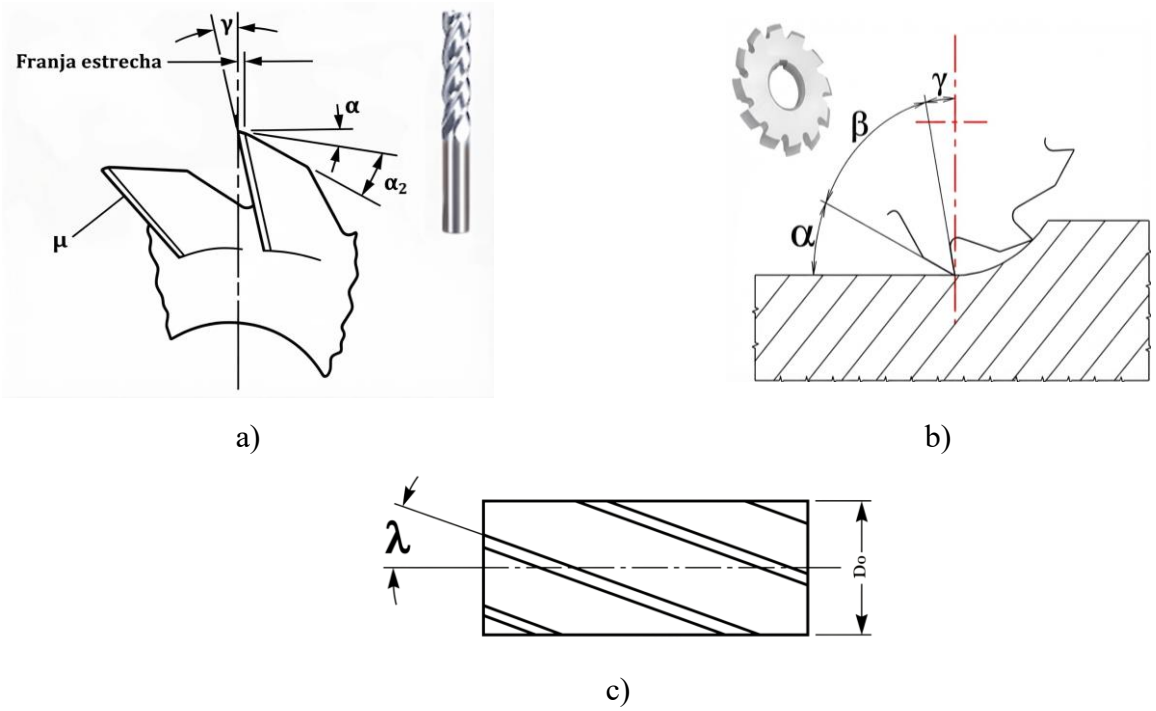


Fig.30 Proceso de fresado, a) Fresado frontal; b) Fresado periférico; c) Fresado terminal de cavidades [21].

En cuanto a la geometría de la herramienta de fresado, esta comparte el mismo principio funcional que la del torneado, ya que los ángulos determinan la manera en que se corta, evacúa la viruta y se reduce el desgaste del filo. Tal como se aprecia en la Fig.31, el ángulo de incidencia (α) evita el roce entre la herramienta y la superficie mecanizada, mientras que el ángulo de salida (γ) facilita la evacuación de la viruta al disminuir la fricción. Además, el ángulo de talla (β) proporciona la resistencia necesaria al filo para soportar los esfuerzos de corte. El ángulo de incidencia secundario (α_2) cumple una función semejante al principal, ya que previene el contacto lateral con la superficie acabada. El ángulo de inclinación (μ) define la orientación lateral del filo respecto al plano de trabajo, mientras que el ángulo de inclinación respecto al eje (λ) asegura que el contacto entre el diente y la pieza sea progresivo [16, 19].



a) b)

c)

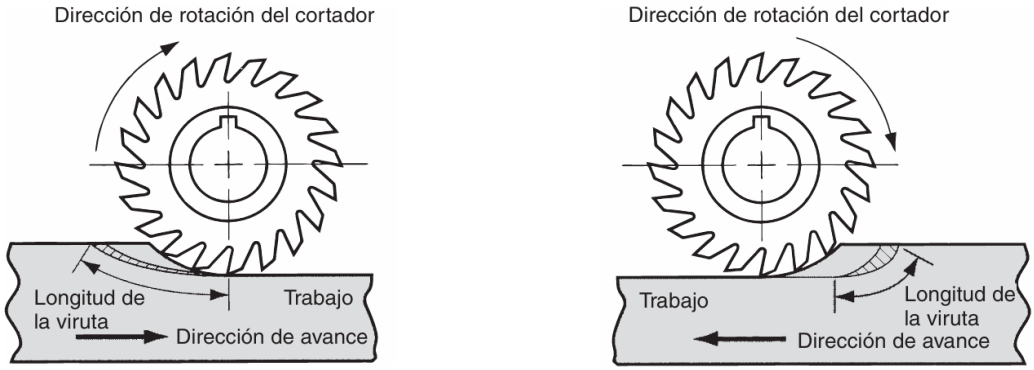
Fig.31 Ángulos de la herramienta de corte de fresadora, a) Fresa de vástago; b) Fresa modular (vista lateral); c) Fresa modular (vista frontal) [16, 19].

Es importante recordar que la geometría de una herramienta de corte se define a partir de tres factores: el material de la pieza a mecanizar, el material de la herramienta y el proceso de

mecanizado a realizar [16, 21]. Asimismo, esta geometría puede variar según el método de fresado empleado, ya sea en concordancia o en oposición. La adecuada selección de estos parámetros permite lograr un equilibrio entre la capacidad de corte, la correcta evacuación de la viruta, la calidad del acabado superficial y la vida útil de la herramienta [16, 21].

Para entender esto, es necesario diferenciar cómo la fresa interactúa con el material. En el fresado ascendente (también llamado convencional o en oposición), como se aprecia en la Fig.32a, la herramienta gira en sentido contrario al avance, obligando al diente a cortar 'contra' la pieza. En este caso, la viruta empieza siendo muy fina y aumenta su espesor gradualmente, debido a esto se emplea para desbastes profundos, pero demanda una sujeción muy firme porque la fuerza tiende a levantar la pieza [18, 21, 26].

En cambio, en el fresado descendente (o en concordancia), la fresa gira en el mismo sentido que el avance (ver Fig.32b); aquí el diente ataca con el espesor máximo de viruta y lo va reduciendo. Esto conlleva varias ventajas operativas: la longitud de la viruta es menor, se reduce el tiempo de trabajo por volumen de material cortado y la herramienta sufre menos, lo que incrementa su vida útil y mejora el acabado superficial. Sin embargo, al ser un proceso más rápido, se produce un golpe al entrar en contacto con el material, lo cual exige prestar atención a la resistencia de la herramienta [18, 21, 26].



a) b)

Fig.32 Métodos de fresado, a) Fresado ascendente; b) Fresado descendente [21].

Por esta razón, se han considerado las Tabla 2.4 a Tabla 2.7, presentadas en el Anexo C, donde se presentan los valores recomendados de los ángulos de la herramienta en función del material de la pieza de trabajo y del método de fresado utilizado.

A partir de estas consideraciones, y en relación con el tipo de herramienta de fresado, estas se presentan comercialmente en diversas configuraciones, de manera semejante a los buriles. En primer lugar, se encuentran las fresas convencionales o sólidas, en las cuales el vástago y la parte activa están fabricados del mismo material, generalmente acero rápido (HSS), para apreciar de mejor manera ver Fig.33a, b y d [16].

Por otro lado, existen las fresas con recubrimiento de carburo metálico (Widia) o de metal duro, donde únicamente la zona activa cuenta con dicho recubrimiento, mientras que el vástago es de acero HSS (véase Fig.33c). Esta configuración permite mejorar la resistencia al desgaste sin incrementar considerablemente el costo de la herramienta [16].

Se distinguen las fresas ensambladas, compuestas por un porta-inserto y un inserto intercambiable, normalmente fijado mediante tornillos, como se observa en la Fig.33e. Este diseño posibilita el

reemplazo del filo cortante sin necesidad de sustituir toda la herramienta, optimizando tanto el tiempo de mantenimiento como los costos operativos [16].

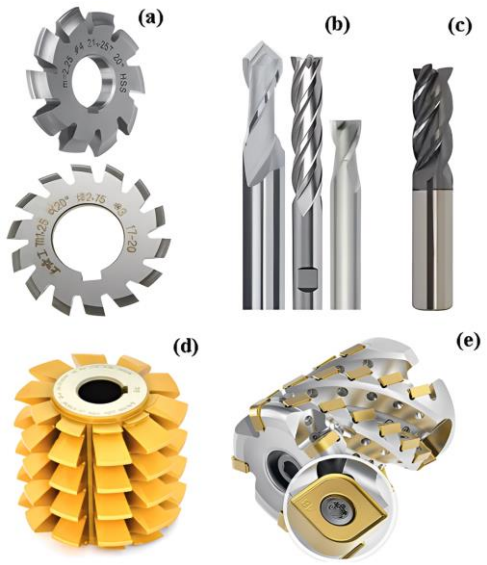


Fig.33 Herramientas de corte de fresado, a) Fresas modulares HSS; b) Fresados de vástago HSS; c) Fresa de vástago con recubrimiento de carburo metálico; d) Fresa madre; e) Fresa cilíndrica de insertos intercambiables [16].

Asimismo, en la Fig.34 se puede observar la forma obtenida por algunos tipos de fresas ampliamente utilizadas, permitiendo identificar las geometrías características generadas durante el mecanizado, destacadas en color rojo.

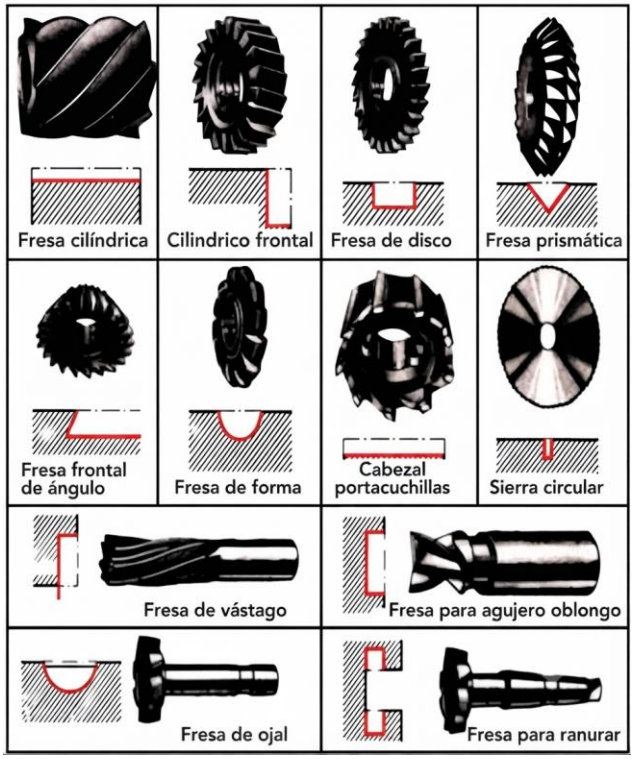


Fig.34 Formas características de distintos tipos de fresas [16].

Cabe aclarar que, al igual que en el caso del torneado, no se profundiza en la gran variedad de materiales disponibles para las herramientas de fresado, dado que este aspecto no constituye el foco central de la presente investigación. No obstante, se hace referencia a las normas ISO 1832 e ISO 513 (ver Tabla 2.1 y Fig.11), que permiten identificar y clasificar adecuadamente los insertos empleados en operaciones como el fresado, asegurando su correcta selección y aplicación.

Asimismo, se recomienda velocidades de corte y avances para distintos materiales de ingeniería, cuyos valores pueden observarse en la Tabla 2.8, presentada en el Anexo C. Estos parámetros dependen del material de la pieza, de la herramienta de corte y del tipo de operación a realizar [16]. Cabe señalar que el límite inferior de los rangos presentados corresponde generalmente a grados o materiales de mayor dureza, mientras que el límite superior se relaciona con grados más blandos del material especificado. De igual manera, los datos tabulados fueron establecidos para fresas con diámetros exteriores comprendidos entre 12 mm y 40 mm; sin embargo, para herramientas de

mayor diámetro pueden emplearse velocidades de corte más elevadas. Asimismo, cuando se utilizan fresas de carburo, las velocidades recomendadas pueden incluso duplicarse respecto a las empleadas con herramientas de acero rápido (HSS) [26].

Por lo general, estas tablas son obtenidas mediante ensayos experimentales en los cuales se mantienen constantes ciertos parámetros, como el avance, la potencia de corte y la vida útil de la herramienta, permitiendo determinar velocidades de corte óptimas según el tipo de herramienta y el material a mecanizar.

A partir de ello, resulta pertinente analizar los parámetros de corte que intervienen en este proceso, ya que determinan en gran medida la eficiencia del mecanizado y la calidad final de la superficie obtenida. En el caso del fresado, los parámetros de corte se definen considerando las características propias de este proceso de mecanizado. No obstante, las Ecuaciones (1) y (2) continúan siendo válidas, con la particularidad de que el término D_o ahora corresponde al diámetro de la fresa, expresado en milímetros [mm] [17, 24].

Por otro lado, el avance en fresado suele expresarse en función del avance por diente cortante, también denominado carga de viruta, que representa la cantidad de material retirada por cada filo de corte en una revolución. A partir de este valor, es posible determinar la velocidad de avance, tomando en cuenta tanto la velocidad del husillo como el número de dientes de la herramienta, tal como se establece en la Ecuación (20) [21, 25, 26].

$$f_r = N \cdot n_t \cdot f \qquad (20)$$

Donde

f_r Avance lineal o velocidad de avance (mm/min) .

N Velocidad de giro del husillo (rpm).

n_t Número de dientes en la fresa.

f Avance $(mm/diente)$.

La Fig.35 muestra los principales parámetros de corte empleados en el fresado.

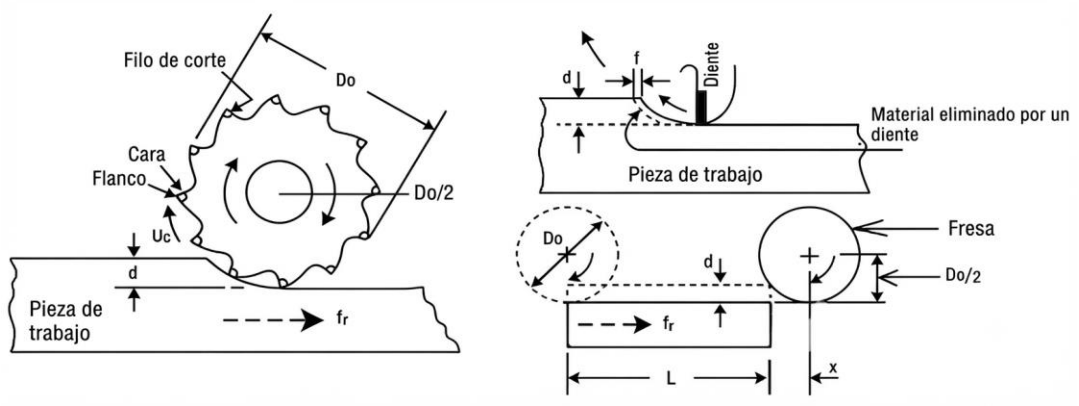


Fig.35 Parámetros de corte de fresado periférico.

Adaptado de: [26].

Donde

x Distancia adicional de entrada/salida (mm).

L Longitud de mecanizado (mm).

La tasa de remoción de material (MRR) con unidades (mm^3/min) se obtiene multiplicando el área de la sección transversal del corte por la velocidad de avance. De esta manera, en una operación de planeado donde la herramienta corta una pieza con un ancho w y una profundidad d, la MRR se calcula según la Ecuación (21), la cual indica la cantidad de material eliminada por unidad de tiempo [25, 26].

$$MRR = w \cdot d \cdot f_r \qquad (21)$$

Posteriormente, se determina el tiempo de fresado de una pieza de trabajo de longitud L, considerando tanto la distancia a mecanizar como la distancia de aproximación (x) requerida para que la fresa logre un contacto completo con el material [21].

En primer lugar, se analiza el caso del fresado periférico, como se observó en la Fig.35. Para calcular el tiempo de ejecución de esta operación, es necesario determinar la distancia de aproximación (x), la cual corresponde al recorrido que realiza la herramienta hasta alcanzar la velocidad de corte completa. Esta distancia se obtiene mediante la ecuación (22) [21, 26].

$$x = \sqrt{d(D_o - d)} \tag{22}$$

Con base en ello, el tiempo de corte para fresar la pieza de trabajo en una pasada T_c, se calcula mediante la ecuación (23) [26].

$$T_c = \frac{L + x}{f_r} \tag{23}$$

De manera similar, el tiempo de corte para una pasada en el fresado de frontal se determina mediante la ecuación (24) [26].

$$T_c = \frac{L + L_o + x}{f_r} \tag{24}$$

En esta expresión, L representa la longitud de corte (mm), (x) longitud de aproximación (mm), L_o longitud de sobrecarrera (mm) y f_r la velocidad de avance (mm/min), tal como se indica en la

Fig.36. En dicha figura se muestra que la longitud de aproximación (x) depende de la posición de fresado del cortador, es decir, de si este se encuentra centrado sobre la pieza de trabajo o desplazado hacia uno de sus lados [21, 26].

Para el fresado frontal, el primer caso se presenta cuando la fresa está centrada sobre la pieza de trabajo rectangular. En la Fig.36b se aprecia que tanto la distancia de aproximación L_A como la distancia adicional L_o son iguales a la mitad del diámetro del cortador. Bajo esta condición ($w > D/2$), la longitud de aproximación (x) se determina mediante la ecuación (25) [17, 25, 26].

$$x = L_o = \frac{D_o}{2} \quad (25)$$

El segundo caso ocurre cuando la fresa sobresale hacia uno de los lados de la pieza, como se muestra en la Fig.36c. En esta condición, la longitud de aproximación depende del ancho de la franja cortada w_s. Por lo tanto, cuando la cortadora está desplazada hacia un lado de la pieza ($w_s < D/2$), la longitud de aproximación (x) se obtiene mediante la expresión correspondiente (26) [21, 26].

$$x = L_o = \sqrt{w_s(D_o - w_s)} \quad (26)$$

El tiempo de maquinado para cada uno de estos casos se calcula mediante la ecuación (27) [17, 21, 25].

$$T_c = \frac{L + 2x}{f_r} \quad (27)$$

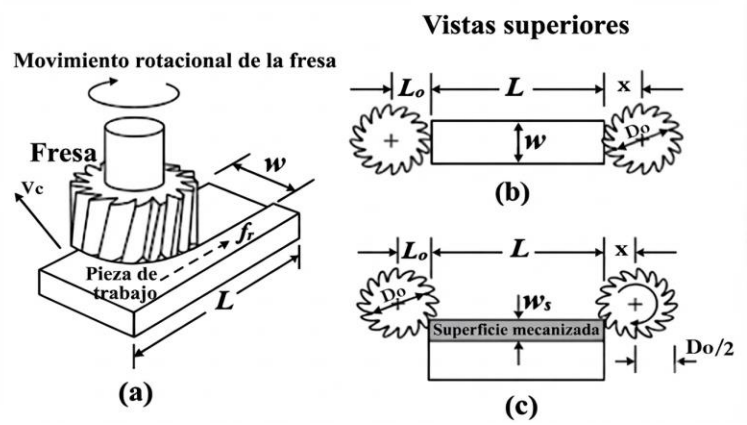


Fig.36 Parámetros geométricos de fresado frontal, a) Fresado frontal; b) Cortador centrado sobre la pieza; c) Cortador desplazado. Adaptado de: [26].

Asimismo, es necesario considerar la potencia de corte requerida durante el mecanizado, ya que esta depende de la fuerza específica de corte y de las condiciones empleadas durante la operación. La fuerza específica de corte F_{sc} representa la fuerza necesaria para remover material durante el proceso de corte y sus valores varían según el material de la pieza y el avance por diente utilizado, como se muestra en la Tabla 2.9, presentada en el Anexo C, donde los valores inferiores de F_{sc} corresponden a materiales más blandos, mientras que los valores superiores se asocian a materiales con mayor dureza o resistencia [26].

Con base en ello, la potencia de corte en el fresado se calcula mediante la ecuación (28), donde P_c corresponde a la potencia de corte (kW), d a la profundidad de corte (mm), w al ancho de corte (mm), f_r a la velocidad de avance (mm/min) y η a la eficiencia de la máquina. Esta expresión se aplica principalmente al fresado de piezas rectangulares simples; sin embargo, en operaciones con geometrías más complejas, como el fresado de engranes, es necesario emplear relaciones de cálculo diferentes [26].

$$P_c = \frac{d \cdot w \cdot f_r \cdot F_{sc}}{60 \times 10^6\ \eta} \qquad (28)$$

De manera complementaria, la potencia requerida durante el fresado también puede relacionarse con la energía específica de corte o potencia unitaria, conceptos descritos previamente en la sección de torneado (ver Fig.23 y Fig.25) y que igualmente se aplican en este proceso de mecanizado considerando sus propias condiciones de corte [16, 22]. En este caso, la potencia depende tanto de la energía específica de corte (E_s) como de la tasa de remoción de material o también llamado caudal (MRR), tal como se establece en la ecuación (*29*) [25].

$$P_c = E_s \cdot MRR \qquad (29)$$

Asimismo, la energía específica de corte depende de diversos factores, entre ellos el material de la pieza, las condiciones de la herramienta y el espesor de la viruta. Además, parámetros como la velocidad de corte, el ángulo de la herramienta y el uso de fluidos de corte pueden modificar ligeramente sus valores [16, 18, 21].

En la práctica, las fuerzas de corte pueden determinarse experimentalmente mediante distintos dispositivos de medición; sin embargo, debido a la dificultad de medir directamente estas fuerzas durante el mecanizado, frecuentemente se emplean valores tabulados de energía específica y fuerza específica de corte para estimar los requerimientos energéticos y de potencia en operaciones de fresado [16, 22]. Debido a ello, diversos investigadores y fabricantes han determinado experimentalmente valores de referencia para diferentes materiales y condiciones de operación. En este contexto, las Tabla 2.10 y Tabla ***2.11***, presentadas en el Anexo D, contienen valores de energía específica de corte de corte que pueden emplearse como referencia para el análisis del proceso. Asimismo, las tablas incluyen valores correspondientes a la energía específica de rectificado,

asociados a procesos abrasivos; sin embargo, estos no se desarrollan en detalle debido a que el presente análisis se enfoca en operaciones de fresado.

Por otra parte, el par generado durante el fresado se determina mediante la ecuación (30), donde Pc se expresa en (W) y N la velocidad de rotación del husillo (rev/s) [26].

$$T = \frac{P_c}{2\pi N} \qquad (30)$$

En las operaciones de fresado también es importante considerar el desgaste de la herramienta de corte, debido a que este se encuentra estrechamente relacionado con las fuerzas de corte y las condiciones de mecanizado empleadas durante el proceso. Como se explicó previamente en el torneado (ver Fig.26), la interacción continua entre la herramienta, la pieza y la viruta, junto con las elevadas temperaturas generadas durante el corte, provoca un deterioro progresivo del filo de la herramienta, reduciendo gradualmente su capacidad de corte y afectando el desempeño del mecanizado [18, 21]. Por ello, en la práctica suelen emplearse distintos criterios de reemplazo basados en el acabado superficial, el incremento de potencia, el tiempo de mecanizado o la condición visible del filo, con el fin de evitar fallas que comprometan la calidad del proceso [16].

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta la metodología empleada para el desarrollo de la propuesta. Bajo un enfoque ingenieril, se establecen las fases que permitieron integrar la fundamentación técnica, el diseño de la fresadora CNC y el desarrollo del entorno de simulación, dando lugar a una propuesta orientada a la enseñanza del mecanizado por arranque de viruta. Posteriormente, se describen las actividades ejecutadas en cada fase y las herramientas utilizadas para su desarrollo.

3.1 Enfoque y tipos de investigación

El presente proyecto se desarrolló bajo un enfoque ingenieril orientado a la solución de una necesidad identificada en el ámbito educativo [28]. Este enfoque permitió transformar los requerimientos del proyecto en una propuesta técnicamente viable mediante la aplicación de herramientas de diseño, análisis y validación propias de la ingeniería [29]. El desarrollo de la investigación se llevó a cabo siguiendo la metodología estructurada presentada en la Fig.37.

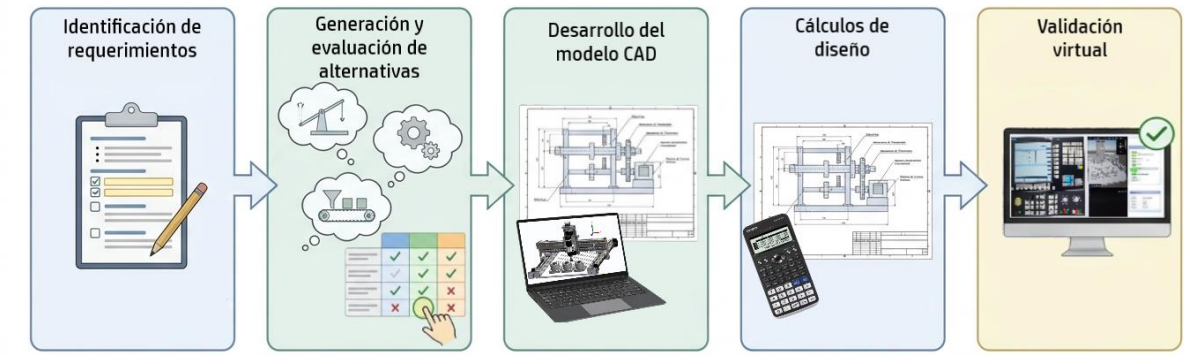


Fig.37 Metodología del proyecto.

3.2 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación se estructuró en fases secuenciales, cada una contempló actividades específicas que permitió organizar de manera sistemática el desarrollo del proyecto.

3.2.1. Fase 1: Evaluación tecnológica y definición de requisitos

Esta fase estuvo orientada a recopilar y analizar información técnica relacionada con fresadoras CNC utilizadas en aplicaciones educativas, con el propósito de establecer los requerimientos que servirían como base para el desarrollo del diseño. Para ello se consideraron tanto requerimientos explícitos, obtenidos directamente de los usuarios, como requerimientos implícitos identificados a partir del análisis de información técnica y antecedentes relacionados con este tipo de equipos [30, 31].

Actividad 1.1: Identificación de requerimientos explícitos; Se realizaron entrevistas abiertas informales a docentes y estudiantes vinculados con procesos de manufactura con el propósito de identificar necesidades, expectativas y características deseadas para la fresadora CNC. La información obtenida permitió establecer los requerimientos explícitos asociados al uso académico del equipo.

Actividad 1.2: Identificación de requerimientos implícitos; Se realizó la revisión de documentación técnica, normas aplicables, patentes, equipos comerciales y antecedentes tecnológicos relacionados con máquinas CNC. Esta información permitió identificar criterios de diseño, restricciones técnicas y buenas prácticas de ingeniería que complementaron los requerimientos explícitos obtenidos previamente.

3.2.2. Fase 2: Diseño conceptual y técnico de la fresadora CNC

Esta fase estuvo orientada al desarrollo de la propuesta de diseño de la fresadora CNC a partir de los requerimientos definidos en la fase anterior. Para ello se emplearon herramientas de diseño conceptual y de ingeniería que permitieron generar, evaluar y seleccionar alternativas de solución, así como desarrollar la arquitectura mecánica y el sistema de control de la máquina.

Actividad 2.1: Despliegue de la función de calidad (QFD); Se aplicó la metodología de despliegue de la función de calidad con el propósito de relacionar los requerimientos identificados con las características técnicas del sistema. Esta herramienta permitió establecer la importancia de cada requerimiento y orientar el proceso de diseño hacia las necesidades identificadas durante la fase anterior.

Actividad 2.2: Análisis funcional; Se desarrolló el análisis funcional de la fresadora CNC con el fin de identificar la función principal del sistema y las subfunciones necesarias para su operación. Esta actividad permitió representar de manera estructurada las funciones que debía cumplir la máquina y facilitó la generación de posibles alternativas de solución.

Actividad 2.3: Definición de la estructura modular; A partir de las funciones identificadas se estableció la estructura modular de la máquina, agrupando funciones relacionadas dentro de módulos funcionales. Esta organización permitió simplificar el proceso de diseño y facilitar la evaluación de alternativas para cada subsistema.

Actividad 2.4: Evaluación y selección de alternativas; Se generaron diferentes alternativas de solución para los módulos identificados y posteriormente se realizó una evaluación comparativa mediante criterios ponderados. Esta actividad permitió seleccionar la solución más adecuada para el desarrollo de la propuesta final.

Actividad 2.5: Desarrollo de la arquitectura CAD; Una vez seleccionadas las alternativas de diseño, se definió la arquitectura mecánica de la fresadora CNC, estableciendo la configuración estructural, los sistemas de guiado, transmisión y accionamiento, así como la disposición general de los componentes que conforman la máquina.

Actividad 2.6: Modelado tridimensional asistido por computador; Se desarrolló el modelo tridimensional de la fresadora CNC mediante software de diseño asistido por computador. El modelado permitió verificar la integración de los componentes seleccionados y generar la información necesaria para las etapas posteriores de análisis y validación.

Actividad 2.7: Cálculos de diseño y selección de componentes; Se realizaron los cálculos necesarios para determinar los esfuerzos mecánicos y factores de seguridad de la máquina. Asimismo, se seleccionaron componentes comerciales y elementos estandarizados considerando criterios de disponibilidad y compatibilidad con los requerimientos establecidos.

Actividad 2.8: Elaboración de documentación técnica; Se prepararon los planos técnicos y diagramas detallados que servirán como guía para la fabricación y montaje de la fresadora.

3.2.3. Fase 3: Simulación y Validación Virtual

Esta fase estuvo orientada a verificar el comportamiento del diseño desarrollado mediante herramientas de simulación asistidas por computador. La validación virtual permitió evaluar el comportamiento general de la fresadora CNC antes de una posible etapa de fabricación, identificando aspectos de mejora y comprobando el cumplimiento de los requerimientos establecidos durante el proceso de diseño.

Actividad 3.1: Simulación del funcionamiento del sistema CNC; Se desarrolló la simulación virtual del funcionamiento de la fresadora CNC mediante herramientas de software, permitiendo verificar los movimientos coordinados de los ejes, la interpretación de trayectorias y la interacción entre los elementos que conforman el sistema de control.

Actividad 3.2: Ajustes y correcciones del sistema; A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, se evaluó el desempeño general de la propuesta y se efectuaron los

ajustes necesarios para garantizar la coherencia entre los requerimientos definidos y la solución desarrollada.

Actividad 3.3: Presentación del documento final escrito; Se realizó la integración y documentación de los resultados obtenidos durante todas las etapas del proyecto, incluyendo el proceso de diseño, los cálculos efectuados, las simulaciones desarrolladas y las conclusiones derivadas del trabajo realizado.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y PROCESOS

La fundamentación técnica desarrollada en los capítulos anteriores forma parte del ecosistema de aprendizaje propuesto para la enseñanza del mecanizado por arranque de viruta. En este contexto, el presente capítulo aborda el desarrollo de la fresadora CNC y del entorno de simulación, completando así los elementos que conforman dicho ecosistema. Para ello, se presenta la recopilación de requerimientos del cliente, el despliegue de la función de calidad (QFD), los diagramas funcionales, la selección de alternativas mediante el método de criterio ponderado, la definición de las cargas de diseño, la selección de materiales y componentes, así como el desarrollo de la interfaz en MATLAB, su integración con Unity y la implementación del módulo ESP32.

4.1 Despliegue de la función de calidad (QFD) para la selección de alternativas

Para la elaboración de la Casa de la Calidad se utilizaron los requerimientos explícitos e implícitos identificados durante la fase de recopilación de información. Los requerimientos considerados se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Requerimientos explícitos e implícitos.

Requerimientos	Voz del cliente (necesidades)		Voz del ingeniero (criterios técnicos)
Explícitos	Bajo costo		Escala de laboratorio
	Simular operaciones de un equipo real industrial		Seguridad
	Hardware y software libre		Compatibilidad con código G de diferentes controladores
	Fácil mantenimiento		Sistema de gestión de virutas
	Mostrar coordenadas en el panel de control		Facilidad de montaje
	Capacidad del cargador de herramientas		Precisión
	Bancada firme y estable		Escalabilidad
Implícitos	**Fuente**		**Información obtenida**
	Equipos comerciales de referencia, antecedentes tecnológicos y las patentes		Capítulo 2 - Antecedentes
	Análisis comparativo de equipos CNC		Tabla 4.2 y Fig.38
	Norma	NTP 235	Criterios generales de seguridad en máquinas [32]
		BS EN ISO 16090-1:2018	Parámetros de espacios, distancias y recorridos seguros [33].

Tabla 4.2 Comparación de fresadoras CNC.

Característica	Osnox OX-FR3060 [34, 35]	Haas Mini Mill [36]
Área de trabajo X (mm)	400	406
Área de trabajo Y (mm)	600	356
Área de trabajo Z (mm)	80	381
Aplicación principal	Educativa / Prototipado	Industrial
Potencia del husillo (kW)	1.5	7.5
Cambio automático de herramientas	No	Sí (10 herramientas)
Gestión de herramientas	No	Sí
Gestión de virutas	No	Sí
Compatibilidad código G	Sí	Sí
Sistema de control CNC	USB Controller	Control Haas
Costo aproximado ($)	3 150	55 995



a) b)

Fig.38 Fresadoras CNC, a) Osnox 3060 [34]; b) Haas Mini Mill [36].

Por otra parte, durante el desarrollo de la propuesta se consideraron criterios asociados a la manufactura y ensamblaje del sistema, priorizando el uso de componentes estandarizados, la reducción del número de piezas y la facilidad de montaje y mantenimiento, en concordancia con los principios de diseño para manufactura y ensamblaje (DFMA) [29].

Una vez definidos los requerimientos explícitos e implícitos, se establecieron las relaciones entre estos y las características técnicas consideradas para el diseño mediante la construcción de la Casa de la Calidad mostrada en el , permitiendo determinar cuáles poseen mayor influencia en el diseño y establecer una base para las etapas posteriores de análisis funcional, estructuración modular y selección de alternativas.

En la Tabla 4.3 se presentan los cinco requerimientos que alcanzaron la mayor ponderación y que, por tanto, ejercieron la mayor influencia sobre el diseño de la fresadora CNC.

Tabla 4.3 Requerimientos con mayor peso de influencia (QFD)

N°	Voz del cliente	Voz del ingeniero
1	Bajo costo	Precio (USD)
2	Capacidad del cargador de herramientas	Herramientas almacenadas (unidades)
3	Simular operaciones de un equipo real industrial	Nivel de confiabilidad (%)
4	Escala de laboratorio	Dimensiones (largo x ancho x alto)
5	Hardware y software libre	% de componentes con documentación abierta

4.2 Análisis funcional

El análisis funcional de la fresadora CNC permitió identificar y representar de manera estructurada las funciones necesarias para su operación. Como resultado, se obtuvo una descomposición funcional en tres niveles.

- Nivel 0 (Función Global – Fig.39): Representa el funcionamiento general de la fresadora CNC, donde la energía eléctrica, las señales de control y la colocación de la madera constituyen las entradas del sistema. A partir de estos elementos, la máquina realiza la transformación de la pieza de madera en bruto en una pieza mecanizada, obteniéndose la pieza de madera cortada.

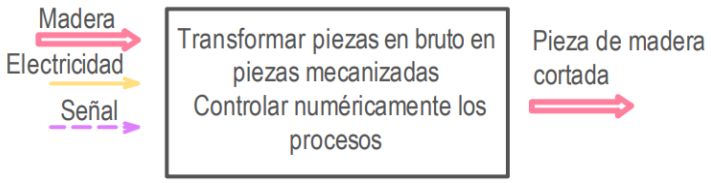


Fig.39 Diagrama funcional – Nivel 0

- Nivel 1 (Descomposición Funcional): La Fig.40 divide el proceso en tres subfunciones principales: inicio del sistema, procesamiento de datos y ejecución del fresado. El inicio del sistema corresponde al encendido manual de la máquina una vez conectada a la energía

eléctrica. Cuando esta operación finaliza, se genera una señal de sistema listo. Mientras la máquina permanezca energizada, se realiza el procesamiento de los datos contenidos en el código CNC, generando la información necesaria para iniciar la ejecución del fresado y obtener la pieza de madera cortada.

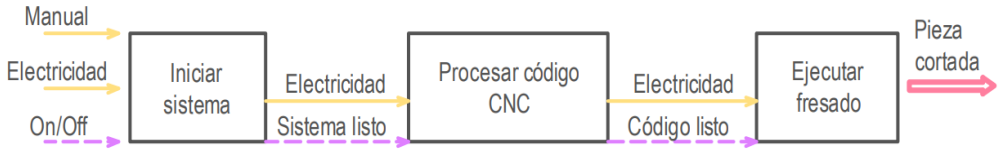


Fig.40 Diagrama funcional – Nivel 1

- Nivel 2 (Operaciones Detalladas – Fig.41): Una vez conectada la máquina a la energía eléctrica, se verifica la comunicación entre el computador y el controlador para asegurar que el sistema se encuentre listo para operar. Posteriormente, se realizan en paralelo la fijación de la pieza de trabajo y de la herramienta de corte, así como las operaciones necesarias para preparar la ejecución del movimiento de los ejes. Mediante el panel de control se envían señales a los actuadores para mover los ejes y establecer los puntos de referencia correspondientes al cero máquina y cero pieza. Una vez definidos estos puntos de origen, se procede a la carga del archivo de código G, el cual es transformado posteriormente en señales de movimiento para los actuadores. Estas señales permiten ejecutar el proceso de desbaste de la pieza hasta obtener la geometría requerida. En caso de que el programa incluya instrucciones de cambio de herramienta, la máquina realiza dicha operación y continúa con el proceso de mecanizado hasta obtener la pieza de madera cortada.

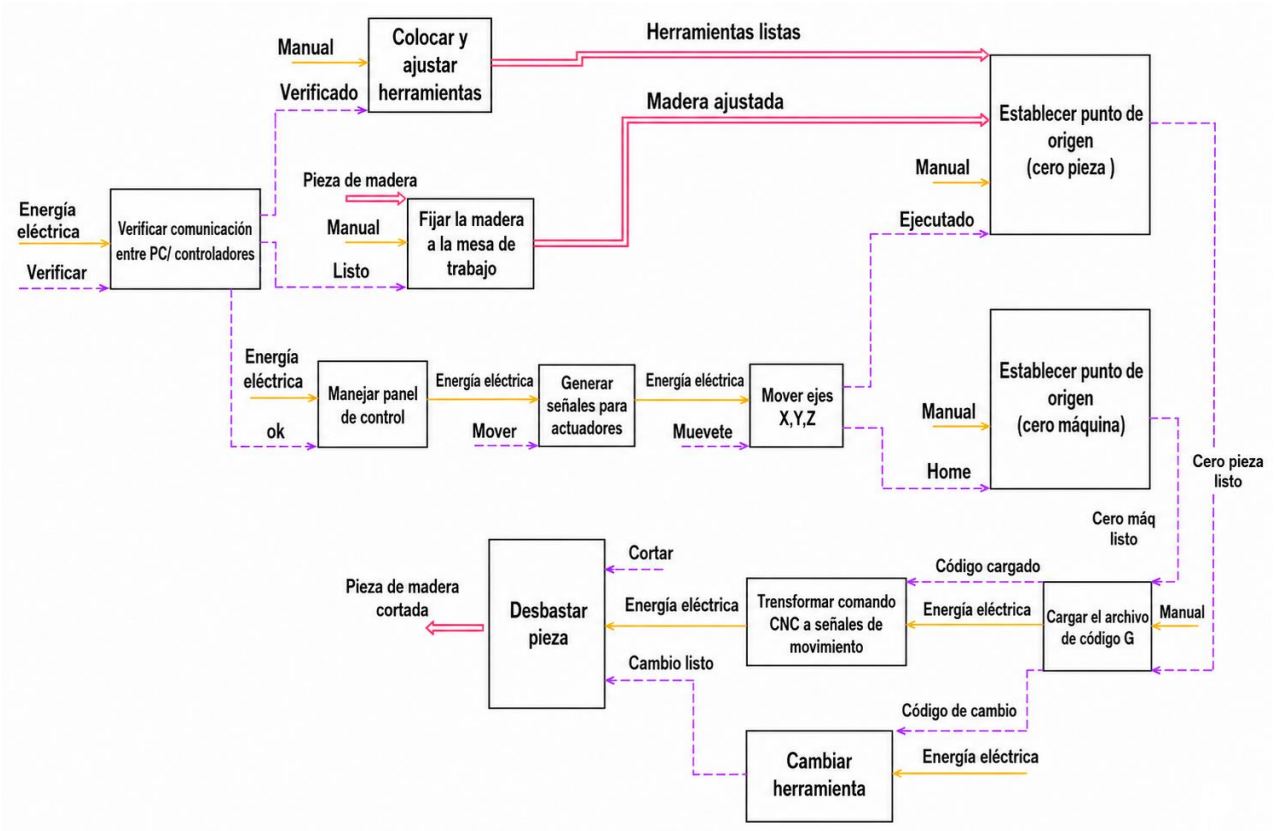


Fig.41 Diagrama funcional – Nivel 2.

La descomposición funcional permitió constituir la base para la estructuración modular desarrollada en la siguiente sección.

4.3 Análisis modular

A partir de la descomposición funcional obtenida, las funciones relacionadas fueron agrupadas en tres módulos con el propósito de facilitar la generación y evaluación de alternativas de solución [29] (ver Fig.42). Los módulos definidos fueron:

1. Preparación inicial: Configuración del equipo y del entorno de trabajo.
2. Preparación de la máquina: Puesta a punto de los sistemas de control, ejes y herramientas.
3. Ejecución del trabajo CNC: Mecanizado por arranque de viruta siguiendo un programa de código G.

