

UNIVERSIDAD EAFIT
Escuela de Ingeniería
IM0240 – Diseño de Máquinas I

Diseño Conceptual - Ruteadora CNC

Alejandro Arango Giraldo

2022-2

Resumen

El presente documento introduce el proceso de diseño conceptual de una ruteadora CNC de 2 grados de libertad para materiales blandos, capaz de cortar 1mm de profundidad de una lámina de madera. El proceso de diseño comienza con la indagación sobre el estado del arte de esta tecnología y sus modelos en el mercado. Esto permite tener una mejor comprensión sobre el funcionamiento de la máquina y establecer los objetivos del proyecto y demás componentes del brief.

Los objetivos facilitan el establecimiento de las especificaciones básicas de diseño, las cuales, a su vez, proveen las condiciones para realizar la síntesis de número. La síntesis de número da como resultado todas las cadenas cinemáticas que satisfacen el problema topológico. De este conjunto de cadenas cinemáticas se exploran múltiples isómeros. Tras seleccionar algunos de los isómeros, a estos se les realiza la inversión cinemática con el fin de obtener mecanismos basados inicialmente en pares de revolución. Estos mecanismos son explorados a más detalle empleando leyes de equivalencia cinemática para identificar conceptos que sean aptos para el problema en cuestión.

Una vez obtenido el concepto final, se desarrolla la caja negra y la estructura funcional, posibilitando la constitución de los requerimientos técnicos para la construcción del router. Estos requerimientos condicionarán el diseño de detalle de la propuesta, la cual, por medio de un boceto preliminar, será expuesta como primer acercamiento a la siguiente etapa del proyecto, la modelación y creación de planos. Por último, se hará una breve exploración de los cálculos tentativos para el diseño propuesto.

Keywords: Síntesis de número, Síntesis topológica, Diseño conceptual de mecanismos, router CNC.

Índice

1. Introducción	8
2. Estado del Arte	9
2.1. Breve historia de la tecnología CNC	9
2.2. ¿Qué es y cómo está compuesta una máquina CNC?	11
2.3. ¿Cómo funciona una máquina CNC?	12
2.3.1. Control del movimiento	12
2.3.2. Accesorios programables	13
2.3.3. Programa CNC	13
2.3.4. Controlador CNC	15
2.3.5. Sistema DNC	16
2.4. Clasificación de máquinas CNC	16
2.4.1. Clasificación por funciones	16
2.4.2. Clasificación por movimiento	20
2.4.3. Clasificación por lazo de control	21
2.5. Oportunidades laborales que ofrece la tecnología CNC	22
2.6. Router CNC	22
2.6.1. ¿Qué es?	22
2.6.2. ¿Qué materiales puede cortar?	22
2.6.3. ¿Cómo funciona?	24
2.6.4. ¿Cuáles son sus componentes?	25
2.7. Modelos de ruteadoras CNC en el mercado	28
2.7.1. Router de madera CNC 1325 de nivel básico	28
2.7.2. Router CNC 2040 ATC con rodillo de prensa	29
2.7.3. Cortadora oscilante 2050	31
2.8. Conclusiones	32
3. Brief	33
3.1. Antecedentes	33
3.2. Justificación	34
3.3. Objetivo general	35
3.4. Objetivos específicos	35
3.5. Definición del cliente	37
3.6. Necesidades del cliente	38
3.7. Cronograma general	40
3.8. Cronograma por etapas	40
3.9. Cronograma por semanas	40
4. Arquitectura del diseño	41
4.1. Especificaciones básicas de diseño	41
4.2. Síntesis de número	43
4.2.1. Síntesis de número para mecanismo 5 barras, 2 GdL	44
4.2.2. Síntesis de número para mecanismo 7 barras, 2 GdL	47

4.2.3. Síntesis de número para mecanismo 9 barras, 2 GdL	53
4.3. Selección del mecanismo para la propuesta	61
5. Diseño conceptual	64
5.1. Caja negra	64
5.2. Estructura funcional	65
5.3. Requerimientos técnicos	66
6. Propuesta de diseño	74
7. Cálculos tentativos	75
7.1. Análisis cinemático	75
7.2. Análisis estático	76
7.3. Análisis de falla	76
7.4. Cálculos adicionales	76

Índice de figuras

1. Router CNC para madera	8
2. Primera cadena de montaje y las máquinas manuales popularmente empleadas	9
(a). Cadena de montaje Ford	9
(b). Torno Manual	9
(c). Fresadora Manual	9
3. Primera máquina NC. Construida por John T. Parsons en colaboración con el MIT .	10
4. Una de las primeras máquinas CNC construidas	10
5. Máquinas CNC modernas	11
(a). Torno moderno	11
(b). Fresadora moderna	11
6. Funcionamiento general de una máquina CNC	12
7. Estructura del código G de una máquina CNC	14
8. Placa controladora CNC Mach3	16
9. Torno CNC	17
(a). Función del torno	17
(b). Modelo de torno CNC	17
10. Fresadora CNC	17
(a). Función de la fresadora	17
(b). Modelo de fresadora CNC	17
11. Router CNC	18
(a). Función del router	18
(b). Modelo de router CNC	18
12. Cortadora de plasma CNC	18
(a). Función de la cortadora de plasma	18
(b). Modelo de cortadora de plasma CNC	18
13. Impresora 3D	19
(a). Función de la impresora 3D	19

(b). Modelo de impresora 3D	19
14. Electroerosionadora CNC	20
(a). Función de la electroerosionadora	20
(b). Modelo de electroerosionadora CNC	20
15. Control de movimiento punto a punto	20
16. Control de movimiento paraxial	21
17. Control de movimiento interpolar o continuo	21
18. Materiales blandos que puede cortar el router CNC	23
(a). Madera	23
(b). MDF	23
(c). PVC	23
19. Metales que puede cortar el router CNC	23
(a). Cobre	23
(b). Latón	23
(c). Níquel	23
20. Sistema de accionamiento de un router CNC	25
21. Servomotor	26
22. Motor paso a paso	27
23. Brocas o fresas	28
24. Router CNC 1325 de 3 ejes ELECNC	29
25. Router CNC ATC2040-4A	30
26. Router CNC ELECNC2050ATC	32
27. Espacio de trabajo y posibles clientes en la industria	38
(a). Planta de mecanizado	38
(b). Técnico en mecanizado o ingeniero	38
(c). Trabajador de planta	38
28. (a) único isómero, (b) única inversión cinemática, y (c), (d) únicos mecanismos de la cadena cinemática (5,5,0,0)	46
(a).	46
(b).	46
(c).	46
(d).	46
29. Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 5, 0, 0)	47
(a).	47
(b).	47
(c).	47
(d).	47
30. Isómeros de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0)	49
(a).	49
(b).	49
(c).	49
31. Isómeros de la cadena cinemática (6, 6, 1, 1, 0, 0)	49
(a).	49
(b).	49

(c).	49
(d).	49
32. Isómeros de la cadena cinemática (6, 8, 0, 0, 1, 0)	50
(a).	50
(b).	50
33. Isómeros de la cadena cinemática (7, 4, 0, 2, 0, 0)	50
(a).	50
(b).	50
34. Isómero de la cadena cinemática (7, 5, 0, 0, 0, 1)	50
35. Mecanismos resultantes de las inversiones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0)	52
(a).	52
(b).	52
(c).	52
36. Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0)	52
(a).	52
(b).	52
(c).	52
37. Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0)	53
(a).	53
(b).	53
(c).	53
38. Mecanismo resultante de la transformación cinemática de la cadena cinemática (6, 6, 1, 1, 0, 0)	53
39. Isómeros de la cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0)	56
(a).	56
(b).	56
(c).	56
(d).	56
(e).	56
(f).	56
40. Isómeros de la cadena cinemática (6, 9, 3, 1, 0, 0, 0, 0)	56
(a).	56
(b).	56
(c).	56
41. Isómeros de la cadena cinemática (6, 11, 2, 0, 1, 0, 0, 0)	57
(a).	57
(b).	57
42. Isómeros de la cadena cinemática (7, 7, 2, 2, 0, 0, 0, 0)	57
(a).	57
(b).	57
(c).	57
(d).	57

43. Isómero de la cadena cinemática (7, 8, 2, 0, 0, 1, 0, 0)	57
44. Isómeros de la cadena cinemática (7, 9, 1, 1, 1, 0, 0, 0)	58
(a).	58
(b).	58
45. Isómero de la cadena cinemática (7, 11, 0, 0, 2, 0, 0, 0)	58
46. Isómeros de la cadena cinemática (8, 5, 1, 3, 0, 0, 0, 0)	58
(a).	58
(b).	58
47. Isómero de la cadena cinemática (8, 8, 0, 0, 1, 1, 0, 0)	59
48. Mecanismos resultantes de las inversiones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0)	60
(a).	60
(b).	60
49. Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0)	60
(a).	60
(b).	60
50. Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de las cadenas cinemáticas	
(a) (6, 9, 3, 1, 0, 0, 0, 0), (b) (7, 7, 2, 2, 0, 0, 0, 0), (c) (7, 9, 1, 1, 1, 0, 0, 0), y (d) (7, 11, 0, 0, 2, 0, 0, 0)	61
(a).	61
(b).	61
(c).	61
(d).	61
51. Mecanismos finalistas en el proceso de filtrado	61
(a).	61
(b).	61
(c).	61
(d).	61
(e).	61
(f).	61
(g).	61
(h).	61
(i).	61
52. Enumeración de los pares para la matriz de adyacencia	63
53. Caja negra	64
54. Estructura funcional de la ruteadora CNC propuesta	66
55. Propuesta para ruteadora con mecanismo 9 barras, 2 GdL, de cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0)	
(a). Vista isométrica	74
(b). Vista de planta	74

Índice de tablas

1. Códigos G y M para torno CNC	15
---	----

2.	Oportunidades laborales generadas por la tecnología CNC	22
3.	Especificaciones del Router CNC 1325 de 3 ejes ELECNC	29
4.	Especificaciones del Router CNC ATC2040-4A	30
5.	Especificaciones del Router CNC ELECNC2050ATC	31
6.	Fechas de entrega	40
7.	Etapas del proyecto	40
8.	Cronograma por semanas	40
9.	Cadenas cinemáticas para mecanismos 5 barras, 2 GdL	45
10.	Cadenas cinemáticas para mecanismos 7 barras, 2 GDL	48
11.	Matriz de PUGH para isómeros de 7 barras, 2 GdL	51
12.	Criterios de evaluación de matriz de PUGH	51
13.	Cadenas cinemáticas para mecanismos 9 barras, 2 GdL	54
14.	Matriz de PUGH para isómeros de 9 barras, 2 GdL	59
15.	Matriz de PUGH para mecanismos seleccionados	62
16.	Criterios de evaluación de matriz de PUGH	62
17.	Matriz de adyacencia del mecanismo 51h	63
18.	Lista de portadores de función. El flujo e.e es abreviación para energía eléctrica , mientras e.m.r y e.m.l es para energía mecánica rotacional y energía mecánica lineal	65
19.	Requerimientos técnicos para la ruteadora CNC basados en el concepto de la fig. 9. Se emplean las siguientes abreviaciones: C.P - Característica de Producto, C.F - Característica Funcional, L.C - Límite de característica. Nota: al inicio de cada elemento se especifica en la columna de clasificación a que clasificación pertenece cada métrica de ese punto en adelante. En algunos casos, hay dos clasificaciones por elemento. En estos casos, una vez haya una métrica con diferente clasificación, se usará la abreviación para indicar la nueva clasificación a la que pertenecen todas las métricas de ese punto en adelante.	66

1. Introducción

La tecnología CNC o de control numérico por computadora es una tecnología de vanguardia ampliamente utilizada en diversas industrias para el mecanizado de piezas. Estos sistemas máquina/computador, también llamados CAD/CAM, permiten el control de la posición y velocidad de movimiento de un elemento montado en el mecanismo.

Con base en lo explicado por la página mundocompresor.com [1], se puede decir que, por medio del desplazamiento en los ejes X, Y, y Z, y el control por computador, la herramienta de corte puede describir un recorrido que facilite taladrar, cortar, roscar, fresar, o desbastar una pieza en todos sus planos de forma totalmente automática.

Para este caso, se adentrará en el proceso de diseño de una ruteadora CNC por medio del desarrollo de diferentes etapas, parte del diseño conceptual. Estas facilitarán la concepción de una propuesta viable, que cumpla con los requerimientos especificados, y dé solución al problema tratado.



Figura 1: Router CNC para madera

2. Estado del Arte

2.1. Breve historia de la tecnología CNC

A comienzos del siglo XX, como consecuencia de la revolución tecnológica, el empleo masivo de maquinaria impulsada por energía motriz obtuvo incluso más relevancia de la que tuvo en la primera revolución industrial. Las empresas comenzaron a adaptar con más vigor esta tecnología, buscando el paulatino aumento de su eficiencia de tal forma que pudiesen reemplazar completamente sus métodos tradicionales.

Tomando en consideración lo propuesto por Castro en su estado del arte sobre la tecnología CNC [2], y complementándolo con la información obtenida en el dominio demaquinasyherramientas.com [3], se puede realizar un sondeo general de la historia de esta tecnología como se da a continuación.

En un principio, la creciente demanda del mercado y los procesos de globalización presentaron a la industria con el reto de producir más, con mayor calidad, pero con un tiempo y costos reducidos. La enorme mano de obra requerida en las tareas industriales implicaba no solo grandes dotaciones de obreros, también afectaba la calidad, precisión y repetibilidad del proceso, aumentaba los costos, y daba cabida a errores humanos que disminuían la producción.

En consecuencia, los avances tecnológicos cobraron impulso hacia la automatización, potenciando así el diseño de máquinas capaces de reproducir las tareas manuales de un operario de manera automática, únicamente requiriendo la programación de su movimiento.

En 1908, Henry Ford, en su misión de fabricar el automóvil modelo Ford T, popularizó la cadena de montaje o producción en serie, revolucionando así la industria. Esta innovación trajo consigo la optimización de las máquinas empleadas en la línea de manufactura, pasando de ser herramientas lentas, robustas, poco ágiles y limitadas estructuralmente a mecanizar piezas grandes y pesadas, a ser máquinas ágiles, rápidas y preparadas para trabajar con piezas medianas y pequeñas de poco peso.

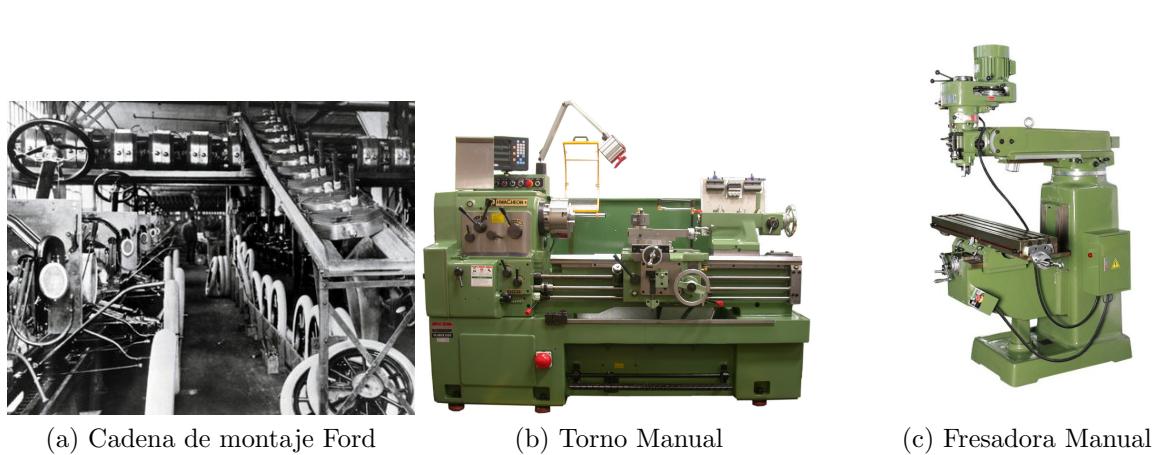


Figura 2: Primera cadena de montaje y las máquinas manuales popularmente empleadas

En 1953, John T. Parsons, con el apoyo del MIT en Estados Unidos, introdujeron el concepto de control numérico (CN) con la creación de un mando automático para una fresadora que, empleando tecnología de válvulas de vacío y tarjetas perforadas, manipulaba simultáneamente el movimiento de dos ejes.

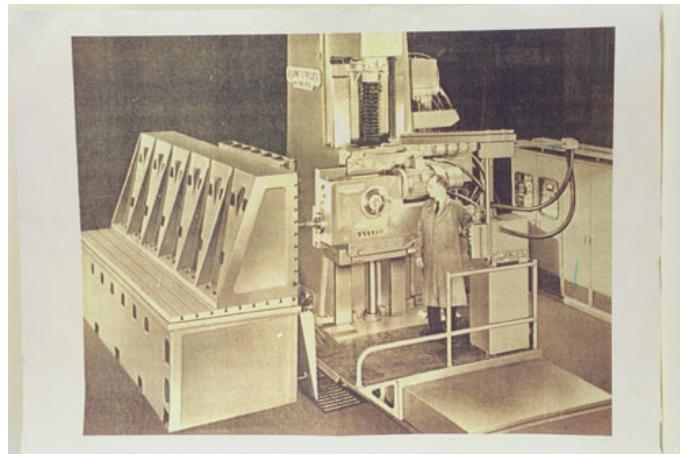


Figura 3: Primera máquina NC. Construida por John T. Parsons en colaboración con el MIT

Para la década de los 60, las válvulas de vacío eran reemplazadas por transistores y, para los años '70, con la aparición de los computadores, finalmente se sentó las bases definitivas para la tecnología de control numérico computarizado (CNC). Posteriormente, los microprocesadores añadieron ayudas avanzadas para la programación e interfaces gráficas para la visualización de la trayectoria de la herramienta. Adicionalmente, esta tecnología revolucionaria permitió incorporar subprogramas y ciclos fijos, así como comunicaciones e integración en redes.