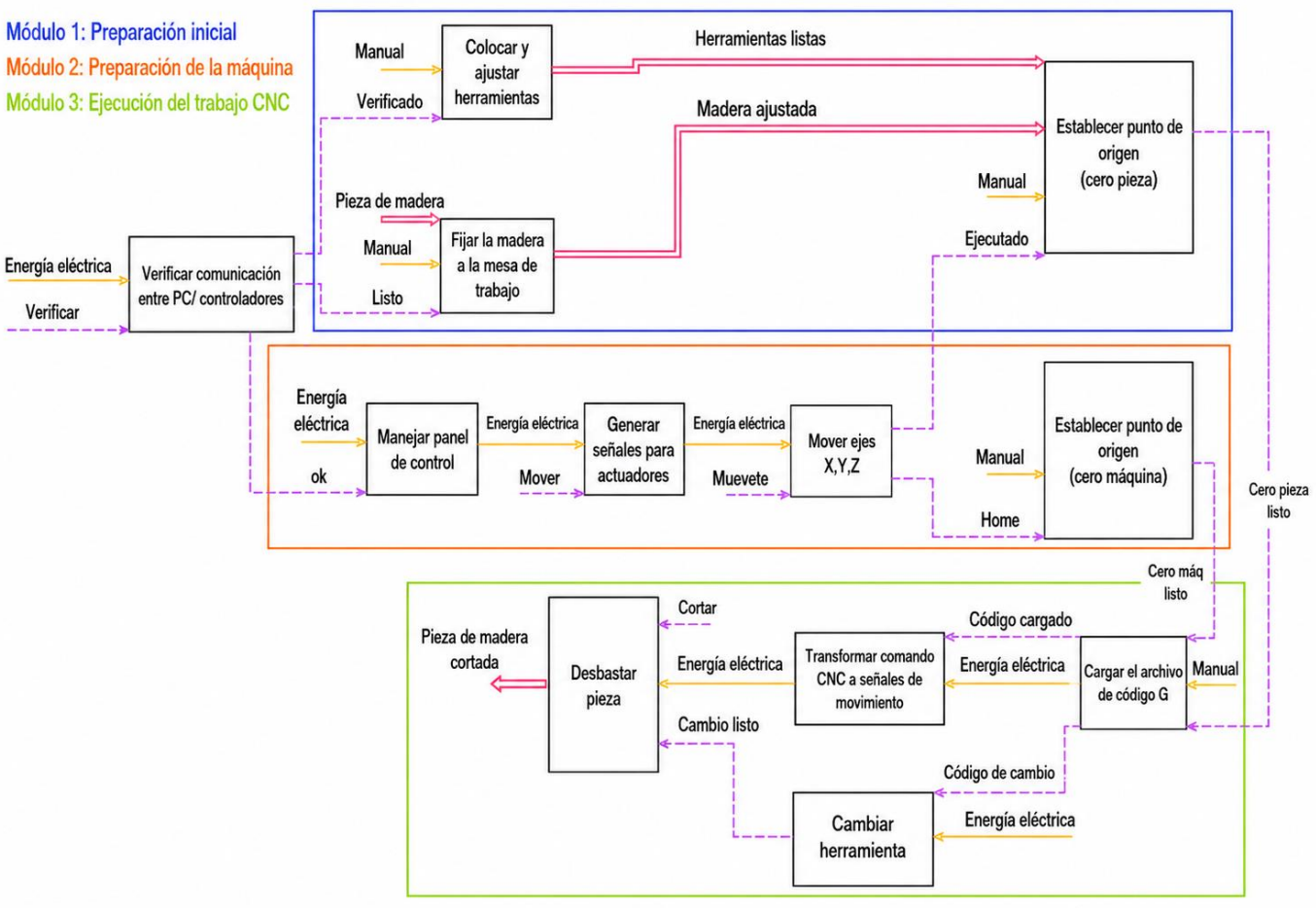


Fig.42 Análisis modular – Nivel 2.

Para cada módulo se identificaron diferentes alternativas de solución a partir de los requerimientos definidos para el proyecto , las cuales se presentan a continuación.

Módulo 1: Preparación inicial

Sección A — Colocar herramienta

Tabla 4.4 Sección A — Colocar la herramienta.

	Método	Qué es
a)	Cambio manual por operario [37, 38].	El operario retira la herramienta anterior, inserta la nueva en el portaherramientas o husillo, la sujeta manualmente, como se observa en la Fig.43a.
b)	Cambio automático (ATC – Automatic Tool Changer) [39, 40].	El sistema de la máquina (husillo más rack lineal o carrusel) intercambia la herramienta automáticamente sin intervención directa del operario (véase Fig.43b y c).
c)	Cambio asistido por sistema de portaherramientas / sistema de cambio rápido (tool-changer rápido) [38, 41].	Adaptadores o portaherramientas diseñados para montaje rápido: facilitan extracción/inserción de la herramienta, como se puede apreciar en la Fig.44a.
d)	Robot o brazo robótico colocando herramienta [38, 42, 43].	En entornos automatizados, un robot toma la herramienta, la entrega al husillo o al magazín, o hace la inserción física del portaherramientas (véase Fig.44b).

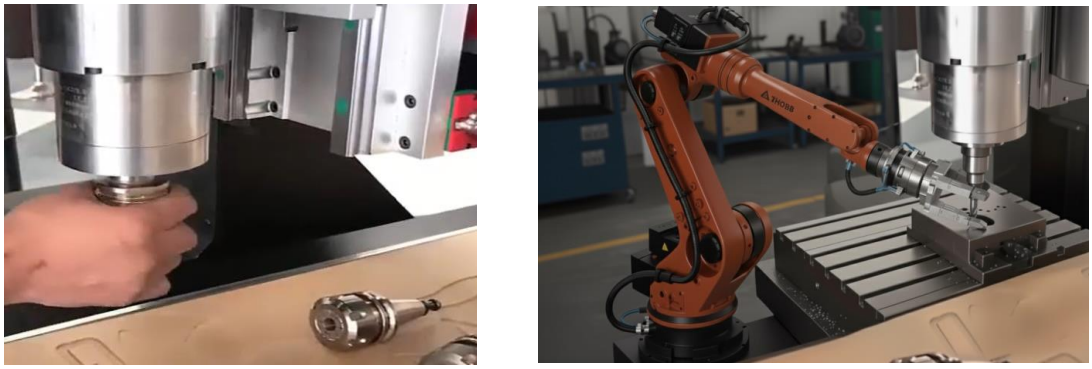


a) b) c)

Fig.43 Cambio de herramienta, a) Manual [44]; b) Automático: Rack lineal; b) Automático: Carrusel [45, 46].

Tabla 4.5 Sección A2 — Colocar la herramienta.

Ventajas	Desventajas
a) Muy flexible, coste bajo (alrededor de USD 200 [47]), útil para pocas piezas o cambio ocasional .	Lento, depende de habilidad del operario, mayor riesgo de error (montaje incorrecto, sujeción débil).
b) Rápido, reduce tiempo de inactividad, buena para producción repetitiva.	Mayor complejidad, coste mayor (USD 4000 en adelante [48]), requiere mantenimiento y buen diseño del rack o carrusel.
c) Mejora del tiempo de cambio manual, menos error humano en sujeción (alrededor de USD 22 en adelante [49]).	Aun requiere intervención humana (en muchos casos).
d) Reduce intervención humana, bueno para producción en continuo.	Alta inversión (alrededor de USD 25 000 en adelante [50]), integración compleja, requiere programación del robot.



a) b)

Fig.44 Cambio de herramienta, a) Portaherramientas manual; b) Brazo robótico [43, 51].

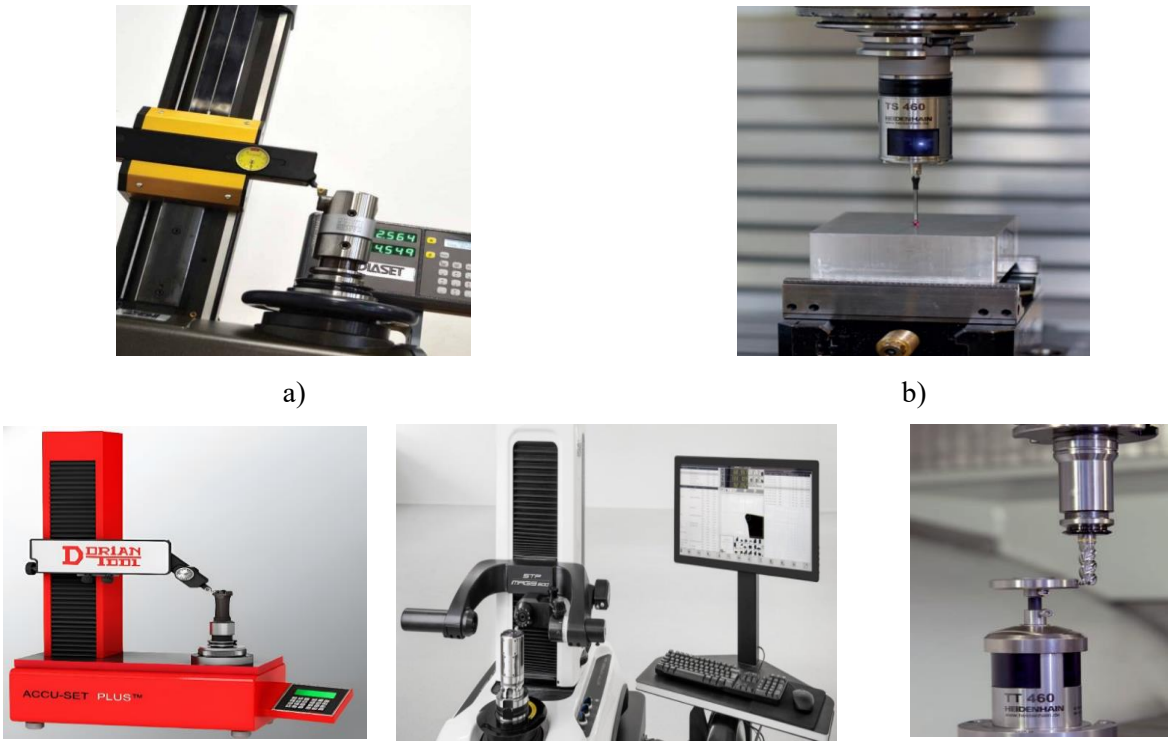
Sección B — Ajustar herramienta

Tabla 4.6 Sección B — Ajustar la herramienta.

Método	Qué es
a) Medición manual de longitud/diámetro (calibradores, galgas, regla, etc) [51].	Operario retira la herramienta, mide la longitud, diámetro o radio con instrumentos manuales, luego ingresa los valores al control CNC.
b) Indicador de carátula / dial indicator para comprobar altura / concentricidad [52].	Se usa indicador mecánico para verificar que la herramienta esté montada correctamente. Luego ajustar offsets, como se observa en la Fig.45a.
c) "Trial cut" / pasada de prueba + medición de pieza [53].	Se hace una pasada con la herramienta, se mide la pieza resultante, se ajustan los offsets/reposicionamiento de la herramienta en el porta-herramientas según medición.
d) Sonda/palpador de herramienta "tool probe" on-machine [53].	Sonda montada en la máquina mide automáticamente la longitud/diámetro de la herramienta tras el cambio; el control ajusta los offsets luego (véase Fig.45b).
e) Presetter automático o "Automatic Tool Presetter (ATP)" [54].	Sistema externo o integrado que mide automáticamente la herramienta y transmite los valores al control CNC o almacena para su uso, como se aprecia en la Fig.45c.
f) Ajuste mediante visión / láser sin contacto [55].	Sistemas que usan cámara o láser para medir herramienta sin contacto físico (ver Fig.45d).
g) Sensores de desgaste / detección automática de desgaste de herramienta [53].	Monitoreo del desgaste de la herramienta y ajuste automático u operario del offset para compensar desgaste, para tener una mejor idea ver Fig.45e.

Tabla 4.7 Sección B2 — Ajustar la herramienta.

	Ventajas	Desventajas
a)	Flexible, costo bajo.	Consumo de tiempo, depender de operario, riesgo de error humano.
b)	Bajo costo, menor error humano.	Manual, lento, puede requerir desmontaje parcial.
c)	Práctico cuando no hay equipo de medición especializado.	Consume material/tiempo de máquina, mayor riesgo de desperdicio.
d)	Rápido, reduce intervención humana.	Costo más alto, requiere configuración del control y calibración de la sonda.
e)	Reduce tiempos de ajuste, útil para producción con muchos cambios de herramientas.	Inversión considerable, puede estar sobredimensionado para talleres pequeños.
f)	Mayor velocidad, reduce desgaste de piezas y rotura de herramientas.	Costoso, requiere condiciones controladas de iluminación, puede requerir calibración frecuente.
g)	Mejora vida útil de la herramienta.	Requiere sensores o software adicional, costoso.



a) b)

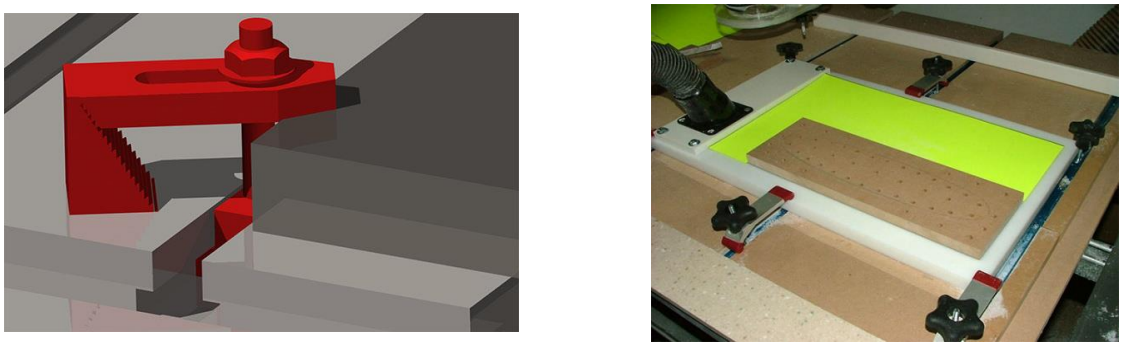
c) d) e)

Fig.45 Dispositivos de ajuste, a) Indicador de carátula; b) Palpador de herramienta [52, 53]; c) Presetter automático; d) Ajuste mediante visión [54, 55]; e) Dispositivos de detección de desgaste [53]..

Sección C — Fijar madera a la mesa de trabajo

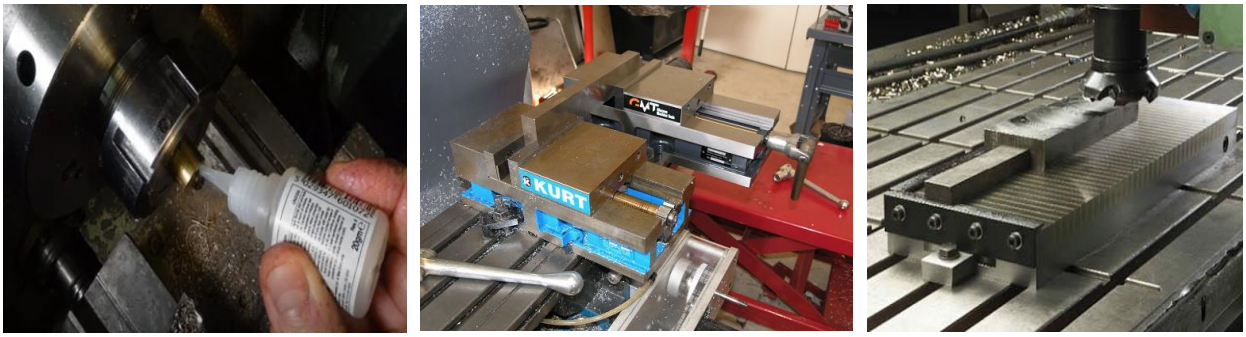
Tabla 4.8 Sección C — Fijar madera a la mesa de trabajo

Método	Qué es
a) Abrazaderas mecánicas [56].	Fijan la pieza con tornillos o palancas sobre la mesa o superficie de la máquina, un ejemplo se puede apreciar en la Fig.46a.
b) Tornillos directamente en la pieza / mesa [57, 58].	Se atornilla directamente la pieza a la base MDF o a una tabla sacrificable.
c) Sistema de vacío [59, 60].	La pieza se sostiene por presión negativa a través de orificios o zonas selladas (ver Fig.46b).
d) Cinta adhesiva doble cara / cinta + superglue [56, 61].	Cinta de doble cara sobre base, un ejemplo se observa en la Fig.47a.
e) Fijación por mordazas o prensas laterales [56, 61].	Prensas o mordazas que sujetan la pieza por los lados, sin cubrir la superficie (ver Fig.47b).
f) Sistema de pines de localización / stops mecánicos [56, 57].	Pines o topes que fijan posición y referencia de la pieza (combinable con vacío).
g) Fijación magnética (para materiales ferrosos o accesorios) [57, 62].	Uso de bases magnéticas. En madera, se usa con accesorios ferrosos (véase Fig.47c) .
h) Sistema híbrido (vacío + mecánico o cinta + pines) [62].	Combinación de métodos para seguridad adicional y repetibilidad.



a) b)

Fig.46 Métodos de fijación, a)Abrazaderas; b) Sistema de vacío [56].



a) b) c)

Fig.47 Métodos de fijación, a) Superglue; b) Fijación por mordazas [56]; c) Fijación magnética [60, 63].

Tabla 4.9 Sección C2 — Fijar madera a la mesa de trabajo.

	Ventajas	Desventajas
a)	Muy común, económica (desde USD 24 en adelante [64]), fácil de usar, reutilizable.	Puede interferir con la herramienta si no se planifica bien, requiere reposicionamiento.
b)	Muy firme, bajo costo (USD 15 [65]), buena para trabajos grandes o rugosos.	Deja marcas/agujeros; lento para desmontar.
c)	Rápido montaje; sin interferencias mecánicas, producción continua.	Coste alto (USD 350 [65]), requiere bomba de vacío, menos eficaz con piezas pequeñas o porosas.
d)	Montaje rápido, bajo costo (USD 24 [65]); buena para piezas pequeñas.	Difícil de limpiar; puede dejar residuos; limitada fuerza de sujeción.
e)	Excelente para mecanizado 3D o grabado superficial, reutilizable.	Ocupa espacio lateral, requiere base sólida o carriles, costo (USD 120 [65]).
f)	Repetibilidad, buena para producción repetitiva, costo (USD 20 [65]).	No provee sujeción por sí solo, requiere otro método adicional.
g)	Sin agujeros visibles, cambio rápido.	No aplica directamente en madera pura, se usa con adaptadores o soportes metálicos, costo (desde USD 80 en adelante [66]).
h)	Mayor estabilidad, permite procesar geometrías complejas.	Mayor tiempo de preparación, complejidad en el montaje.

Sección D — Establecer punto de origen (cero pieza)

Tabla 4.10 Sección D — Métodos para establecer el punto de origen (cero pieza).

Método	Qué es
a) Manual (panel) [67].	El operador posiciona manualmente la herramienta sobre el punto deseado en la pieza y registra esa posición como origen utilizando los controles del panel (teclas de eje X, Y, Z y botones de “set zero”), como se aprecia en la Fig.48a.
b) Software (CAM/CNC) [68].	El punto de origen se establece desde el software CAM o desde el sistema de control CNC antes de ejecutar el programa. El operador define el “Work Offset” y carga el valor correspondiente al punto de origen de la pieza. (véase Fig.48b).
c) Mixto (panel + software) [69, 70].	Combina el ajuste físico con confirmación digital. El operador mueve manualmente la herramienta o el eje hasta el punto de referencia, luego ingresa o verifica ese valor desde el software o el panel de control.
d) Automático.	La máquina ejecuta un ciclo de palpado y almacena las coordenadas como el nuevo “cero pieza” como se observa en la Fig.49.



a) b)

Fig.48 Métodos para establecer cero pieza, a) Mekanika EVO; b) Mach 4 [68, 70].

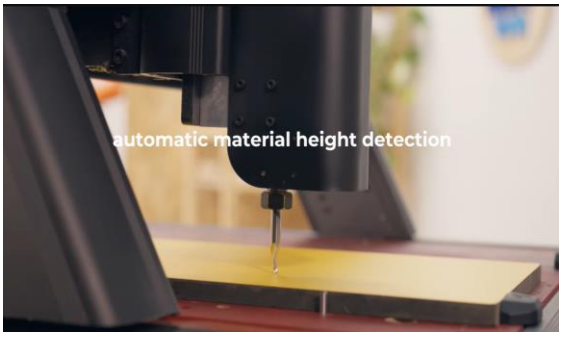


Fig.49 Detección de cero pieza automático Red Fox 2 [71].

Tabla 4.11 Sección D2 — Métodos para establecer el punto de origen (cero pieza).

Ventajas	Desventajas
a) Permite control visual y directo del operador, bajo costo, no requiere hardware o software adicional.	Dependencia de la habilidad del operador, mayor tiempo de configuración por movimientos manuales, mayor riesgo de error humano en la asignación del cero.
b) Repetibilidad garantizada entre sesiones o máquinas, se integra con modelos CAD/CAM y simulaciones previas.	Requiere calibración precisa entre software y máquina, posibles fallas por errores de comunicación, puede requerir licencias o software propietario.
c) Combina intervención física y verificación digital.	Riesgo de inconsistencias si no se sincronizan correctamente los datos.
d) Minimiza intervención humana, reduce tiempos de preparación.	Alto costo, requiere mantenimiento y calibración de instrumentos de ajuste, algunos se mencionan en la Tabla 4.6.

Para la generación de las combinaciones de alternativas se priorizaron las opciones de menor costo, de acuerdo con los resultados del QFD (ver Anexo H y Tabla 4.3). Por ello, en la colocación y ajuste de herramienta, así como en la fijación de la madera, se consideró únicamente la alternativa manual. Las alternativas seleccionadas para la generación de combinaciones se presentan en la Fig.50.

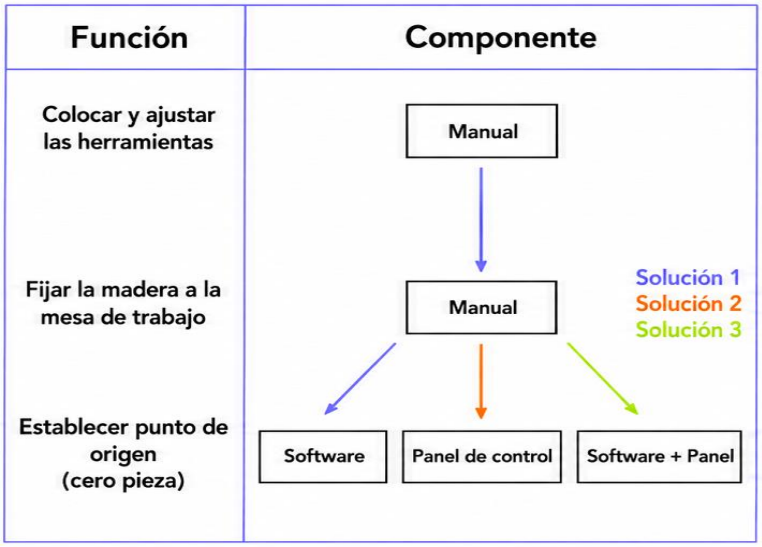


Fig.50 Módulo 1: Preparación inicial.

Módulo 2: Preparación de la máquina

Sección E — Verificación de la comunicación entre PC y controladores

Tabla 4.12 Sección E — Métodos para verificar comunicación.

Método	Qué es
a) Manual o física [72, 73].	Se realiza conectando directamente los cables de comunicación (por ejemplo, USB, paralelo, otros) y comprobando mediante instrumentos o indicadores de conexión (LED, multímetro, test de continuidad).
b) Por software de control o terminal [74].	Se utiliza un programa (como Mach3, LinuxCNC, HyperTerminal o software del fabricante) para enviar comandos de prueba y verificar la recepción de datos por el controlador (ver Fig.51).
c) Por protocolo de red (Ethernet/Wi-Fi) [73, 75].	La comunicación se verifica mediante conexión de red, generalmente a través de direcciones IP, pings o protocolos industriales (TCP/IP, Modbus, Ethernet/IP).

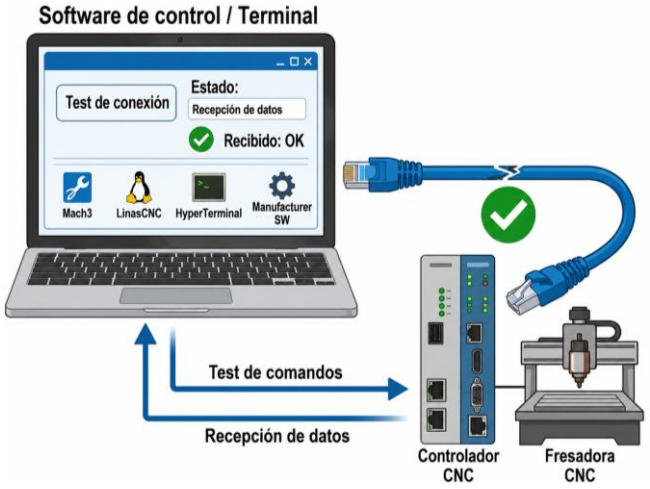


Fig.51 Comunicación por protocolo de red y software de control.

Tabla 4.13 Sección E2 — Métodos para verificar comunicación.

	Ventajas	Desventajas
a)	No requiere software especializado, permite verificar fallos físicos inmediatos, económico y fácil de aplicar en laboratorio.	No detecta errores lógicos de comunicación, limitado a conexiones locales, requiere intervención humana constante.
b)	Permite diagnóstico más completo, muestra velocidad de transmisión y errores, facilita guardar registros y configurar parámetros.	Requiere instalación y conocimientos técnicos, no detecta fácilmente fallos físicos de conexión.
c)	Permite control remoto y monitoreo en tiempo real, alta velocidad y confiabilidad, facilita la integración de múltiples equipos.	Configuración más compleja, requiere infraestructura de red estable, mayor riesgo de vulnerabilidades si no se protege adecuadamente.

Sección F — Generación de señales para actuadores

Tabla 4.14 Sección F — Generar señales actuadores: Tarjetas controladoras CNC.

Método	Qué es
a) PlanetCNC Mk3/ Mk3-9 [76].	Controladora USB/Ethernet que conecta una computadora con drivers de motores de señal STEP/DIR.
b) UC300ETH (CNCdrive) [77].	Tarjeta Ethernet de movimiento (hasta 6 ejes).
c) PoKeys57CNC (PoLabs) [78].	Dispositivo que combina funciones de un dispositivo (entradas/salidas digitales programables) con un controlador de motores especializado.
d) NOVUSUN / Mach3 USB Motion Cards (NVCM) [79].	Placa de movimiento tipo "USB motion card" para Mach3, controlar máquinas CNC con motores (ver Fig.52).



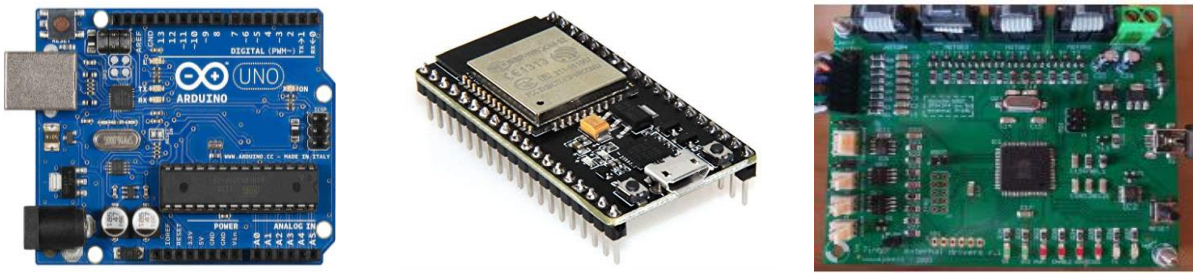
Fig.52 Tarjetas controladoras CNC Mach3 de 3 ejes USB [80].

Tabla 4.15 Sección F2 — Generación de señales para actuadores: Tarjetas controladoras CNC.

Ventajas	Desventajas
a) Conexión de varios ejes, comunicación USB/Ethernet.	Limita las velocidades, alto costo (USD 200 en adelante [81]), configuración inicial compleja.
b) Velocidades altas, integración con Mach3, múltiples I/O, económicas en algunos casos (USD 148 [82]).	Necesita red estable y configuración avanzada.
c) Muy flexible en I/O, comunicación USB/Ethernet, permite velocidades altas.	Precio elevado (USD 233 en adelante [83]), requiere licencia para el software, configuración compleja para usuarios nuevos.
d) Económicas en algunas variantes (alrededor de USD 155 [84]), integración directa con Mach3, fácil sustitución en máquinas hobby.	Calidad y soporte variable según fabricante, algunos modelos requieren drivers específicos.

Tabla 4.16 Sección F3 — Generación de señales/actuadores: Microcontroladores / Firmwares (intérpretes G-code libres).

	Método	Microcontrolador base / Plataforma	Qué es
a)	GRBL (Arduino Uno) [85, 86].	ATmega328P	Firmware de código abierto para controlar máquinas CNC pequeñas, como se aprecia en la Fig.53a.
b)	GRBL Mega 5X [87, 88].	ATmega2560	Versión extendida de GRBL de Arduino Uno.
c)	GRBL-ESP32 [89].	ESP32 (Xtensa LX6 Dual Core)	Variante moderna del GRBL optimizada para el microcontrolador ESP32 (ver Fig.53b).
d)	Smoothieware [90].	LPC1769 (ARM Cortex-M3)	Firmware open source para control de CNC, impresoras 3D y cortadoras láser.
e)	TinyG v2 / G2Core [91].	ATSAM3X8E (ARM Cortex-M3)	Firmware avanzado con interpolación de trayectorias y soporte para varios ejes, como se observa en la Fig.53c.
f)	Marlin (modo CNC) [92].	STM32 / ATmega2560	Firmware popular de impresión 3D adaptado para fresadoras CNC pequeñas.



a) b) c)

Fig.53 Microcontroladores/Firmwares, a) Arduino Uno [93]; b) ESP32 [94]; c) TinyG [95].

Tabla 4.17 Sección F3 — Generación de señales/actuadores: Microcontroladores / Firmwares (intérpretes G-code libres).

	Ventajas	Desventajas
a)	Económico (USD 10 en adelante [96]), comunidad extensa, fácil configuración, adaptable a diferentes máquinas CNC, código abierto.	Limitado a 3 ejes, poca memoria, sin conectividad inalámbrica.
b)	Mayor flexibilidad que GRBL Uno, más memoria, costo (USD 29 en adelante).	Configuración más compleja, procesamiento más lento que plataformas ARM.
c)	Comunicación inalámbrica integrada, mayor velocidad, más memoria, costo (desde USD 11 en adelante [97]).	Requiere más conocimiento técnico, menos documentación que el GRBL Arduino.
d)	Conexión Ethernet integrada, arquitectura moderna, buena documentación.	Hardware más costoso (alrededor de USD 99 en adelante [98]), lectura/escritura más lenta, menos comunidad que GRBL.
e)	Mayor velocidad, configuración completa de herramientas.	Mayor costo (USD 130 en adelante [99]), sin conexión inalámbrica, requiere más configuración.
f)	Amplia comunidad, compatible con pantallas LCD, costo (desde USD 20 en adelante [100]).	No optimizado para CNC, requiere personalización, requiere más configuración.

De las alternativas analizadas de microcontroladores (G-code libres), se seleccionó GRBL-ESP32 debido a que ofrece mayor capacidad de procesamiento, memoria y conectividad en comparación con las versiones basadas en Arduino Uno. Además, frente a otras plataformas de mayor costo, GRBL-ESP32 proporciona las prestaciones necesarias para la aplicación propuesta con una menor inversión económica.

Sección G — Establecimiento de punto de origen (cero máquina)

Tabla 4.18 Sección G — Establecimiento del punto de origen (cero máquina): Transmisión de movimiento.

	Estructura	Qué es
a)	Guías lineales (perfil rail) + tornillo de bolas (ball screw) [101].	Un carro se desliza sobre dos o más guías lineales paralelas; el avance lo genera un tornillo de bolas que convierte el giro del motor en movimiento lineal (ver Fig.54a y b).
b)	Rack & Pinion (cremallera y piñón) [102].	Un piñón motorizado engrana con una cremallera lineal para convertir el giro en movimiento lineal, común en ejes largos, como se ve en la Fig.54c.



a) b) c)

Fig.54 Transmisión de movimiento, a) Guía lineal [101]; b) Tornillo de bolas [103]; c) Rack & Pinion [104].

Tabla 4.19 Sección G2 — Establecimiento del punto de origen (cero máquina): Transmisión de movimiento.

	Ventajas	Desventajas
a)	Alta precisión de posicionamiento, buena rigidez ante momentos laterales, bajo coeficiente de fricción, buena repetibilidad, amplia disponibilidad de piezas industriales.	Mayor coste inicial (USD 65 en adelante [105, 106]), requiere montaje muy preciso (planitud / paralelismo), necesita mantenimiento de guías y tornillo para evitar desgaste.
b)	Velocidad de desplazamiento, tolerante a entornos con polvo/suciedad, buena para recorridos largos donde tornillo de bolas pierde eficiencia, costo (USD 24 en adelante [107]).	Menor precisión que el tornillo de bolas, mayor fricción en contacto metálico-metálico, puede requerir mayor mantenimiento de engranajes y ajuste de holgura.

Con base en las alternativas analizadas, para la transmisión de movimiento se seleccionó el sistema de guías lineales con tornillo de bolas debido a que ofrece mayor precisión, rigidez y repetibilidad. Si bien requiere una inversión inicial mayor, su mejor desempeño mecánico permite obtener movimientos más estables y precisos durante la operación de la máquina.

Tabla 4.20 Sección G3 — Establecimiento del punto de origen (cero máquina): Límites físicos.

	Estructura	Qué es
a)	Final de carrera mecánico [108]	Interruptor físico accionado por el eje (Fig.55a)
b)	Sensor inductivo / óptico [108]	Sensor sin contacto que detecta posición, como se muestra en la Fig.55b



a) b)

Fig.55 Límites físicos, a) Final de carrera mecánico [109]; b) Sensor óptico [110].

Tabla 4.21 Sección G4 — Establecimiento del punto de origen: Límites físicos.

	Ventajas	Desventajas
a)	Bajo costo (USD 1.25 [109]), fácil instalación, compatible con GRBL y controladoras CNC	Menor precisión, desgaste mecánico, posible rebote
b)	Mayor precisión, no desgaste	Mayor costo (USD 6 [111]), resistencia ambiental

Las alternativas seleccionadas para la generación de combinaciones se presentan en la Fig.56.

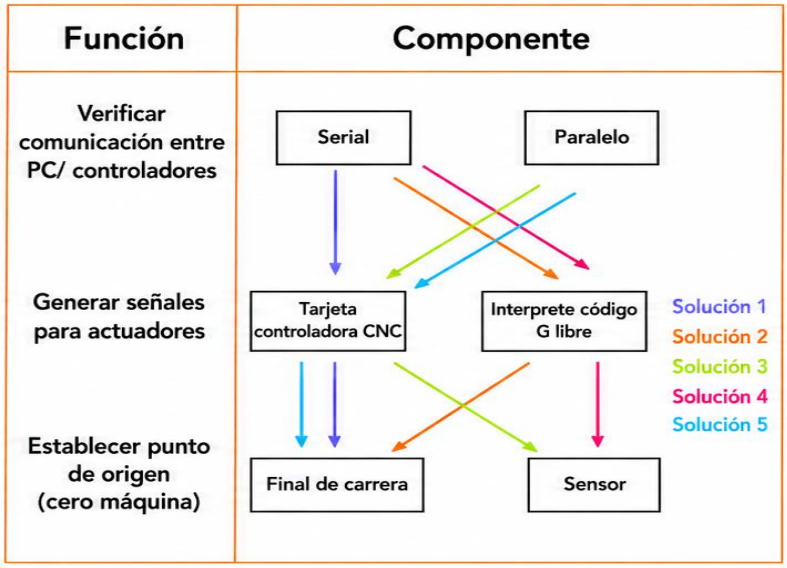


Fig.56 Módulo 2: Preparación de la máquina.

Módulo 3: Ejecución el trabajo CNC

Sección H — Carga del archivo de código G

Tabla 4.22 Sección H — Carga del código G.

	Estructura	Qué es
a)	Computador (PC conectado al controlador)	El archivo G-code se envía directamente desde un computador mediante software de control.
b)	Memoria USB	El archivo se almacena en una memoria USB y posteriormente se carga desde el panel de control o controlador CNC.

Tabla 4.23 Sección H2 — Carga del código G.

Ventajas	Desventajas
a) Permite modificar y ejecutar programas inmediatamente, visualizar trayectorias antes del mecanizado, compatible con la mayoría de controladores.	Posibles interrupciones por fallos del sistema operativo o comunicación.
b) Reduce riesgos asociados a fallos de comunicación durante el mecanizado.	Menor flexibilidad para realizar modificaciones rápidas, requiere transferir nuevamente el archivo después de cada cambio.

Se tomaron en cuenta las alternativas de rack lineal y mini carrusel descritas previamente en la Fig.43b y c, debido a que estos sistemas también intervienen en el cambio de herramienta durante la ejecución del trabajo CNC. Por otro lado, las alternativas seleccionadas para la generación de combinaciones se presentan en la Fig.57.

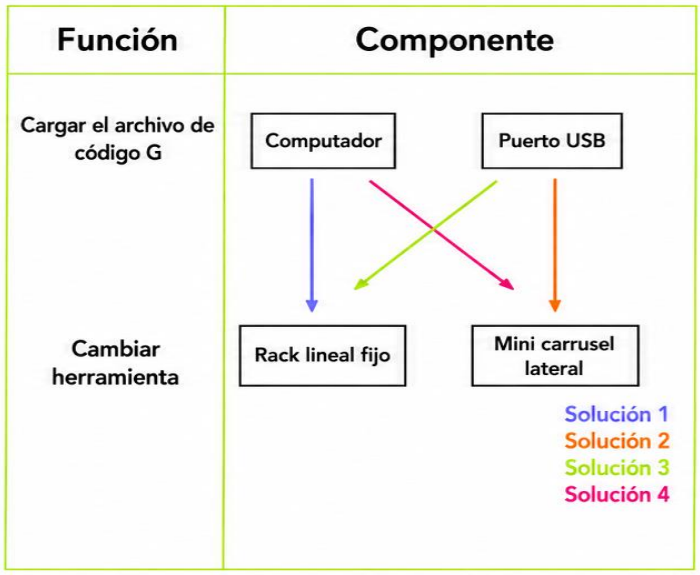


Fig.57 Módulo 3: Ejecución del trabajo CNC.

Las combinaciones de alternativas obtenidas para cada módulo se presentan en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Soluciones de análisis modular.

Módulo	Modo de operación	Soluciones alternativas
1	Preparación inicial	Sol1: Manual-manual-Software Sol2: Manual-manual-Panel de control Sol3: Manual-manual-Software + panel de control
2	Preparación de la máquina	Sol1: Serial-Tarjeta controladora CNC-Final de carrera Sol2: Serial-Intérprete código G libre-Final de carrera Sol3: Paralelo-Tarjeta controladora CNC-Sensor Sol4: Serial-Intérprete código G libre-Sensor Sol5: Paralelo-Tarjeta controladora CNC-Final de carrera
3	Ejecución del trabajo CNC	Sol1: Computador-Rack lineal fijo Sol2: Puerto USB-Mini carrusel lateral Sol3: Puerto USB-Rack lineal fijo Sol4: Computador-Mini carrusel lateral

4.4 Criterios ponderados – evaluación de soluciones

Para la evaluación de las alternativas del módulo 1 se consideraron los criterios de precio, simulación, compatibilidad, visualización de coordenadas y uso de hardware y software libre, por su relación con las funciones desarrolladas en este módulo. La evaluación de los criterios se presenta en la Tabla 4.25, mientras que las Tabla 4.26 a Tabla 4.30 muestran la valoración de cada alternativa respecto a los criterios considerados. Los resultados finales se presentan en la Tabla 4.31.

Tabla 4.25 Evaluación del peso específico de criterios del módulo 1.

Criterio	Precio	Simulación	Compatibilidad	Mostrar coordenadas	Hw/Sw libre	Σ+1	Pond.
Precio		1	1	1	1	5	0,333
Simulación	0		1	1	1	4	0,267
Compatibilidad	0	0		1	0	2	0,133
Mostrar coordenadas	0	0	0		0	1	0,067
Hw/Sw libre	0	0	1	1		3	0,200
					Suma	**15**	**1**

Precio>Simulación>Hs/Sw libre>Compatibilidad>Mostrar coordenadas

Tabla 4.26 Evaluación del peso específico del criterio Precio.

Precio	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Σ+1	Pond.
Sol 1		1	1	3	0,545
Sol 2	0,5		0	1,5	0,273
Sol 3	0	0		1	0,182
			Suma	**5,5**	**1**

Sol1>Sol2>Sol3

Tabla 4.27 Evaluación del peso específico del criterio Compatibilidad.

Compatibilidad	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Σ+1	Pond.
Sol 1		1	1	3	0,600
Sol 2	0		0	1	0,200
Sol 3	0	0		1	0,200
			Suma	**5**	**1**

Sol1>Sol2=Sol3

Tabla 4.28 Evaluación del peso específico del criterio Hw/Sw libre.

Hw/Sw libre	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Σ+1	Pond.
Sol 1		1	1	3	0,600
Sol 2	0		0	1	0,200
Sol 3	0	0		1	0,200
			Suma	**5**	**1**

Sol1>Sol2=Sol3

Tabla 4.29 Evaluación del peso específico del criterio Simulación.

Simulación	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Σ+1	Pond.
Sol 1		1	0	2	0,444
Sol 2	0,5		0	1,5	0,333
Sol 3	0	0		1	0,222
			Suma	**4,5**	**1**

Sol1>Sol2>Sol3

Tabla 4.30 Evaluación del peso específico del criterio Mostrar coordenadas.

Mostrar coordenadas	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Σ+1	Pond.
Sol 1		0,5	0	1,5	0,333
Sol 2	1		0	2	0,444
Sol 3	0	0		1	0,222
			Suma	**4,5**	**1**

Sol2>Sol1>Sol 3

Tabla 4.31 Tabla de conclusiones – Módulo 1.

Criterio	Precio	Compatibilidad	Hw/Sw libre	Simulación	Mostrar coordenadas	Σ	Prioridad
Sol 1	0,182	0,080	0,120	0,119	0,022	0,523	1
Sol 2	0,091	0,027	0,040	0,089	0,030	0,276	2
Sol 3	0,061	0,027	0,040	0,059	0,015	0,201	3

De acuerdo con los resultados obtenidos, la alternativa óptima es la solución 1 (Manual – Manual – Software), porque es la opción más económica al prescindir de un panel físico, permite una simulación industrial al emular paneles reales a través de la interfaz gráfica, y facilita el uso de software libre sin pérdida de funcionalidad en la visualización de coordenadas.

Para la evaluación de las alternativas del módulo 2 se consideraron los criterios de precio, hardware y software libre, compatibilidad con diferentes controladores, mantenimiento, precisión y seguridad. La evaluación de los criterios se presenta en la Tabla 4.32, mientras que las Tabla 4.33 a Tabla 4.38 muestran la valoración de las alternativas. Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 4.39.

Tabla 4.32 Evaluación del peso específico de criterios del módulo 2.

Criterio	Precio	Hw/Sw libre	Compatibilidad	Mantenimiento	Precisión	Seguridad	Σ+1	Pond.
Precio		1	1	1	1	1	6	0,286
Hw/Sw libre	0		1	1	1	1	5	0,238
Compatibilidad	0	0		0	1	1	3	0,143
Mantenimiento	0	0	1		1	1	4	0,190
Precisión	0	0	0	0		0	1	0,048
Seguridad	0	0	0	0	1		2	0,095
						Suma	**21**	**1**

Precio>Hw/Sw libre>Mantenimiento>Compatibilidad>Seguridad>Precisión

Tabla 4.33 Evaluación del peso específico del criterio Precio.

Precio	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5	Σ+1	Pond.
Sol 1		0,5	0	0,5	0	2	0,174
Sol 2	1		1	1	1	5	0,435
Sol 3	0	0		0	0	1	0,087
Sol 4	1	0,5	0		0	2,5	0,217
Sol 5	0	0	0	0		1	0,087
					Suma	**11,5**	**1**

Sol2>Sol4>Sol1>Sol3=Sol5

Tabla 4.34 Evaluación del peso específico del criterio Seguridad.

Seguridad	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5	Σ+1	Pond.
Sol 1		1	1	1	1	5	0,435
Sol 2	0,5		0	0,5	0	2	0,174
Sol 3	0	0		0	0	1	0,087
Sol 4	0	0,5	0		0	1,5	0,130
Sol 5	0	0	0	0		1	0,087
					Suma	**10,5**	**1**

Sol1>Sol2>Sol4>Sol3=Sol5

Tabla 4.35 Evaluación del peso específico del criterio Mantenimiento.

Mantenimiento	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5	Σ+1	Pond.
Sol 1		0,5	0	0	0,000	1,5	0,130
Sol 2	1		0	0	0,000	2	0,174
Sol 3	0	0		0	0,000	1	0,087
Sol 4	1	0,5	0		0	2,5	0,217
Sol 5	0	0	0	0		1	0,087
					Suma	**8**	**1**

Sol4>Sol2>Sol1>Sol3=Sol5

Tabla 4.36 Evaluación del peso específico del criterio Precisión.

Precisión	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5	Σ+1	Pond.
Sol 1		0,5	0	0,5	0	2	0,174
Sol 2	1		0	0	1	3	0,261
Sol 3	0	0		0	0	1	0,087
Sol 4	1	1	1		0	4	0,348
Sol 5	0	0	0	0		1	0,087
					Suma	**11**	**1**

Sol4>Sol2>Sol1>Sol3=Sol5

Tabla 4.37 Evaluación del peso específico del criterio Compatibilidad.

Compatibilidad	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5	Σ+1	Pond.
Sol 1		0,5	0	0,5	0	2	0,174
Sol 2	1		0	1	0	3	0,261
Sol 3	0	0		0	0	1	0,087
Sol 4	1	0,5	0		0	2,5	0,217
Sol 5	0	0	0	0		1	0,087
					Suma	**9,5**	**1**

Sol2>Sol4>Sol1>Sol3=Sol5

Tabla 4.38 Evaluación del peso específico del criterio Hw/Sw libre.

Hw/Sw libre	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5	Σ+1	Pond.
Sol 1		0	0	0,5	0	1,5	0,130
Sol 2	1		1	1	1	5	0,435
Sol 3	0	0		0	0	1	0,087
Sol 4	1	0,5	0		0	2,5	0,217
Sol 5	0	0	0	0		1	0,087
					Suma	**11**	**1**

Sol2>Sol4>Sol1>Sol3=Sol5

Tabla 4.39 Tabla de conclusiones – Módulo 2.

Criterio	Precio	Seguridad	Mantenimiento	Precisión	Compatibilidad	Hw/Sw libre	Σ	Prioridad
Sol 1	0,050	0,041	0,025	0,008	0,025	0,031	0,180	3
Sol 2	0,124	0,017	0,033	0,012	0,037	0,104	0,327	1
Sol 3	0,025	0,008	0,017	0,004	0,012	0,021	0,087	3=4
Sol 4	0,062	0,012	0,041	0,017	0,031	0,052	0,215	2
Sol 5	0,025	0,008	0,017	0,004	0,012	0,021	0,087	3=4

Con base en los resultados obtenidos, la alternativa óptima es la solución 2 (Serial – Interprete código G libre – Final de carrera), ya que combina un costo bajo con el hardware y software libre, ofreciendo un mantenimiento sencillo, compatibilidad con código G y seguridad suficiente para un entorno educativo, sin necesidad de sensores más costosos o tarjetas propietarias.

Para la evaluación de las alternativas del módulo 3 se consideraron los criterios de precio, capacidad de herramientas, precisión, escalabilidad, facilidad de montaje y seguridad. La evaluación de los criterios se presenta en la Tabla 4.40, mientras que las Tabla 4.41 a Tabla 4.46 muestran la valoración de las alternativas. Los resultados finales se presentan en la Tabla 4.47.

Tabla 4.40 Evaluación del peso específico de criterios del módulo 3.

Criterio	Precio	Capacidad de herramientas	Precisión	Escalabilidad	Fácil montaje	Seguridad	Σ+1	Pond.
Precio		1	1	1	1	1	6	0,286
Capacidad de herramientas	0		1	1	1	1	5	0,238
Precisión	0	0		1	0	0	2	0,095
Escalabilidad	0	0	0		0	0	1	0,048
Fácil montaje	0	0	1	1		1	4	0,190
Seguridad	0	0	1	1	0		3	0,143
						Suma	**21**	**1**

Precio>Capacidad de herramientas>Fácil montaje>Seguridad>Precisión>Escalabilidad

Tabla 4.41 Evaluación del peso específico del criterio Precio.

Precio	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Σ+1	Pond.
Sol 1		0	0	1	2	0,364
Sol 2	0		0	0	1	0,182
Sol 3	0	0		0	1	0,182
Sol 4	0,5	0	0		1,5	0,273
				Suma	**5,5**	**1**

Sol1>Sol4>Sol2=Sol3

Tabla 4.42 Evaluación del peso específico del criterio Precisión.

Precisión	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Σ+1	Pond.
Sol 1		0	1	1	3	0,375
Sol 2	0		0	0	1	0,125
Sol 3	0	0		0,5	1,5	0,188
Sol 4	0,5	0	1		2,5	0,313
				Suma	**8**	**1**

Sol1>Sol4>Sol3>Sol2

Tabla 4.43 Evaluación del peso específico del criterio Capacidad de herramientas.

Capacidad de herramientas	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Σ+1	Pond.
Sol 1		1	1	1	4	0,444
Sol 2	0		0	0	1	0,111
Sol 3	0	1		1	3	0,333
Sol 4	0	0	0		1	0,111
				Suma	**9**	**1**

Sol1>Sol3>Sol2=Sol4

Tabla 4.44 Evaluación del peso específico del criterio Seguridad.

Seguridad	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Σ+1	Pond.
Sol 1		0,5	0	0,5	2	0,200
Sol 2	1		1	0	3	0,300
Sol 3	0	0,5		0,5	2	0,200
Sol 4	1	0	1		3	0,300
				Suma	**10**	**1**

Sol4=Sol2>Sol1=Sol3

Tabla 4.45 Evaluación del peso específico del criterio Fácil montaje.

Fácil montaje	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Σ+1	Pond.
Sol 1		0	0	0	1	0,125
Sol 2	1		1	0	3	0,375
Sol 3	0	0		0	1	0,125
Sol 4	1	0	1		3	0,375
				Suma	**8**	**1**

Sol4=Sol2>Sol1=Sol3

Tabla 4.46 Evaluación del peso específico del criterio Escalabilidad.

Escalabilidad	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Σ+1	Pond.
Sol 1		1	0	1	3	0,375
Sol 2	0		0	0	1	0,125
Sol 3	0	1		1	3	0,375
Sol 4	0	0	0		1	0,125
				Suma	**8**	**1**

Sol1=Sol3>Sol2=Sol4

Tabla 4.47 Tabla de conclusiones – Módulo 3.

Criterio	Precio	Precisión	Capacidad de herramientas	Seguridad	Fácil montaje	Escalabilidad	Σ	Prioridad
Sol 1	0,104	0,036	0,106	0,029	0,024	0,018	0,316	1
Sol 2	0,052	0,012	0,026	0,043	0,071	0,006	0,211	4
Sol 3	0,052	0,018	0,079	0,029	0,024	0,018	0,219	3
Sol 4	0,078	0,030	0,026	0,043	0,071	0,006	0,254	2

De acuerdo con la evaluación realizada, la alternativa óptima es la solución 1 (Computador – Rack lineal fijo), priorizando el bajo costo del rack lineal, una buena precisión y repetibilidad al no tener partes móviles en el almacenador, una capacidad amplia de herramientas, montaje sencillo y escalabilidad futura, todo ello sin añadir complejidad electrónica ni motores adicionales.

Solución conceptual final seleccionada

Como resultado de la evaluación ponderada de alternativas, la configuración conceptual seleccionada para la fresadora CNC quedó definida por:

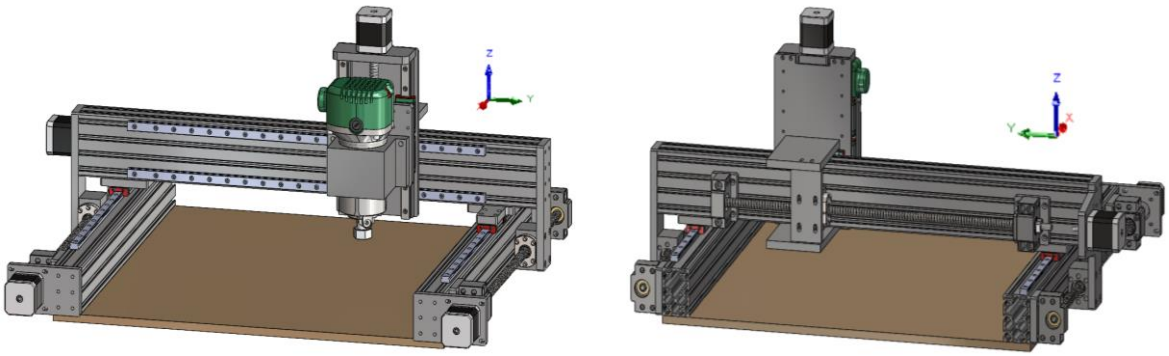
- Módulo 1: Manual – Manual – Software.
- Módulo 2: Comunicación serial – Intérprete de código G libre – Finales de carrera.
- Módulo 3: Computador – Rack lineal fijo.

4.5 Arquitectura general de la máquina

Una vez seleccionada la solución conceptual, se procedió al desarrollo de la arquitectura mecánica de la fresadora CNC considerando los requerimientos de bajo costo, facilidad de mantenimiento, utilización de hardware y software libre, capacidad de simular procesos industriales e incorporación de un sistema de gestión de herramientas.

Como punto de partida se utilizó un modelo tridimensional de referencia correspondiente a una fresadora CNC desarrollada por LowPower CNC [112], mostrada en la Fig.58. A partir de esta

referencia se realizaron modificaciones en las dimensiones generales, la distribución de componentes y la incorporación de elementos adicionales para satisfacer los requerimientos específicos del proyecto. Asimismo, se añadieron funcionalidades asociadas a la simulación de controladores industriales, visualización de coordenadas y gestión de herramientas.

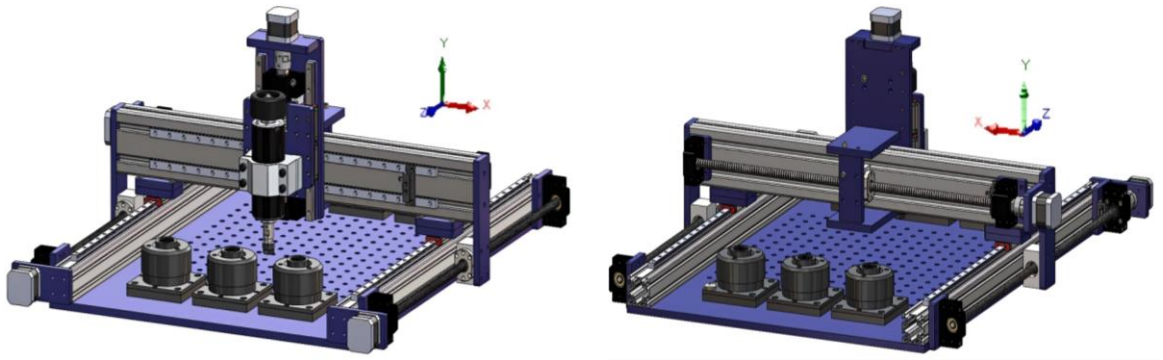


a) b)

Fig.58 Fresadora CNC de referencia [112].

La configuración seleccionada corresponde a una máquina de tipo pórtico, en la cual la herramienta de corte se desplaza mediante movimientos coordinados en los ejes X, Y y Z para ejecutar operaciones de mecanizado controladas mediante código G. Este tipo de arquitectura se caracteriza por su simplicidad constructiva, facilidad de fabricación y costo de implementación [113, 114].

La Fig.58 muestra el modelo de referencia empleado durante la etapa conceptual, mientras que la Fig.59 presenta el ensamblaje final desarrollado para la presente investigación. La comparación entre ambas configuraciones permite identificar las modificaciones realizadas durante el proceso de diseño.



a) b)

Fig.59 Fresadora CNC desarrollada.

Debido a que durante las diferentes etapas del proyecto se emplearon distintas referencias para la definición de los ejes de movimiento, la nomenclatura utilizada en algunos cálculos, modelos CAD y entornos de simulación puede presentar diferencias. Para evitar ambigüedades, la Fig.60 muestra el sistema de coordenadas definitivo adoptado para la fresadora CNC. A partir de este punto, todas las referencias a los ejes X, Y y Z corresponderán a dicha configuración. Estas diferencias de nomenclatura no afectan los resultados obtenidos ni el funcionamiento de la máquina.

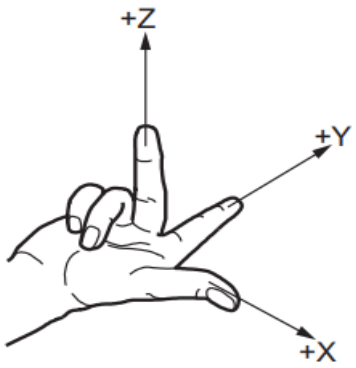


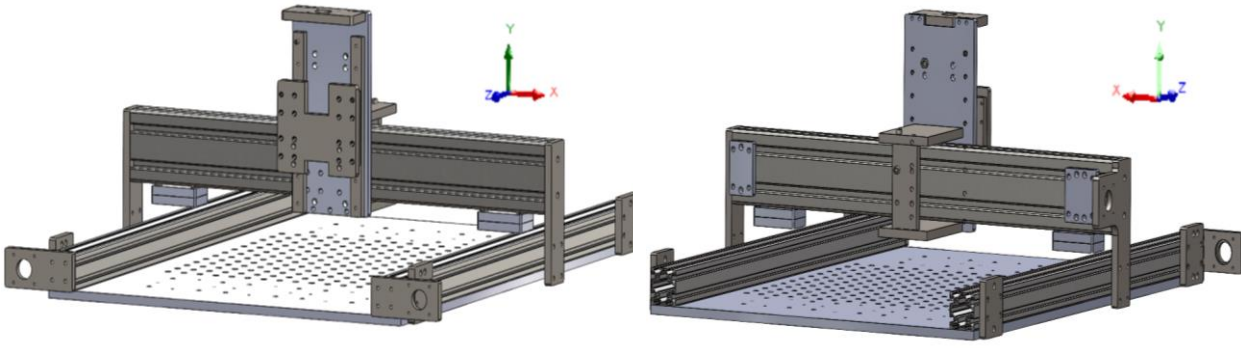
Fig.60 Sistema de coordenadas definitivo [115].

El área útil de trabajo se estableció en 450 mm para el eje X, 400 mm para el eje Y y 100 mm para el eje Z. Estas dimensiones fueron definidas considerando el carácter educativo de la máquina, las dimensiones de las piezas previstas para las prácticas de laboratorio y las características observadas en fresadoras CNC de aplicación similar analizadas durante la fase de evaluación tecnológica. A

partir de estas dimensiones se establecieron las longitudes de los sistemas de guiado, transmisión y estructura, considerando el espacio necesario para la instalación de motores, soportes, rodamientos y demás componentes mecánicos.

4.5.1 Sistema estructural

El sistema estructural constituye el elemento principal de soporte de la fresadora CNC y tiene como función proporcionar rigidez mecánica al conjunto, mantener la alineación entre los componentes móviles y absorber las cargas generadas durante el proceso de mecanizado [116, 117] (ver Fig.61).



a) b)

Fig.61 Fresadora desarrollada – estructura.

La estructura está conformada principalmente por perfiles de aluminio extrusionado 6061-T6 ensamblados mediante elementos de fijación mecánica. Este material fue seleccionado por su disponibilidad comercial, bajo peso, facilidad de mecanizado y ensamblaje, así como por la posibilidad de realizar modificaciones futuras [116, 117].

Los perfiles principales empleados corresponden a secciones de 40 × 40 mm y 40 × 80 mm, utilizadas en la bancada y los elementos portantes de la máquina. Para las uniones estructurales y la fijación de componentes se utilizaron platinas de acero ASTM A36, las cuales permiten reforzar las conexiones, mejorar la distribución de esfuerzos y garantizar la estabilidad geométrica del conjunto durante la operación de la fresadora CNC [116, 117].

La Fig.62 muestra los principales componentes utilizados en el sistema estructural.

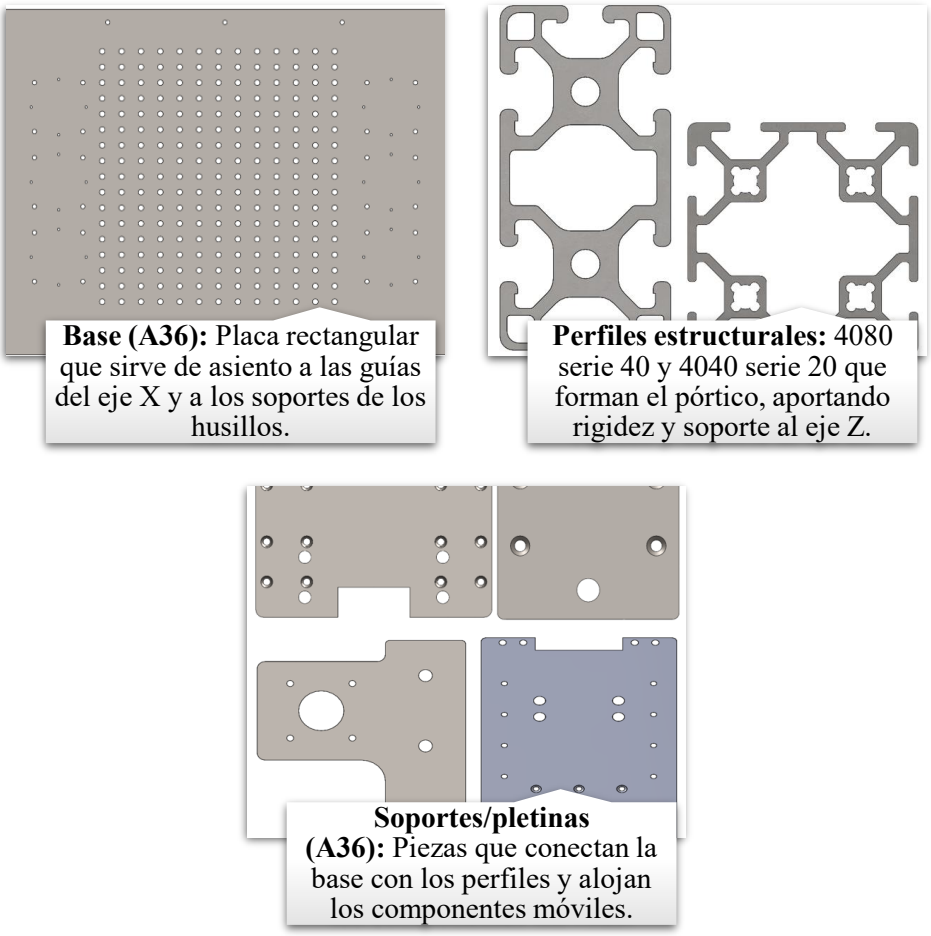


Fig.62 Sistema estructural - Componentes utilizados.

4.5.2 Sistema de guiado lineal

El sistema de guiado lineal tiene la función de garantizar desplazamientos controlados y precisos en los ejes de la fresadora CNC. Para ello se seleccionaron guías lineales con rodamientos de recirculación de bolas, debido a su baja fricción, suavidad de movimiento y adecuada capacidad de carga. Además, este tipo de guías permite mantener la alineación de los ejes durante el desplazamiento, contribuyendo a la precisión del mecanizado [101].

Se emplearon rieles MGN12 distribuidos en los tres ejes de movimiento: dos rieles de 500 mm para el eje X, un riel de 650 mm para el eje Y y un riel de 200 mm para el eje Z. Asimismo, se

utilizaron bloques deslizantes MGN12H, con cuatro bloques en los ejes X y Z (dos por riel) y un bloque por riel en el eje Y. Esta distribución se definió para repartir adecuadamente las cargas sobre el sistema de guiado y mejorar la estabilidad durante el movimiento. La Fig.63 muestra la disposición de estos componentes dentro de la máquina.

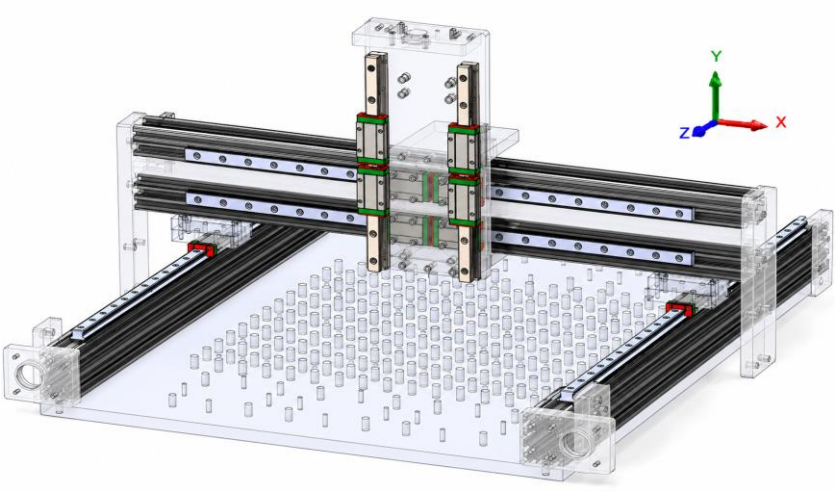


Fig.63 Fresadora desarrollada – guiado lineal.

4.5.3 Sistema de transmisión y accionamiento

El sistema de transmisión convierte el movimiento rotacional de los motores en desplazamientos lineales sobre los ejes X, Y y Z [103]. Para ello se emplearon husillos de bolas SFU1204 acoplados directamente a motores paso a paso NEMA 17, seleccionados por su precisión de posicionamiento, compatibilidad y disponibilidad comercial.

Cada eje incorpora un husillo SFU1204, su respectiva tuerca, soportes de rodamiento tipo BF10 y BK10, y un acoplamiento flexible para la conexión con el motor. Los soportes BF10 y BK10 permiten asegurar el eje del husillo y garantizar su correcto funcionamiento durante la transmisión del movimiento [117].

Los motores NEMA 17 fueron seleccionados por su compatibilidad con sistemas CNC de código abierto, facilidad de integración y disponibilidad en el mercado [114]. La disposición de los elementos de transmisión y accionamiento puede observarse en la Fig.64.

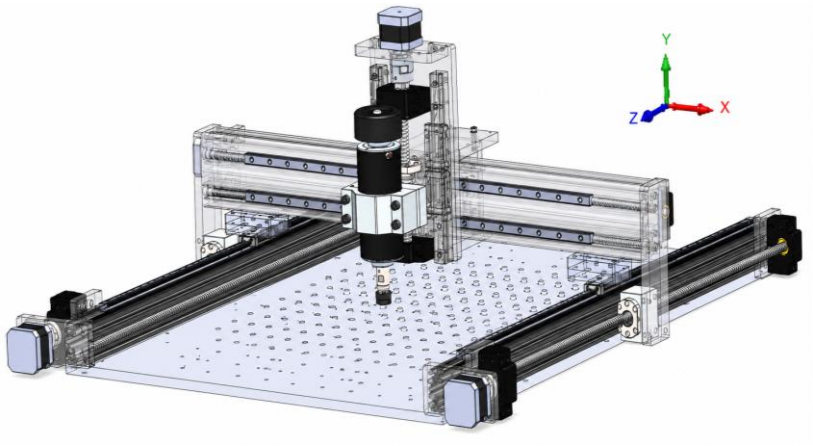


Fig.64 Fresadora desarrollada –transmisión y accionamiento.

4.5.4 Elementos adicionales

Además de los subsistemas principales, la fresadora CNC incorpora elementos complementarios:

- Finales de carrera: Interruptores mecánicos ubicados en los límites de recorrido de cada eje, cuya función es detectar las posiciones extremas y evitar desplazamientos fuera del rango de trabajo.
- Sistema de cambio de herramienta: De acuerdo con los resultados obtenidos en el QFD y la evaluación de alternativas, se seleccionó un rack lineal fijo con capacidad para almacenar hasta seis herramientas. Para su desarrollo se tomó como referencia un diseño de acceso libre reportado por Hobby CNC [118], el cual fue adaptado a las dimensiones y requerimientos específicos de la fresadora CNC propuesta en este trabajo.

La Fig.65 muestra la implementación de esto en la máquina.

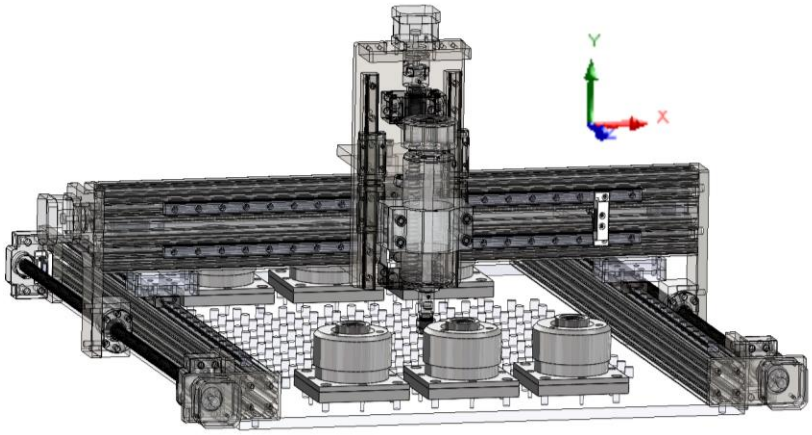


Fig.65 Fresadora desarrollada – Elementos adicionales.

4.6 Selección del motor (spindle) para el eje Z

Para determinar la potencia de corte requerida para el mecanizado, así como la potencia consumida por la máquina dada por la ecuación (32), se emplearon las ecuaciones correspondientes a la velocidad rotacional (ecuación (*2*)) y a la potencia de corte requerida dada por la ecuación (29). El valor de la energía específica se tomó de la Tabla 2.10 (Anexo C), mientras que la velocidad de corte y la velocidad de avance se obtuvieron de la Tabla 4.66, presentada en el Anexo D. Para esta condición de mecanizado se empleó la ecuación (31) para determinar el caudal de material, considerando el proceso como una operación de taladrado [25].

Para el caso de fresado inclinado se utilizaron las ecuaciones (*20*) y (*21*), correspondientes a la velocidad de avance y al caudal de material, respectivamente, asumiendo el ancho de corte (w) igual al radio de la fresa. Asimismo, la profundidad de corte se determinó mediante la ecuación (35), mientras que el torque y la fuerza de corte se calcularon mediante las ecuaciones (33) y (34), respectivamente [25, 26].

$$Material\ de\ remoción\ (MRR) = \left(\frac{\pi(diámetro\ de\ la\ fresa)^2}{4}\right)V_a \qquad (31)$$

$$P_e = \frac{P_c}{\eta} \quad (32) \qquad T_m = \frac{P_c}{2\pi \cdot N} \quad (33)$$

$$F_c = \frac{2 \cdot T_m}{D_o} \quad (34) \qquad d = \frac{1}{f} \quad (35)$$

Donde

MRR	Material de remoción o caudal (mm^3/s).	N	Velocidad rotacional (rpm).
P_c	Potencia de corte requerida (W).	D_o	Diámetro de la fresa (mm).
P_e	Potencia consumida por la máquina (W).	F_c	Fuerza de corte (N).
η	Rendimiento de la máquina (%).	d	Profundidad de corte (mm).
T_m	Torque $(N.m)$.	f	Avance $(mm/diente)$.

Los datos considerados para los cálculos se presentan en la Tabla 4.48. Todos estos cálculos se basaron en [25].

Tabla 4.48 Datos considerados para el cálculo de potencia requerida y consumida por la máquina.

Diámetro de la fresa	Avance	Velocidad de avance	Velocidad de corte	Número de filos fresa	Energía específica	Rendimiento de máquina
6 mm	0,2 $mm/diente$	0,136 mm/rev	110 m/min	2	0,76 J/mm^3	80 % se asume

Los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 4.49, permitieron determinar una potencia consumida por la máquina de 784,089 W, por lo que se seleccionó un spindle de 1 HP para satisfacer las condiciones de mecanizado consideradas.

Tabla 4.49 Tabla de resumen de resultados del cálculo de potencia requerida y consumida por la máquina.

Caso	MRR mm^3/s	P_m W	P_m HP	P_e W	P_e HP	T_m $N.m$	F_c N
Perforar	374	284,24	0,381	355,3	0,476	0,465	155
Inclinado	825,356	627,271	0,841	784,089	1,051	1,027	342,33

4.6.1 Determinación de las cargas aplicadas

Para el análisis del eje Z se establecieron las cargas iniciales correspondientes a las operaciones de perforación y corte inclinado. Las fuerzas de corte y los torques asociados a cada condición de mecanizado se presentan en la Tabla 4.49, mientras que las fuerzas debidas al peso de los componentes del conjunto móvil del eje Z se muestran en la Tabla 4.50. Estas cargas representan los datos de entrada del análisis y se incorporan en los diagramas de cuerpo libre de las Fig.67a y Fig.69a, donde las fuerzas se identifican en color morado y los torques en color verde. A partir de estas condiciones conocidas se determinarán progresivamente las reacciones y los momentos del sistema, conforme se desarrollen las ecuaciones de equilibrio correspondientes a cada diagrama de cuerpo libre.

Tabla 4.50 Estimación de peso para el eje Z [119-122].

Cantidad	Componentes	Peso (Kg)
1	Nema 17	0,22
1	Husillo	0,367
2	Guías	0,07
S/N	Placas	1
S/N	Cable/ anexos	1
1	Motor (spindle)	5
	$\boldsymbol{F_{w_z}}$	**75,039 N**

4.6.2 Eje Z – Caso perforación

El diagrama de cuerpo libre (DCL) del eje Z para el caso de perforación se elaboró considerando los elementos que intervienen en este eje, como se muestra en la Fig.66. A partir de las cargas generadas durante la operación de perforación, se estableció la distribución de fuerzas presentada en la Fig.67a. Aplicando la sumatoria de fuerzas y momentos respecto al punto A (ecuaciones (36) y (37)) [116, 117], se determinaron las incógnitas del sistema; las variables representadas en color naranja corresponden a los momentos y las indicadas en color rosado a las reacciones de fuerza. El

DCL resuelto se presenta en la Fig.67b. Con estos resultados se construyeron los diagramas de fuerza cortante y momento flector mostrados en la Fig.68.

$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0 \qquad \sum F_z = 0 \tag{36}$$

$$\sum M_x = 0 \qquad \sum M_y = 0 \qquad \sum M_z = 0 \tag{37}$$

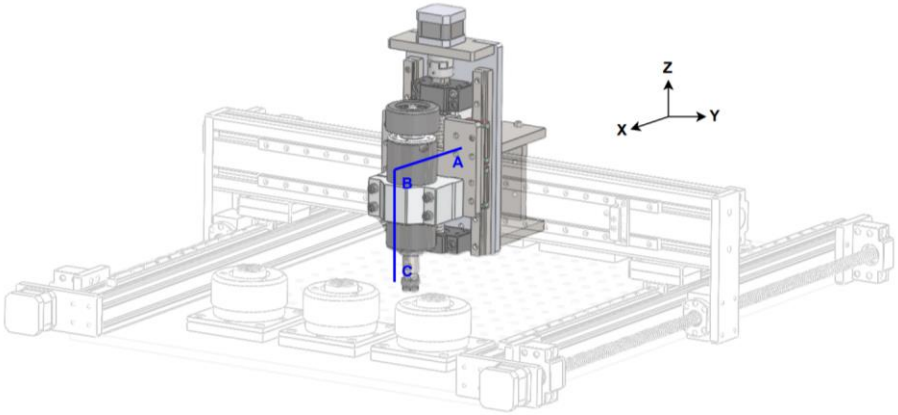
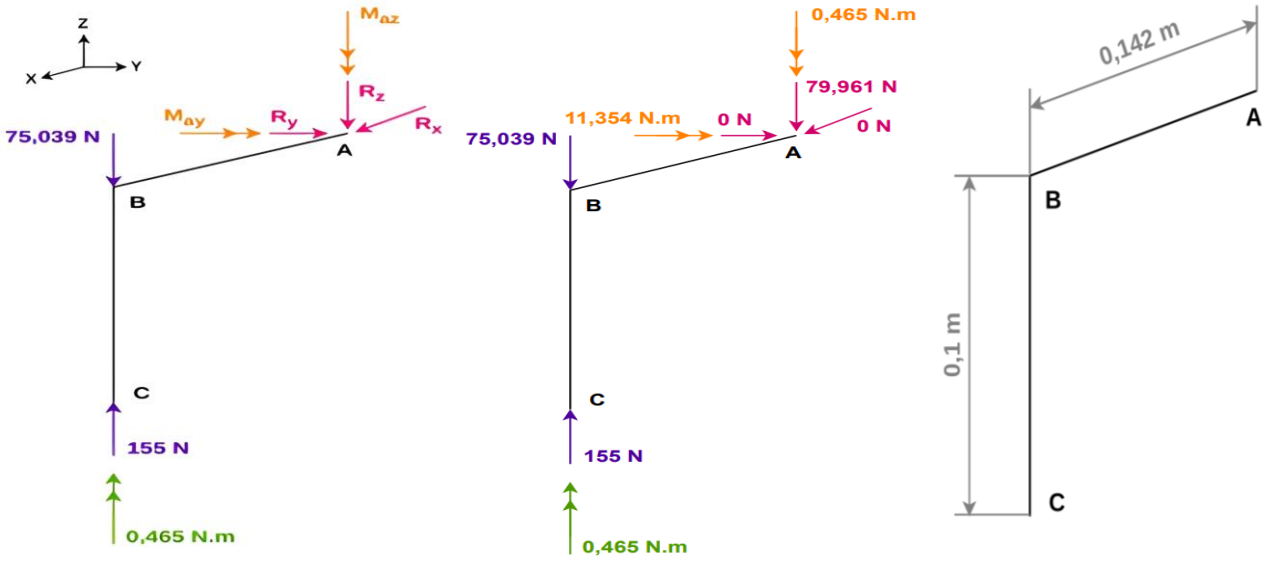


Fig.66 Eje Z.



a) b) c)

Fig.67 DCL eje Z – Perforación, a) Sin resolver; b) Resuelto; c) Medidas.

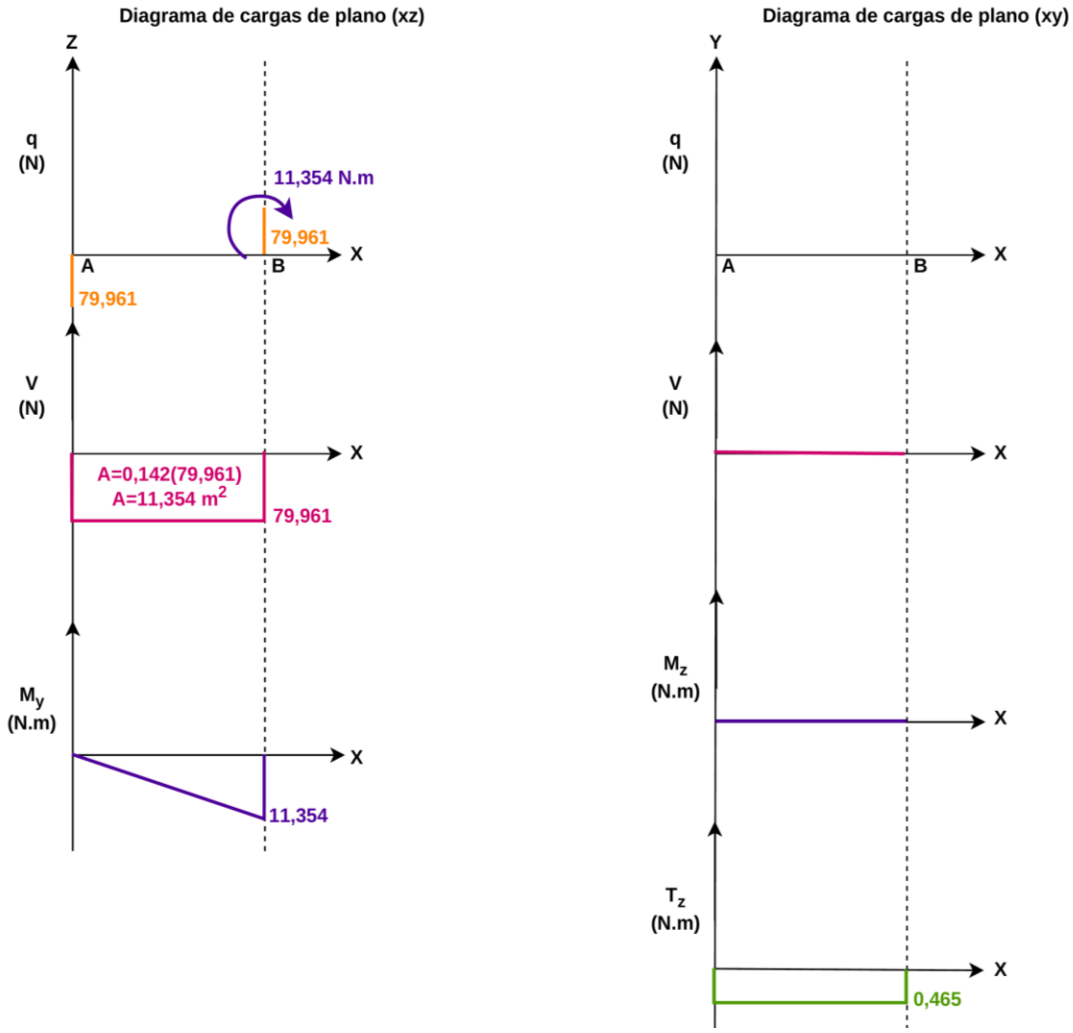


Fig.68 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje Z – Perforación.

El mismo procedimiento fue aplicado para los ejes X, Y y Z en los casos de perforación (corte en el eje Z) y fresado inclinado (corte en el plano XY). Por esta razón, en las siguientes secciones se presentan únicamente los diagramas y resultados obtenidos para cada condición de carga.