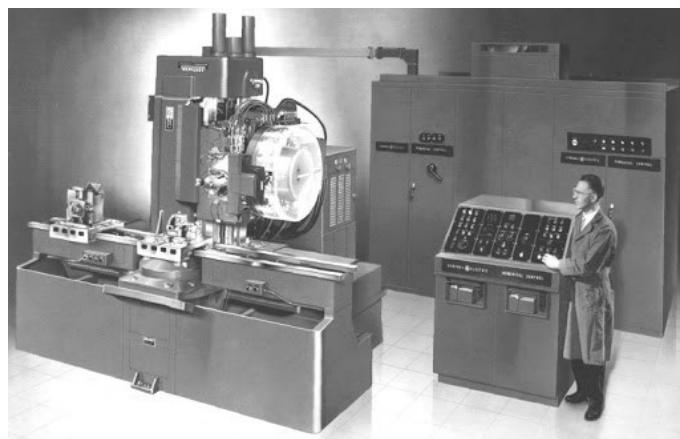


Figura 4: Una de las primeras máquinas CNC construidas

A comienzos de los '90 se introdujo la tecnología de control numérico abierto, posibilitando la personalización e incorporación de conocimientos propios, programación gráfica interactiva, comunicación digital con los accionamientos, y demás adiciones que convierten a las CNC de hoy día en herramientas indispensables para los procesos de manufactura.



(a) Torno moderno



(b) Fresadora moderna

Figura 5: Máquinas CNC modernas

2.2. ¿Qué es y cómo está compuesta una máquina CNC?

Inspirado en el contenido de la página demaquinasyherramientas.com [3], podemos entrar en más detalle sobre la tecnología CNC. En esta y la siguiente sección sobre cómo funciona una máquina CNC, se utilizará esta información para describir estos aspectos.

Las máquinas CNC, como se ha mencionado anteriormente, consisten en el control y monitoreo de los movimientos de una máquina herramienta por medio de un computador. Entre este conjunto de máquinas podemos encontrar: fresadora, torno, rectificador, máquina de corte por láser, por chorro de agua o por electroerosión, estampadora, prensa, brazo robotizado, entre otros.

Los mecanismos empleados en la industria suelen, en su mayoría, disponer de un sofisticado sistema de retroalimentación que monitorea y ajusta constantemente la velocidad y posición de la herramienta de corte. Asimismo, el controlador CNC trabaja en conjunto con una serie de motores (servomotores y/o paso a paso) y componentes de accionamiento para desplazar los ejes de la máquina de manera controlada y lograr así el movimiento deseado.

En este orden de ideas, una máquina CNC consiste, en sus rasgos generales, de 6 elementos:

- Dispositivo de entrada.
- Unidad de control o controlador.
- Máquina herramienta.
- Sistema de accionamiento.
- Dispositivos de retroalimentación (solo en sistemas con servomotores).
- Monitor.

El trabajo coordinado de estos componentes es lo que permite que la CNC cumpla satisfactoriamente con las demandas del cliente y logre desempeñar su función perfectamente. El siguiente diagrama describe de manera global las etapas, componentes, flujos de entrada y salida, y la ruta de funcionamiento de una CNC.

La siguiente figura muestra un diagrama de bloques de una máquina CNC típica, provista de servomotores.^[3]

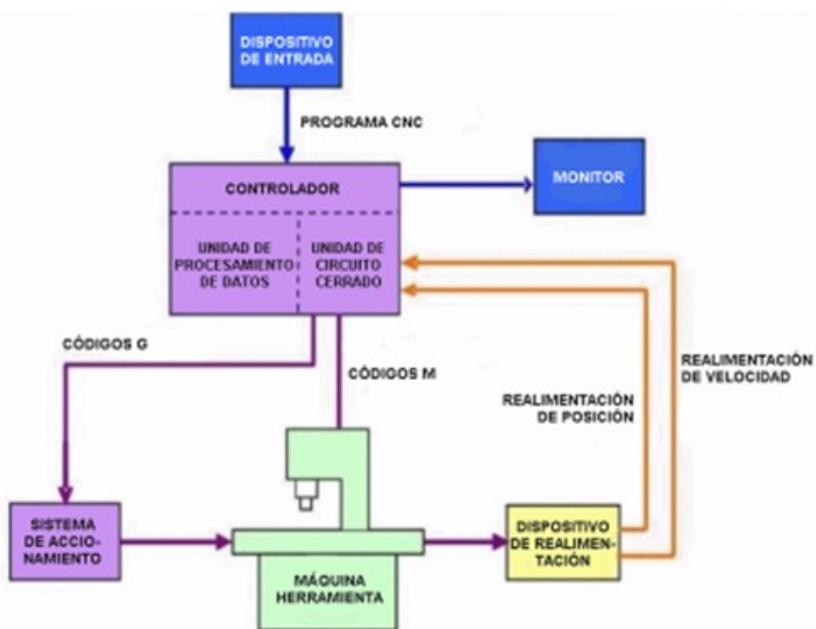


Figura 6: Funcionamiento general de una máquina CNC

2.3. ¿Cómo funciona una máquina CNC?

De la figura anterior se puede observar el flujo de información y energía como se distribuye por los diferentes componentes del sistema. Inicialmente, el computador traduce el diseño CAD a códigos G y M, los cuales fluyen hacia el controlador de la máquina para ser convertidos en señales eléctricas por medio de su software propio. Estas señales eléctricas se destinan a la activación de los motores que, a su vez, ponen en marcha el sistema de accionamiento y generan el movimiento del mecanismo.

Para comprender a mayor detalle el funcionamiento de esta maquinaria, se examinarán algunas de las funciones específicas que pueden programarse.

2.3.1. Control del movimiento

Todas las máquinas CNC presentan dos o más direcciones programables de movimiento llamadas ejes. Un eje de movimiento puede ser lineal (en línea recta) o rotatorio (en una trayectoria circular) y la complejidad del movimiento del mecanismo depende directamente de la cantidad de ejes presentes. Lógicamente, a mayor cantidad de ejes, mayor complejidad.

Los ejes son un requisito para generar los movimientos necesarios en el proceso de fabricación. A manera de ejemplo, un taladro industrial tiene tres ejes, dos de ellos ubicarían la herramienta sobre el orificio a mecanizar y el tercero sería el que efectuaría la operación. En términos de notación, los ejes se denominan con letras, siendo los ejes lineales X, Y, y Z, y los ejes giratorios A, B, y C, los más comúnmente utilizados.

Entrando más en materia, el control de movimiento puede realizarse mediante dos sistemas que pueden funcionar de manera individual o conjunta:

1. Valores absolutos (código G90):

Las coordenadas del punto de destino son referidas con respecto al origen coordenado. Para ello, se utiliza la medida del diámetro final (variable X) y la medida en dirección paralela al eje de giro del husillo (variable Z).

2. Valores incrementales (código G91):

Las coordenadas del punto de destino son referidas con respecto al punto actual. Para su cálculo se dispone de la distancia radial (variable U) y la medida en dirección paralela al eje de giro del husillo (variable W). sobre un eje.

2.3.2. Accesorios programables

Las máquinas CNC, adicional al control de movimiento, tienen un conjunto de accesorios y funciones programables que facilitan la adaptación del mecanismo a requerimientos y diseños variables. Por ejemplo, un centro de mecanizado contará mínimamente con las siguientes funciones específicas programables:

1. Cambiador automático de herramienta:

Para la producción de distintas piezas, las máquinas CNC facilitan el cambio de herramientas en el husillo para así efectuar el mecanizado correspondiente.

2. Velocidad y activación del husillo:

La velocidad y activación del husillo se pueden controlar de tal forma que este gire en sentido horario o antihorario y se detenga o active a placer.

3. Refrigerante:

La activación del refrigerante puede ser programada para operaciones de mecanizado que requieran lubricar y/o enfriar la pieza.

2.3.3. Programa CNC

Las instrucciones que ejecutará la máquina deben venir contenidas en un listado secuencial de órdenes en el programa CNC. Este programa está escrito en un lenguaje denominado G y M, estandarizado por las normas 6983 de ISO (Organización Internacional de Normalización) y RS274 de EIA (Alianza de Industrias Electrónicas). Se compone de instrucciones **Generales** (código G) y **Misceláneas** (código M), formateadas como bloques de frases encabezadas por la letra N.

Por una parte, el código G describe las funciones de movimiento de la máquina (por ejemplo, movimientos rápidos, avances, avances radiales, pausas, y ciclos), mientras que el código M describe

las funciones misceláneas que se requieren para el mecanizado de la pieza (arranque y detención del husillo, cambio de herramienta, refrigerante, detención del programa, etc.). Cada una de estas funciones se realiza secuencialmente y, como se muestra en la figura, vienen enumeradas, donde cada par de números representa un comando.

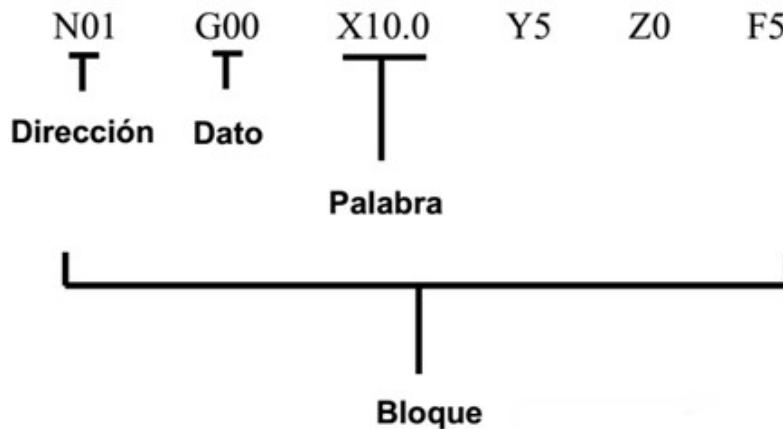


Figura 7: Estructura del código G de una máquina CNC

De igual forma, como se puede identificar en la imagen, cada código contiene variables (direcciones), identificadas con letras definidas por el programador para denotar una función específica. Como ejemplificación, F define la velocidad de avance, S la velocidad del husillo, T la herramienta seleccionada, X, Y y Z el movimiento de los ejes, I, J y K la localización del centro de un arco, entre muchos otros.

Cabe señalar que cada máquina emplea su propio programa CNC. Aunque estos sueles ser similares entre sí, a causa de las diferencias en sus mecanismos, ejes de movimiento, componentes y aplicaciones, sus códigos deben adaptarse a cada caso específico. Con la intención de ilustrar la estructura de estos códigos, la siguiente tabla expone los códigos G y M más usados para un torno.

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

Tabla 1: Códigos G y M para torno CNC

Con base a la tabla anterior, y a modo de ejemplo, un bloque como este:

N0040 G01 X25.000 Z32.000 F500

Indicaría lo siguiente:

- **Número del registro:** 0040.
- **Procedimiento:** G01, es decir, trasladarse al punto (X=25 mm, Z=32 mm) a través de una línea recta.
- **Avance:** 500 (mm/rev o mm/min, según se haya especificado previamente).

2.3.4. Controlador CNC

Una de las partes fundamentales de todo el sistema, el controlador se encarga de interpretar el programa CNC y convertirlo en una serie de comandos en forma de señales eléctricas. Estas son

enviadas secuencialmente a los componentes de accionamiento para generar el movimiento esperado.

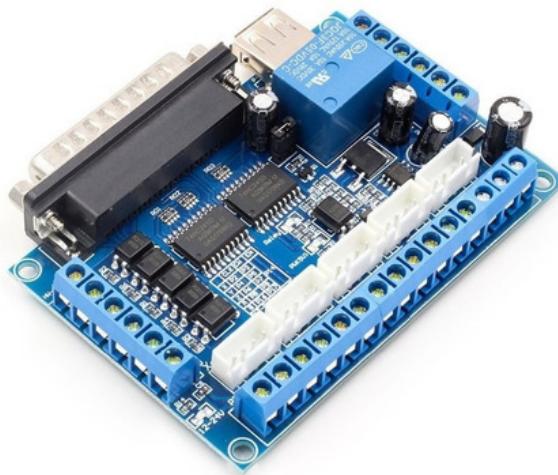


Figura 8: Placa controladora CNC Mach3

2.3.5. Sistema DNC

Una vez desarrollado el programa CNC (ya sea manualmente o con un programa CAM), este se carga en el controlador utilizando un sistema de distribución de control numérico (DNC). El sistema DNC consiste en la conexión en red entre una computadora y una o más máquinas CNC mediante Ethernet.

2.4. Clasificación de máquinas CNC

Para esta sección, tomamos diversas fuentes que nos permiten clasificar las máquinas CNC según diferentes características. Para la clasificación por funciones, nos basamos en conocimientos compartidos por las empresas Gemak [4] e Inoxform [5] en artículos redactados por estas. Para la clasificación por movimiento, tomamos de base la información brindada por Rolón [6] y el dominio: Autycom [7]. Finalmente, la clasificación por lazo de control se fundó en el reportaje hecho por Castaño [8]. Aclaradas las fuentes, se procede con la sección de clasificación.

Para dar inicio, es importante considerar que en la industria, en especial en los talleres de mecanizado, podemos encontrar diferentes tipos de máquinas CNC que dan cumplimiento a una o varias funciones, describiendo diferentes movimientos y empleando uno de dos sistemas de control. A continuación, se ahondará en cada una de estas clasificaciones para lograr una mayor comprensión de las opciones disponibles en el mercado.

2.4.1. Clasificación por funciones

1. Torno CNC:

Están diseñados para realizar cortes y perforaciones precisas y a gran velocidad. Suele estar equipado con doce portaherramientas y bombas de refrigeración para reducir el desgaste por uso.



(a) Función del torno



(b) Modelo de torno CNC

Figura 9: Torno CNC

2. Fresadora CNC:

Actúan por arranque de viruta o acepillado para realizar cortes precisos y de profundidad en piezas de tamaños y materiales variados (principalmente piezas metálicas). De igual forma, pueden desempeñar diferentes tareas de fresado como: tornejar, taladrar, roscar, y fresado frontal y de resalte.



(a) Función de la fresadora



(b) Modelo de fresadora CNC

Figura 10: Fresadora CNC

3. Ruteadora o router CNC:

Funciona por medio del arrastre o enrutamiento de material empleando una herramienta de

corte. Su gran velocidad y potencia le permiten trabajar con piezas de gran tamaño y volumen, además de diversos materiales aparte del metal, como el plástico, la madera, goma espuma, y más.



Figura 11: Router CNC

4. Cortadora de plasma CNC:

Funciona de una manera similar al router, no obstante, esta máquina no arrastra el material, sino que actúa por encima de este mediante el desplazamiento de plasma en un proceso de fundición.

Este mecanismo puede proporcionar acabados de mayor calidad a los del router CNC, pues ofrece una mayor precisión en el corte de la pieza y, adicionalmente, puede ser usado en materiales de alta densidad.



Figura 12: Cortadora de plasma CNC

5. Impresora 3D:

Una de las tecnologías más revolucionarias de los últimos años por su gran versatilidad y potencial en la creación de moldes o maquetas en un tiempo reducido. Estas tratan con pequeñas piezas de plástico mediante boquillas extrusoras, las cuales depositan el plástico fundido por capas para generar la pieza final.



(a) Función de la impresora 3D

(b) Modelo de impresora 3D

Figura 13: Impresora 3D

6. Erosionado con hilo o electroerosión (EDM):

Proceso de erosión térmica que permite la extracción de metal mediante descargas eléctricas recurrentes entre una herramienta de corte, que actúa como electrodo, y una pieza conductora, en presencia de un fluido dieléctrico.

El calor de la descarga vaporiza las partículas del material y del electrodo, las cuales son removidas posteriormente por el dieléctrico que fluye constantemente. La ausencia de contacto facilita la producción de piezas muy pequeñas, fáciles y de formas complejas, pues no se genera vibración ni fuerzas de corte.



(a) Función de la electroerosionadora



(b) Modelo de electroerosionadora CNC

Figura 14: Electroerosionadora CNC

2.4.2. Clasificación por movimiento

1. Control punto a punto:

El proceso de mecanizado se da exclusivamente entre los puntos iniciales y finales, por tanto, no existe control de la trayectoria entre un punto y otro. Este tipo de movimiento suele emplearse en taladradoras o punteadoras que no controlan trazado ni velocidad.

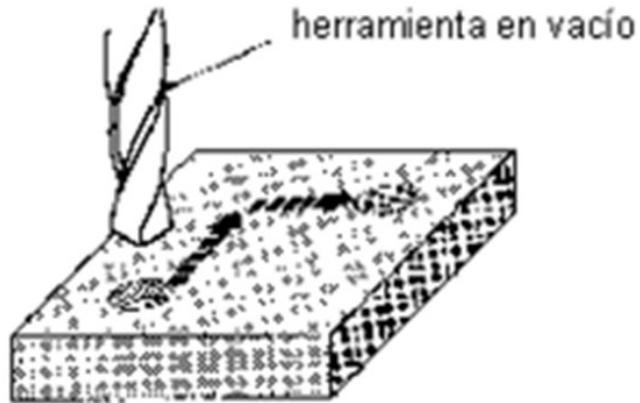


Figura 15: Control de movimiento punto a punto

2. Control paraxial:

A diferencia del punto a punto, en el paraxial se puede controlar de manera precisa tanto la posición del elemento que se desplaza (herramienta o pieza) como la trayectoria de su movimiento. Sin embargo, esta trayectoria está limitada a líneas rectas paralelas a los ejes de la máquina.



Figura 16: Control de movimiento paraxial

3. Control interpolar o continuo:

Pueden realizar mecanizados en trayectorias de cualquier tipo, teniendo control total sobre el movimiento de la herramienta. Por ello, se considera el método más popular dentro de la industria.



Figura 17: Control de movimiento interpolar o continuo

2.4.3. Clasificación por lazo de control

1. Lazo abierto:

La característica principal de este sistema de control es que la salida sensada del proceso no es comparada con la señal de referencia. En otras palabras, el lazo abierto nunca sabe como se comporta la variable a lo largo del proceso, por tanto, este solo interviene en el procedimiento por medio del conocimiento previo que se tiene del sistema.