4.6.3 Eje Z – Caso inclinado

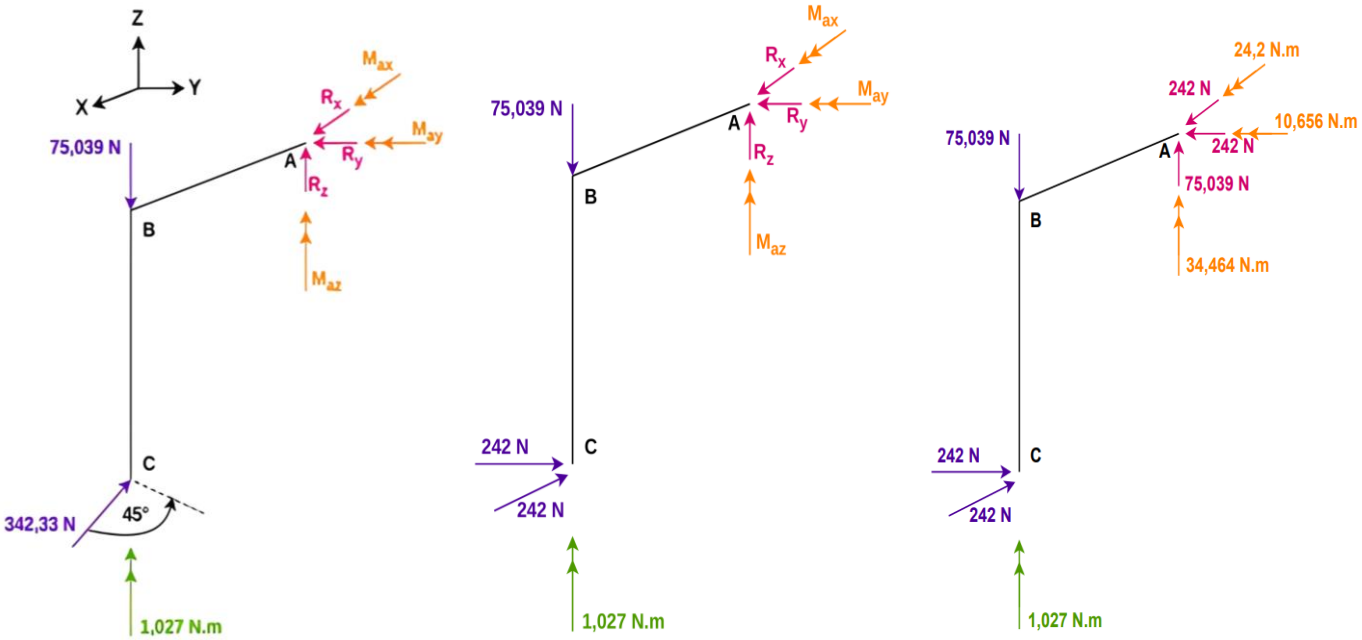


Fig.69 DCL eje Z – Inclinado, a) Sin resolver; b) Sin resolver- descomposición; c) Resuelto.

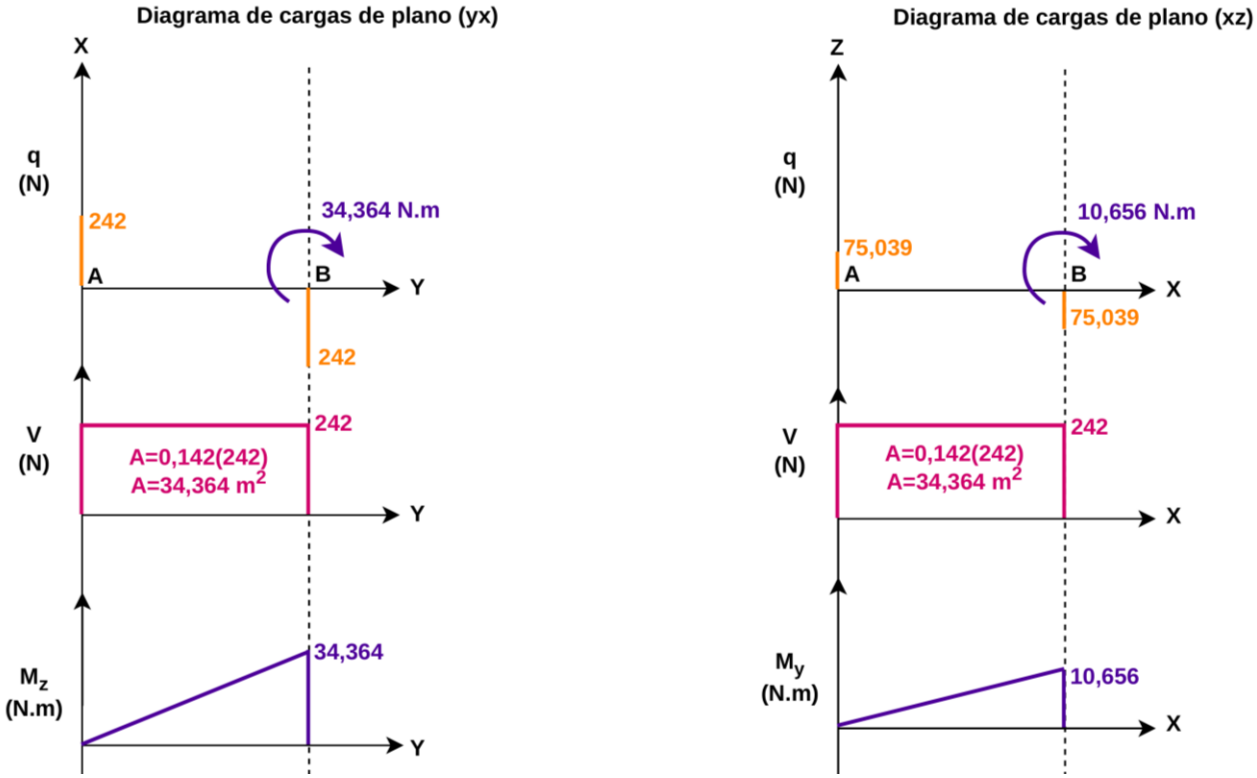


Fig.70 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje Z – Inclinado.

4.6.4 Eje Y – Caso perforación

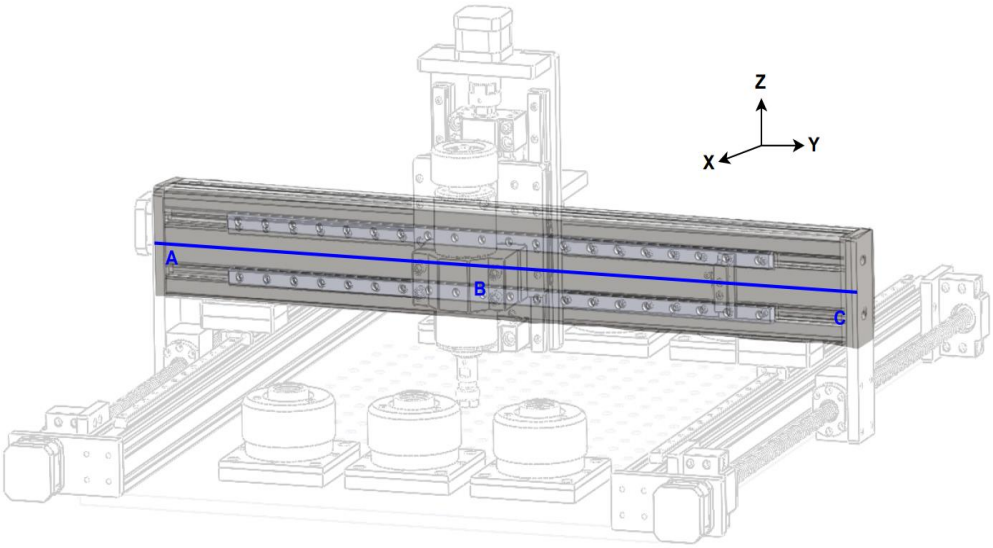


Fig.71 Eje Y.

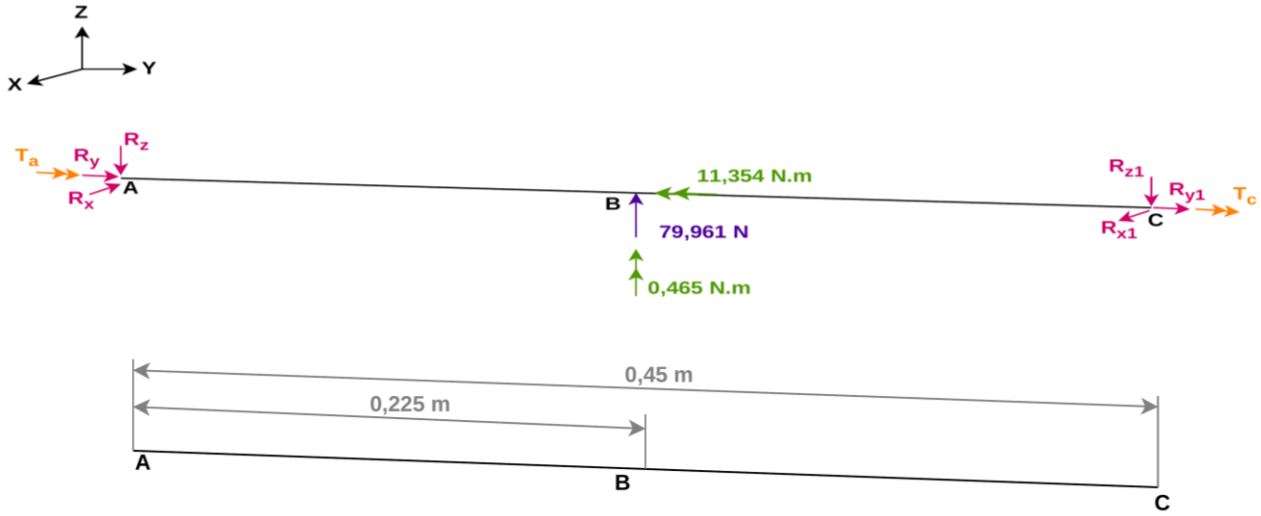


Fig.72 DCL eje Y – Perforación.

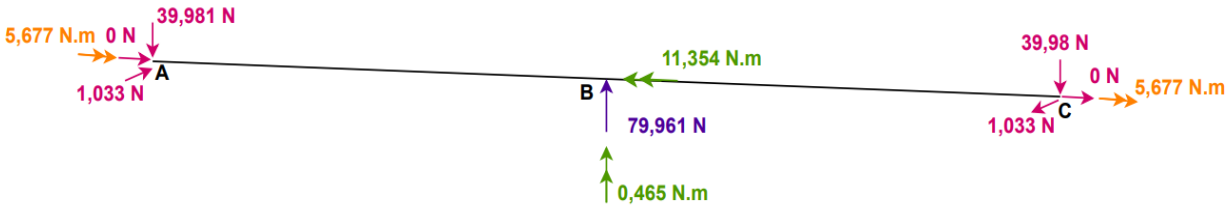


Fig.73 DCL resuelto eje Y – Perforación.

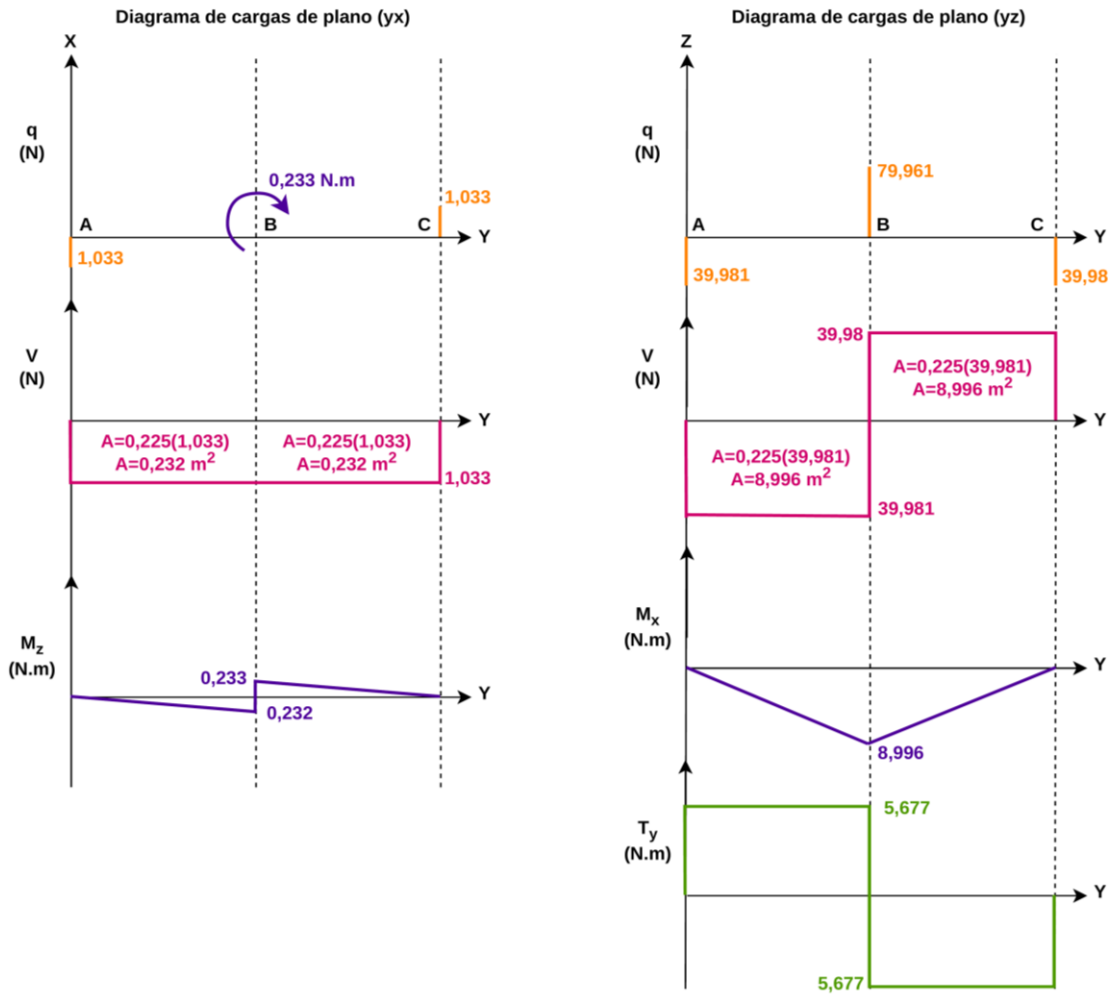


Fig.74 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje Y – Perforación.

4.6.5 Eje Y – Caso inclinado

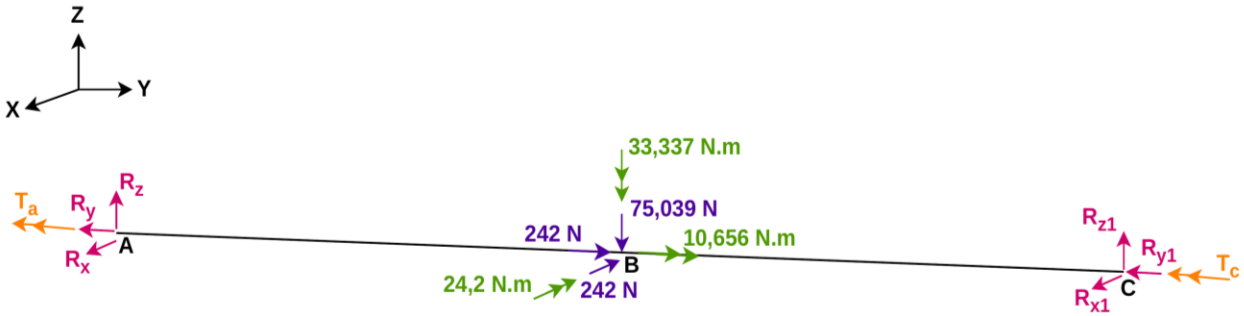


Fig.75 DCL eje Y – Inclinado.

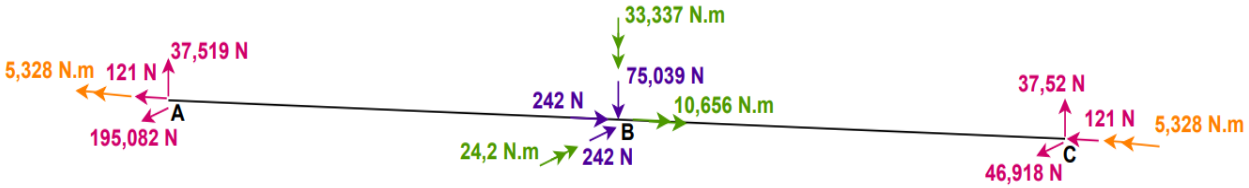


Fig.76 DCL resuelto eje Y – Inclinado.

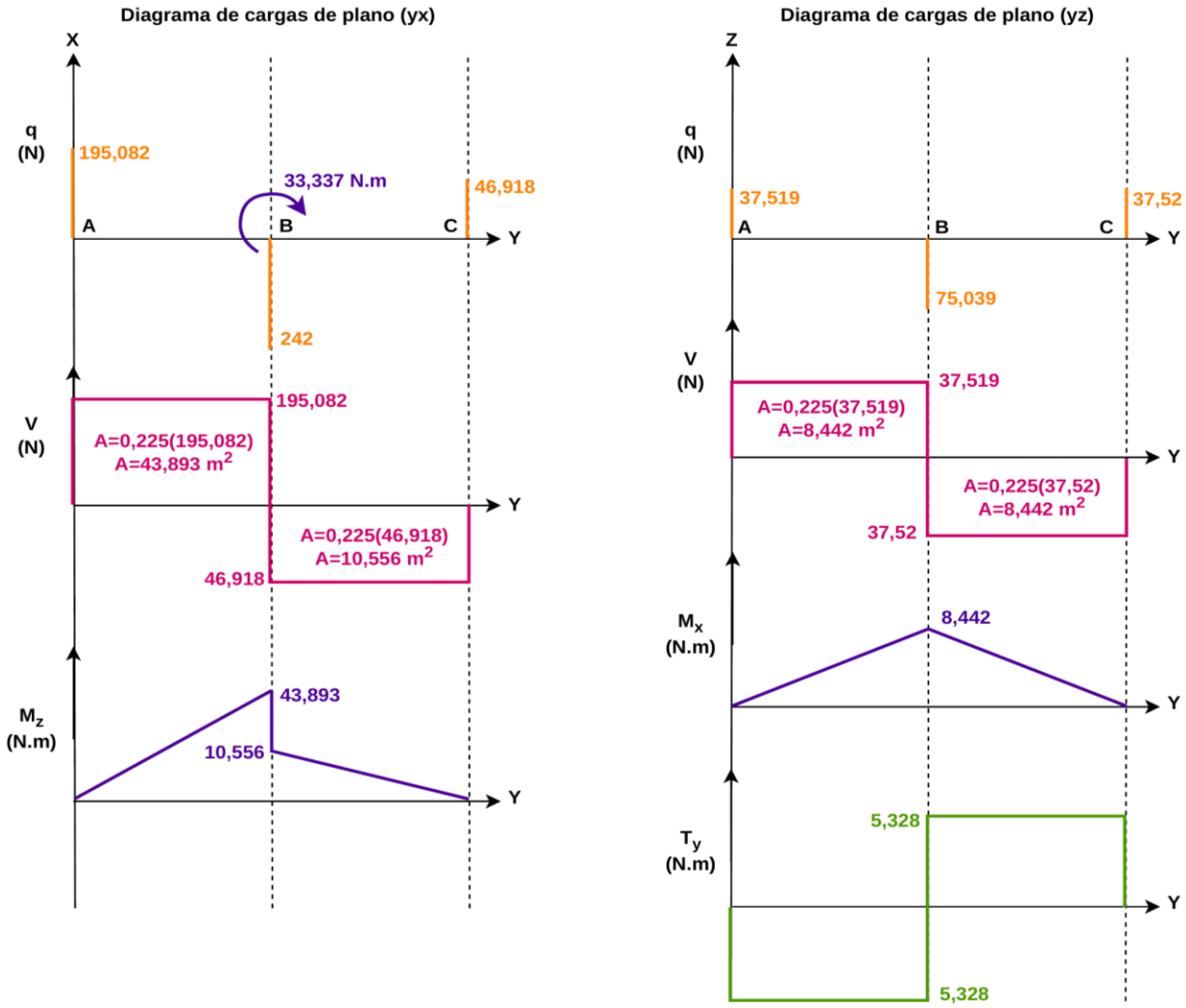


Fig.77 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje Y – Inclinado.

4.6.6 Eje X – Caso perforación

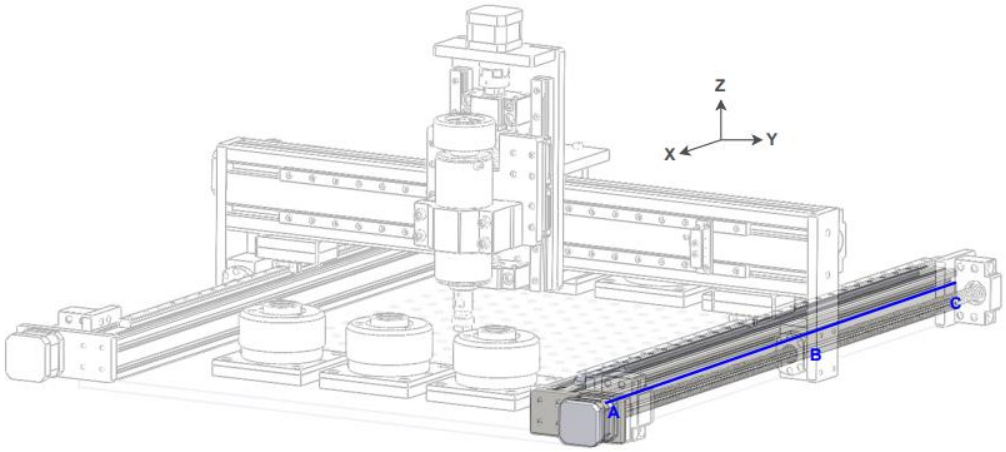


Fig.78 Eje X.

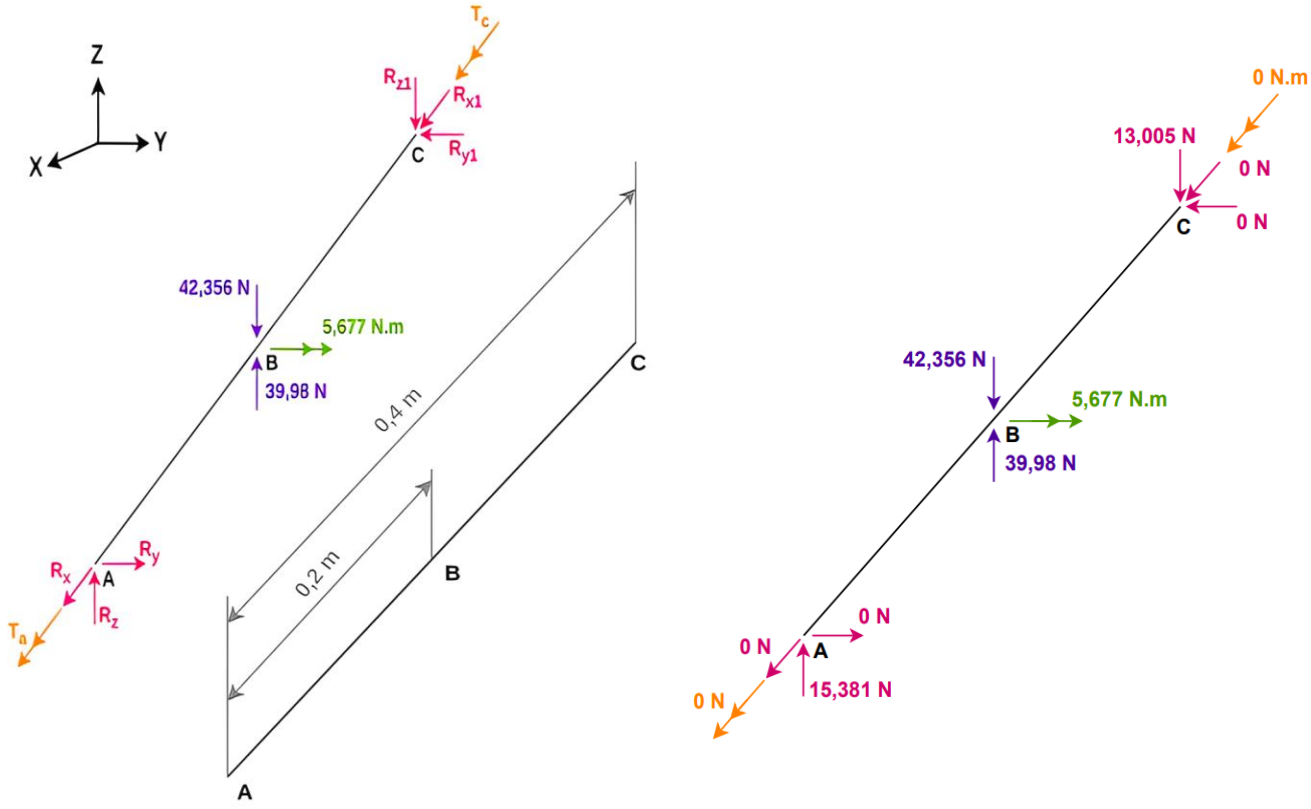


Fig.79 DCL eje X – Perforación, a) Sin resolver; b) Resuelto.

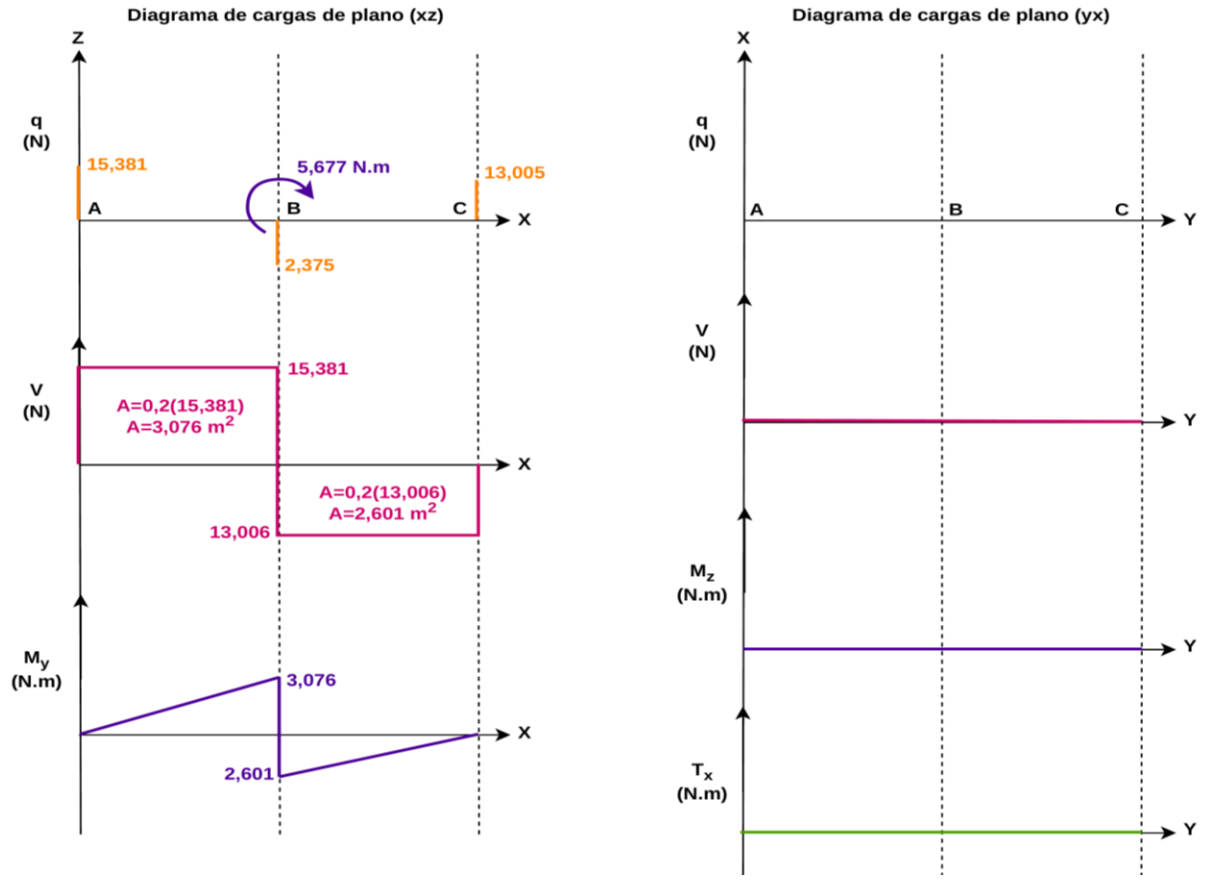
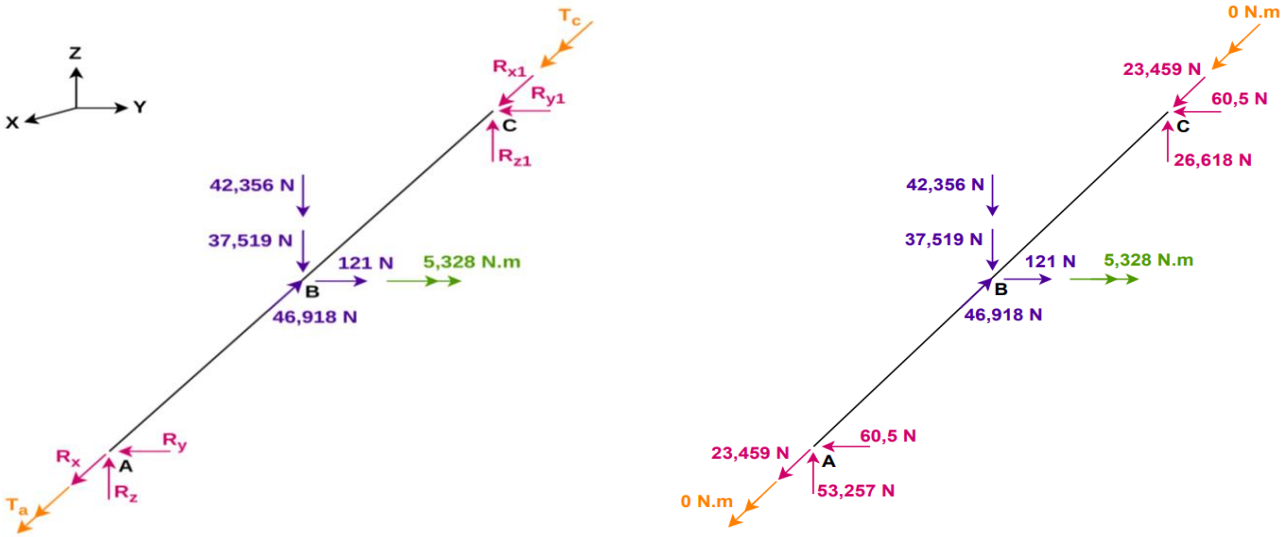


Fig.80 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje X – Perforación.

4.6.7 Eje X – Caso inclinado



a) b)

Fig.81 DCL eje X – Inclinado, a) Sin resolver; b) Resuelto.

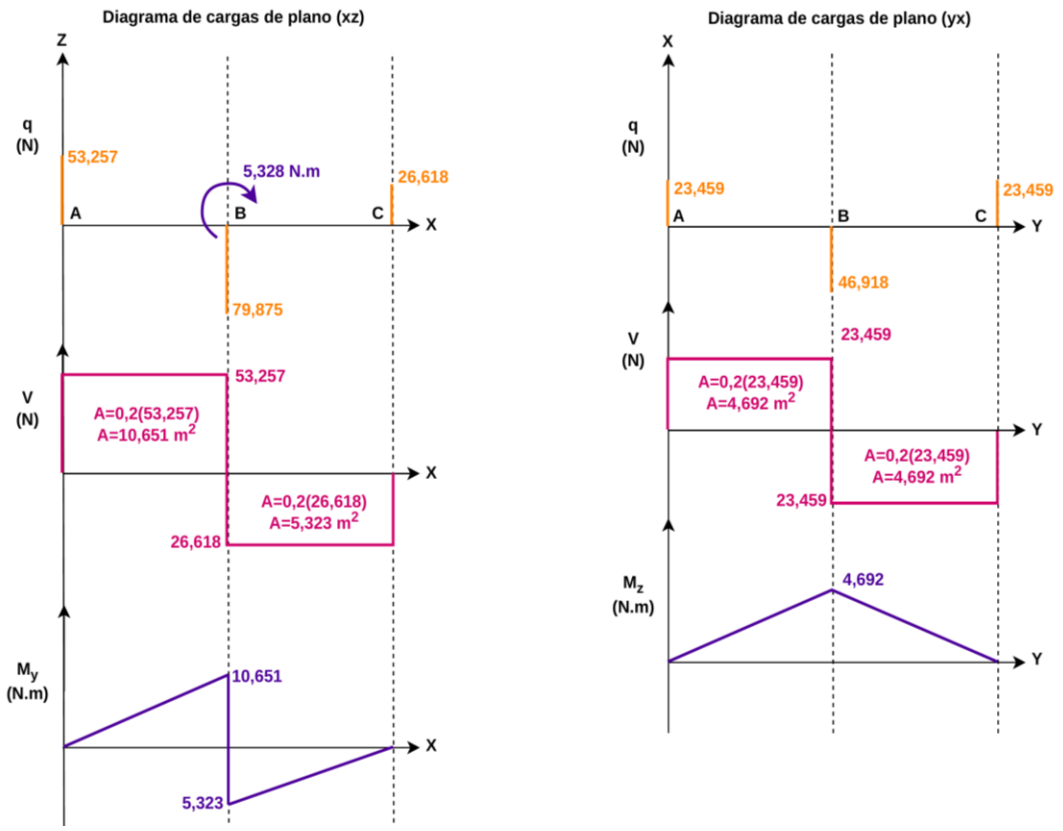


Fig.82 Diagrama de fuerza cortante y momento flector eje X – Inclinado.

4.6.8 Cálculo del esfuerzo máximo

Debido a que el perfil estructural 4080 correspondiente al eje Y presentó los mayores momentos flectores durante el caso de fresado inclinado (ver Fig.77), se determinó el esfuerzo máximo por flexión mediante la ecuación (38) [117], con el fin de evaluar el comportamiento del perfil bajo la condición de carga más crítica. Los datos empleados para el cálculo se presentan en la Tabla 4.51.

$$\sigma_x = -\frac{M_z}{I_z} y + \frac{M_y}{I_y} z \qquad (38)$$

Tabla 4.51 Datos empleados para esfuerzo máximo [123].

M_z $[MPa]$	M_y $[MPa]$	y $[mm]$	z $[mm]$	I_z $[mm^4]$	I_y $[mm^4]$
43.893	8.442	20	40	187.791	718.926

Con el fin de verificar el esfuerzo obtenido, se realizó un análisis por elementos finitos del mismo perfil utilizando el criterio del esfuerzo de Von Mises. La Fig.83 muestra el modelo empleado para la simulación.

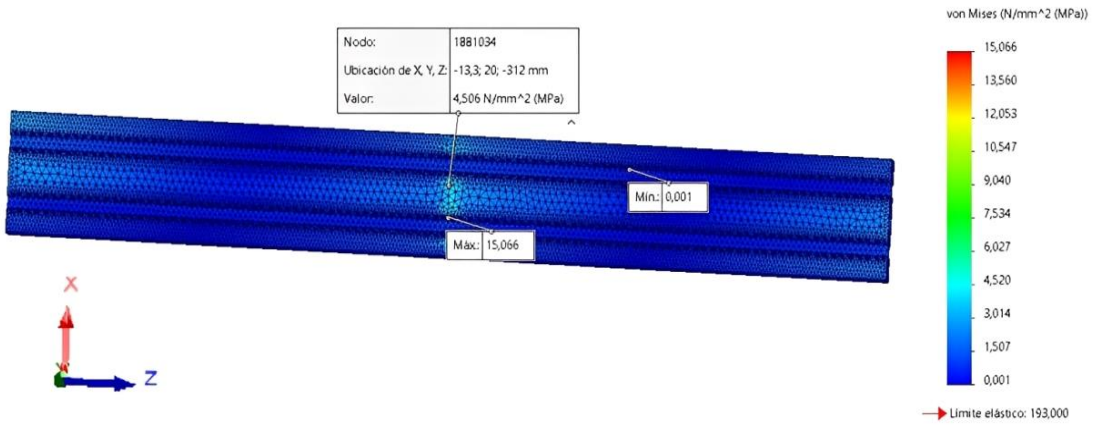


Fig.83 Perfil 4080 simulado (eje Y).

Para evaluar la estabilidad de los resultados se elaboró cuatro simulaciones con diferentes configuraciones de mallado. Los esfuerzos máximos obtenidos se presentan en la Tabla 4.52, donde además se determinaron el promedio, la desviación estándar y el error estándar mediante funciones estadísticas de Microsoft Excel [124].

Tabla 4.52 Resultado de esfuerzos máximos simulados.

N° de muestra	Esfuerzo máximo Von Mises [MPa]
1	4,275
2	4,506
3	4,671
4	4,391
Promedio	4,461
Desviación estándar	0,169
Error estándar	0,084

La Fig.84 muestra la dispersión de los esfuerzos obtenidos respecto al valor promedio. Se observa una baja variación entre las simulaciones, representada por un error estándar de ±0,084 MPa.

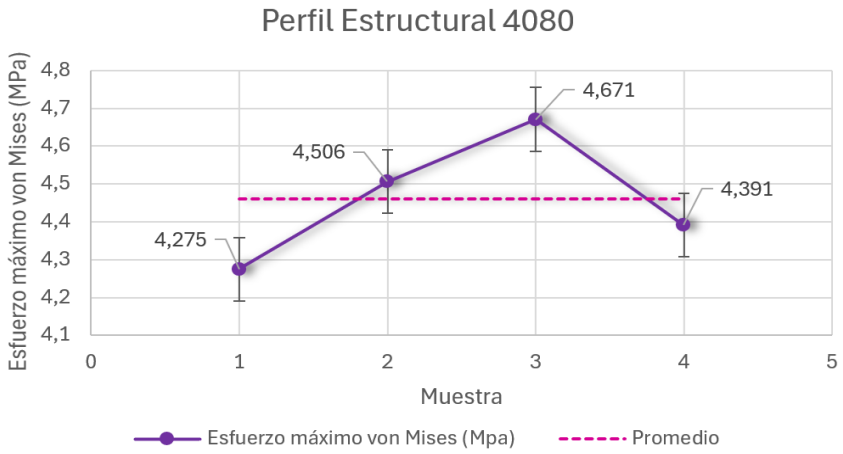


Fig.84 Gráfica de resultados de esfuerzos máximos simulados.

El esfuerzo máximo obtenido mediante el cálculo se comparó con el esfuerzo promedio obtenido en la simulación mediante la ecuación (39) de error relativo [125].

$$\%\, Error\ relativo = \left(\frac{|Valor\ calculado - valor\ de\ simulación|}{valor\ calculado}\right) \times 100 \qquad (\ 39\ )$$

Los resultados se presentan en la Tabla 4.53, obteniéndose un error de 6,107 %. Este valor es inferior al 7 % recomendado para el criterio de error de discretización [125], lo que evidencia una adecuada concordancia entre el cálculo teórico y la simulación por elementos finitos.

Tabla 4.53 Resultado de error entre esfuerzo máximo calculado – simulado.

Promedio de esfuerzo máximo simulado[MPa]	**Esfuerzo máximo calculado [MPa]**	**Error relativo [%]**
4,461	4,204	6,107

4.6.9 Selección de guías lineales

La selección de las guías lineales y sus respectivos bloques se realizó considerando los momentos máximos obtenidos a partir de los diagramas de fuerza cortante y momento flector de cada eje. Como referencia se utilizaron las especificaciones de capacidad de carga y momento de los bloques HIWIN serie MGNH [121], verificando que los valores calculados se mantuvieran dentro de los límites admisibles establecidos por el fabricante.

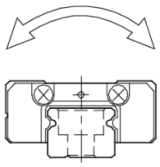
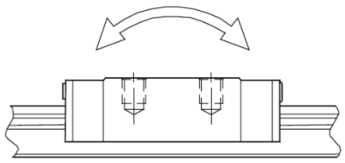
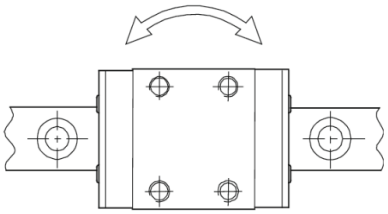
En aquellos casos en los que un solo bloque no resultaba suficiente para soportar el momento actuante, se incrementó la cantidad de bloques por eje, distribuyendo la carga entre dos o hasta cuatro bloques según la condición analizada. Esta distribución corresponde a la configuración adoptada para el sistema de guiado lineal descrito anteriormente (ver Fig.63).

La Tabla 4.54 presenta un resumen de los momentos máximos obtenidos para cada eje a partir de los diagramas de fuerza cortante y momento flector, considerando como condición crítica el fresado de caso inclinado. La Tabla 4.55 muestra las capacidades de carga y los momentos admisibles especificados por el fabricante para los bloques HIWIN serie MGNH [121], utilizados para verificar el cumplimiento de los criterios de diseño y seleccionar la configuración de guiado más adecuada para cada eje.

Tabla 4.54 Resumen de momentos – Caso inclinado

Eje	Momento resultante (N.m)
Z	35,978
Y	44,697
X	11,638

Tabla 4.55 Capacidades de carga y pares de torsión [121].

M_X	M_Y	M_Z	
			
C_{dyn}	Capacidad de carga dinámica	3,720	
C_0	Capacidad de carga estática	5,880	
M_{0X}	Momento estático	38,2	$N.m$
M_{0Y}	Momento estático	36,3	$N.m$
M_{0Z}	Momento estático	36,3	$N.m$

4.6.10 Determinación del diámetro del husillo de bolas

Para la selección del husillo de bolas se aplicó el criterio de Von Mises, mostrado en la ecuación (40) junto con las ecuaciones (47) y (48). Para la determinación de los esfuerzos internos se emplearon las expresiones correspondientes al área de la sección circular, módulo de sección y módulo polar, presentadas en las ecuaciones (41) a (43), así como las ecuaciones de esfuerzo normal, flexión y torsión indicadas entre las ecuaciones (44) a (46), basándose en [116, 117, 126].