2. Lazo cerrado:

Contrario al lazo abierto, el cerrado toma la salida del proceso y la compara con la señal de referencia para conocer en todo momento la evolución de la variable. En un sistema de lazo cerrado se colocan sensores y transmisores que realimentan el controlador para así comprobar el estado de la variable y realizar las correcciones pertinentes.

2.5. Oportunidades laborales que ofrece la tecnología CNC

El auge de la tecnología CNC y la comercialización masiva de estas máquinas ha abierto una gran variedad de oportunidades laborales. Aunque resulta irónico que una tecnología enfocada en la automatización de procesos industriales resultara generando más ocupaciones de las que eliminó. La obsolescencia de las tareas manuales era inevitable, sin embargo, la aparición de esta tecnología dio gran valor a capacidades técnicas e ingenieriles.

En este orden de ideas, la siguiente tabla obtenida de la página web demaquinasyherramientas.com [3], evidencia el gran rango de cargos relacionados con la tecnología CNC.

Industrias manufactureras	Empresas que comercializan máquinas CNC	Capacitación y difusión
<ul style="list-style-type: none"> • Ayudantes • Ajustadores de herramientas • Técnicos de puesta a punto de máquinas CNC • Operadores de máquinas CNC • Oficiales de mecanizado • Programadores CNC • Programadores CAD-CAM • Personal de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Personal para servicio técnico • Ingenieros de aplicaciones CNC • Instructores de CNC • Vendedores especializados • Asesores posventa 	<ul style="list-style-type: none"> • Instructores de CNC • Organizadores de cursos/seminarios • Organizadores de eventos

Tabla 2: Oportunidades laborales generadas por la tecnología CNC

2.6. Router CNC

Ya conocidos los aspectos generales de la tecnología CNC, es momento de profundizar en el objeto de estudio del proyecto, una ruteadora o router CNC. Para ello, se emplean los artículos escritos por el blog 330ohms [9] y la empresa SIDEKO [10].

2.6.1. ¿Qué es?

La ruteadora CNC es una herramienta popularmente utilizada para cortar o realizar grabados en materiales blandos como madera, acrílico, MDF o algunos metales como el aluminio, latón, bronce, entre otros. Sus aplicaciones varían desde la fabricación de muebles y tallado de maderas, hasta el perfilado de círculos y corte de materiales.

2.6.2. ¿Qué materiales puede cortar?

El router CNC es considerado una de las máquinas más versátiles para el corte en tres y dos dimensiones sobre cualquier tipo de superficie. Su sistema de accionamiento asistido por tecnología

CNC permite la materialización de diseños e ideas que anteriormente solo permanecían plasmadas en la imaginación o el papel.

La falta de capacidad y herramientas impedían la manufactura de piezas complejas, un problema que el router llegó para solucionar. Adicionalmente, como si fuera poco, esta herramienta ofrece una amplia gama de materiales en los cuales modelar.

Para materiales blandos, algunos ejemplos son: PVC espumado, MDF, triplay, acrílico, alucobond, dibond, madera sólida (blanda), aglomerados melamínicos, gatorfoam, poliuretano, Nylamid, etc.

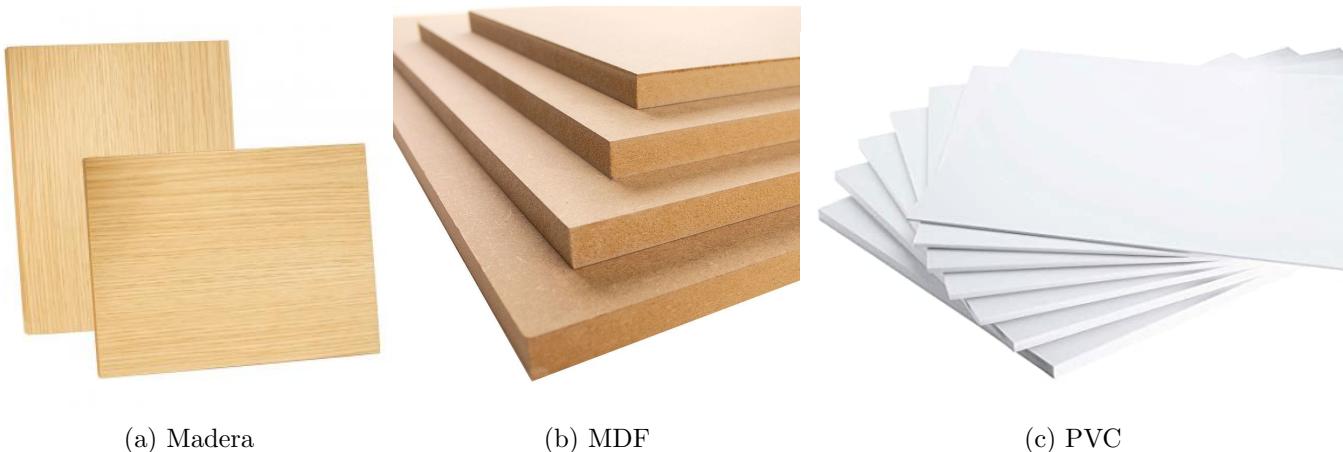


Figura 18: Materiales blandos que puede cortar el router CNC

Para el corte y grabado de metales no ferrosos, algunos serían: aluminio, cobre, latón, níquel, bronce, etc.



Figura 19: Metales que puede cortar el router CNC

La mayoría de los modelos de ruteadora CNC tienen una mesa de trabajo de 1.30 m x 2.50 m, con la posibilidad de desbastar, grabar y cortar profundidades de hasta 15 cm dependiendo del material.

2.6.3. ¿Cómo funciona?

Una ruteadora CNC sigue prácticamente el mismo proceso de funcionamiento explicado al inicio del estado del arte. Inicialmente, se realiza la modelación del diseño deseado en programas como InDesign, Illustrator, AutoCAD, FreeHand, Rhinoceros, Inventor, Google Sketchup, SolidWorks, entre otros. Estos deben estar diseñados en vectores para así ser traducidos por el programa que genera los códigos G y M.

El router, así como las demás máquinas CNC, operan de manera diferente, sin embargo, se suele cometer el error de confundir los routers y las fresadoras entre sí por sus bajas similitudes. Por tal razón se realiza esta aclaración, y es que ambos mecanismos difieren en ciertas características específicas. Más allá de los materiales que puede cortar cada una, sus velocidades de corte, precisión, y demás aspectos, la diferencia fundamental reside en las configuraciones de los movimientos efectuados por cada mecanismo.

En el caso del router, el cabezal, lugar donde se encuentra la herramienta de corte, suele ser móvil y puede desplazarse en los ejes con los que cuente la máquina. Por otro lado, el cabezal de la fresadora en su mayoría se presenta estático, aunque también puede darse el caso de ser móvil. Esta variación también ocurre en el router, pues este, aunque en su mayoría tiene cabezal móvil, puede presentarse un diseño donde la cama de corte sea la que se desplace mientras que la herramienta de corte permanezca fija.

Hecha la aclaración, podemos volver al funcionamiento del mecanismo. Los códigos G y M son dirigidos al controlador, usualmente un driver. Este componente decodifica las órdenes contenidas en los códigos para producir pulsos eléctricos que controlan el funcionamiento del sistema de accionamiento impulsado por servomotores o motores paso a paso dependiendo de la selección realizada.

Finalmente, los actuadores se mueven, desplazando consigo la herramienta de corte (usualmente un motortool) y trazando la trayectoria contenida en las instrucciones de los códigos. El resultado es una copia de excelente calidad, si no es que perfecta, del diseño desarrollado en el software de programación.

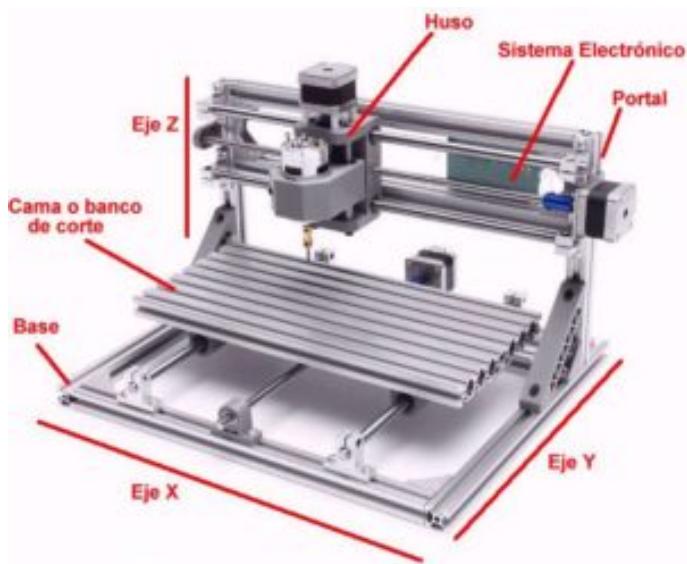


Figura 20: Sistema de accionamiento de un router CNC

2.6.4. ¿Cuáles son sus componentes?

Un router CNC está conformado por varios componentes particulares, sin embargo, estos se pueden agrupar en 3 sistemas principales descritos por la empresa SIDEKO en uno de sus artículos [11].

1. Sistema mecánico y estructura:

Una de las piezas fundamentales de este sistema es la mesa de corte, donde se sostiene y asegura la pieza que será cortada para obtener una mayor precisión en el trazado. Estas mesas varían de tipo, tamaño y diseño. Algunos de los tipos de mesas son: de ranura en T, de vacío, o híbridos que combinan ambos tipos.

El mecanismo puede tener dos o tres ejes que le permiten moverse y cortar en las dimensiones que permitan sus ejes. Este sistema de desplazamiento lineal comprende los sistemas de acoplamiento que unen los ejes de los motores con los tornillos sin fin. Son estos tornillos los que permiten el movimiento del marco que contiene el cabezal en las direcciones de sus ejes. Igualmente, los rieles, parte vital del sistema, soportan el marco y facilitan su desplazamiento.

Para comprender a mayor detalle los componentes del sistema mecánico, ver la figura 20.

a) Motores:

Los motores, encargados de generar la energía mecánica rotacional que usan los tornillos, pueden venir de dos maneras.

1) Servomotor:

Basados en la información compartida por el centro de formación técnica para la industria Aula 21 [12], un servomotor se puede definir como un actuador rotativo o motor que permite un control preciso de la posición angular, aceleración y velocidad

por medio de un bucle cerrado de retroalimentación de posición.

Los servomotores son una combinación de un motor de corriente continua o alterna adecuados para su uso en un sistema de retroalimentación de posición. Estos componentes funcionan a la par, con el codificador o encoder funcionando como sensor para proporcionar retroalimentación al controlador. Por su parte, el controlador envía pulsos eléctricos de ancho variable, o modulación de ancho de pulso (PWM) para dirigir el motor.

El PWM enviado al motor determina la posición del eje, y, con base a la duración y longitud del pulso, el servomotor determina hasta donde debe girar el motor. Estos solo pueden girar 90° en cualquier dirección para un movimiento total de 180° y, cuando se les ordena moverse, estos lo harán y mantendrán esa posición hasta que se les instruya algo diferente.



Figura 21: Servomotor

2) Motor paso a paso:

Según la organización TEM [13], un motor paso a paso es un motor de corriente continua sin escobillas en el que la rotación se divide en un cierto número de pasos. Normalmente, una revolución completa de 360° se divide en 200 pasos, lo que implica que una sola carrera del eje se realiza cada 1.8° .

Este tipo de motor está compuesto por un rotor y un estator. El estator es una parte estacionaria, mientras que el rotor gira siguiendo el campo magnético giratorio creado alrededor del estator.

Por una parte, el estator es el marco de un conjunto de electroimanes, los cuales son bobinas montadas en lugares específicos alrededor del rotor. Cuando la corriente fluye a través de las bobinas se crea un campo magnético que atrae un imán montado en el rotor. Al encender cierta bobina, la atracción que se genera hace que el rotor y el eje giren en el ángulo en el que su posición se oponga menos al flujo magnético.

Este proceso se repite sucesivamente, pudiendo incluso variar la dirección e intensidad del flujo magnético al modificar la intensidad y dirección de la corriente que fluye a través de una bobina determinada. De esta manera, el rotor y el eje pueden girar en sentido horario y antihorario, además de abrir la posibilidad no solo de realizar la operación de paso completo, sino también de medio paso o incluso menos.

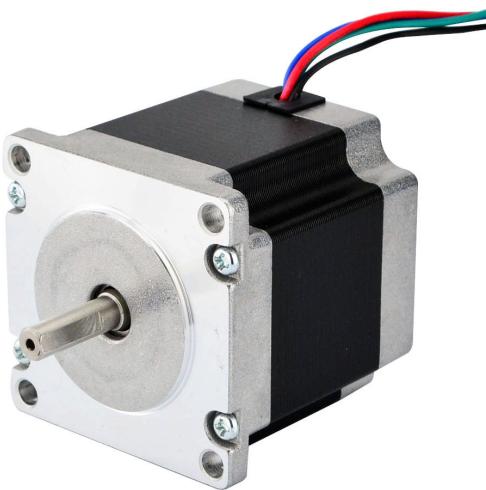


Figura 22: Motor paso a paso

2. Sistema de automatización y control:

Los controladores de un router CNC son los distintos software que se instalan en la computadora. Estos se encargan de enviar las órdenes que debe seguir el sistema de accionamiento para reproducir el diseño establecido, de manera que se reduzca el riesgo de error al mínimo.

3. Maquinaria de corte:

Las herramientas de corte son las fresas o brocas utilizadas para llevar a cabo la aplicación respectiva en las diferentes superficies disponibles. Estas tienen formas y materiales variados para adaptarse de la mejor manera al material y el trabajo a realizar, ya sean cortes, perfilados, rebajes, ranuras o decoraciones en metales o materiales blandos.

En el mercado se pueden encontrar una gran variedad de instrumentos de corte. Algunos de los más usados son: cortadores de dos filos o fresa recta, cortador de ensamble, fresa biselada o de chaflán, fresa redondeada y curva, fresa romana, fresa de ranurado, entre otros.



Figura 23: Brocas o fresas

2.7. Modelos de ruteadoras CNC en el mercado

Con la intención de tener un mayor acercamiento a las opciones de ruteadoras CNC en el mercado, el fabricante profesional de enrutadores CNC, Blue Elephant CNC [14] recopiló las 10 mejores máquinas de enrutador CNC recomendadas en el 2021. A continuación, se presentan algunos de los mejores modelos disponibles.

2.7.1. Router de madera CNC 1325 de nivel básico

Es una máquina de grabado de tres ejes con herramienta de corte móvil y sistema de fijación para la pieza. Esta es una de las más populares selecciones a la hora de escoger routers CNC por su bajo costo de adquisición y mantenimiento, su relación calidad/precio, su extensa vida útil, rango de aplicaciones, y vasto procesamiento de materiales.

Esta ruteadora tiene amplias aplicaciones no solo en el campo de la carpintería, sino también en las industrias de la publicidad, artesanías, molduras, electrónica, construcción, entre muchas otras. Asimismo, este puede cumplir con el procesamiento de la mayoría de los materiales no metálicos como acrílico, mármol, tablero de PVC, tablero de hibisco, tablero de madera, etc.[15]

Parámetro	Dato
Modelo	Router CNC 1325 de 3 ejes ELECNC
X, Y, Z Área de trabajo	1300 * 2500 * 200 mm
Voltaje de funcionamiento	380V / 3PH / 50Hz
Sistema de control	Sistema de control DSP A11
Tipo de husillo	Husillo de refrigeración por aire 4.5kw Italia HSD, ER32
Velocidad del husillo	0-18000 RPM
Sistema de conducción	Controladores Stepper FL118 y Leadshine 860H
Mesa de trabajo	Mesa de trabajo al vacío y ranura en T de aluminio
Guía lineal	Guía lineal PMI
Transmisión	Eje X, Y: piñón y cremallera helicoidal de Taiwán Eje Z: husillo de bolas de alta precisión Taiwán TBI
Software compatible	Artcam, Aspire, etc
Lenguaje de comando	G Code
Velocidad de desplazamiento	30m / min
Velocidad de trabajo	0-15m / min
Precisión de reposicionamiento	± 0.05 mm
Precisión de trabajo	± 0.05 mm

Tabla 3: Especificaciones del Router CNC 1325 de 3 ejes ELECNC



Figura 24: Router CNC 1325 de 3 ejes ELECNC

2.7.2. Router CNC 2040 ATC con rodillo de prensa

Esta máquina está especialmente diseñada para usuarios con requisitos de procesamiento de lata precisión y alta eficiencia. Este router tiene un almacén de herramientas independiente con diferentes brocas, el cual puede ser controlado por computador para cambiar automáticamente las herramientas requeridas sin detener el trabajo durante el proceso.