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_{x^2} + \sigma_{y^2} - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy^2}} \quad (40)$$

$$A = \pi \frac{d^2}{4} \quad (41) \qquad S = \pi \frac{d^3}{32} \quad (42)$$

$$S_p = \pi \frac{d^3}{16} \quad (43) \qquad \sigma_x = \frac{P}{A} \quad (44)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{A} - \frac{M}{S} \quad (45) \qquad \tau_{xy} = \frac{T}{S_p} \quad (46)$$

$$\sigma' \leq \sigma_{ADM} \quad (47) \qquad \sigma_{ADM} = \frac{S_y}{N} \quad (48)$$

Los datos considerados para el husillo de bolas se presentan en la Tabla 4.56, donde se asumió un factor de seguridad de 1,5. Para el cálculo se emplearon los valores de momento flector correspondientes al punto B, identificado como la sección crítica, así como las fuerzas y torsiones asociadas a cada caso de corte según el eje analizado, obtenidas a partir de los diagramas de cuerpo libre, fuerza cortante y momento flector realizados anteriormente, mismas se pueden observar en la Tabla 4.57.

Los diámetros calculados (ver Tabla 4.57) fueron comparados con las dimensiones comerciales disponibles para husillos de bolas. Debido a que los catálogos comerciales contemplan diámetros

a partir de 12 mm y el siguiente diámetro disponible es de 16 mm, se seleccionó un husillo SFU1204 de 12 mm, considerando que el diámetro mínimo calculado para la condición más crítica fue de 12,016 mm y que la diferencia respecto al diámetro comercial disponible es de 0,016 mm, evitando así un sobredimensionamiento que incrementaría el costo del sistema [106, 127].

Tabla 4.56 Datos de husillo de bolas SFU [127, 128].

Material	Límite de fluencia (S_y)	Resistencia última a la tracción (S_u)	Factor de seguridad (N)
S55c	392 MPa	647 MPa	1,5

Tabla 4.57 Diámetros de husillos calculados.

Eje	Caso	Momento (M_{B_R}) $[N.m]$	Torque (T_m) $[N.m]$	Fuerza axial (P) $[N]$	Diámetro de husillo $[mm]$
Z	Perforar	11,354	0,465		7,622
	Inclinado	35,978		242	11,176
Y	Perforar	8,999	5,677		7,366
	Inclinado	44,697		242	12,016
X	Perforar	3,076			4,931
	Inclinado	11,639		46,918	7,679

4.6.11 Selección del motor paso a paso

Para seleccionar el motor paso a paso adecuado para cada eje de la máquina CNC, se consideraron las fuerzas axiales (F_b) obtenidas durante la condición de corte inclinado (ver Tabla 4.58), debido a que representa el caso más crítico de operación. Estas fuerzas actúan sobre los husillos de bolas SFU1204 seleccionados previamente, los cuales poseen un avance (ℓ) de 4 mm por revolución.

Asimismo, se asumió una eficiencia mecánica (η_1) del sistema de transmisión del 80%, la cual considera las pérdidas asociadas al conjunto husillo-tuerca y a los elementos mecánicos involucrados en la transmisión del movimiento.

El torque requerido (T_a) para cada eje se determinó mediante la ecuación (49) [120]:

$$T_a = \frac{F_b \cdot \ell}{2\pi \cdot \eta_1} \quad (49)$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.58.

Tabla 4.58 Resultados obtenidos – selección del motor paso a paso.

Eje	Fuerza axial (N)	Torque requerido (N.m)
Z	242	0,193
Y	121	0,096
X	23,459	0,019

Posteriormente, los torques requeridos se compararon con los pares nominales de los motores evaluados. El motor NEMA 17 presenta un par nominal de $0{,}48\ N.m$, mientras que el NEMA 23 alcanza $1{,}5\ N.m$ [119]. Dado que el máximo torque requerido corresponde al eje Z ($0{,}193\ N.m$), el NEMA 17 satisface los requerimientos de los tres ejes, por lo que la incorporación de un NEMA 23 implicaría un sobredimensionamiento del sistema, incrementando el costo de implementación sin aportar ventajas significativas para las condiciones de mecanizado previstas.

4.6.12 Factor de seguridad y vida útil de los rodamientos

Para el cálculo del factor de seguridad y la vida útil de los rodamientos se consideraron las fuerzas radiales y axiales obtenidas para los casos de fresado inclinado de cada eje. El procedimiento se basó por el catálogo SKF [129], empleando el ángulo de contacto para determinar el tipo de rodamiento requerido. La orientación de las fuerzas se muestra en la Fig.85, mientras que la Tabla 4.59 presenta las cargas, los ángulos calculados y el tipo de rodamiento correspondiente.

Tabla 4.59 Resultados para tipo de rodamiento requerido.

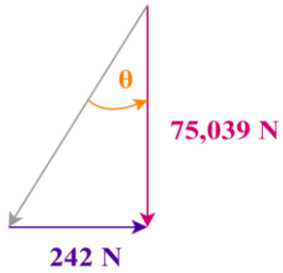


Fig.85 Orientación de fuerzas.

Eje	Radial (N)	Axial (N)	Ángulo de contacto (°)	Tipo de rodamiento
Z	75,039	242	72,77	Axial (rodillos o bolas)
Y (Ambos lados)	37,52	121	72,77	Axial (rodillos o bolas)
+X	53,257	23,459	23,77	Radial (rodillo o bolas)
-X	26,618	23,459	41,39	

Debido a que los husillos SFU1204 incorporan los soportes BF10 y BK10 con sus respectivos rodamientos, las capacidades de carga se obtuvieron del catálogo HIWIN y se presentan en la Tabla 4.60.

Tabla 4.60 Datos considerados para rodamientos de bolas [130].

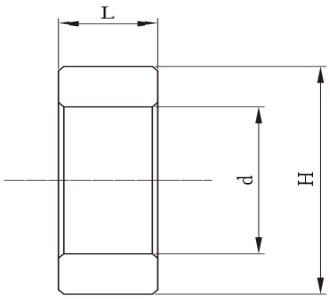


Fig.86 Esquema de rodamiento.

Datos rodamiento de bolas axial (BK10)		**Datos rodamiento de bolas radial (BF10)**	
Capacidad de carga (kN)	d: 10 mm	Capacidad de carga (kN)	d: 8 mm
Dinámica (C): 6,4	H: 15,5 mm	Dinámica (C): 3,3	L: 20 mm
Estática (C_o): 1,9	L: 5,5 mm	Estática (C_o): 1,3	$X = 6{,}6$
$\theta_{interno}$: 10 mm	$X = 6{,}6$	$\theta_{interno}$: 8 mm	$Y = 10{,}8$
	$Y = 10{,}8$		

Donde

P_o	Carga estática	F_r	Carga radial real
S_o	Factor de seguridad a carga estática	Y_o	Factor de carga axial
C_o	Capacidad de carga estática básica	F_a	Carga axial real
X_o	Factor de carga radial	P	Carga dinámica equivalente

Posteriormente, se aplicaron las ecuaciones (50) a (56) para determinar el factor de seguridad y la vida útil de los rodamientos. En la ecuación (54) se asumió la primera condición de cálculo,

debido a que el catálogo HIWIN no proporciona el valor del factor límite (e). Asimismo, en la ecuación (56) se adoptó el exponente correspondiente a rodamientos de rodillos, de acuerdo con las recomendaciones del catálogo SKF [129].

$$P_o = X_o \cdot F_r + Y_o \cdot F_a \quad (50)$$

$$P_o = 0{,}6 \cdot F_r + 0{,}5 \cdot F_a \quad (51)$$

$$P_o = \begin{cases} F_r \ , & si\ P_o < F_r \\ P_o \ , & si\ P_o \geq F_r \end{cases} \quad (52)$$

$$S_o = \frac{C_o}{P_o} \quad (53)$$

$$P = \begin{cases} X \cdot F_r + Y \cdot F_a \ , & si \ \ \frac{F_a}{F_r} > e \\ F_r \ , & si \ \ \frac{F_a}{F_r} \leq e \end{cases} \quad (54)$$

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (55)$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (56)$$

Los resultados correspondientes se presentan en la Tabla 4.61. Los elevados factores de seguridad obtenidos se atribuyen a que las cargas generadas durante el mecanizado resultan reducidas en comparación con la capacidad de carga de los rodamientos de los soportes BF10 y BK10.

Tabla 4.61 Resultados de cálculos de rodamientos.

Eje	Carga estática calculada (P_o) [N]	Factor de seguridad a carga estática (S_o)	Carga dinámica equivalente (P) [kN]	Vida útil (L_{10}) [$millones\ de\ ciclos$]
Z	166,023 N	11,444	3,109 kN	8,723
Y	83,012 N	22,888	1,554 kN	69,853
+X	43,684 N	24,409	604,853 N	162,402
-X	23,700 N	48,839	429,036 N	455,052

La vida útil calculada mediante el criterio (L_{10}) en la Tabla 4.61 se transformó de millones de revoluciones a horas de operación considerando una velocidad de giro de 200 rpm [119], correspondiente a una velocidad de avance de 800 mm/min y un husillo de bolas SFU1204. Posteriormente, considerando un régimen de trabajo de 6 horas diarias durante 5 días a la semana, equivalente a 1560 horas anuales, se determinó la duración equivalente de operación para cada eje, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.62.

Tabla 4.62 Resultado de vida útil de rodamientos para cada eje.

Eje	Vida útil [años]	Vida útil
Z	0,47	5 meses y 19 días
Y	3,73	3 años, 8 meses y 23 días
+X	8,67	8 años, 8 meses y 1 día
-X	24,31	24 años, 3 meses y 22 días

4.6.13 Selección de acoples Lovejoy

Entre las opciones analizadas (helicoidal, rígido y tipo araña), se seleccionó el acople tipo araña (de mandíbula) debido a su compatibilidad con los diámetros del eje del motor y del husillo, así como por su capacidad de transmisión de par. Los datos correspondientes al torque nominal del motor y a los diámetros de los ejes se presentan en la Tabla 4.63.

Tabla 4.63 Datos para selección de acoples [119, 131].

Torque nominal ($N.m$)	Eje motor (mm)	Eje husillo SFU1204 (mm)
0,48	5	8

Como criterio de validación, se determinó el par de diseño (T_d) mediante la ecuación (57) [132]:

$$T_d = T_n \cdot FS \tag{57}$$

Donde

T_n Torque nominal del motor ($N.m$).

FS Factor de servicio.

Para este cálculo se aplicó un factor de servicio de 1.0, el cual corresponde a un motor con par estándar en el trabajo de madera, obteniéndose un par de diseño de 0,48 $N.m$. El acople seleccionado presenta un rango operativo que inicia en 0,31 $N.m$, cubriendo adecuadamente el par requerido [133].

Posteriormente, la comparación entre las alternativas se realizó considerando los criterios de compensación de desalineaciones angular, lateral y axial mostrados en la Tabla 4.64. El acople helicoidal (hendidura) fue descartado debido a que su comportamiento frente a la desalineación axial se clasifica como "Razonable", lo que evidencia una mayor flexibilidad longitudinal y puede generar pequeñas deformaciones elásticas bajo las cargas de mecanizado, afectando la precisión de posicionamiento.

Por otra parte, el acople rígido se descartó debido a que su comportamiento frente a las desalineaciones angular, lateral y axial se clasifica como "Ineficiente", por lo que las vibraciones e impactos producidos por pequeñas imperfecciones de montaje serían transmitidos directamente al motor y al husillo.

El acople tipo araña fue seleccionado debido a que su comportamiento frente a la desalineación axial se clasifica como "Ineficiente", característica que resulta favorable al proporcionar una mayor rigidez longitudinal del sistema. Adicionalmente, presenta un comportamiento "Razonable" frente a las desalineaciones angular y lateral, permitiendo absorber vibraciones y reducir las cargas transmitidas hacia los rodamientos y los motores paso a paso.

Tabla 4.64 Comparación de acoples [133].

Tipo de acoplamiento	Con tipo hendidura	Tipo de mandíbula	Tipo rígido
Imagen			
Diámetro del orificio del eje	ϕ1,5 – 35 mm	ϕ3 – 60 mm	ϕ3 – 35 mm
Recomendación de motor	Servo motor, motores paso a paso	Motores paso a paso, mortero de uso general	Servo motor, motores paso a paso
Torque	0.05-35 N·m	0.31-1,350 N·m	0.3-206 N·m
Cero reacción	Excelente	Ineficiente	Excelente
Desalineación angular permitida	Bien	Razonable	Ineficiente
Desalineación lateral permitida	Razonable	Razonable	Ineficiente
Desalineación axial	Razonable	Ineficiente	Ineficiente

Como resultado del proceso de diseño, se elaboró la documentación técnica necesaria para la fabricación y el montaje de la fresadora CNC. Los planos de conjunto, partes, y la lista de materiales correspondiente se incluyen en el Anexo G.

4.7 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario fue desarrollada en MATLAB con el objetivo de proporcionar un entorno de operación para el aprendizaje del control de máquinas CNC. Su diseño se basó en la estructura de los controladores industriales FANUC Serie 0i-M [134] y Siemens SINUMERIK 808D [115] (ver Fig.87), considerados como referencia para la organización de funciones y secuencia operativa debido a que presentan una estructura clara de las funciones de operación. Adicionalmente, se empleó el simulador SSCNC para analizar la interacción y el comportamiento de entornos CNC virtuales [135].



a) b)

Fig.87 Interfaces desarrolladas, a) Siemens; b) Fanuc.

Con el propósito de facilitar la interacción del usuario, la aplicación incorpora una pantalla inicial desde la cual es posible seleccionar el controlador que se desea utilizar. En la Fig.88 se presenta la pantalla inicial implementada.



Fig.88 Inicio – Interfaz.

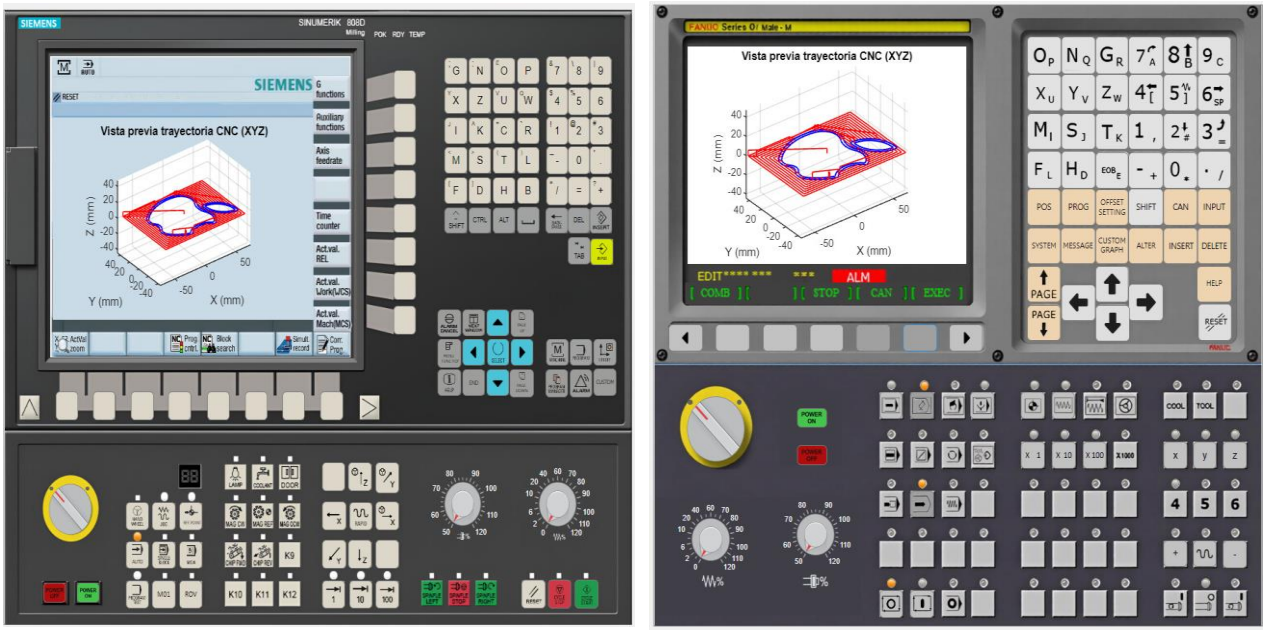
4.7.1 Funcionalidades implementadas

La interfaz incorpora las funciones necesarias para la operación del sistema, entre ellas el movimiento manual de los ejes (JOG), el establecimiento del cero máquina (Machine Zero), la

definición del cero pieza (Work Zero), la visualización de coordenadas y la carga de programas de mecanizado [115, 134].

La aplicación realiza una interpretación general de las instrucciones contenidas en el programa de mecanizado, enfocándose en la identificación de comandos de movimiento necesarios para generar la trayectoria de la herramienta y ejecutar la simulación del sistema. Esta interpretación no implementa un intérprete completo de un lenguaje CNC específico, sino que procesa las instrucciones de movimiento requeridas para el funcionamiento de la fresadora desarrollada.

Como parte de este proceso, el sistema genera una vista previa de la trayectoria [136] antes de iniciar la simulación, permitiendo verificar el recorrido programado (ver Fig.89).



a) b)

Fig.89 Vista de la trayectoria de la herramienta, a) Siemens; b) Fanuc.

4.7.2 Integración con Unity

Con el propósito de representar el proceso de mecanizado en un entorno tridimensional, se seleccionó Unity como plataforma de desarrollo debido a su facilidad para integrar modelos CAD,

programar animaciones mediante C# y establecer comunicación con aplicaciones externas [137]. La comparación de las alternativas consideradas para la selección de la plataforma se presenta en la Tabla 4.65.

Tabla 4.65 Comparación de entornos para simulación del proceso [137-139].

Criterio / Opción	Unity	Unreal Engine	Blender + Python
Importar modelo SolidWorks	Directo vía exportación FBX/OBJ	Directo (FBX/OBJ)	Directo (FBX/OBJ)
Visualización 3D	Bueno (fácil de usar)	Excelente (gráficos realistas)	Básico, más técnico
Interprete de G-Code	Programable en C#	Requiere C++/Blueprints avanzados	En Python es sencillo
Cambio de herramienta (animación)	Fácil con animaciones	Muy realista	Manual con Python
Conexión con CNC real (Serial/USB)	Necesita plugin o System.IO.Ports	Difícil (plugins en C++)	Con pyserial directo
Velocidad de desarrollo	Buena curva de aprendizaje	Más complejo, curva alta	Python más técnico, lento al inicio
Multiplataforma (Windows, Android, Web)	Windows, Android, WebGL	Windows, Android (menos Web)	Solo PC (requiere Python)
Licencias / Costo	Gratis personal	Gratis personal	Libre

La Fig.59, es el modelo tridimensional de la fresadora diseñado anteriormente que fue importado a Unity para su representación virtual (ver Fig.90).

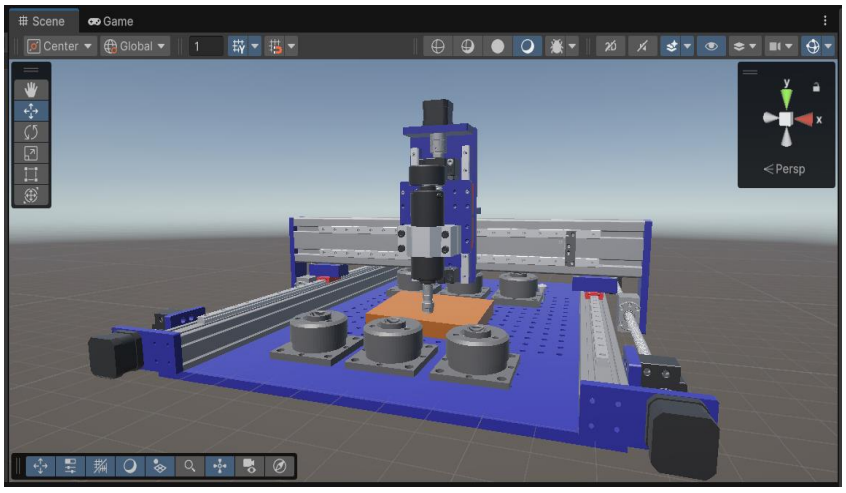


Fig.90 Fresadora CNC – Importada en Unity.

La comunicación entre MATLAB y Unity se implementó mediante una arquitectura cliente-servidor utilizando el protocolo TCP/IP [140, 141], donde MATLAB actúa como servidor encargado de procesar las instrucciones del sistema y Unity como cliente responsable de recibir la información para actualizar la posición de los ejes y sincronizar el movimiento del modelo tridimensional.

La Fig.91 muestra la integración entre la interfaz desarrollada en MATLAB y el entorno virtual implementado en Unity, evidenciando la sincronización entre las órdenes generadas desde la interfaz y la representación tridimensional de la fresadora.

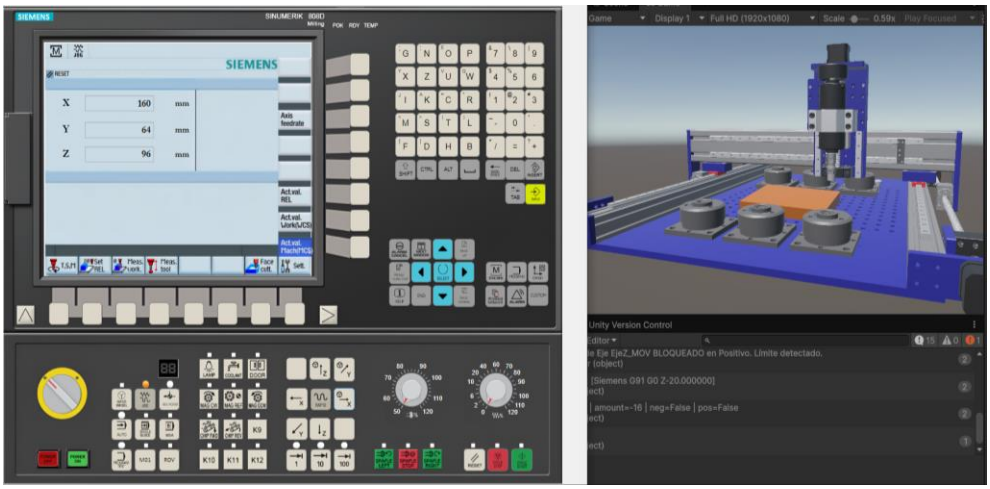
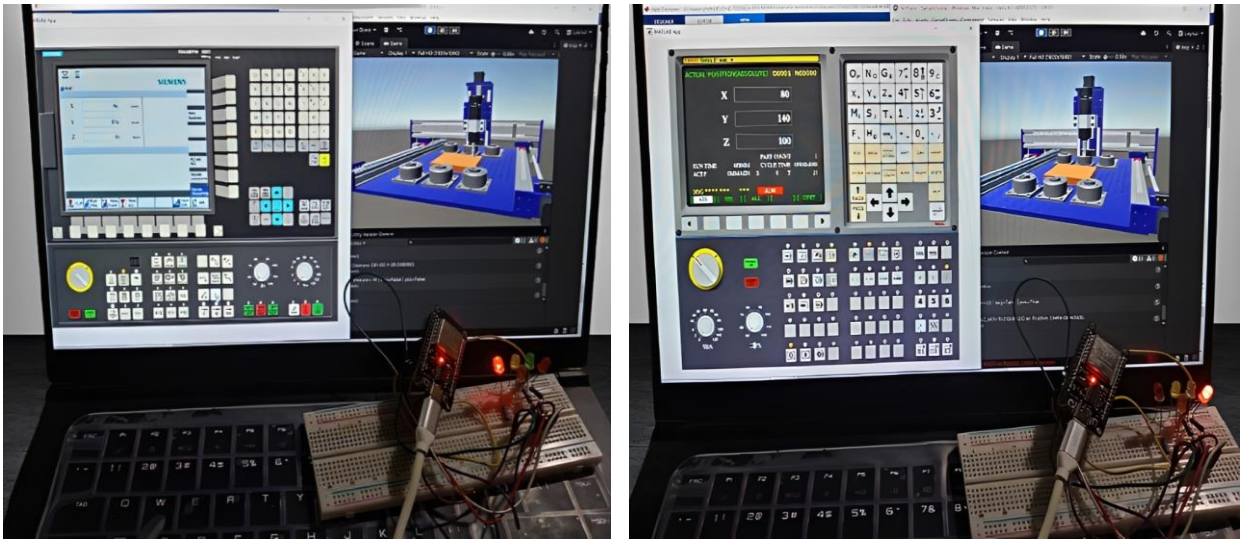


Fig.91 Implementación Matlab – Unity.

4.7.3 Integración con el sistema físico

Como complemento de la simulación virtual, la interfaz establece comunicación con un módulo ESP32 para la interacción con el prototipo físico.

Mediante esta comunicación, las órdenes de movimiento generadas desde MATLAB permiten activar indicadores LED asociados a los ejes X, Y y Z, mostrando el sentido del desplazamiento correspondiente. Esta funcionalidad proporciona una representación física del movimiento ejecutado y complementa la simulación desarrollada en Unity (ver Fig.92).



a) b)

Fig.92 Implementación Matlab – Unity – ESP32, a) Siemens (-Z); b) Fanuc (+Z).

Al finalizar esta sección, el código fuente correspondiente a la interfaz desarrollada en MATLAB, la comunicación TCP/IP con Unity, los scripts implementados en Unity y el programa desarrollado para el módulo ESP32 se presentan en el Anexo F, con el propósito de facilitar la consulta de su implementación sin afectar la continuidad del presente documento. Asimismo, el plano electrónico correspondiente a la conexión del sistema se incluye en el Anexo G, donde se detallan las conexiones realizadas para la implementación del circuito.

Conclusiones

Se determinaron las principales características técnicas de los equipos CNC educativos, estableciendo los criterios de diseño que sirvieron como base para el desarrollo de la propuesta. Dichas características permitieron definir la configuración conceptual de la fresadora CNC mediante una evaluación ponderada de alternativas.

Se diseñó una fresadora CNC considerando criterios técnicos y pedagógicos obtenidos del análisis de equipos educativos e industriales. Estos criterios permitieron definir una propuesta orientada no solo al funcionamiento del sistema, sino también a su integración con el entorno de simulación y la fundamentación técnica desarrollada en el documento, conformando un ecosistema de aprendizaje para la enseñanza del mecanizado por arranque de viruta.

Se simuló el funcionamiento de la fresadora CNC mediante una interfaz desarrollada en MATLAB e integrada con Unity, permitiendo representar los movimientos coordinados de los ejes y la ejecución de trayectorias de mecanizado. La integración con el módulo ESP32 complementó la simulación mediante la activación de indicadores LED asociados a los ejes de movimiento.

Recomendaciones

- Ampliar la interfaz de usuario para incorporar un mayor conjunto de comandos de mecanizado asociados a lenguajes CNC específicos, como FANUC, Siemens u otros, fortaleciendo el proceso de aprendizaje de la programación CNC.
- Implementar funciones adicionales en la interfaz relacionadas con operaciones de fresado, selección de herramientas y parámetros de mecanizado, con el fin de mejorar la experiencia de simulación y la comprensión del proceso de arranque de viruta.
- Construir y validar experimentalmente un prototipo físico de la fresadora CNC, con el propósito de verificar el comportamiento real de la estructura, la precisión de posicionamiento de los ejes y el desempeño de los componentes seleccionados en condiciones de operación.

Referencias

[1] C. Secretaría de Educación Superior, Tecnología e Innovación. "Del 12 al 16 de junio: Inscripciones para evaluación de institutos tecnológicos y conservatorios superiores públicos." https://www.educacionsuperior.gob.ec/del-12-al-16-de-junio-inscripciones-para-evaluacion-de-institutos-tecnologicos-y-conservatorios-superiores-publicos/ (accessed.

[2] Z. Rahman, S. Mohamed, M. Minhat, and Z. Rahman, "Design and Development of 3-Axis Benchtop CNC Milling Machine for Educational Purpose," *International Journal of Integrated Engineering,* vol. 15, p. 16, 2023-04-05 2023, doi: 10.30880/ijie.2023.15.01.013.

[3] S. Kamariah, N. Hamzah, A. Ariffin, N. Zakaria, and N. Aias, "Simulation in classroom: Development mini Computer Cumerical Control (CNC) milling machine for G Code movement," vol. 9, p. 6, 2020, doi: https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/218952020.

[4] H. F. Teams. "Lista de precios de Haas." https://www.haascnc.com/es/shop/category/pricelist.html (accessed.

[5] F. Stepcraft. "Máquinas CNC." https://www.stepcraft.es/ (accessed.

[6] X. a. Zhou and J. Pan, "Development and Application of Educational Mini CNC Milling Machines," *E3S Web of Conferences,* 2022-01-01 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202235801045.

[7] D. Shen and T. Ou, "Desktop type numerical control milling machine," 2023. [Online]. Available: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/087669436/publication/CN219561531U?q=pn%3DCN219561531U

[8] H. Huo, Y. Xin, and G. Liang, "Desktop-level miniature five-axis numerical control milling machine suitable for teaching," 2021. [Online]. Available: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/076699035/publication/CN213646013U?q=pn%3DCN213646013U

[9] Y. Jin and C. Song, "Computer numerical control machine tool capable of achieving automatic tool changing," 2020. [Online]. Available: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/073364971/publication/CN111958288A?q=pn%3DCN111958288A

[10] J. Diaz, C. Trott, F. Iskandar, J. Wang, and Z. Wu, "MAKER: Design of a Virtual CNC Mill by Unity Software," p. 9doi: 10.18260/1-2--37473.

[11] M. Soori and B. Arezoo, "Virtual Machining Systems for CNC Milling and Turning Machine Tools: A Review," vol. 18, no. 1, p. 50

[12] MYLAS, "The importance and advancements of CNC controllers," in *MYLAS*, ed. Taiwan.

[13] Radonix. "CNC Controller Selection Guide: Mid-Range Comparison." https://radonix.com/cnc-controller-selection-guide-mid-range-comparison/ (accessed.

[14] "Controlador Heidenhain," ed.

[15] "Controlador Siemens," ed.

[16] C. Montilla, G. Calle, and I. Moreno, *Procesos de mecanizado convencionales teoría y práctica*, E. UTP, ed., 2021, p. 395. [Online]. Available: https://core.ac.uk/reader/516517500.

[17] A. Y. C. Nee, *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, 2015 ed. London: Springer London, 2015.

[18] M. Estrems and W. Cumbicus, *Principios de mecanizado y planificación de procesos*, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.upct.es/bitstreams/1d884206-6ada-4512-84b9-b45fcf98e16d/download.

[19] H. Youssef and H. El-Hofy, "Traditional Machining Technology," vol. 2, ed, 2021, p. 502.

[20] Y. Club, "Ángulos de ataque," in *Facebook*, ed, 2023, pp. Ángulo de ataque en la herramienta de corte para el proceso de arranque de viruta, este variara dependiendo del material a trabajar y potencia del spindle.

[21] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, 3 ed., 2007, p. 1038. [Online]. Available: https://www.academia.edu/36642220/Fundamentos_de_Manufactura_Moderna_terce?email_work_card=view-paper.
[22] S. Kalpakjian and S. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 6 ed.: Prentice Hall, 2010, p. 1176. [Online]. Available: https://www.directtextbook.com/isbn/9780136081685-manufacturing-engineering-and-technology.
[23] X. Salueña and A. Nápoles, *Tecnología mecánica*, 1 ed., 2000, p. 228. [Online]. Available: https://www.academia.edu/8651338/20194374_Tecnologia_Mecanica?email_work_card=view-paper.
[24] V. Ivanov, A. Evtuhov, I. Dehtiarov, and J. Trojanowska, "Technological Processes in Machining," in *Fundamentals of Manufacturing Engineering Using Digital Visualization*, V. Ivanov, A. Evtuhov, I. Dehtiarov, and J. Trojanowska Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 79-90.
[25] E. M. Rubio and M. Á. Sebastián, *Ejercicios y problemas de mecanizado*, 2011. [Online]. Available: https://www.academia.edu/30505285/Ejercicios_y_problemas_de_mecanizado.
[26] Z. Huda, "Machining Processes and Machines," p. 301, 2021, doi: 10.1201/9781003081203.
[27] I. Standart, "Tool-life testing with single-point turning

tools," 2 ed, 1993, p. 53.
[28] O. González and M. Villamil, *Introducción a la ingeniería*, 2013, p. 271. [Online]. Available: https://todoproyectos1.com/wp-content/uploads/2021/03/introduccion-a-la-ingenieria-una-perspectiva-desde-el-curriculo-en-la-formacion-del-ingeniero-oscar-gonzalez.pdf.
[29] C. Riba, *Diseño concurrente*, 2002. [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/entities/publication/c408e206-fce4-48f9-bb85-ae956e1f3452.
[30] J. Frascara, *Enseñando diseño*. 2018.
[31] K. Ulrich and S. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, 4 ed. 2009.
[32] I. N. d. S. y. S. e. e. Trabajo. "NTP 235: Medidas de seguridad en máquinas: criterios de selección - PDF - Portal INSST - INSST." https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/7-serie-ntp-numeros-226-a-260-ano-1990/ntp-235-medidas-de-seguridad-en-maquinas-criterios-de-seleccion (accessed.
[33] UNE. "UNE-EN ISO 16090-1:2018 Seguridad de las mÃ¡quinas herramienta...." https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060937 (accessed.
[34] Osnox. "Fresadora router CNC 60x40 cm." https://www.osnox.com/ (accessed.
[35] E. center. "Máquinas y repuestos." https://ecenter.ec/pak1maquinariacnc.html (accessed.
[36] Haas. "Mini Mill." https://www.haascnc.com/es/machines/vertical-mills/mini-mills/models/minimill.html#gsc.tab=0 (accessed.
[37] Legacy, "Lesson 1: Manually Change The Tool | Legacy Woodworking Machinery, LLC," 2025-05-03 2025.
[38] H. Prototyping, "Mastering Tool Change in CNC Machining: A Comprehensive Guide," 2025-02-12 2025.
[39] U. Lee, "Automatic tool change: how it works and why you might need it," 2024-12-20 2024.
[40] Legacy, "Lesson 2: ATC - Pick Up & Put Away Tool | Legacy Woodworking Machinery, LLC," 2025-05-03 2025.
[41] GIZIN. "GIZIN INTERNATIONAL CO., LTD." https://www.gizin-atc.com (accessed.
[42] H. F. Team, "11 - Haas Cobot - Operation," 2025.
[43] D. MORI, "Industrial Automation Systems From DMG MORI: The Future of Automated," ed, 2024.
[44] J. Chernushevich, "Roland MDX-40A End Mill Installation," ed, 2020.
[45] Y. Pomarede, "DIY CNC Router with Automatic Tool Change milling aluminium," ed, 2018.
[46] Tantancnc, "Denford Novamill ATC tool change with the Mach3 controll," ed, 2016.

[47] Amazon. "Makita RT0700C 1-1/4 HP* Router compacto." https://www.amazon.com/Makita-RT0700C-Horsepower-Discontinued-Manufacturer/dp/B007NZHNX2 (accessed.
[48] Haas. "10-Pocket Carousel Tool Changer." https://www.haascnc.com/productivity/tool-changer/tc-10.html?utm_source=chatgpt.com#gsc.tab=0 (accessed.
[49] AliExpress. "Collet chuck holder." https://es.aliexpress.com/w/wholesale-collet-chuck-holder.html (accessed.
[50] V. robots. "Brazos roboticos." https://ventarobots.com/categoria-producto/brazos-robots/ (accessed.
[51] J. Valdés, "Cambiar Hta. de corte CNC Manual vs Automático," ed, 2021.
[52] DIASET. "Tool presetting measuring systems." https://www.bigdaishowa.com/sites/default/files/documents/2017-10/big_kaiser_vol._1_tool_presetting_measuring_systems.pdf?utm_source=chatgpt.com (accessed.
[53] Heidenhain. "Touch probes for machine tools." https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Touch_Probes_ID1113984_en.pdf?utm_source=chatgpt.com (accessed.
[54] D. I. Tool. "Tool Presetters & Tightening Fixtures." https://www.doriantool.com/wp-content/uploads/SEC-F-PRESETTER-TIGHTENING-FIXTURE-2016.pdf?srsltid=AfmBOord3vm_FlO50PTV2dt1ep29JYQwUBM3D7e6snMFKzR32xXi7JgZ&utm_source=chatgpt.com (accessed.
[55] B. Daishowa, "Tool Presetters 101: What, Why, When and How," 2025.
[56] C. Cookbook. "Guía completa de plantillas, utillajes y soluciones de sujeción para fresadoras CNC." https://www.cnccookbook.com/cnc-jigs-fixtures-workholding-solutions-milling/?utm_source=chatgpt.com (accessed.
[57] Jergens. "Workwolding solutions." https://pdf.directindustry.com/viewerCatalog/jergens-inc/workwolding-solutions/7113-876359.html#open (accessed.
[58] A. M. G. C. K. (AMF). "Sistemas de sujeción tipo bloque." https://www.amf.de/es/productos/tecnologia-de-sujecion/sistemas-de-sujecion-tipo-bloque.html (accessed.
[59] C. Cookbook. "Definitive Guide to Router Vacuum Tables and Pumps for CNC & DIY." https://www.cnccookbook.com/router-vacuum-table-cnc-diy/ (accessed.
[60] Caro, "Métodos de sujeción CNC: Guía completa de accesorios, prensas, abrazaderas y mesas de vacío," 2025-09-10 2025.
[61] R. Precision, "Una guía de accesorios CNC y los 10 mejores tipos de accesorios de máquinas CNC," 2023-02-10 2023.
[62] Jergens. "Workholding Capabilities Brochure." https://pdf.directindustry.com/viewerCatalog/jergens-inc/workholding-capabilities-brochure/7113-728415.html#open (accessed.
[63] M. a. Microwaves, "Machining precision washers with a Glue Chuck," ed, 2022.
[64] Amazon. "Abrazaderas mecánicas." https://www.amazon.com/s?k=clamps+cnc&language=es_US&adgrpid=152938925174&hvadid=690390480938&hvdev=c&hvlocphy=9076633&hvnetw=s&hvqmt=b&hvrand=17027020087858299455&hvtargid=kwd-331666736524&hydadcr=14694_13586993&mcid=c4a5a6bf13ee3d6180d12c07662c056c&tag=txscdpesrow-20&ref=pd_sl_2byf9077ip_b (accessed.
[65] C. 3D. "Tornillos." https://shop.carbide3d.com/collections/workholding?utm_source=chatgpt.com (accessed.

[66] Alibaba. "Mesa magnética." https://spanish.alibaba.com/g/electro-magnetic-table.html (accessed.
[67] Siemens. "Sinumerik one milling." https://cache.industry.siemens.com/dl/files/966/109822966/att_1148787/v1/ONE_milling_op_man_0723_en-US.pdf (accessed.
[68] M. Support, "Mach 4 Tool Offsets," ed, 2023.
[69] shaju, "Manual de usuario de la fresadora CNC de la serie Pro de MEKANIKA," 2023-03-10 2023.
[70] Mekanika, "Mekanika EVO Product Presentation Desktop CNC Milling Machine

", ed, 2023.
[71] N. Technologies, "Red Fox 2 es la fresadora CNC todo en una," ed.
[72] Machinetoolhelp. "Machinery RS232 communications settings for CNC controls including fanuc and mitsubishi." https://www.machinetoolhelp.com/Applications/RS232Communications.html?utm_source=chatgpt.com (accessed.
[73] Siemens, *SINUMERIK 808D, SINUMERIK*

808D ADVANCED

Diagnostics Manual. [Online]. Available: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/311/109751311/att_931893/v1/808D_808D_ADV_diagnostics_man_0917_en-US.pdf.
[74] Jasonxue, "Connecting Your CNC Machine: Tips and Support on CNC Forums," 2025-02-25 2024.
[75] Fanuc, *EMBEDDED ETHERNET FUNCTION*. [Online]. Available: https://www.cnc1.com/hubfs/fanuc-library/Fanuc_30i_Ethernet_Settings.pdf?utm_source=chatgpt.com.
[76] PlanetCNC. "CNC USB Controller Mk3." https://manuals.plus/m/a57962c644e755465762fd82cc045106723502ecfca554469e1e8fdef2598324 (accessed.
[77] UC300. "UC300-5LPT USB CNC motion controller to use with MACH3 software." https://cncdrive.com/MC/UC300%20datasheet/UC300%20users%20guide.pdf (accessed.
[78] PoLabs. "PoKeys57CNC User manual." https://www.manual.ec/polabs/pokeys-57-cnc/manual?p=1 (accessed.
[79] Novusun. "Novusun CNC Mach3 Manual." https://www.manualslib.com/manual/2178766/Novusun-Cnc-Mach3.html#manual (accessed.
[80] ebay. "Tarjeta de control de movimiento Mach3 de 3 ejes de 400 KHz USB 2.0 placa de ruptura de interfaz CNC." https://www.ebay.com/itm/800106457055?chn=ps&_trkparms=ispr%3D1&amdata=enc%3A1W5X23uTOStWA2yFtAjnJsg43&norover=1&mkevt=1&mkrid=711-171749-061037-3&mkcid=2&itemid=800106457055&targetid=4580702897368871&device=c&mktype=&googleloc=148509&poi=&campaignid=604212377&mkgroupid=1233653099691400&rlsatarget=pla-4580702897368871&abcId=9430009&merchantid=51291&msclkid=8c9d5621a48216982e753c11dd0e4964 (accessed.
[81] PlanetCNC. "CNC Controller." https://shop.planet-cnc.com/product-category/controllers/ (accessed.
[82] Y. industry. "UC300 Mach3 USB CNC Motion Controller Board Card 3 / 4 / 6 Axis." https://yuyongindustry.com/product/uc300-mach3-usb-cnc-motion-controller-board-card-3-4-6-axis/?utm_source=chatgpt.com (accessed.