El router CNC de 4 ejes tiene una amplia gama de aplicaciones en muebles, publicidad, moldes, decoración, construcción, etc. En términos de funciones, este puede cortar, grabar, taladrar, fresar, y ranurar materiales de madera, plásticos, piedra, metales blandos y compuestos.[16]

Parámetro	Dato
Modelo	ATC2040-4A
X, Y, Z Área de trabajo	2000 * 4000 * 400 mm
Voltaje de funcionamiento	380V / 3PH / 50Hz
Sistema de control	Controlador Taiwan Syntec
Tipo de husillo	Husillo de refrigeración por aire HSD de 9kw de Italia, ER32
Velocidad del husillo	0-24000 RPM
Sistema de conducción	Servocontrolador de CA Yaskawa de 850w Japón y servomotor de CA de 750w, 5 juegos
Mesa de trabajo	Mesa de trabajo al vacío y ranura en T de aluminio
Guía lineal	Guía lineal de Taiwán
Transmisión	Eje X, Y: piñón y cremallera helicoidal de Taiwán Eje Z: husillo de bolas de alta precisión Taiwán TBI
Revista de herramientas automáticas	12 herramientas
Software compatible	Artcam, Alphcam, Tipo 3, Unancam, Aspire, etc
Lenguaje de comando	Código G y código M
Velocidad de desplazamiento	65m / min
Velocidad de trabajo	0-25m / min
Precisión de reposicionamiento	± 0.03 mm
Resolución del sistema	± 0.0025 mm
Precisión de trabajo	± 0.05 mm

Tabla 4: Especificaciones del Router CNC ATC2040-4A



Figura 25: Router CNC ATC2040-4A

2.7.3. Cortadora oscilante 2050

La máquina cortadora CNC oscilante es un nuevo tipo de ensamblaje de máquina de grabado con la función integrada de posicionamiento de borde de patrulla automática. Esta ruteadora CNC procesa principalmente materiales blandos, como PVC y tableros KT en la industria de producción publicitaria, así como corte de tela, mantel, adhesivos y cuero en la industria de la confección y, adicionalmente, materiales flexibles como interiores de automóviles y alfombras.[\[17\]](#)

Parámetro	Dato
Modelo	ELECNC2050ATC
X, Y, Z Área de trabajo	2000 * 5000 * 400 mm
Voltaje de funcionamiento	380V / 3PH / 50Hz
Sistema de control	Controlador Taiwan Syntec
Tipo de husillo	Husillo de refrigeración por aire ATC de 9kw, ER32
Velocidad del husillo	0-24000 RPM
Sistema de conducción	Servomotor de CA Yaskawa de 850w de Japón y servocontroladores de CA de 1000w, 5 juegos
Mesa de trabajo	Mesa de trabajo al vacío y ranura en T de aluminio
Guía lineal	Guía lineal de Taiwán
Transmisión	Eje X, Y: piñón y cremallera helicoidal de Taiwán Eje Z: husillo de bolas de alta precisión Taiwán TBI
Revista de herramientas automáticas	12 herramientas
Software compatible	Artcam, Alphacam, Tipo 3, Unancam, Aspire, etc
Lenguaje de comando	Código G y código M
Velocidad de desplazamiento	40m / min
Velocidad de trabajo	0-25m / min
Precisión de reposicionamiento	± 0.03 mm
Resolución del sistema	± 0.0025 mm
Precisión de trabajo	± 0.07 mm

Tabla 5: Especificaciones del Router CNC ELECNC2050ATC



Figura 26: Router CNC ELECNC2050ATC

2.8. Conclusiones

Con base al material recopilado podemos concluir inicialmente que la tecnología CNC ha revolucionado la industria desde su núcleo. Desde la primera revolución industrial, el mercado, la tecnología y la industria han evolucionado a la par, cada una, complementando a la otra e influyendo en sus procesos de innovación. De esta cadena de reacción surgieron las máquinas CNC, mecanismos que han permitido la automatización de diversos procesos de manufactura, trayendo consigo variados y significativos beneficios.

Las máquinas CNC, en sus diversas presentaciones y con sus numerosas aplicaciones, tienen un funcionamiento intrincado, constituido por diversos componentes, cada uno cumpliendo una función particular. Estas operaciones individuales, en el esquema global del mecanismo, se integran y complementan entre sí para ofrecer un producto de gran calidad, en un tiempo reducido, costos mínimos, y precisión impecable. Adicionalmente, por más complejo que sea el diseño, este puede ser reproducido innumerables veces con la misma calidad, sin la intervención de un trabajador que pueda salir lastimado o introducir errores humanos al proceso.

A juzgar por sus vastos beneficios y escasas desventajas, la tecnología CNC se presenta como una herramienta indispensable para las líneas de producción en diferentes industrias. Máquinas basadas en el control numérico computarizado, como las fresadoras, tornos, ruteadoras, y demás mecanismos, se encuentran en auge, obteniendo una gran relevancia que se ve reflejada en las constantes mejoras de los productos disponibles en el mercado y la creciente oferta de empleos relacionados con este sector.

Sustentado en la investigación realizada previamente, podemos confirmar la complejidad de esta maquinaria. El control del movimiento, los accesorios programables, el programa CNC, el controlador CNC, y el sistema DNC, son todos elementos programables que le dan a la máquina una autonomía sin precedentes.

Inicialmente, el control del movimiento se realiza vía digital, empleando los códigos G90 y G91 para dirigir el movimiento del mecanismo en los diferentes ejes con los que cuenta la máquina. Estos

códigos, parte de la familia de los códigos G, almacenan las instrucciones que debe seguir el mecanismo para lograr el resultado esperado. Este conjunto de órdenes se transportan por medio del código G y de su familia complementaria, el código M, a través del sistema de distribución DNC. Una vez llegan al controlador, este se encarga de traducir los códigos a señales eléctricas que los motores puedan entender, controlando así el movimiento del mecanismo para producir el resultado final.

Para el caso de una ruteadora CNC, herramienta comúnmente utilizada para el corte y grabado de materiales blandos y ciertos metales, esta sigue todo el proceso de funcionamiento previamente mencionado. Su control de movimiento es interpolar y se vale de un lazo de control cerrado para recibir retroalimentación de la operación.

Este tipo de máquina CNC es ampliamente usada en diversas industrias por su gran versatilidad. Por tanto, el mercado para esta maquinaria está en su apogeo, lo que implica una extensa oferta de modelos, cada uno con características y aplicaciones particulares.

Del análisis de opciones disponibles, se halló que, en su mayoría, las máquinas de gran envergadura, con áreas de trabajo amplias y aplicaciones especializadas, suelen tener una velocidad de husillo máxima de 24000 RPM, un sistema de conducción impulsado por servomotores y servocontroladores, un lenguaje de comando compuesto por código G y M, una mayor precisión de reposicionamiento, y una velocidad de desplazamiento de la herramienta de corte bastante elevada.

Por el contrario, las máquinas de menor tamaño y un área de trabajo más reducida, tanto a nivel industrial como personal (productos dirigidos a personas), presentan características totalmente diferentes a las demás. Para empezar, la velocidad máxima del husillo llega a 18000 RPM para las industriales, mientras que las personales suelen ser de entre 10000 y 15000 RPM. Igualmente, su sistema de conducción está fundado en motores stepper o paso a paso, y su lenguaje de comando está dado únicamente por código G, pues estos mecanismos no tienen elementos adicionales que puedan requerir de código M. Lógicamente, su velocidad de desplazamiento y precisión de reposicionamiento y de trabajo resultan ser menores a sus contrapartes.

3. Brief

3.1. Antecedentes

Tomando en consideración todo lo susodicho en el estado del arte, podemos encontrar una motivación subyacente a la naturaleza obligatoria del proyecto, y es que, más allá de que este proyecto sea parte de un esquema académico, este mismo presenta una oportunidad invaluable para acercarse a la ingeniería aplicada.

El estado del arte nos permite identificar el valor inherente a la construcción de una ruteadora CNC. La complejidad de este mecanismo, constituido por tantos componentes, procesos y variables, demuestra la extensa gama de valiosos aprendizajes que se pueden extraer de la experiencia.

De la propuesta académica se origina el problema a resolver, la construcción de una ruteadora de 2 grados de libertad capaz de cortar 1 mm de profundidad en una lámina de madera. Adicionalmente,

de las motivaciones personales surgen nuevos requisitos que se procederá a declarar.

Además de los requerimientos obligatorios para la construcción de la máquina, es posible establecer propiedades adicionales y delimitar a mayor detalle sus características imprescindibles, todo con base a las evidencias encontradas en la investigación inicial.

En primera instancia, el diseño básico que se nos exige, en adición al objetivo general mencionado anteriormente, puede ser encuadrado en las siguientes características: Carente de elementos programables (sin programa CNC ni control de movimiento por CNC), movimiento paraxial no programado, lazo de control abierto, mesa de corte básica, área de trabajo acorde a la envergadura de la máquina, cabezal móvil, sistema de accionamiento impulsado por motores paso a paso, y precisión de trabajo de ± 5 mm.

Con la intención de aplicar la tecnología CNC, claramente, a un extremo que nos sea posible con nuestras habilidades y recursos, podemos modificar e incluir ciertos requerimientos que, aunque opcionales, potenciarían en gran medida el aprendizaje y optimizarían la máquina a un punto de calidad comercial.

La diferencia entre esta nueva propuesta y el diseño básico es que esta tendrá elementos programables. En el caso del control de movimiento, se empleará únicamente código G90 pues, para el G91, se requeriría de un sistema de sensórica, metrología y control mucho más complejo. De igual forma, como nuestro modelo carecerá de accesorios programables como dispensador de refrigerante o cambiador automático de herramientas, no es necesario añadir código M al programa CNC, con el código G es suficiente.

Por otra parte, se dispondrá de un sistema DNC para transmitirle al controlador el código G, el cual deberá accionar los motores paso a paso de tal forma que se logre un movimiento interpolar controlado. Se buscará igualmente que el lazo de control sea cerrado, sin embargo, solo proveerá retroalimentación en el caso de que la herramienta de corte se salga de los límites de la mesa de corte. Con base a estas mejoras, se espera que la precisión de trabajo pase a ser de ± 0.1 mm y la calidad del resultado refleje los conocimientos adquiridos en el proceso.

3.2. Justificación

El presente proyecto tiene el propósito de servir como un acercamiento al proceso de diseño de máquinas. Por medio de un detallado y exhaustivo ejercicio de diseño, modelación, planeación, y construcción, se pretende manufacturar una cortadora CNC de materiales blandos valiéndose de conocimientos previos y nuevos.