[83] Ubuy. "PoKeys57CNC - USB and Ethernet CNC Controller with Mach4 and Mach3 Plugins." https://www.ubuy.ec/es/product/7IM4QPCK-pokeys57cnc-motion-controller-for-mach4?utm_source=chatgpt.com (accessed.
[84] Phantom. "3 Axis CNC Mach3 USB Motion Control Card Breakout Board MK3-V." https://www.phantomcncsystems.com/product-page/3-axis-cnc-mach3-usb-motion-control-card-breakout-board-mk3-v?utm_source=chatgpt.com (accessed.
[85] H. t. mechatronics. "How to setup GRBL & Control CNC machine with Arduino." https://howtomechatronics.com/tutorials/how-to-setup-grbl-control-cnc-machine-with-arduino/ (accessed.
[86] K. v. d. Veer. "Grbl v1.1 has been released at our new site! The old site will eventually be phased out. Find the new documentation here." https://github.com/grbl/grbl/wiki/Frequently-Asked-Questions (accessed.
[87] LibHunt. "grbl-L-Mega VS grbl-Mega-5X." https://www.libhunt.com/compare-grbl-L-Mega-vs-grbl-Mega-5X (accessed.
[88] Circuitist.com. "How to flash (install) Grbl 1.1 onto an Arduino Uno, Nano, or Mega." https://www.circuitist.com/install-grbl-onto-arduino-uno-nano-or-mega/ (accessed.
[89] Bdring. "Grbl (CNC Controller) for ESP32." https://github.com/bdring/Grbl_Esp32/blob/main/README.md (accessed.
[90] Smoothieware. "SmoothieBoard v2 is Here." https://smoothieware.org/ (accessed.
[91] L. Watts. "How to build a CNC Controller: GRBL or G2Core?" https://www.cncsourced.com/cnc-machining/how-to-build-grbl-g2core-controller-for-cnc/ (accessed.
[92] T. CNC. "Marlin Firmware." https://tacticalcnc.com/marlin-firmware/ (accessed.
[93] M. creativo. "Arduino Uno R3." https://www.makercreativo.com/store/producto/arduino-uno-r3/ (accessed.
[94] T. s. circuitos. "ESP32 - Especificaciones y diseños." https://www.circuitos-electricos.com/esp32-especificaciones-y-disenos/ (accessed.
[95] djuke. "TinyG (external drivers)." https://webshop.djuke.nl/tinyg-external-kit (accessed.
[96] M. libre. "Arduino uno." https://listado.mercadolibre.com.ec/electronica-audio-y-video/arduino-uno (accessed.
[97] M. libre. "ESP32." https://listado.mercadolibre.com.ec/esp32?sb=all_mercadolibre#D[A:esp32] (accessed.
[98] Banggood. "Smoothieboard 5X V1.0 ARM Open Source Hauptplatine." https://de.banggood.com/Smoothieboard-5X-V1_0-ARM-Open-Source-Mainboard-For-3D-Printer-Engraving-Machine-p-1381544.html?cur_warehouse=CN (accessed.
[99] S. Webstore. "TinyG." https://synthetos.myshopify.com/products/tinyg (accessed.
[100] Alibaba. "Placa de Control MKS SGen_L V2.0 de 32 Bits, Piezas para Impresora 3D." https://spanish.alibaba.com/product-detail/MKS-SGen-L-V2-0-32Bit-1600451571633.html (accessed.
[101] Z. l. motion. "Differences and coordination between linear guides and lead screws." https://zendamotion.com/es/diferencias-y-combinacion-entre-guias-lineales-y-tornillos-de-bolas/ (accessed.
[102] C. Plus. "Rack and pinion: Qué es y cómo funciona." https://centropiezasplus.com/rack-and-pinion-que-es-y-como-funciona/ (accessed.
[103] Y. robotics. "Tornillo de bolas recirculante mecanizado 12 mm SFU1204 longitud 80 cm." https://yorobotics.co/producto/tornillo-bolas-recirculante-mecanizado-sfu1204-80cm-800mm/ (accessed.
[104] E. guidebook. "Rack and pinion systems explained." https://engineersguidebook.com/rack-and-pinion-systems-explained/ (accessed.

[105] P. CNC. https://perfilescnc.com/categoria/rielesybloqueslineales/hiwin-serie-mg/ (accessed.
[106] *Husillo de bolas SFU1204*. [Online]. Available: https://perfilescnc.com/categoria/husillos-de-bolas-y-accesorios/.
[107] P. CNC. "Crenallera y piñon." https://perfilescnc.com/categoria/cremallera-y-pinon/ (accessed.
[108] Ilardia, "Finales de carrera: tipos, funcionamiento y usos," ed.
[109] L. Tech. "Final de carrera mecánico KW11-N." https://www.lozurytech.com/product-page/final-de-carrera-mec%C3%A1nico-kw11-n-kw12-micro-switch (accessed.
[110] B. Roll. "CNY70 reflectiveoptical sensor." https://www.botnroll.com/en/infrared/2402-cny70-reflective-optical-sensor-.html (accessed.
[111] G. factory. "Sensores ópticos." https://www.geekfactory.mx/categoria-de-producto/sensores/sensores-opticos/ (accessed.
[112] LowPower.IO. "CNC Basic Model A." https://lowpower.io/category/cnc/cncbasic-model-a/ (accessed.
[113] R. Berckelman. "How to build a CNC Router." https://es.scribd.com/document/227580709/how-to-build-a-cnc-milling-machine (accessed.
[114] J. Ganseman, *Build your own multifunctional 4-axis CNC machine*. 2022.
[115] SIEMENS. "Sinumerik 808D Milling Part1: Operation." https://cache.industry.siemens.com/dl/files/757/81163757/att_23536/v1/808D_OPM_Part_1_Operation_1212_en_en-US.pdf (accessed.
[116] R. Norton, *Diseño de máquinas*, 4 ed. 2011.
[117] R. Budynas and J. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 10 ed. 2018.
[118] HobbyCNC. "Cambios automáticos de herramientas con un presupuesto de aficionado: mi construcción de ATC casera." https://www.reddit.com/r/hobbycnc/comments/1oy2y9r/automatic_tool_changes_on_a_hobby_budget_my_diy/?solution=c5211398559fda77c5211398559fda77&js_challenge=1&token=7afd7253fec22262ff1c52b1703fe9ec643ff7c6c031ae09a3e030cef120c1c1&jsc_orig_r= (accessed.
[119] PBCLINEAR. "Stepper Motor Nema 17." https://media.pbclinear.com/pdfs/pbc-linear-data-sheets/data-sheet-stepper-motor-support.pdf (accessed.
[120] *Ballscrew*, p. 220. [Online]. Available: https://www.hiwin.com/wp-content/uploads/HIWIN-Ballscrew-Catalog.pdf.
[121] HIWIN. "MGN12HZ0HM." https://www.hiwin.de/en/Products/Linear-guideways/Blocks/Miniature-guides/MGN-HIRES-series/MGN12HZ0HM/p/5-001036 (accessed.
[122] Amazon. "Makita RT0700C - Fresadora eléctrica." Makita RT0700C - Fresadora eléctrica (710 Watios) : Amazon.es: Industria, empresas y ciencia (accessed.
[123] *T-slot profiles*. [Online]. Available: https://catalogs.8020.net/80-20-Catalog-26/3-84/.
[124] Microsoft. "Funciones de Excel." https://support.microsoft.com/es-es/excel/excel-functions-by-category (accessed.
[125] H. Patil and P. Jeyakarthikeyan, "Mesh convergence study and stimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS," doi: 10.1088/1757-899X/402/1/012065.
[126] R. Mott, *Resistencia de materiales*, 5 ed., 2009. [Online]. Available: https://archive.org/details/RESISTENCIADEMATERIALESMOTTOp/page/n1/mode/2up.
[127] M. i. China. "Factory Spot Wholesale Sfu1205 Rolling Ball Screw Length Optional." https://njshuntai.en.made-in-china.com/product/itZpsLNHnhVG/China-Factory-Spot-Wholesale-Sfu1205-Rolling-Ball-Screw-Length-Optional.html (accessed.
[128] MatWeb. "JIS S55C Steel, Normalized." https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=20c682ad35514c5cb4d7bb19834b66e5&ckck=1 (accessed.

[129] *Rolling bearings catalogue*, p. 1152. [Online]. Available: https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings.
[130] *Support Unit*, p. 34. [Online]. Available: https://www.hiwin.com/wp-content/uploads/HIWIN-Ballscrew-Supports-Catalog.pdf.
[131] Amazon. "SFU 1205 Ballscrew." https://www.amazon.com.mx/WANGKENSU-SFU1205-Ballscrew-1200mm-2500mm-Accuracy/dp/B0FHPZDSLN (accessed.
[132] *Jaw*, p. 28. [Online]. Available: https://pdf.directindustry.com/viewerCatalog/lovejoy/jaw-coupling/7199-647301.html#open.
[133] Misumi. "Acomples flexibles - Tipo ranurados, con logitud estándar o compactos." https://mx.misumi-ec.com/es/vona2/detail/110300126210/ (accessed.
[134] FANUC. "Manual guide i milling." https://es.scribd.com/document/563427923/Manual-guide-i-cnc-Milling-made-easy-manual?_gl=1*8ravxj*_up*MQ..*_ga*MTE1MjI5OTE2My4xNzc3OTE4Njkz*_ga_Z4ZC50DED6*czE3Nzc5MTg2OTIkbzEkZzEkdDE3Nzc5MTg2OTIkajYwJGwwJGgw*_ga_8KZ8BV0P5W*czE3Nzc5MTg2OTMkbzEkZzEkdDE3Nzc5MTg2OTMkajYwJGwwJGgw (accessed.
[135] SWANSOFT. "Simulador SSCNC." http://www.swansc.com/en/download/PDF.html (accessed.
[136] Matlab. "Tipos de gráficas de Matlab." https://la.mathworks.com/help/matlab/creating_plots/types-of-matlab-plots.html (accessed.
[137] Unity. "Unity Manual." https://docs.unity3d.com/Manual/UnityManual.html (accessed.
[138] EPICGAMES. "Unreal engine." https://dev.epicgames.com/documentation/unreal-engine/unreal-engine-5-8-documentation (accessed.
[139] Blender. "Blender manual." https://docs.blender.org/manual/en/latest/ (accessed.
[140] Matlab. "Comunicación TCP/IP." https://la.mathworks.com/help/matlab/tcpip-communication.html?s_tid=CRUX_lftnav (accessed.
[141] Unity. "Simple client and server." https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.transport@2.0/manual/client-server-simple.html (accessed.
[142] H. Jütz, E. Scharkus, and R. Lobert, *Tablas para la industria metalúrgica* (Edición especial para proyectos de formación profesional en el área de la cooperación técnica). GTZ, 1993.
[143] R. Warren and DeVries, *Analysis of Material Removal Processes*. 1992.

Anexos

Anexo A. Geometría y clasificación de herramientas de corte

Tabla 2.1 Aplicaciones de la clasificación ISO 513:2004 de metal duro [16].

Designación	Aplicación
P01	Torneado y mandrilado en acabado; elevadas velocidades de corte; sección de viruta pequeña; muy buena precisión y calidad superficial, exento de vibraciones.
P10	Torneado por copiado, roscado y fresado; grandes velocidades de corte; sección de viruta entre pequeña y mediana.
P20	Torneado, copiado, fresado; velocidades de corte medias; viruta de sección media; refrentados ligeros; avances medios.
P30	Torneado, fresado y cepillado a velocidades de corte medias a pequeñas; viruta de sección media a grande, incluyendo operaciones bajo condiciones desfavorables; avances medios y grandes.
P40	Torneado, cepillado, fresado, mortajado; bajas velocidades de corte y avances grandes; sección de viruta grande; posibilidad de elevados ángulos de desprendimiento grandes y en condiciones muy desfavorables.
P50	Torneado, cepillado, mortajado, ranurado, tronzado, donde se requiera una gran tenacidad de la herramienta; pequeñas velocidades de corte; sección de viruta grande; posibilidad de elevados ángulos de desprendimiento grandes, en condiciones extremadamente desfavorables.
M10	Torneado; velocidades de corte medias a altas; sección de viruta de pequeña a mediana; avances bajos y medios.
M20	Torneado, fresado; velocidades de corte y avances medianos; sección de viruta mediana.
M30	Torneado, fresado y cepillado, a medias velocidades de corte y avances intermedios a grandes; sección de viruta de mediana a grande.
M40	Torneado, perfilado, tronzado; especial para trabajo en máquinas automáticas.
K01	Torneado en desbaste y acabado; mandrilado y fresado en acabado, rasqueteado.
K10	Torneado, fresado, taladrado, mandrilado, escariado, brochado y rasqueteado.
K20	Torneado, fresado, cepillado, mandrilado, escariado, brochado; operaciones que necesitan una herramienta de alta tenacidad.
K30	Torneado, fresado, cepillado, tronzado, ranurado y mortajado; posibilidad de usar grandes ángulos de desprendimiento en condiciones desfavorables.
K40	Torneado, fresado, cepillado, tronzado y mortajado, en condiciones muy desfavorables, y con ángulos de desprendimiento muy grandes.

Anexo B. Parámetros de corte para torneado

Tabla 2.2 Valores usando herramientas de corte afiladas y t_0=0,25 mm [21].

Material	Dureza Brinell	Energía específica (E_s) o Potencia unitaria (P_u)		Caballos de fuerza unitaria (HP_u)
		$[N-m/mm^3]$	$[In-lb/in^3]$	$[Hp/(in^3/min)]$
Acero al carbono	150-200	1,6	240 000	0,6
	201-250	2,2	320 000	0,8
	251-300	2,8	400 000	1,0
Aceros aleados	200-250	2,2	320 000	0,8
	251-300	2,8	400 000	1,0
	301-350	3,6	520 000	1,3
	351-400	4,4	640 000	1,6
Hierros fundidos	125-175	1,1	160 000	0,4
	175-250	1,6	240 000	0,6
Acero inoxidable	150-250	2,8	400 000	1,0
Aluminio	50-100	0,7	100 000	0,25
Aleaciones de aluminio	100-150	0,8	120 000	0,3
Latón	100-150	2,2	320 000	0,8
Bronce	100-150	2,2	320 000	0,8
Aleaciones de magnesio	50-100	0,4	60 000	0,15

Tabla 2.3 Valores de C y n para diferentes materiales de herramientas [26].

Herramientas de corte	Acero de alto carbono	Acero de alta velocidad	Carburo cementado	Carburo recubierto	Cerámicos
n	0,1	0,125	0,25	0,25	0,7
C para corte de acero	20 $[m/min]$	70 $[m/min]$	500 $[m/min]$	700	3000
C para corte que no sea de acero	70 $[m/min]$	120 $[m/min]$	900 $[m/min]$	–	–

Anexo C. Parámetros de corte para fresado

Tabla 2.4 Valores indicativos para n°. de dientes y ángulos de corte en fresas de acero rápido parte I [142].

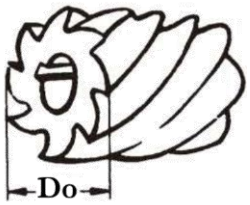
Tipo de fresa Fresa cilíndrica														
Ac. Normales hasta 740 N/mm^2 resistencia					Materiales tenaces hasta 980 N/mm^2 resistencia					Metales ligeros				
ϕ	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**			**ϕ**	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**			**ϕ**	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**		
D_o	n_t	α	γ	λ	D_o	n_t	α	γ	λ	D_o	n_t	α	γ	λ
40	6	Avance en oposición			40	10	Avance en oposición			40	4	Avance en oposición		
50	6				50	10				50	4			
60	6	7	10	38	60	10	4	5	35	60	4	8	25	45
75	6	Avance en concordancia			75	12	Avance en concordancia			75	5	Avance en concordancia		
90	8				90	14				90	5			
110	8	12	16	35	110	16	8	12	30	110	6	14	30	45
130	10				130	16				130	6			
150	10				150	18				150	8			

Tabla 2.5 Valores indicativos para n°. de dientes y ángulos de corte en fresas de acero rápido parte II [142].

Tipo de fresa Fresa frontal cilíndrica													
Ac. Normales hasta 740 N/mm^2 resistencia					Materiales tenaces hasta 980 N/mm^2 resistencia					Metales ligeros			
ϕ	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**			**ϕ**	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**			**ϕ**	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**	
D_o	n_t	α	γ	λ	D_o	n_t	α	γ	λ	D_o	n_t	α	γ	λ
40	8	Avance en oposición			40	12	Avance en oposición			40	4	Avance en oposición		
50	10				50	14				50	5			
60	10	7	10	20	60	14	4	5	20	60	6	8	25	35
75	10				75	16				75	6			
90	12				90	18				90	6			
110	12				110	20				110	7			
130	14				130	22				130	8			
150	16				150	24				150	10			

Tabla 2.6 Valores indicativos para n°. de dientes y ángulos de corte en fresas de acero rápido parte III [142].

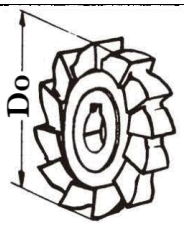
Tipo de fresa Fresa de disco													
Ac. Normales hasta 740 N/mm^2 resistencia					Materiales tenaces hasta 980 N/mm^2 resistencia					Metales ligeros			
ϕ	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**			**ϕ**	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**			**ϕ**	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**	
D_o	n_t	α	γ	λ	D_o	n_t	α	γ	λ	D_o	n_t	α	γ	λ
50	10	Avance en oposición			50	16	Avance en oposición			50	4	Avance en oposición		
60	10				60	16				60	6			
75	12	7	12	15	75	18	5	6	10	75	6	8	25	30
90	12	Avance en concordancia			90	20	Avance en concordancia			90	8	Avance en concordancia		
110	14				110	22				110	8			
130	16	12	18	15	130	24	8	14	12	130	10	14	30	30
150	18				150	26				150	10			
175	18				175	28				175	12			
200	20				200	30				200	12			

Tabla 2.7 Valores indicativos para n°. de dientes y ángulos de corte en fresas de acero rápido parte IV [142].

Tipo de fresa Fresa de vástago														
Ac. Normales hasta 740 N/mm^2 resistencia					Materiales tenaces hasta 980 N/mm^2 resistencia					Metales ligeros				
ϕ	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**			**ϕ**	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**			**ϕ**	**N° de dientes**	**Ángulos de corte (°)**		
D_o	n_t	α	γ	λ	D_o	n_t	α	γ	λ	D_o	n_t	α	γ	λ
10	4	Avance en oposición			10	6	Avance en oposición			10	3	Avance en oposición		
12	4				12	6				12	3			
14	5	7	8	15	14	6	4	6	15	14	3	8	20	25
16	5				16	8				16	3			
20	6				20	8				20	4			
24	6				24	8				24	4			
30	6				30	10				30	4			
36	6				36	10				36	5			
40	6				40	10				40	5			

Tabla 2.8 Velocidades de corte de fresado y avance por diente para diversos materiales de trabajo utilizando cortador HSS [26].

#	**Material de trabajo**	**Velocidad de corte (m/min)**	**Avance por diente ($mm/diente$)**
1	Aluminio y sus aleaciones	150 – 300	0.102 – 0.305
2	Latón y bronce	20 – 35	0.050 – 0.305
3	Cobre	35	0.102 – 0.305
4	Hierro fundido gris	25	0.050 – 0.076
5	Hierro fundido blanco	15	0.025 – 0.050
6	Acero mecanizable	21 – 30	0.102 – 0.152
7	Acero para herramientas	18 – 20	0.050 – 0.102

Tabla 2.9 Datos de F_{sc} para materiales seleccionados según avances por diente especificados [26].

	Fuerza de corte específica F_{sc} (MPa)		
Material de trabajo	**0.1 ($mm/diente$)**	**0.3 ($mm/diente$)**	**0.5 ($mm/diente$)**
Acero dulce	2200	1820	1580
Acero de medio carbono	1980	1730	1570
Acero de alto carbono	2520	2040	1740
Acero para herramientas	1980 – 2030	1730 – 1750	1590
Acero aleado al Cromo-Manganeso	2300 – 2750	1880 – 2060	1660 – 1780
Acero aleado al Cromo-Molibdeno	2180 – 2540	1860 – 2140	1670 – 1800
Acero al Níquel-Cromo-Molibdeno	2000 – 2100	1680 – 1760	1500 – 1530
Fundiciones (o hierros fundidos)	2180 – 2800	1750 – 2320	1470 – 2040
Fundición gris	1750	1240	970
Latón	1150	800	630
Aleaciones de aluminio	580 – 850	400 – 800	320 – 700

Anexo D. Energía específica de corte

Tabla 2.10 Tabla de energía específica de corte y rectificado Parte I [143].

Material		Dureza Brinell	Energía de corte $[J/mm^3]$	Energía de rectificado $[J/mm^3]$	
Materiales ferrosos				Viruta pequeña	Viruta grande
Aceros AISI	1019	147 – 150	2,07		21,51
	1020	109 – 110	1,99	82,73	16,55
	1045	190 – 200	2,26		24,82
	1070	217	2,48		
	1095	182	2,35		
	1113	170	1,34		
	1340	192	2,56		
	2340	197	2,18		
	3115	131 – 150	1,88		14,89
	3130	169	2,10		
	3140	185	2,48		
	4135	220 – 250	1,77		28,13
	4135	330 – 350	2,37		33,09
	4340	210	2,56		
	4340	300 – 302	4,12		29,78
	4340	400 – 514	5,46		41,37
	52100	186	2,15		
	81B45	180	1,61		
Hierros fundidos	All	100 – 125	1,04		9,93
		150	1,39		13,24
		200 – 215	1,61	74,46	14,06
		250	1,96		33,09
Aceros para herramientas y matrices	Peerless 56	352	3,82		
	Super Tricent	352	3,55		
	Acero para herramienta A-6	240		82,73	13,24
	Acero para herramienta A-6	530		82,73	14,89
	T-15 HSS	700		99,28	20,68
Aceros inoxidables	302	160	3,08		
	303	162	2,21		
	304	162 – 182	2,92	99,28	18,20
	410	217	1,99		
	416	215	1,80		
	430	156	2,02		
	17-7PH	170	4,01		

Tabla 2.11 Tabla de energía específica de corte y rectificado Parte II [143].

Material		**Dureza Brinell**	**Energía de corte $[J/mm^3]$**	**Energía de rectificado $[J/mm^3]$**	
Materiales ferrosos				**Viruta pequeña**	**Viruta grande**
Aeroespaciales	A-286	321	3,85		
Aleaciones	AM-350	444	3,96		
	D6 AC	560	9,41		
	INCONEL 700	520	5,10		
	RENE 41	340 – 365	9,60	99,28	16,55
	UDIMET 500	360	4,94		
No Ferrosos					
Aluminio	2024-T4		0,87		
	6061-T6		0,76		
	Blando	80		41,37	12,41
	Duro	150		41,37	8,27
Latón	Fácil mecanizado		0,68	9,93	5,79
	Duro		1,50		18,20
	Rojo		1,34		
	8/15				
Titanio	Aleación dura		2,73		
	Aleación blanda		1,77		
	Aleación	295 - 300		66,19	19,03
	Cobalto (HS-25)		4,36		
	Columbio		3,82		
	Cobre		1,23		28,96
	Magnesio		0,33	4,96	3,31
	Molibdeno (TZM)		6,82		
	Aleación de tántalo (90%)		8,18		
	Tungsteno		6,82		
	Zinc		0,68		

Anexo E. Parámetros de corte para taladro

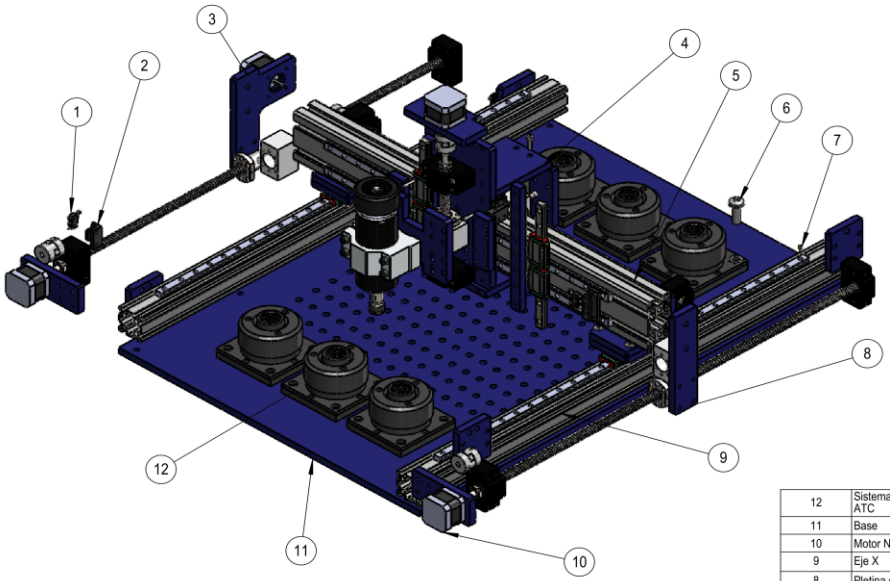
Tabla 4.66 Parámetros de corte para taladrado [142].

Material	Unidad $[kp/mm^2]$	Vc para caso de acero de herramientas	Avance $[mm/rev]$							Medio de refrigeración y lubricación
			Vc en m/min para caso de acero rápido de aleación débil							
			Diámetro de la broca $[mm]$							
			5	10	15	20	25	30	35	
Acero	Hasta 40	… 20	0,1	0,18	0,25	0,28	0,31	0,34	0,36	Taladrina o bien aceite de corte y refrigerante
			15	18	22	26	29	32	35	
	Hasta 60	… 14	13	16	20	23	26	28	29	
	Hasta 80	… 10	0,07	0,13	0,16	0,19	0,21	0,23	0,25	
			12	14	16	18	21	23	24	
	Hasta 100	–	8	10	13	15	17	18	19	
	Más 100	–	0,015 … 0,17 mm/rev							
			6 … 12 m/min							
Fundición gris	Hasta 18	… 14	0,15	0,24	0,3	0,32	0,35	0,38	0,4	En seco o con taladrina abundante
			24	28	32	34	37	39	40	
	Hasta 22	… 10	16	18	21	24	26	27	28	
	Hasta 30	… 8	0,1	0,16	0,2	0,24	0,28	0,3	0,3	
			12	14	16	18	20	21	22	
Latón	Hasta 40	… 40	0,1	0,15	0,22	0,27	0,3	0,32	0,36	Taladrina o aceites minerales
			60 … 70 m/min							
	Hasta 60	… 25	0,07	0,12	0,18	0,24	0,25	0,28	0,32	
			40 … 60 m/min							
Bronce	Hasta 30	… 15	0,1	0,15	0,22	0,27	0,3	0,32	0,36	
			30 … 40 m/min							
	Hasta 70	… 12	0,05	0,08	0,12	0,18	0,2	0,22	0,26	
			25 … 35 m/min							
Aluminio	Técnico	… 50	0,05	0,12	0,2	0,3	0,35	0,4	0,46	Taladrina o aceites de corte y refrigerantes
			80 … 120 m/min							
	Aleaciones	… 40	0,12	0,2	0,3	0,4	0,46	0,5	0,6	
			100 … 150 m/min							
Magnesio	Aleaciones	… 80	0,15	0,2	0,3	0,38	0,4	0,45	0,5	En seco o con aceites especiales
			200 … 250 m/min							
Materiales prensados	No en capas	… 15	0,04	0,05	0,07	0,1	0,12	0,15	0,17	Aire a presión
			35 45 m/min							

Anexo F. Código fuente de la interfaz de usuario

Debido a la extensión del código fuente desarrollado y con el fin de optimizar la presentación del documento, el código completo se encuentra disponible en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1yHyEX2CuTn68tenmzJx9munK75X1SK2F?usp=sharing

Anexo G. Planos y lista de materiales de la fresadora CNC



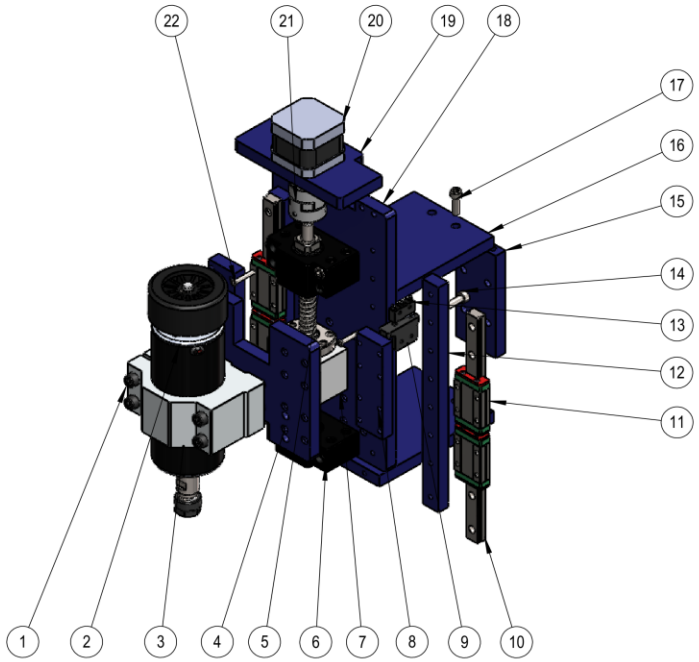
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIIDAD	CÓDIGO	DESCRIPTION
12	Sistema de cambio de herramienta ATC	PET G	6	EM-TF-E-ATC	Impresión 3D
11	Base	ASTM A36	1	EM-TF-Bs37	Dimensiones:530x751,28x10
10	Motor Nema 17	-----	4	EM-TF-mN17	
9	Eje X	-----	2	EM-TF-E-X	Sub ensamble
8	Pletina eje X	ASTM A36	1	EM-TF-pEX28	Dimensiones: 40x158,53x10
7	Tornillo para guías lineales	-----	108	EM-TF-TG	M3X0,5X6
6	Tornillo para cambio de herramienta	-----	24	EM-TF-Tatc	M10X1,5X30
5	Eje Y	-----	1	EM-TF-E-Y	Sub ensamble
4	Eje Z	-----	1	EM-TF-E-Z	Sub ensamble
3	Pletina eje X	ASTM A36	1	EM-TF-pEX7	Dimensiones: 103,92x158,53x10
2	Soporte final de carrera (Y)	PET G	2	EM-TF-sFC3	Impresión 3D
1	Final de carrera mecánico	-----	6	EM-TF-FC	

UTN | CIME

PROYECTO: Fresadora CNC
PARTE: Ensamble
CÓDIGO: EM-TF-EN
ESCALA 1:5
TOLERANCIA: ±

MATERIAL:		DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026
TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026
RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026
CANTIDAD:		APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026

HOJA 1/28 A3



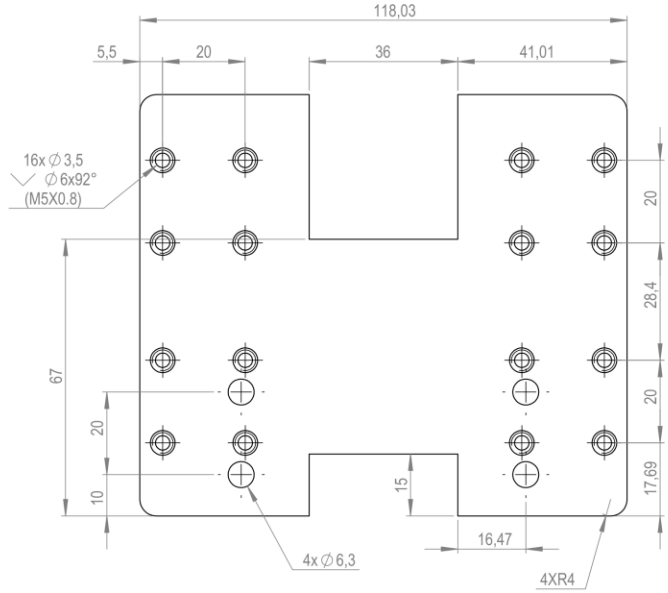
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
22	Tornillo para unir bloque MGN12H	-----	16	EM-TF-E-Z-TBg	M3X0,5X20
21	Acople flexible	-----	1	EM-TF-E-Z-AFz	Tipo araña 5 a 8
20	Motor Nema 17	-----	1	EM-TF-E-Z-mN17	
19	Pletina superior spindle	ASTM A36	1	EM-TF-E-Z-pSP13	Dimensiones: 52x106,91x10
18	Pletina eje Z	ASTM A36	1	EM-TF-E-Z-pEZ16	Dimensiones: 114x228x10
17	Tornillo para unir pletinas (Z)	-----	4	EM-TF-E-Z-TPz	M5X0,8X16
16	Pletina larga Z	-----	2	EM-TF-E-Z-pSX18	Sub ensamble
15	Pletina soporte tornillo	ASTM A36	1	EM-TF-E-Z-pST19	Dimensiones: 40x91x10
14	Tornillo para unir pletina-tornillo de bolas		4	EM-TF-E-Z-TBt	Dimensiones: 80x115x20
13	Final de carrera mecánico	-----	2	EM-TF-E-Z-FCz	
12	Pletina soporte guía Z	ASTM A36	2	EM-TF-E-Z-pSGz20	Dimensiones: 16x200x10
11	Bloque de guía lineal MGN12H	-----	4	EM-TF-E-Z-bMGz	
10	Guía lineal MGN12	-----	2	EM-TF-E-Z-gMGz	200 mm
9	Soporte final de carrera (Z)	PET G	2	EM-TF-E-Z-sFC32	Impresión 3D
8	Pletina soporte guia (Z)	ASTM A36	2	EM-TF-E-Z-pSg39	Dimensiones:26x82,8x10
7	Soporte de tornillo de bolas sfu	-----	1	EM-TF-E-Z-sTBz	
6	Kit tornillo de bolas (BK10 y BF10)	-----	1	EM-TF-E-Z-kTB	sfu1204x200mm
5	Tornillos para soporte de rodamientos	-----	6	EM-TF-E-Z-TR	M6X1X40
4	Pletina spindle	ASTM A36	1	EM-TF-E-Z-pSp40	Dimensiones:102x118,03x10
3	Soporte de spindle	-----	1	EM-TF-E-Z-sSP	
2	Spindle	-----	1	EM-TF-E-Z-SP	Potencia: 1 HP
1	Tornillos de soporte spindle	-----	4	EM-TF-E-Z-TS	M6x60

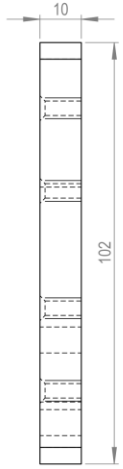
UTN CIME

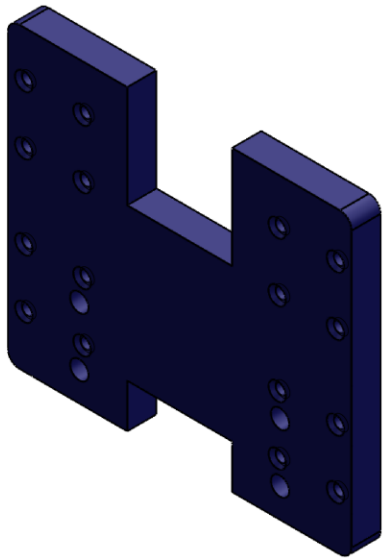
PROYECTO: Fresadora CNC
PARTE: Eje Z
CÓDIGO: EM-TF-E-Z
ESCALA 1:3
TOLERANCIA: ±

MATERIAL:		DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026
TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026
RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026

HOJA 2/28
A3

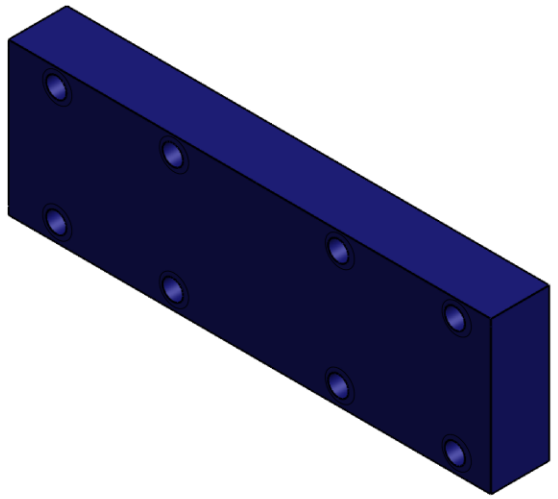


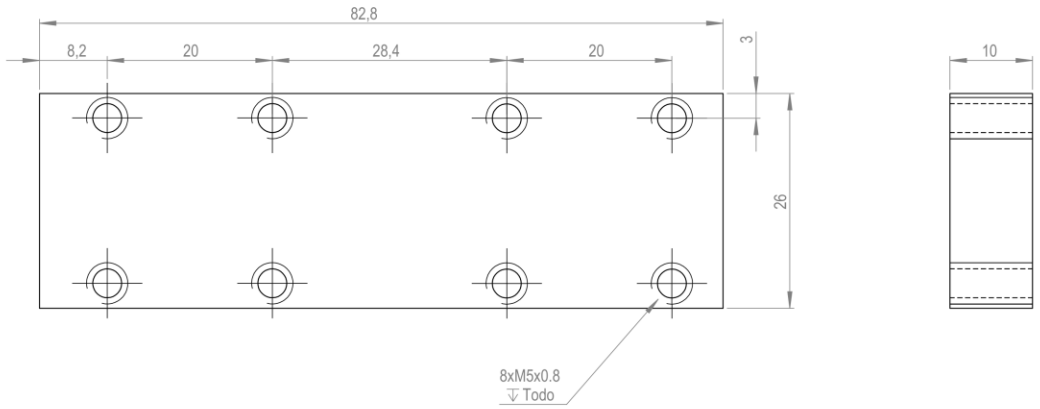




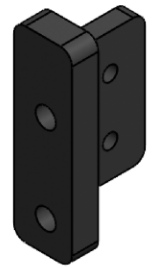
Nota: Todas las perforaciones son pasantes por todo.

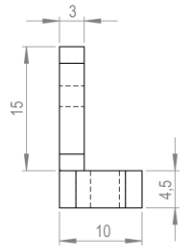
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Z				ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina spindle				TOLERANCIA: ± 0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-Z-pSp40					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	3/28
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejia.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

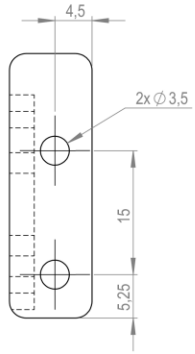


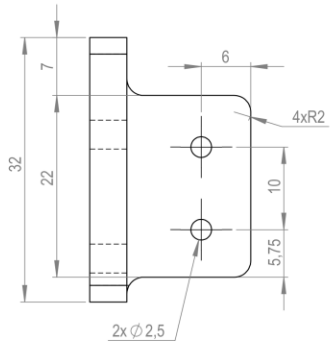


UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Z				ESCALA 2:1	
	PARTE: Pletina soporte guía Z					
	CÓDIGO: EM-TF-E-Z-pSg39				TOLERANCIA: ± 0.02	
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	4/28
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	2	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	



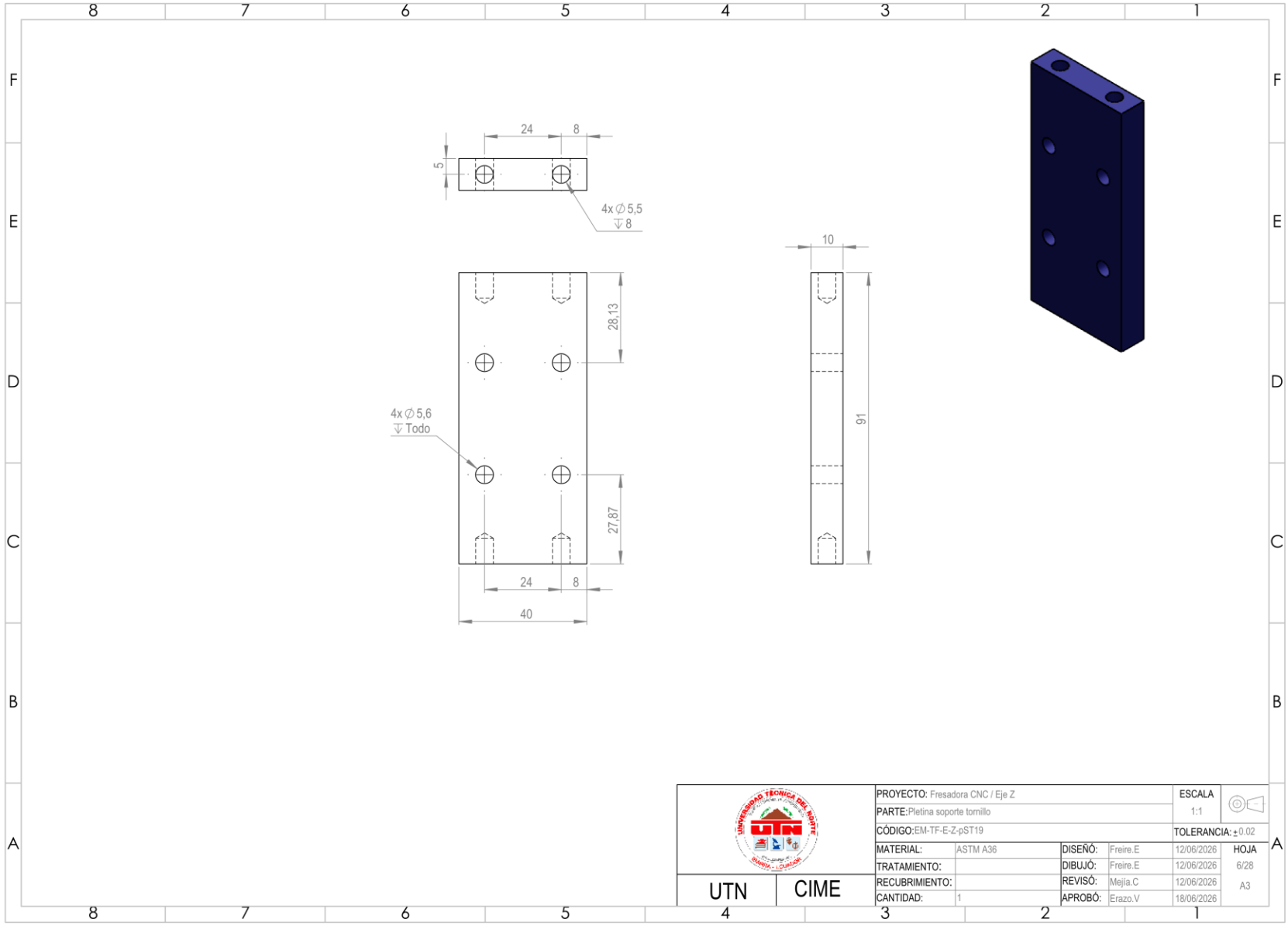




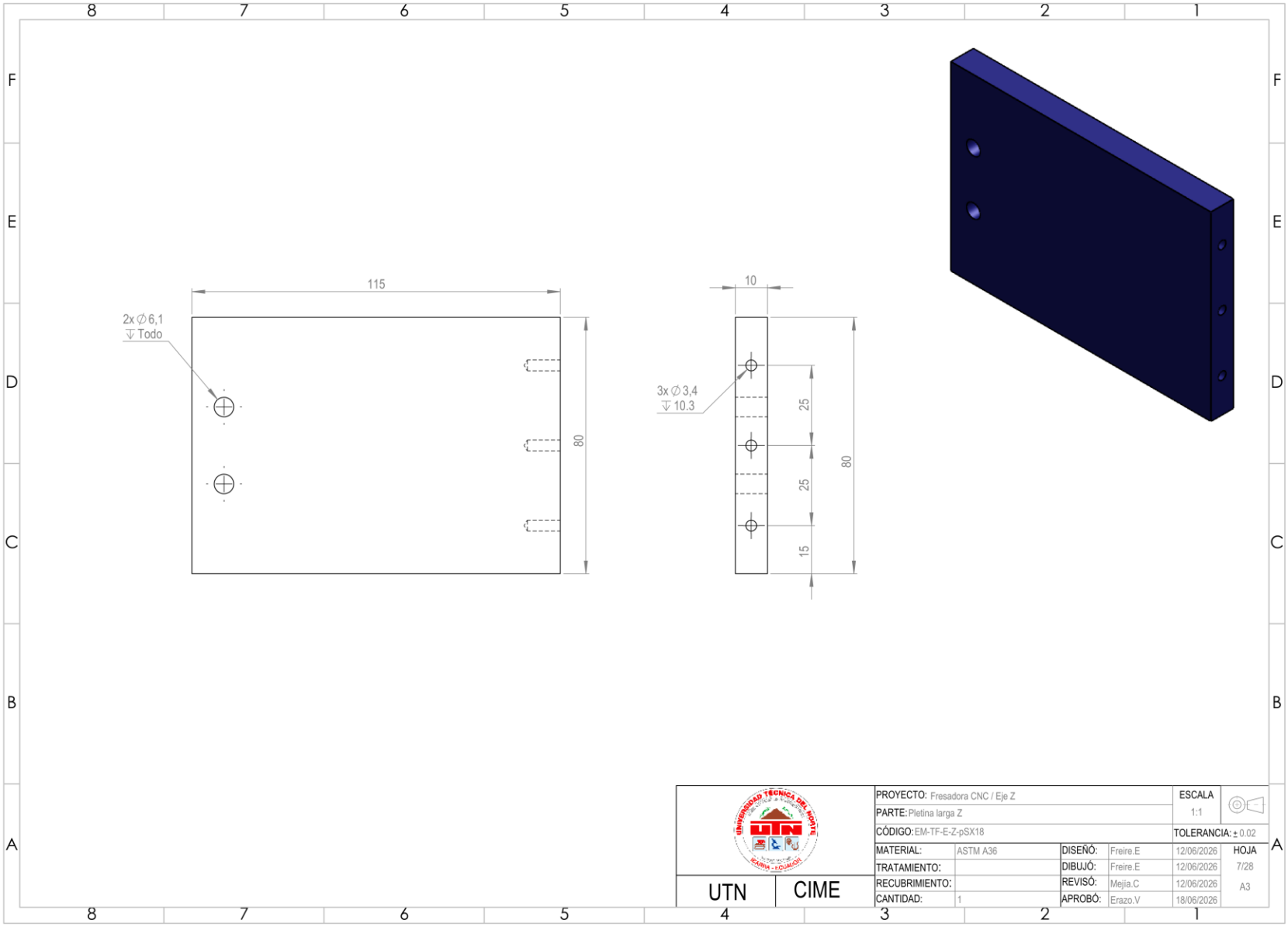


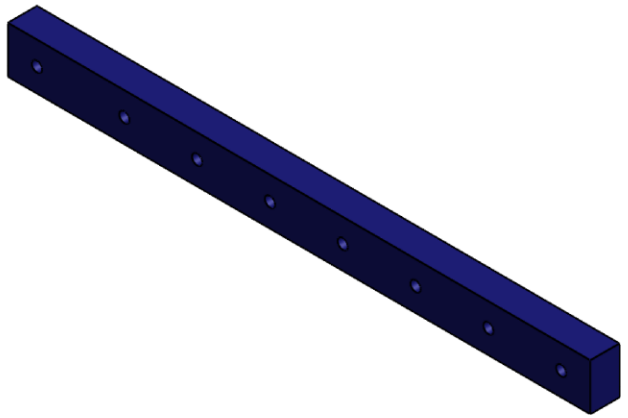
Nota: Todas las perforaciones son pasantes por todo.

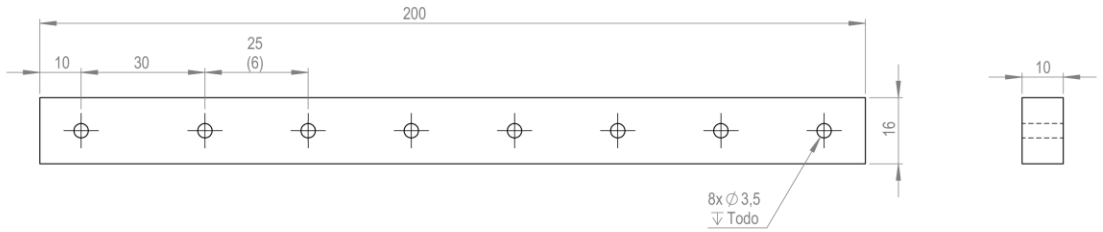
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Z			ESCALA 2:1	
	PARTE: Soporte final de carrera (Z)				
	CÓDIGO: EM-TF-E-Z-sFC32			TOLERANCIA: ± 0.02	
	MATERIAL: PET G	DISEÑÓ: Freire.E	12/06/2026	HOJA	
	TRATAMIENTO:	DIBUJÓ: Freire.E	12/06/2026	5/28	
	RECUBRIMIENTO:	REVISÓ: Mejía.C	12/06/2026	A3	
	CANTIDAD: 2	APROBÓ: Erazo.V	18/06/2026		



UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Z				ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina soporte tornillo				TOLERANCIA: ±0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-Z-pST19					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	6/28
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

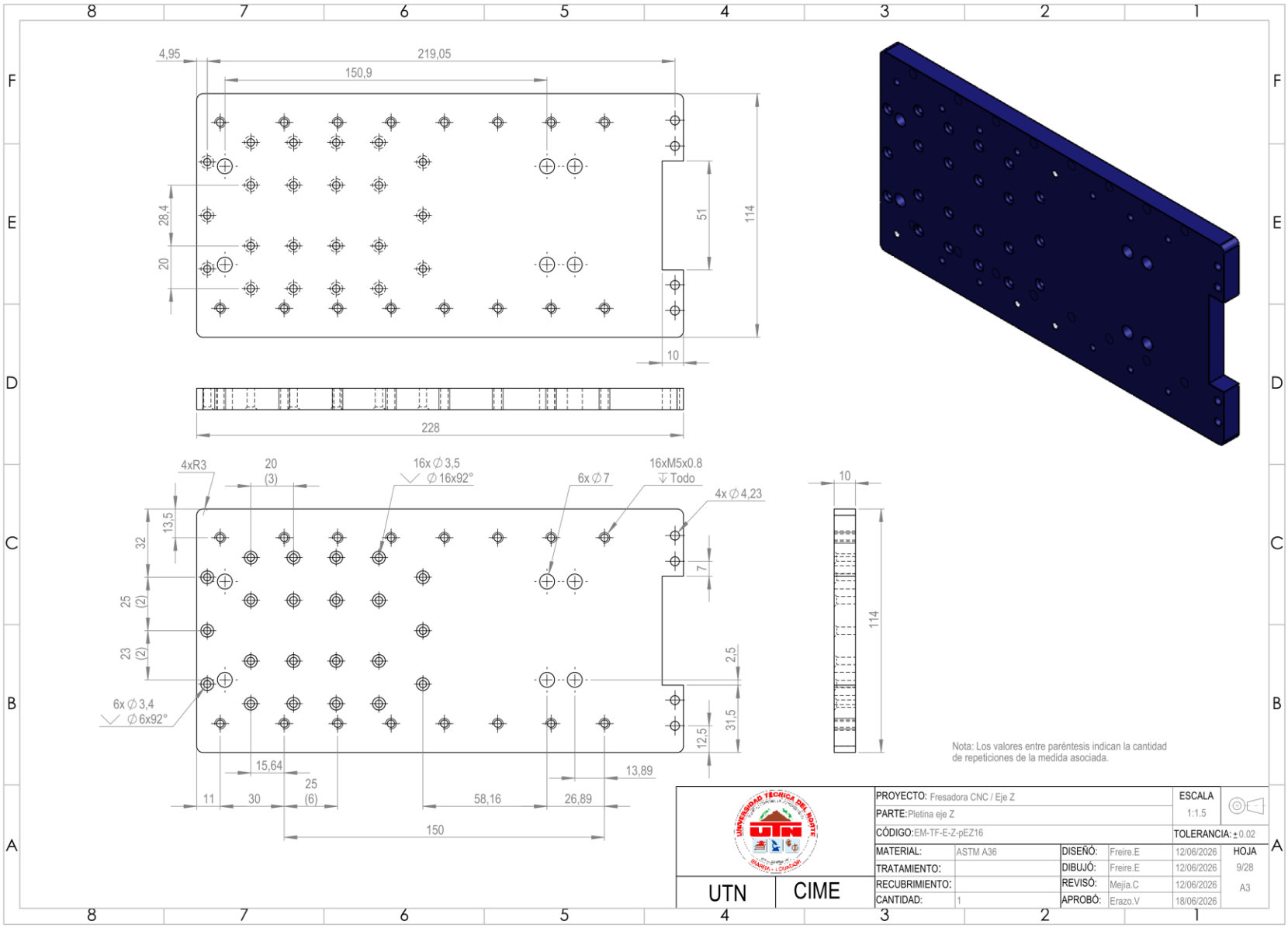

8
7
6
5
4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
115
2x ∅6,1
↧ Todo
80
10
3x ∅3,4
↧ 10.3
25
25
15
80
UTN
CIME
PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Z
PARTE: Pletina larga Z
CÓDIGO: EM-TF-E-Z-pSX18
ESCALA
1:1
TOLERANCIA: ± 0.02
MATERIAL: ASTM A36
TRATAMIENTO:
RECUBRIMIENTO:
CANTIDAD: 1
DISEÑÓ: Freire.E 12/06/2026
DIBUJÓ: Freire.E 12/06/2026
REVISÓ: Mejia.C 12/06/2026
APROBÓ: Erazo.V 18/06/2026
HOJA
7/28
A3

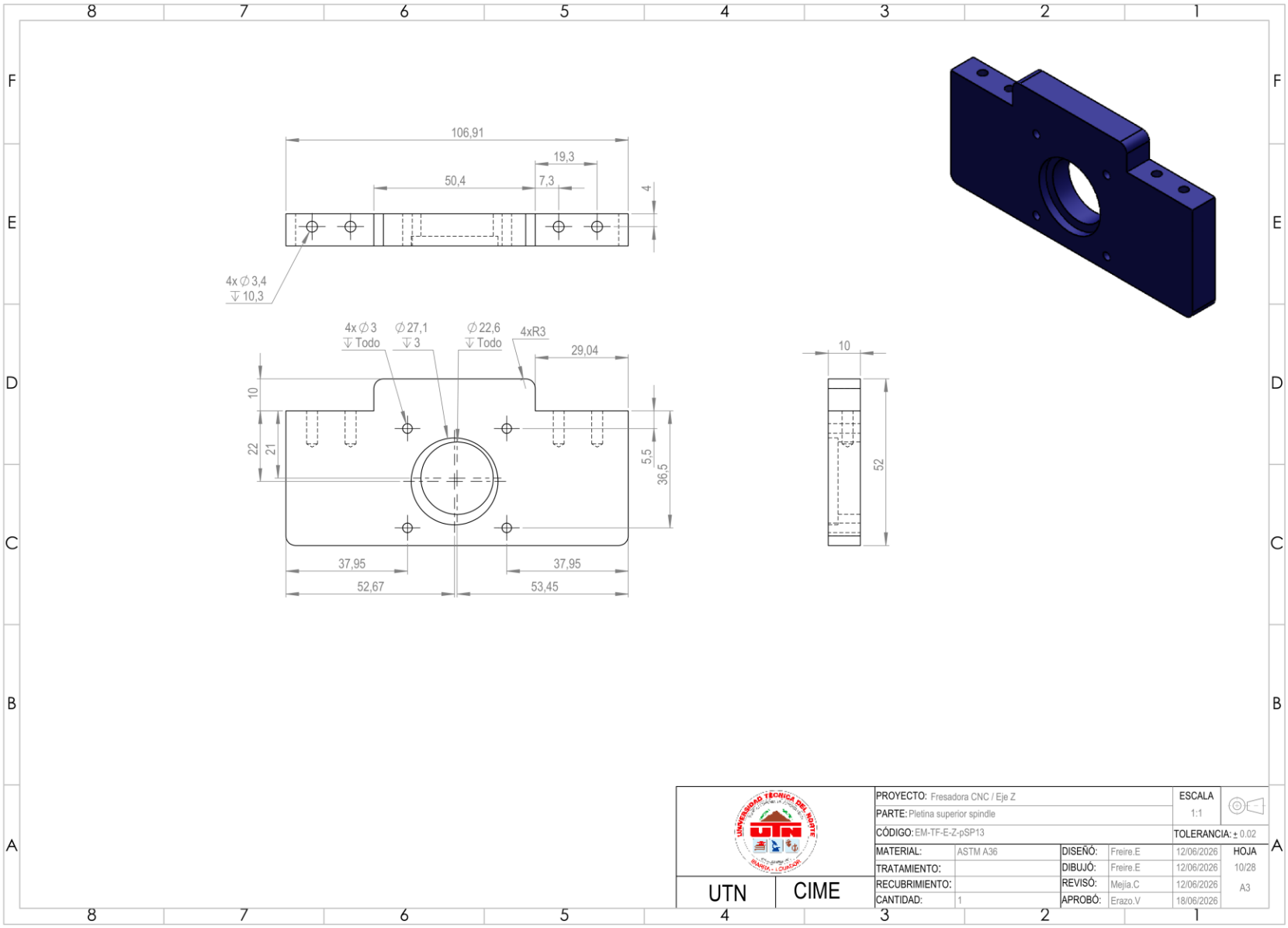




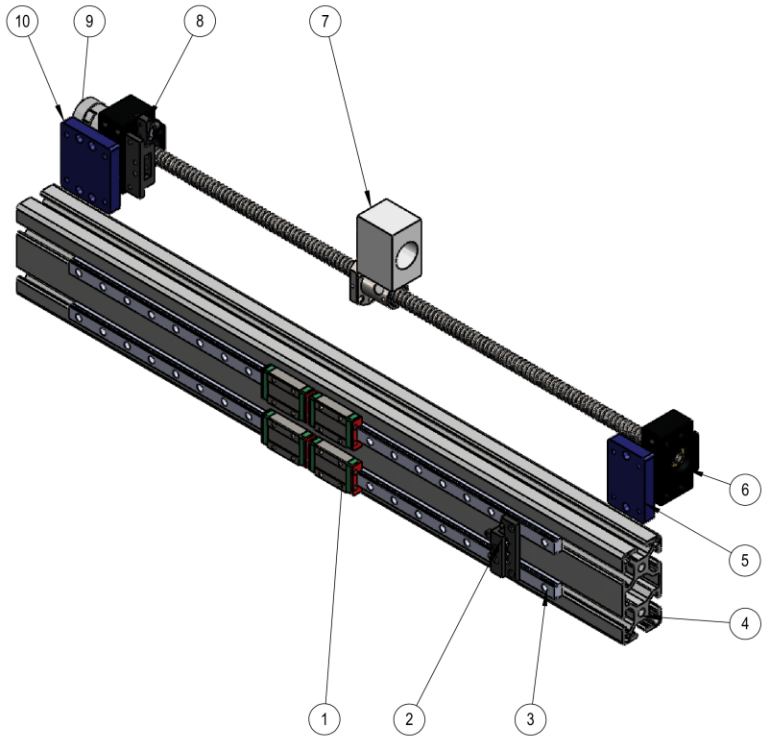
Nota: Los valores entre paréntesis indican la cantidad de repeticiones de la medida asociada.

UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Z			ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina soporte guía Z			TOLERANCIA: ±0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-Z-pSGz20				
	MATERIAL: ASTM A36	DISEÑÓ: Freire.E	12/06/2026	HOJA	
	TRATAMIENTO:	DIBUJÓ: Freire.E	12/06/2026	8/28	
	RECUBRIMIENTO:	REVISÓ: Mejía.C	12/06/2026	A3	
	CANTIDAD: 2	APROBÓ: Erazo.V	18/06/2026		


4,95
219,05
150,9
28,4
20
51
114
10
228
4xR3
20
(3)
16x ∅3,5
∅16x92°
6x ∅7
16xM5x0.8
Todo
4x ∅4,23
13,5
32
25
(2)
23
(2)
6x ∅3,4
∅6x92°
7
2,5
31,5
12,5
15,64
25
(6)
13,89
11
30
58,16
26,89
150
10
114
Nota: Los valores entre paréntesis indican la cantidad de repeticiones de la medida asociada.
UTN
CIME
PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Z
PARTE: Pletina eje Z
CÓDIGO: EM-TF-E-Z-pEZ16
ESCALA 1:1.5
TOLERANCIA: ±0.02
MATERIAL: ASTM A36
TRATAMIENTO:
RECUBRIMIENTO:
CANTIDAD: 1
DISEÑÓ: Freire.E 12/06/2026
DIBUJÓ: Freire.E 12/06/2026
REVISÓ: Mejia.C 12/06/2026
APROBÓ: Erazo.V 18/06/2026
HOJA 9/28
A3



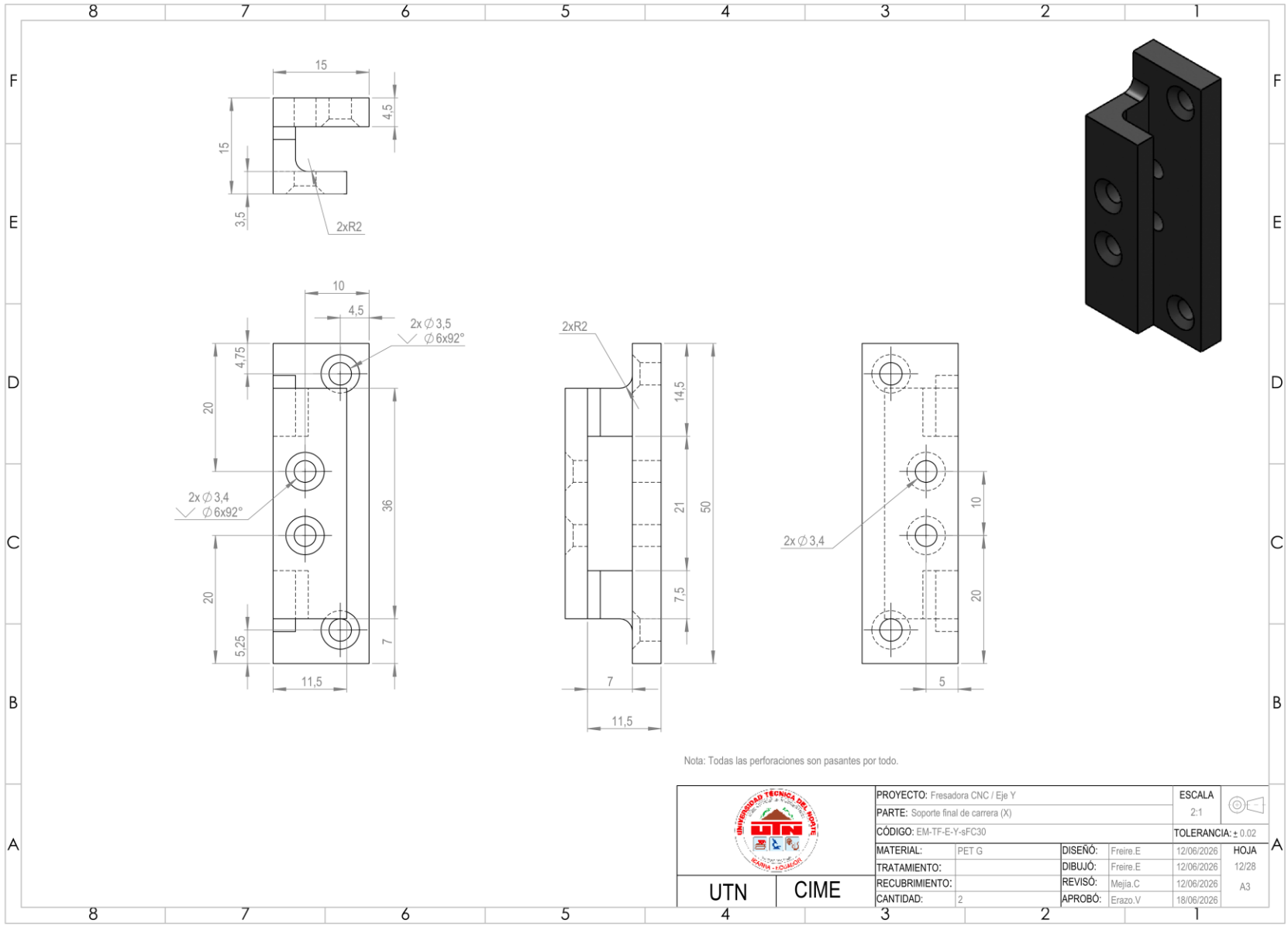
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Z				ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina superior spindle				TOLERANCIA: ± 0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-Z-pSP13					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 10/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejia.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

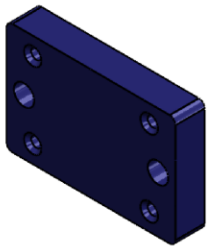


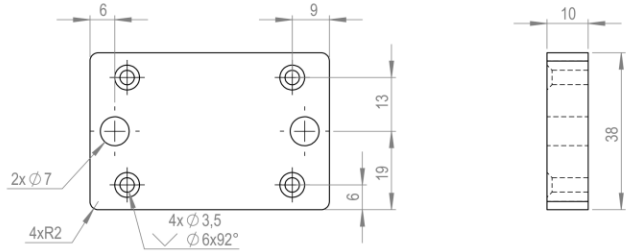
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
10	Pletina tornillo X	ASTM A36	1	EM-TF-E-Y-pTX11	Dimensiones: 51x58x10
9	Acople flexible	-----	1	EM-TF-E-Y-AF	Tipo araña 5 a 8
8	Final de carrera mecánico	-----	2	EM-TF-E-Y-FCx	
7	Soporte de tornillo de bolas sfu	-----	1	EM-TF-E-Y-sTBx	
6	Kit tornillo de bolas (BK10 y BF10)	-----	2	EM-TF-E-Y-kTBx	sfu1204x200mm
5	Pletina tornillo X (BF10)	ASTM A36	1	EM-TF-E-Y-pTX27	Dimensiones: 38x58x10
4	Perfil (Y)	6105-T5 Aluminum	1	EM-TF-E-Y-PRy	40-4080x300mm
3	Guía lineal MGN12	-----	2	EM-TF-E-Y-gMGx	500 mm
2	Soporte final de carrera (X)	PET G	2	EM-TF-E-Y-sFC30	Impresión 3D
1	Bloque de guía lineal MGN12H	-----	4	EM-TF-E-Y-bMG	

UTN | CIME

PROYECTO: Fresadora CNC				ESCALA	
PARTE: Eje Y				1:3	
CÓDIGO: EM-TF-E-Y				TOLERANCIA: ±	
MATERIAL:		DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA
TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	11/28
RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

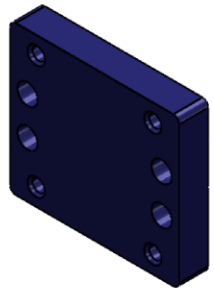

15
4,5
15
3,5
2xR2
10
4,5
2x ∅ 3,5
∅ 6x92°
4,75
20
2x ∅ 3,4
∅ 6x92°
36
20
5,25
7
11,5
2xR2
14,5
21
50
7,5
7
11,5
2x ∅ 3,4
10
20
5
Nota: Todas las perforaciones son pasantes por todo.
UTN
CIME
PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Y
PARTE: Soporte final de carrera (X)
CÓDIGO: EM-TF-E-Y-sFC30
ESCALA 2:1
TOLERANCIA: ± 0.02
MATERIAL: PET G
TRATAMIENTO:
RECUBRIMIENTO:
CANTIDAD: 2
DISEÑÓ: Freire.E 12/06/2026
DIBUJÓ: Freire.E 12/06/2026
REVISÓ: Mejia.C 12/06/2026
APROBÓ: Erazo.V 18/06/2026
HOJA 12/28
A3

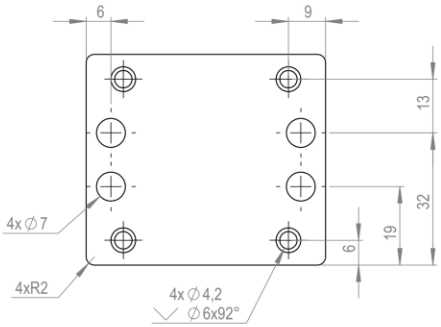


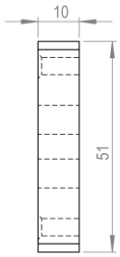


Nota: Todas las perforaciones son pasantes por todo.

UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Y				ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina tornillo X (BF10)				TOLERANCIA: ± 0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-Y-pTX27					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 13/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejia.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

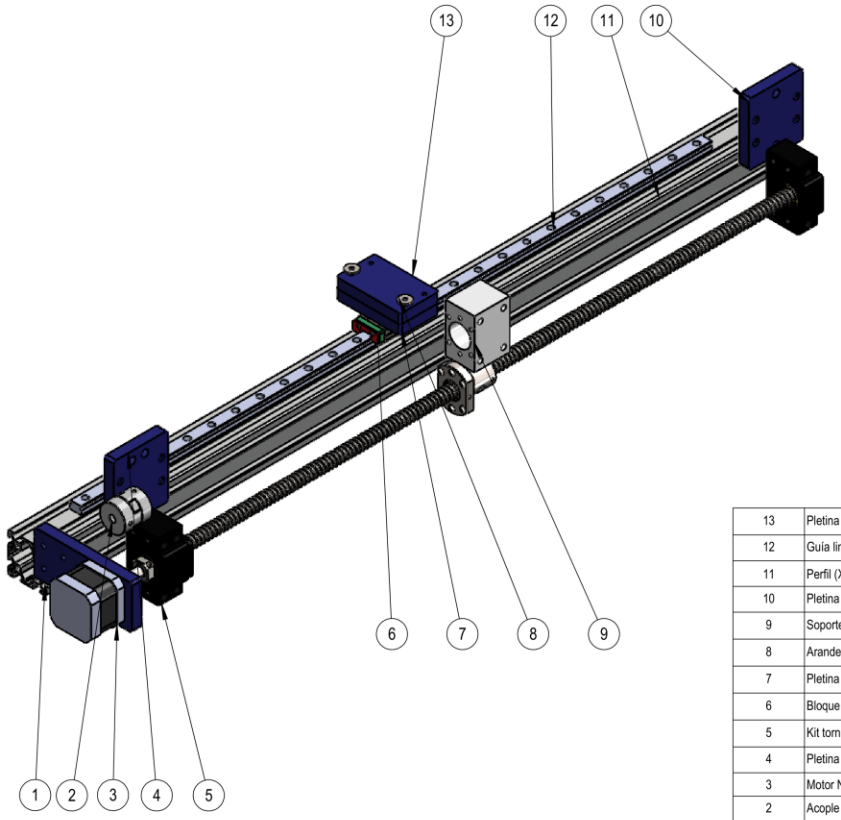






Nota: Todas las perforaciones son pasantes por todo.

UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje Y				ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina tornillo X				TOLERANCIA: ±0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-Y-pTX11					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 14/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejia.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

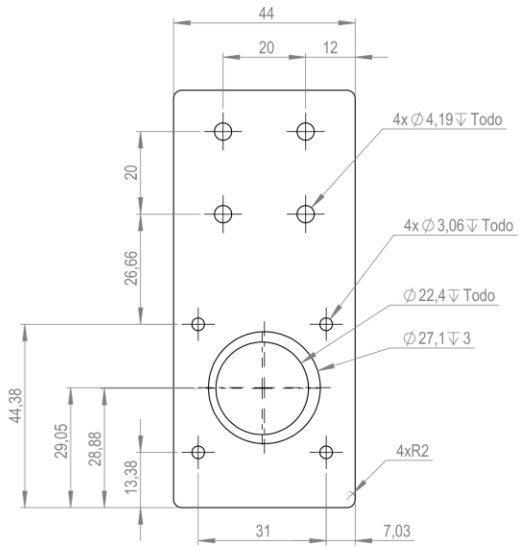


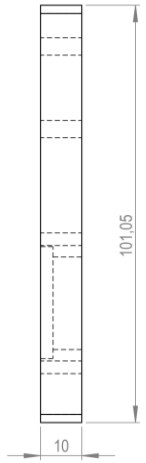
N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
13	Pletina soporte guia2	ASTM A36	2	EM-TF-E-X-pSG6	Dimensiones: 40x66,6x10
12	Guía lineal MGN12	-----	2	EM-TF-E-X-gMGy	650 mm
11	Perfil (X)	6105-T5 Aluminum	2	EM-TF-E-X-PRx	20-4040x300mm
10	Pletina BF	ASTM A36	2	EM-TF-E-X-pBF	Dimensiones: 55,83x63,5x10
9	Soporte de tornillo de bolas sfu	-----	2	EM-TF-E-X-sTB	
8	Arandela plana	-----	8	EM-TF-E-X-AP	B18,22M-3 mm
7	Pletina soporte guia	ASTM A36	2	EM-TF-E-X-pSG5	Dimensiones: 40x66,6x10
6	Bloque de guía lineal MGN12H	-----	2	EM-TF-E-X-bMG	
5	Kit tornillo de bolas (BK10 y BF10)	-----	2	EM-TF-E-X-kTB	sfu1204x500mm
4	Pletina Bk	ASTM A36	2	EM-TF-E-X-pBK33	Dimensiones:55,83x63,5x10
3	Motor Nema 17	-----	2	EM-TF-E-X-mN17	
2	Acople flexible	-----	2	EM-TF-E-X-AF	Tipo araña 5 a 8
1	Pletina motor	ASTM A36	2	EM-TF-E-X-pM35	Dimensiones:44x101,05x10

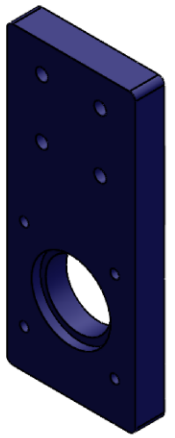
UTN CIME

PROYECTO: Fresadora CNC
PARTE: Eje X
CÓDIGO: EM-TF-E-X
ESCALA 1:3
TOLERANCIA: ±

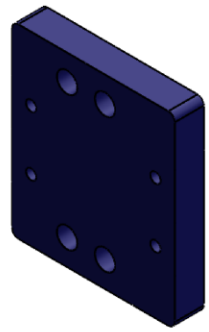
MATERIAL:		DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA
TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	15/28
RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejia.C	12/06/2026	A3
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

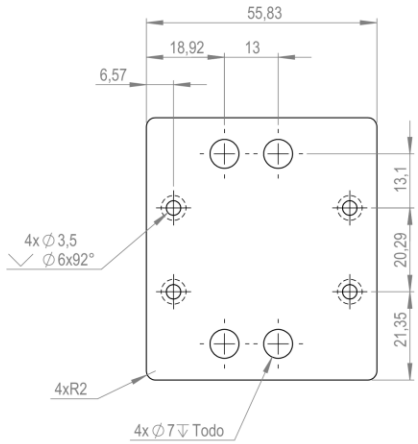


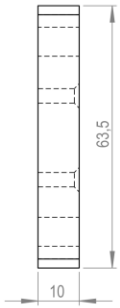




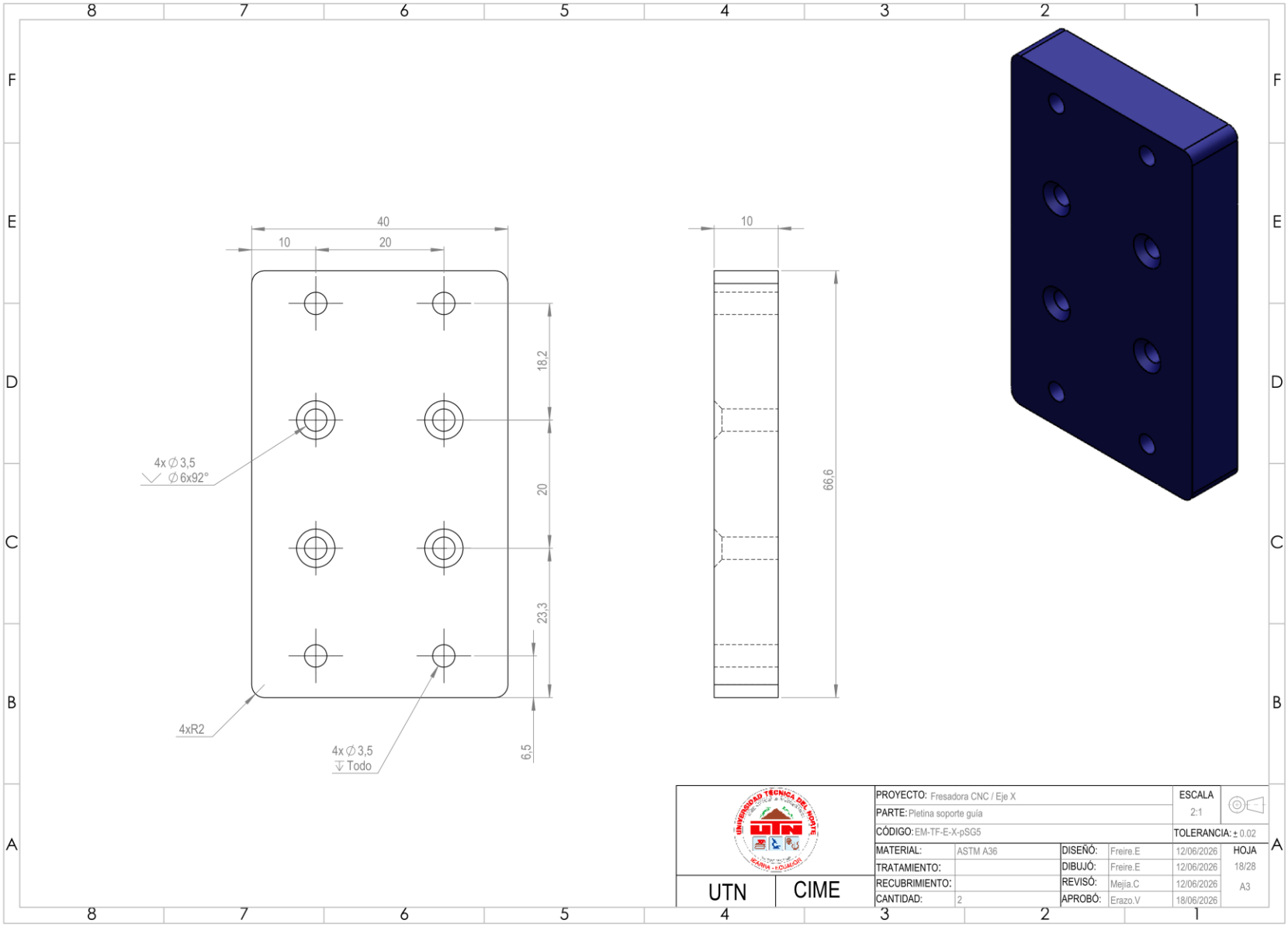
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje X				ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina motor				TOLERANCIA: ± 0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-X-pM35					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 16/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	2	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	



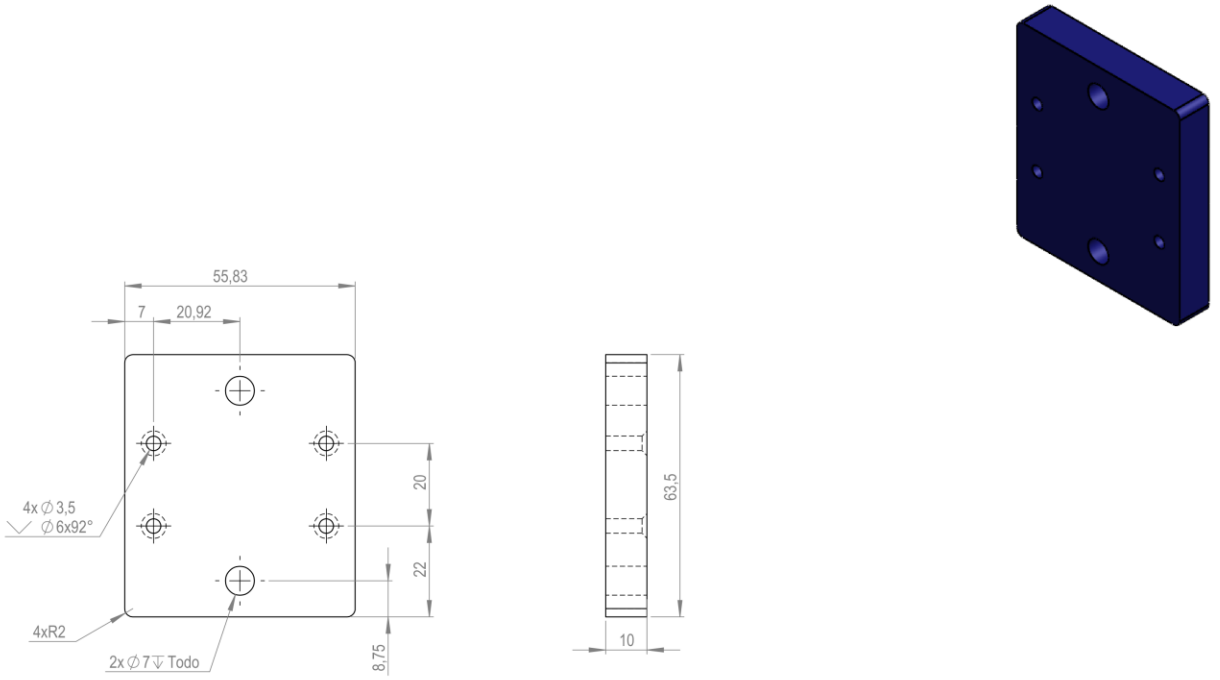




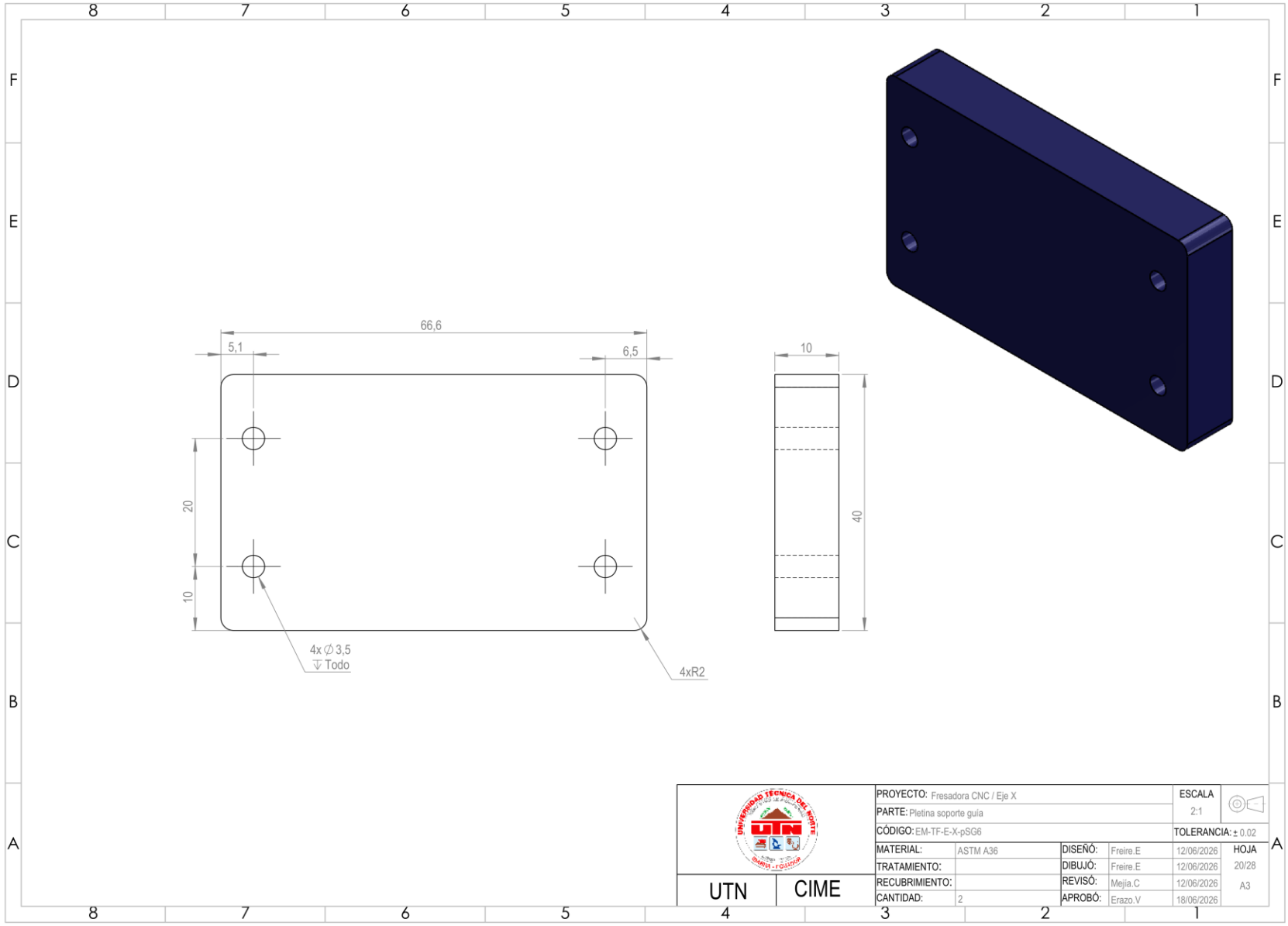
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje X				ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina BK				TOLERANCIA: ± 0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-X-pBK33					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 17/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	2	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	



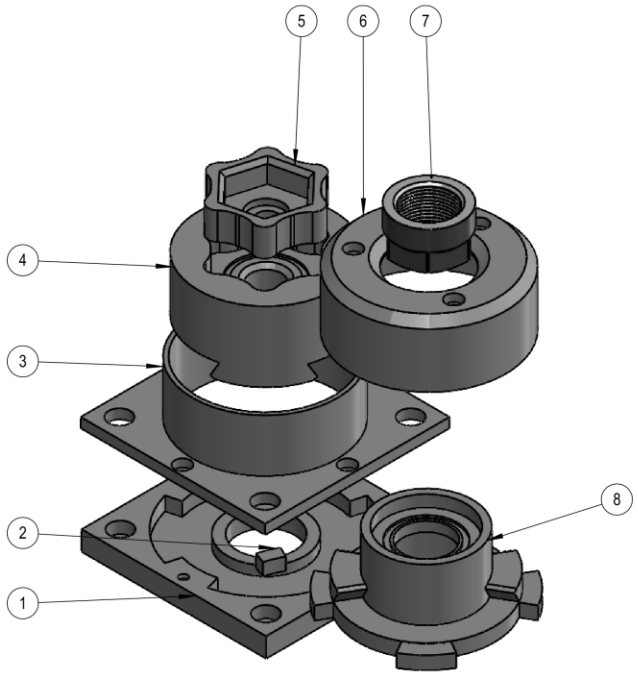
UTN	CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje X				ESCALA 2:1
		PARTE: Pletina soporte guía				TOLERANCIA: ± 0.02
		CÓDIGO: EM-TF-E-X-pSG5				
		MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E 12/06/2026	HOJA 18/28
		TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E 12/06/2026	
		RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejia.C 12/06/2026	A3
		CANTIDAD:	2	APROBÓ:	Erazo.V 18/06/2026	



UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje X				ESCALA 1:1	
	PARTE: Pletina BF				TOLERANCIA: ± 0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-X-pBF					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 19/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejia.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	2	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	



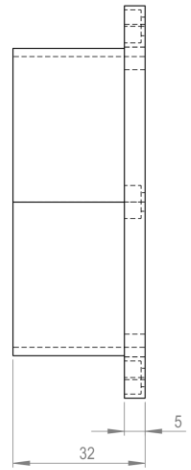
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Eje X				ESCALA 2:1	
	PARTE: Pletina soporte guía				TOLERANCIA: ± 0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-E-X-pSG6					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 20/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	2	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

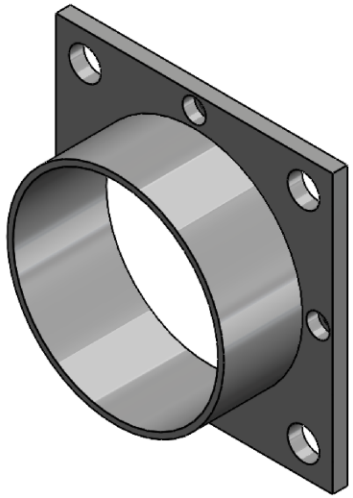


N.º DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
8	OpenATC-Bottom-main-body.step	Steel	1	EM-TF-E-ATC-MB	Impresión 3D
7	ER20-A Collet Nut.step	Steel	1	EM-TF-E-ATC-Cn	Impresión 3D
6	OpenATC-Body-top-cover	PETG G	1	EM-TF-E-ATC-Bt6	Impresión 3D
5	OpenATC-ER20-A-Nut-holder.step	Steel	1	EM-TF-E-ATC-ER	Impresión 3D
4	OpenATC-Top-main-body	PETG G	1	EM-TF-E-ATC-Tm4	Impresión 3D
3	OpenATC-Base-bottom-cover	PETG G	1	EM-TF-E-ATC-Bb3	Impresión 3D
2	OpenATC-Shock-absorber.step	Steel	1	EM-TF-E-ATC-Sa	Impresión 3D
1	OpenATC-Base-holder.step	Steel	1	EM-TF-E-ATC-Bh	Impresión 3D

UTN CIME

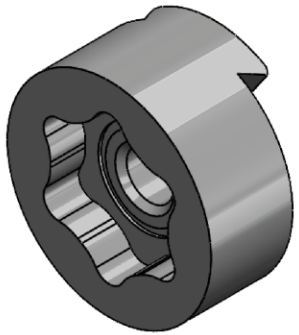
PROYECTO: Fresadora CNC				ESCALA	
PARTE: Sistema de cambio de herramientas ATC				1:1.5	
CÓDIGO: EM-TF-E-ATC				TOLERANCIA: ±	
MATERIAL:	PET G	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA
TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	21/28
RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
CANTIDAD:	6	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

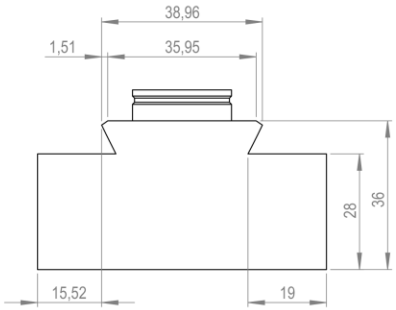




Nota: Este plano incluye únicamente las medidas modificadas respecto al repositorio base.

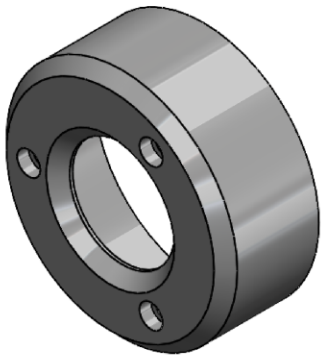
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Sistema de cambio de herramientas ATC				ESCALA 1:1
	PARTE: OpenATC-Base-bottom-cover				
	CÓDIGO: EM-TF-E-ATC-Bb3				TOLERANCIA: ± 0.02
	MATERIAL:	PET G	DISEÑÓ:	Freire.E 12/06/2026	HOJA 22/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E 12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C 12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V 18/06/2026	

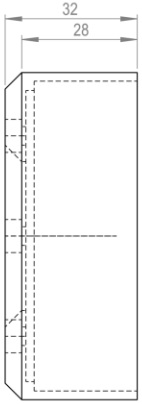




Nota: Este plano incluye únicamente las medidas modificadas respecto al repositorio base.

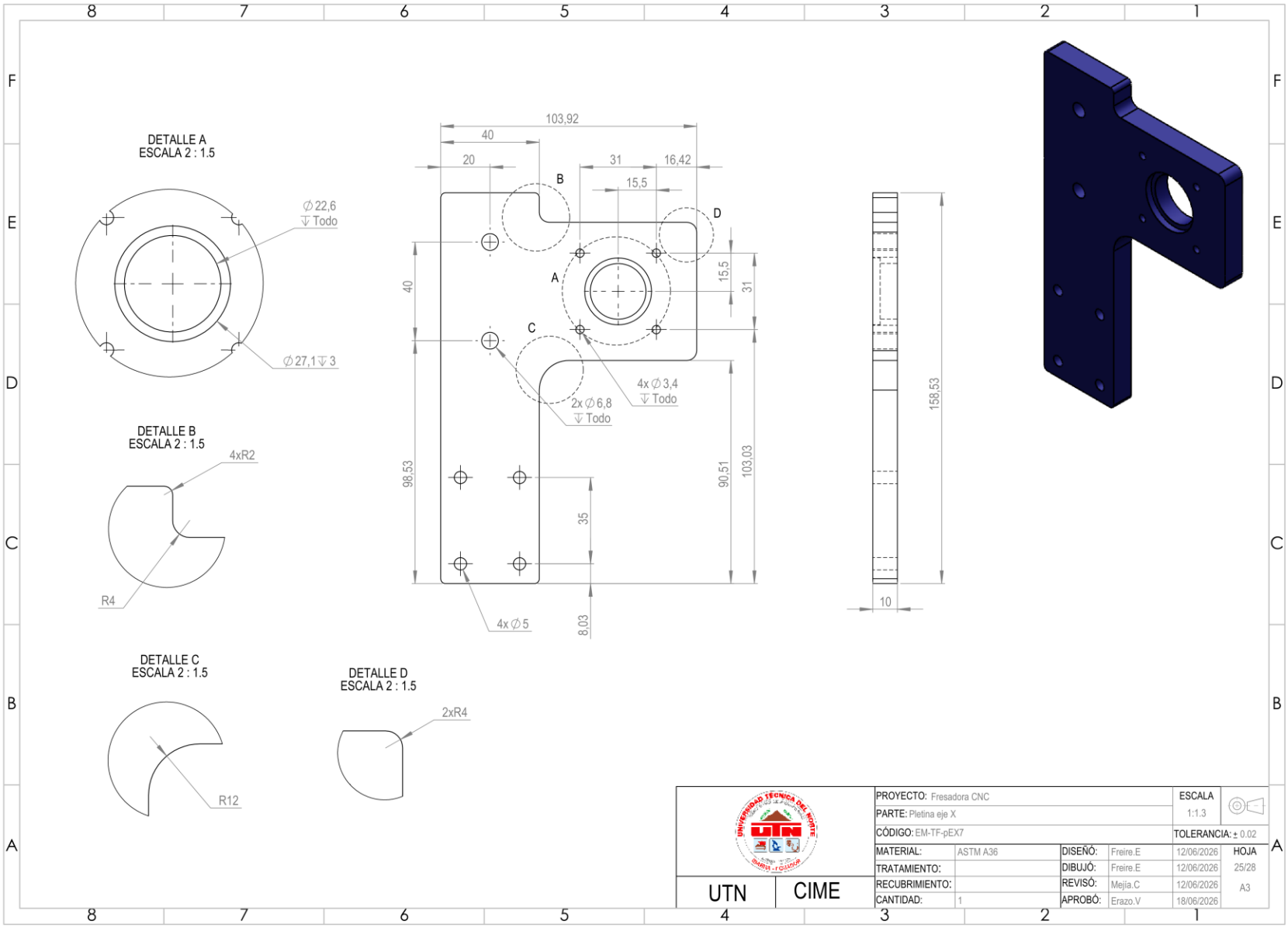
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Sistema de cambio de herramientas ATC				ESCALA 1:1	
	PARTE: OpenATC-Top-main-body					
	CÓDIGO: EM-TF-E-ATC-Tm4				TOLERANCIA: ± 0.02	
	MATERIAL:	PET G	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 23/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	

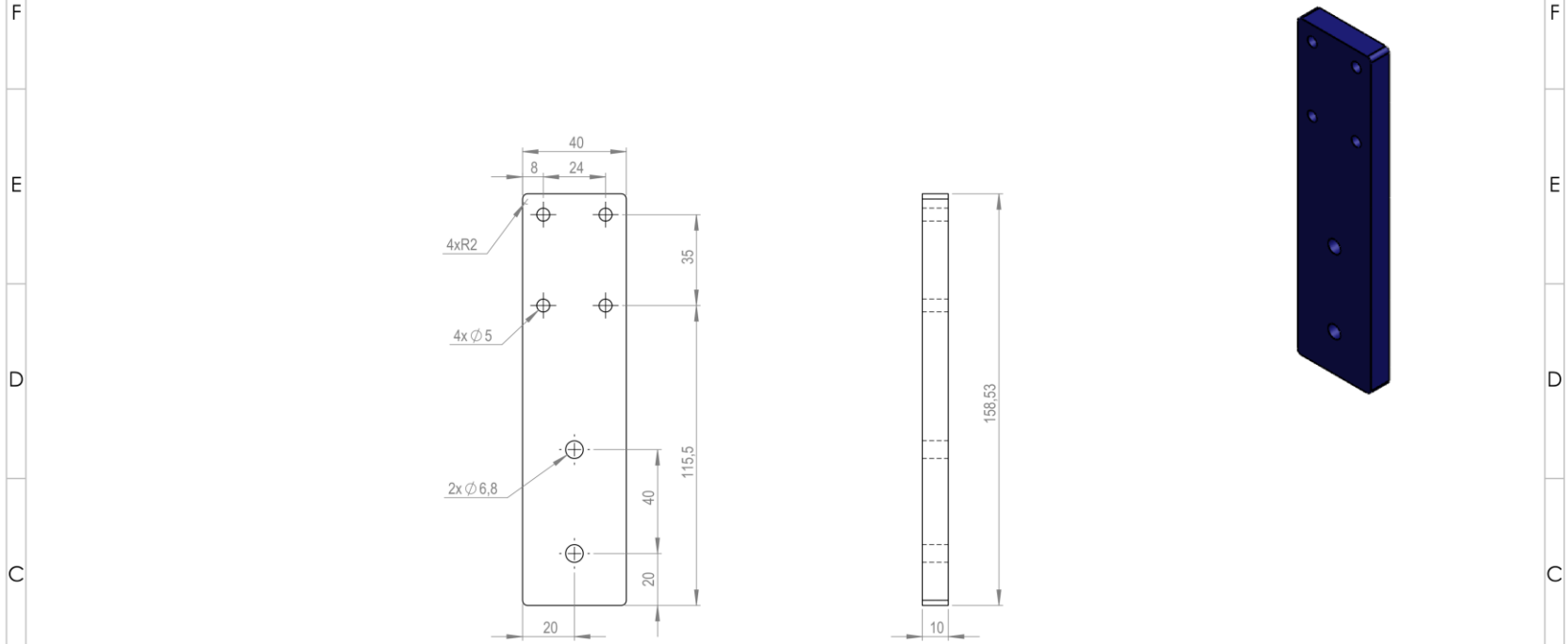




Nota: Este plano incluye únicamente las medidas modificadas respecto al repositorio base.

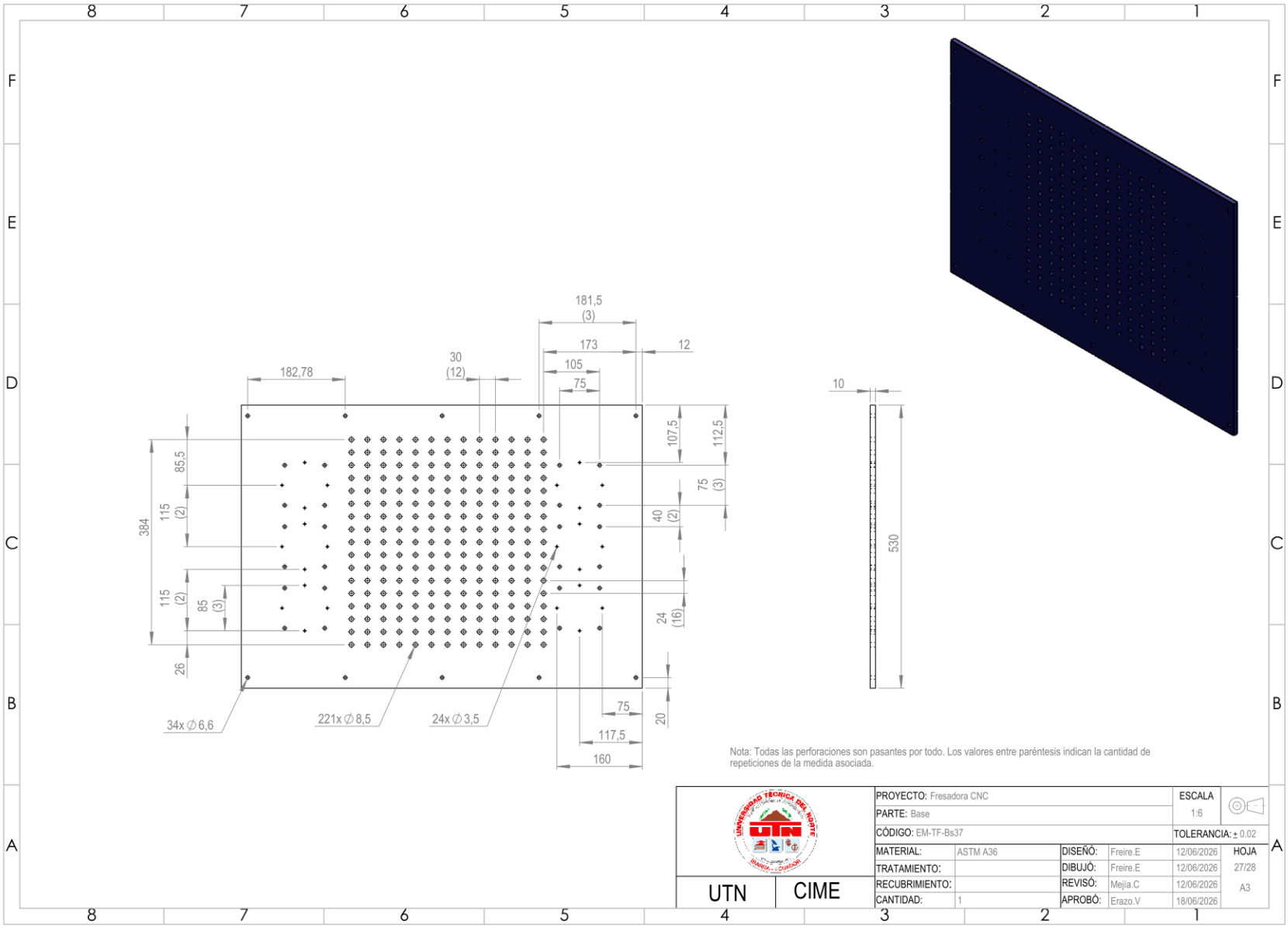
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC / Sistema de cambio de herramientas ATC			ESCALA 1:1	
	PARTE: OpenATC-Body-top-cover				
	CÓDIGO: EM-TF-E-ATC-Bt6			TOLERANCIA: ± 0.02	
	MATERIAL:	PET G	DISEÑÓ: Freire.E	12/06/2026	HOJA 24/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ: Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ: Mejía.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ: Erazo.V	18/06/2026	

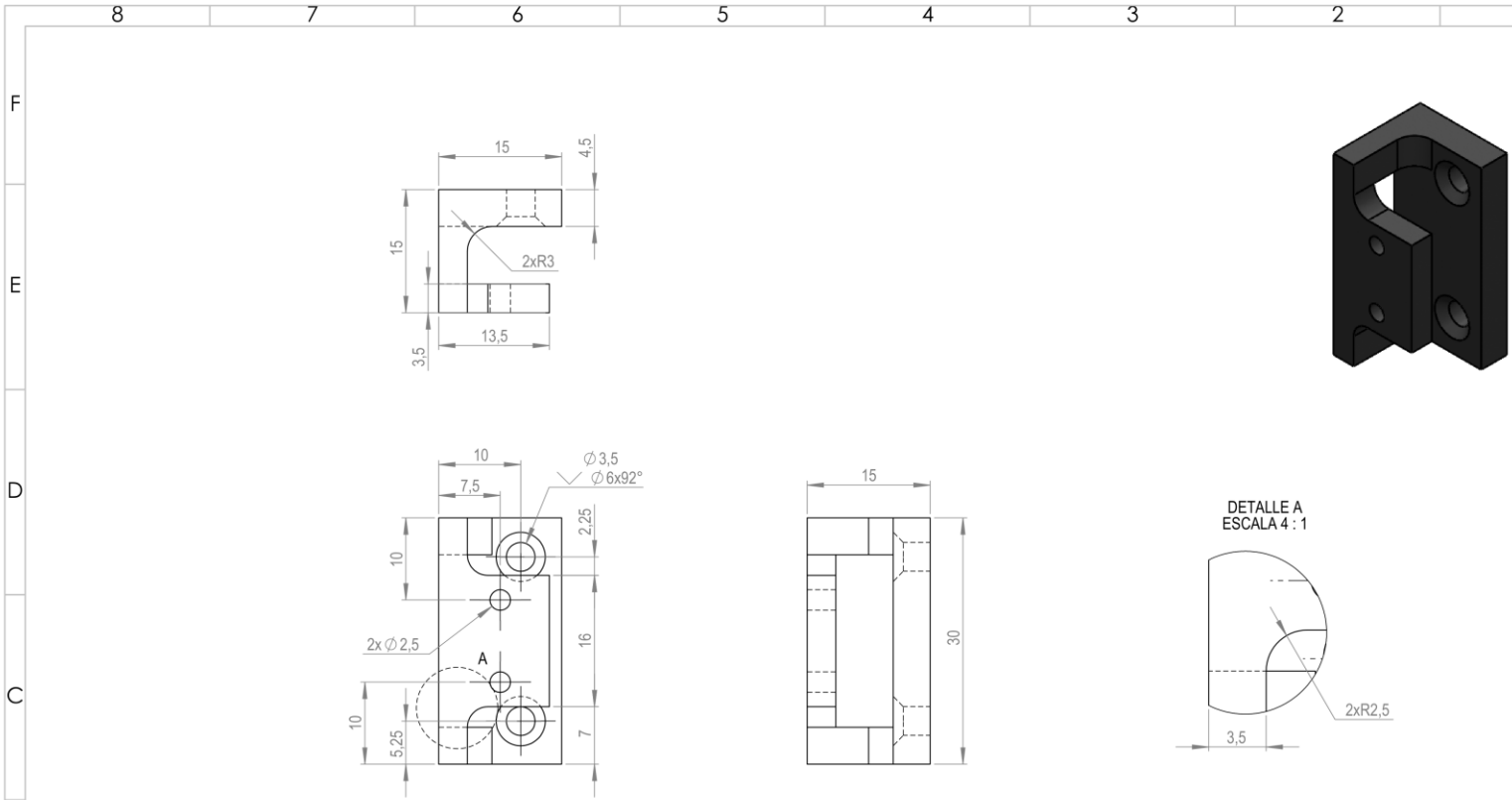

DETALLE A
ESCALA 2 : 1.5
∅22,6
↧Todo
∅27,1↧3
DETALLE B
ESCALA 2 : 1.5
4xR2
R4
DETALLE C
ESCALA 2 : 1.5
R12
DETALLE D
ESCALA 2 : 1.5
2xR4
103,92
40
20
31
16,42
15,5
B
D
A
C
40
15,5
31
4x∅3,4
↧Todo
2x∅6,8
↧Todo
98,53
90,51
103,03
35
4x∅5
8,03
158,53
10
PROYECTO: Fresadora CNC
PARTE: Pletina eje X
CÓDIGO: EM-TF-pEX7
ESCALA 1:1.3
TOLERANCIA: ± 0.02
MATERIAL: ASTM A36
TRATAMIENTO:
RECUBRIMIENTO:
CANTIDAD: 1
DISEÑÓ: Freire.E 12/06/2026
DIBUJÓ: Freire.E 12/06/2026
REVISÓ: Mejia.C 12/06/2026
APROBÓ: Erazo.V 18/06/2026
HOJA 25/28
A3
UTN
CIME



Nota: Todas las perforaciones son pasantes por todo.

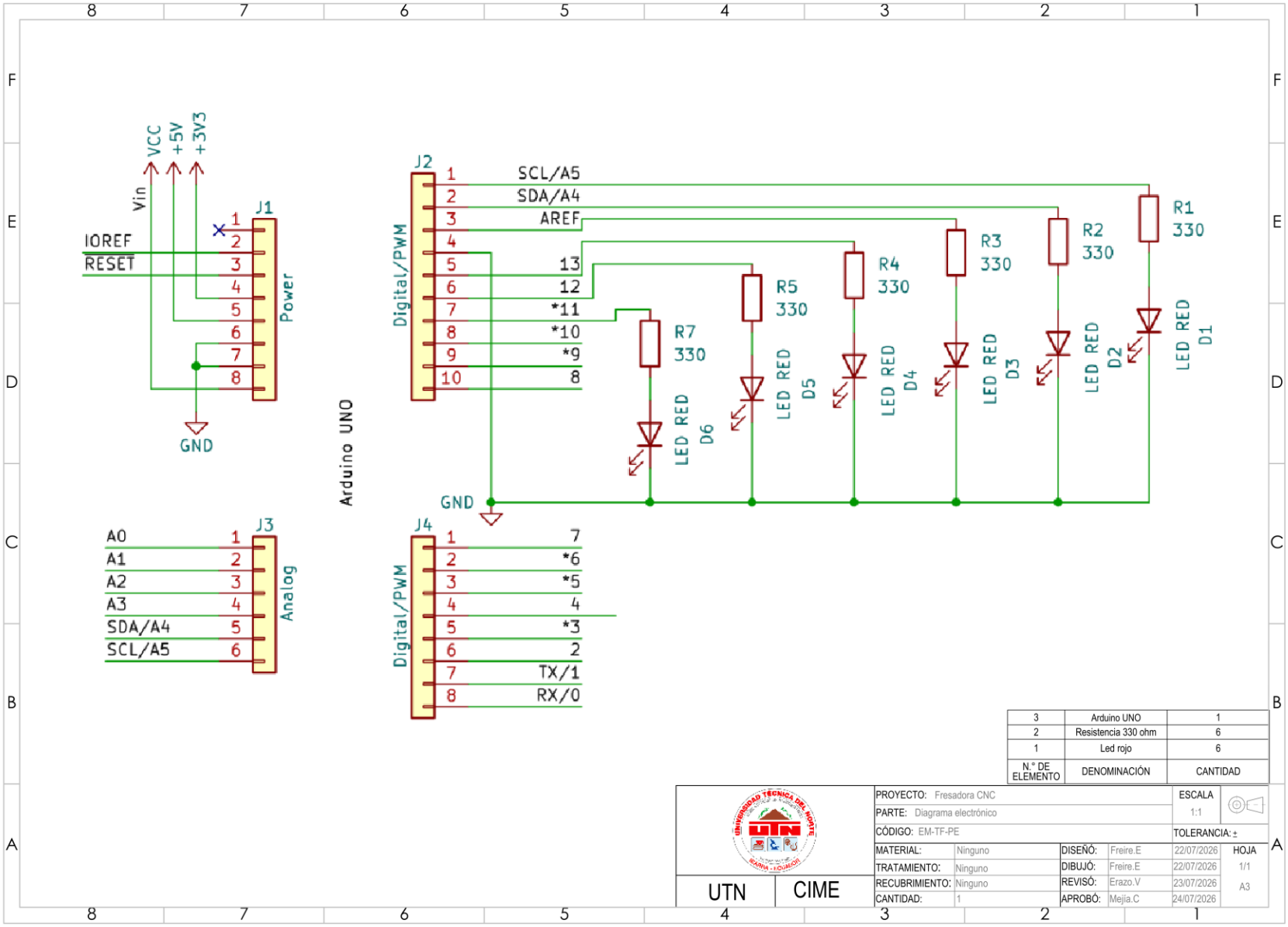
UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC				ESCALA 1:1.5	
	PARTE: Pletina eje X				TOLERANCIA: ± 0.02	
	CÓDIGO: EM-TF-pEX28					
	MATERIAL:	ASTM A36	DISEÑÓ:	Freire.E	12/06/2026	HOJA 26/28
	TRATAMIENTO:		DIBUJÓ:	Freire.E	12/06/2026	
	RECUBRIMIENTO:		REVISÓ:	Mejía.C	12/06/2026	A3
	CANTIDAD:	1	APROBÓ:	Erazo.V	18/06/2026	


181,5
(3)
173
12
30
(12)
105
182,78
75
107,5
112,5
85,5
75
(3)
384
115
(2)
40
(2)
115
(2)
85
(3)
24
(16)
26
34x ∅ 6,6
221x ∅ 8,5
24x ∅ 3,5
75
20
117,5
160
10
530
Nota: Todas las perforaciones son pasantes por todo. Los valores entre paréntesis indican la cantidad de repeticiones de la medida asociada.
UTN
CIME
PROYECTO: Fresadora CNC
PARTE: Base
CÓDIGO: EM-TF-Bs37
ESCALA 1:6
TOLERANCIA: ± 0.02
MATERIAL: ASTM A36
TRATAMIENTO:
RECUBRIMIENTO:
CANTIDAD: 1
DISEÑÓ: Freire.E 12/06/2026
DIBUJÓ: Freire.E 12/06/2026
REVISÓ: Mejia.C 12/06/2026
APROBÓ: Erazo.V 18/06/2026
HOJA 27/28
A3



Nota: Todas las perforaciones son pasantes por todo.

UTN CIME	PROYECTO: Fresadora CNC			ESCALA 2:1	
	PARTE: Soporte final de carrera (Y)				
	CÓDIGO: EM-TF-sFC3			TOLERANCIA: ± 0.02	
	MATERIAL: PET G	DISEÑÓ: Freire.E	12/06/2026	HOJA	
	TRATAMIENTO:	DIBUJÓ: Freire.E	12/06/2026	28/28	
	RECUBRIMIENTO:	REVISÓ: Mejía.C	12/06/2026	A3	
	CANTIDAD: 2	APROBÓ: Erazo.V	18/06/2026		



N.° DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
3	Arduino UNO	1
2	Resistencia 330 ohm	6
1	Led rojo	6

UTN	CIME	PROYECTO: Fresadora CNC			ESCALA 1:1
		PARTE: Diagrama electrónico			TOLERANCIA: ±
		CÓDIGO: EM-TF-PE			
		MATERIAL: Ninguno	DISEÑÓ: Freire.E	22/07/2026	HOJA 1/1
		TRATAMIENTO: Ninguno	DIBUJÓ: Freire.E	22/07/2026	
		RECUBRIMIENTO: Ninguno	REVISÓ: Erazo.V	23/07/2026	A3
		CANTIDAD: 1	APROBÓ: Mejia.C	24/07/2026	

Tabla de proveedores consultados

Proveedor	Ubicación	Productos consultados	Información obtenida
Perfiles CNC	Cuenca	Perfiles V-slot 40×40, perfiles T-slot 40×80, rieles MGN12, rodamientos lineales MGN12C y MGN12H, acoples tipo araña, kits de spindle de 500 W y 800 W, motores NEMA 17, husillos SFU1204 y soportes BK/BF10.	Se obtuvieron precios referenciales para perfiles, rieles, rodamientos, acoples, kits de spindle, motores y costo de envío. También se confirmó la disponibilidad de husillos SFU1204 en catálogo.
Robotics Ecuador	Quito	Kit de spindle de 500 W, spindle de 750 W, spindle bajo pedido, motores NEMA 17 1,5 A, acoples tipo araña y envío.	Se consultaron precios promocionales y bajo pedido, así como disponibilidad local e importación.
Novatronic	Ambato	Spindle de 500 W refrigerado por aire.	Disponible sin fuente de poder ni accesorios de kit. No disponen de spindle de 750 W bajo pedido al momento de la consulta.
Pro Electronics	Quito	Motores NEMA 17, filamento PLA negro, filamento PETG negro y costos de envío.	No disponen de spindle ni acoples tipo araña. Se consultaron precios de filamentos y opciones de envío.
Mundo del Ruliman	Quito y Guayaquil	Kit de husillo de bolas SFU1204 de 750 mm con BK10 y BF10, rodamientos lineales MGN12C y MGN12H, y riel MGN12 de 1 m.	Se obtuvieron precios referenciales para componentes lineales y de transmisión.
DIPAC	Quito	Lámina ASTM A36 de 10 mm de espesor.	Se confirmó disponibilidad en catálogo; el precio no fue cotizado directamente durante la consulta.
3D Tronix	Quito	Filamento PLA negro de 1 kg.	Se identificaron precios referenciales de USD 22,00 para “inversionista” y USD 20,00 para “cliente”.
Megatrónica	Quito	Filamento PETG negro de 1 kg.	Precio referencial de USD 19,80; el costo de envío no fue determinado.

Precios referenciales consultados

Perfiles estructurales de aluminio

Componente	Especificación	Precio referencial	Proveedor
Perfil V-slot	40×40 mm, hasta 3 m	USD 28,68/m	Perfiles CNC (Cuenca)
Perfil T-slot	40×80 mm, hasta 3 m	USD 51,84/m	
Perfiles requeridos	Longitudes de 750 mm (40x40) y 624 mm (40x80)	Costo calculable según longitud	

Guías lineales y rodamientos

Componente	Especificación	Precio referencial	Proveedor
Riel lineal MGN12	0,7 m	USD 25,41	Perfiles CNC (Cuenca)
	0,5 m	USD 18,15	
	0,2 m	USD 7,26	
	1 m	USD 62,00	Mundo del Ruliman (Quito y Guayaquil)
Rodamiento lineal	MGN12C	USD 14,29	Perfiles CNC (Cuenca)
		USD 30,00	Mundo del Ruliman (Quito y Guayaquil)
	MGN12H largo	USD 16,07	Perfiles CNC (Cuenca)
		USD 22,50	Mundo del Ruliman (Quito y Guayaquil)

Sistema de transmisión

Componente	Especificación	Precio referencial	Proveedor
Kit husillo de bolas	SFU1204 de 750 mm con BK10 y BF10	USD 175,00	Mundo del Ruliman (Quito y Guayaquil)
Husillos requeridos	SFU1204 de 500 mm, 200 mm y 600 mm	Precio pendiente de cotización	Perfiles CNC (Cuenca)
Acople flexible tipo araña	5 a 8 mm, D25L30	USD 8,93	
	5 a 8 mm	USD 10,00	Robotics Ecuador (Quito)

Motores y actuadores

Componente	Especificación	Precio referencial	Proveedor
Motor paso a paso	NEMA 17, 0,4 N·m, 12–24 V	USD 14,73	Perfiles CNC (Cuenca)
	NEMA 17, 1,5 A, 42HD6021, 0,5 N·m + cable	USD 19,75	Robotics Ecuador (Quito)
	NEMA 17	USD 20,00	Pro Electronics (Quito)

Sistema de corte (spindle)

Componente	Especificación	Precio referencial	Proveedor
Kit spindle	800 W, 24 000 rpm, refrigerado por aire, con accesorios	USD 388,39	Perfiles CNC (Cuenca)
	500 W, refrigerado por aire, con accesorios	USD 200,00	
	500 W en promoción, con fuente, soporte, cable y puntas	USD 150,00	Robotics Ecuador (Quito)
Solo spindle	500 W bajo pedido	USD 500,00	Robotics Ecuador (Quito)
	750 W disponible en Ecuador	USD 160–180	
	750 W por importación	USD 600,00	
	500 W refrigerado por aire, sin fuente ni accesorios	USD 123,20	Novatronic (Ambato)

Electrónica de control

Componente	Especificación	Precio referencial	Proveedor
ESP32	Módulo de control	USD 20,00	Mundo Electrónico (Ibarra)

Materiales estructurales

Componente	Especificación	Precio referencial	Proveedor
Lámina de acero ASTM A36	Espesor 10 mm	Precio pendiente de cotización	DIPAC (Ibarra)

Tornillería y elementos de fijación

Elemento	Detalle	Observación
Tornillos métricos	M3, M5 y M6	Se consideran necesarios para el ensamblaje de perfiles, soportes y componentes mecánicos.
Tuercas y arandelas	Compatibles con la tornillería M3, M5 y M6	No se realizó consulta específica de precios.
Tornillería adicional	Según requerimientos de montaje	Se debe definir en función del diseño final de la estructura.

Material para impresión 3D

Componente	Especificación	Precio referencial	Proveedor
Filamento PLA negro	1 kg, precio inversionista	USD 22,00	3D Tronix (Quito)
	1 kg, precio cliente	USD 20,00	
	1 kg	USD 20,00	Pro Electronics (Quito)
Filamento PETG negro	1 kg	USD 19,80	Megatrónica (Quito)
	1 kg	USD 20,00	Pro Electronics (Quito)
Requerimiento estimado	1 kg de filamento	Suficiente para varias piezas	La masa estimada por pieza es de 274,02 g.

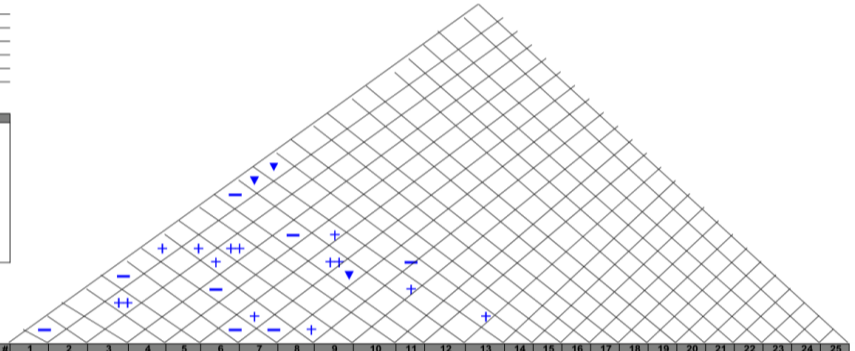
Costos de envío consultados

Proveedor	Modalidad	Costo referencial
Perfiles CNC	Transporte provincia a provincia	USD 10,00
Robotics Ecuador	Envío consultado	USD 6,90
Pro Electronics	Servientrega	USD 5,95
	Cooperativa	USD 5,00

Anexo H. Matriz QFD

Title:
Author:
Date:
Notes:

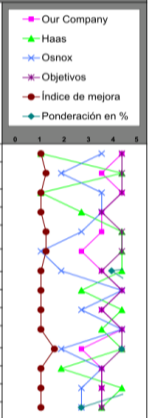
Legend		
⊙	Strong Relationship	9
O	Moderate Relationship	3
▲	Weak Relationship	1
++	Strong Positive Correlation	
+	Positive Correlation	
−	Negative Correlation	
▼	Strong Negative Correlatior	
▼	Objective Is To Minimize	
▲	Objective Is To Maximize	
x	Objective Is To Hit Target	



Column #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)	▼	▲			▲	▲	▼	▼		▲															

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats") \ Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Precio total (USD)	Nivel de confiabilidad (%/des)	% componentes con documentación abierta	Tiempo promedio de reparación (min/h)	Precisión en la visualización (número de decimales) exacto	Herramientas almacenadas (unidades)	Vibración máxima (mm o micras)	Dimensiones (largo x ancho x alto)	% Cumplimiento de normas	Controladores compatibles (unidades)	Caudal de corte (m3)	Número de piezas (unidades)	Tolerancia (mm)	Modularidad (#componentes)
1	9	10,4	8,5	Bajo costo	⊙	O	▲	▲		⊙	O	O	▲	O	O	O		
2	9	8,5	7,0	Simular operaciones de un equipo real industrial	O	⊙	O		O	O			▲	▲			▲	
3	9	7,3	6,0	Hardware y software libre	▲	⊙	⊙		▲					O		▲		
4	9	6,1	5,0	Fácil mantenimiento	⊙			⊙		⊙	▲	⊙	▲		▲	O		
5	9	8,5	7,0	Mostrar coordenadas en el panel de control	O	O	▲		⊙								O	
6	9	7,9	6,5	Capacidad del cargador de herramientas	⊙	O		⊙		⊙	▲	O	▲		▲	▲	▲	▲
7	9	6,7	5,5	Bancada firme y estable	O			▲		▲	⊙	O			▲	O	▲	O
8	9	4,9	4,0	Escala de laboratorio	⊙			O		⊙	O	⊙			▲	▲		
9	9	9,8	8,0	Seguridad	▲	▲	▲	O		▲	▲	▲	⊙					▲
10	9	9,8	8,0	Compatibilidad con código G de diferentes controladores	⊙	⊙	⊙		▲					⊙				
11	9	3,7	3,0	Sistema de gestión de virutas	O			▲		▲	▲	O			⊙			
12	9	6,1	5,0	Facilidad de montaje			▲	O		O		▲				⊙		O
13	9	6,7	5,5	Precisión	▲	▲			O	▲	▲			▲			⊙	
14	9	3,7	3,0	Escalabilidad	O		▲			▲	▲	⊙			▲	▲	⊙	
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		

Competitive Analysis (0=Worst, 5=Best)	Our Company	Haas	Osnox	Objetivos	Índice de mejora	Factor de venta	Importancia	Ponderación	Ponderación en %
1	5	1	4	5	1,00	1,5	5	7,5	11,2
2	4	5	2	5	1,25	1,2	4	6	9,0
3	5	1	4	5	1	1,0	5	5	7,5
4	4	3	4	4	1	1	4	4	6,0
5	4	5	3	5	1	1,2	3	5	6,7
6	3	5	1	5	1,25	1,2	5	8	11,2
7	4	5	2	4	1	1	3	3	4,5
8	5	3	5	5	1	1,0	4	4	6,0
9	4	5	3	4	1	1,5	4	6	9,0
10	5	4	5	5	1	1,5	4	6	9,0
11	3	5	2	5	1,67	1	2	3,3	5,0
12	4	2	4	4	1	1	4,0	4,0	6,0
13	4	5	3	4	1	1,0	4,0	4,0	6,0
14	4	4	3	4	1	1	2	2	3,0
								66,83	



Target or Limit Value	1	3	5	6	10	2	9	4	11	7	13	8	12	13
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	7	6	8	3	8	2	7	6	9	8	6			
Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance	468,3	327,4	217,7	209,1	139,6	337,8	143,9	233,5	120,7	156,1	89,6	148,2	112,8	89,0
Relative Weight	16,8	11,7	7,8	7,5	5,0	12,1	5,2	8,4	4,3	5,6	3,2	5,3	4,0	3,2

Powered by QFD Online (http://www.QFDOnline.com)