La CNC, como ha sido previamente expresado, es una máquina de corte o grabado, fundada en el funcionamiento de un complejo mecanismo, compuesto por piezas particulares, pero de gran importancia en el movimiento articulado de la máquina. Este intrincado proceso de transformación de flujos de entrada en flujos de salida por medio de funciones individuales representa la más elemental característica de la ingeniería y una ruta funcional inherente a la robótica.

Con base a esto, el problema propuesto da vía libre a la concepción de un diseño de ruteadora CNC, partiendo inicialmente de los conceptos más generales de la ingeniería como lo es el planteamiento de objetivos, el trazado de una ruta funcional factible, la conceptualización de propuestas, y la solución de problemas individuales para lograr resultados globales.

Entrando más en materia de la robótica y su subcategoría de CAD/ CAM, el control numérico por computador (CNC) se presenta como uno de los métodos con mayor alcance y aplicaciones en la industria. En referencia a este tema, entra a colación conceptos propios del diseño de máquinas, la síntesis de mecanismos, mecánica de sólidos, estática y dinámica, propiedades de materiales, diseño CAD, programación de computadores y automatización, entre otros. En este gran abanico de conceptos, cálculos y procedimientos que vienen sujetos al proyecto, identificamos la propuesta de valor para los estudiantes en su proceso de creación.

Por otra parte, desde una perspectiva más realista y comercial, el proyecto se puede percibir como el diseño de maquinaria con el interés expreso de ofrecer un producto para el corte, grabado, roscado, y mecanizado de piezas. Con este nuevo panorama, el proyecto se torna aún más exigente y elaborado, pasando de un propósito didáctico a una situación donde el objetivo principal es la satisfacción del consumidor. Frente a esto, encontramos nuevas variables sujetas a la apreciación del cliente, como lo son el precio, la simplicidad de manejo, la estética, y, claramente, los elementos técnicos, los cuales se fusionan en el más importante aspecto de todos, su funcionalidad.

En la oferta de esta ruteadora CNC se reconocen entonces numerosos beneficios para el usuario de la máquina, dentro de los cuales está la estabilidad, precisión y dinamismo de sus trazos, así como su fácil ensamble, portabilidad, interfaz usuario/máquina, vida útil, eficiencia energética, velocidad de actuación, precio, factor innovador, materiales, entre otros.

3.3. Objetivo general

Construir una máquina ruteadora de control numérico por computador (CNC), fundada en un mecanismo de 2 grados de libertad acoplados diferente a un sistema cartesiano XY. Esta debe ser capaz de cortar al menos 1mm de profundidad en una placa de madera.

3.4. Objetivos específicos

1. **Estado del arte:** Proponer un estado del arte considerando todas las diferentes implicaciones que vienen sujetas al diseño y construcción de una máquina CNC.

El estado del arte debe contener una agrupación de todos los diferentes aspectos que constituyen el proyecto visto desde una perspectiva objetiva y realista. Para ello, se toman en consideración modelos disponibles en el mercado y se desglosa cada una de sus características y componentes en aspectos individuales. Con este método, se logra formar una imagen general del proyecto, al igual que una percepción más detallada de su funcionamiento. En esto radica la importancia del estado del arte.

Por tanto, con el estado del arte se pretende delimitar las diferentes variaciones disponibles para la CNC, desde sus elementos técnicos como lo es su funcionamiento, hasta particularidades como su historia, modelos y aplicaciones.

Del funcionamiento se busca individualizar cada elemento funcional y comprender como se asocia con los demás componentes. Partiendo desde lo más general (estructura funcional), a aspectos como el control del movimiento, el proceso de automatización, y las funciones primarias de las piezas constituyentes.

2. Diseño conceptual: Plantear un diseño conceptual prolífico que ahonde en los diferentes elementos funcionales de la máquina CNC.

El diseño conceptual debe contener un conjunto de elementos que describan el funcionamiento general de la máquina, partiendo de las especificaciones básicas de diseño, proponiendo una caja negra, y finalmente estableciendo una estructura funcional adecuada.

Inicialmente, las especificaciones de diseño surgen de los requerimientos inherentes al proyecto en sí, a las exigencias del cliente, y demás factores externos relacionados con este. Por ello, este paso en el diseño conceptual pretende delimitar todas las posibles exigencias referentes al proyecto, de tal manera que todas las rutas de creación de ahí en adelante cimienten sus procedimientos, cálculos, y evaluaciones en estos requerimientos.

La caja negra busca simplificar el funcionamiento de la máquina en aspectos esenciales como los flujos de entrada, la función general, y los flujos de salida. De esta manera, se procura eliminar las restricciones al proceso creativo y estimular la producción de resultados más diversificados.

La estructura funcional debe, por tanto, ser el conector entre las especificaciones de diseño y la caja negra. Este método busca plasmar el funcionamiento de la máquina de manera detallada, inquiriendo en los procesos internos que permiten la conversión de los flujos de entrada iniciales en los flujos de salida finales. La importancia de este procedimiento radica en su comprensibilidad al ilustrar toda la base funcional, facilitando los procesos creativos para la concepción del producto final. De igual forma, la notación empleada debe ser la de Pahl & Beitz con los verbos de la notación Roberts.

3. Requerimientos técnicos: Desarrollar una tabla de requerimientos técnicos que abarque todos los flujos, funciones y portadores de la estructura funcional y los exprese en términos de métricas y valores.

Los requerimientos técnicos deben englobar todos los aspectos relevantes que jueguen algún papel en el funcionamiento de la máquina y exhibirlos de una manera cuantificable y evaluable. De tal forma, la base funcional puede ser tecnificada con recursos que cumplan con estos requerimientos y los procesos individuales examinados puntualmente para calcular sus flujos de salida e identificar fallas o aspectos a mejorar.

4. **Síntesis del mecanismo:** Realizar un proceso de síntesis de número para hallar un mecanismo óptimo que cumpla con los requerimientos de diseño.

La síntesis de número debe estar compuesta por varias etapas de filtro donde, inicialmente, se proponen todas las diferentes cadenas cinemáticas que satisfagan los requisitos generales. De esta manera se pueden visualizar las opciones topológicas disponibles para el diseño del mecanismo.

A partir de este abanico de posibilidades, se seleccionan aquellas que cumplen con las especificaciones enunciadas en los requerimientos básicos de diseño, para, posteriormente, hallar sus respectivos mecanismos.

De los mecanismos obtenidos, se seleccionan los mejores adaptados para solucionar el problema pertinente y, a cada uno de estos, se les aplican reglas de equivalencia cinemática. Finalmente, se realiza un último proceso de selección del cual se derive el diseño más adecuado para ser corporizado y empleado en la construcción de la CNC.

5. **Planteamiento de propuestas:** Esbozar un modelo funcional para la máquina CNC con base a los resultados de las etapas previas.

Esta propuesta debe ser expresada de manera gráfica por medio de un boceto. El boceto tiene que reflejar de manera clara el funcionamiento del modelo, teniendo en cuenta la actuación del mecanismo, la disposición de sus componentes, características particulares, y los elementos electrónicos.

6. **Cálculos tentativos:** Enlistar cálculos tentativos para el diseño propuesto.

Esta lista debe explorar los diversos cálculos concernientes al funcionamiento de la máquina, teniendo en consideración la dinámica, estática, mecánica de sólidos, y demás cálculos que puedan ser relevantes para lograr el objetivo general.

3.5. Definición del cliente

Desde una perspectiva meramente académica, el usuario de la máquina CNC será un estudiante o profesor con conocimientos ingenieriles avanzados. El uso que estos darán a la máquina será para cortar al menos 1mm de profundidad en una placa de madera.

Por otra parte, visto como un producto comercial podemos tomar como referencia los artículos de HI-TEC [18] y la colaboración de Gesmain Laser con Framun Techno [19] para definir los clientes de nuestro producto.

Los clientes serán profesionales con bagaje en el área de control de máquinas, probablemente ingenieros o técnicos, en su mayoría trabajadores de planta. Estos podrán encontrarse empleados en diversas áreas de la industria como la ebanistería, carpintería, interiorismo, diseño industrial,

industria textil, fabricación de piezas, entre otros. Cada cliente, desde su ocupación respectiva, buscará utilizar la CNC para diferentes aplicaciones como lo son: corte balanceado, brochado, corte simultáneo, roscado por laminación, corte poligonal, etc.

La tecnología CNC busca el aumento de la producción, eficiencia, calidad e innovación dentro de las empresas, además de aportar en gran medida a la reducción de costes y el aumento del retorno de inversión. De igual forma, debido a la creciente complejidad de los procesos industriales, los constantes cambios disruptivos, las demandantes exigencias del mercado, y la gran cantidad de piezas fabricables, cada vez más industrias implementan la automatización de su maquinaria, potenciando así la relevancia de esta tecnología y volviéndola un eje clave en la industria.

En este orden de ideas, la clientela de la CNC no se limita únicamente a las industrias previamente mencionadas. De hecho, la concentración de clientes potenciales aumenta paulatinamente de la mano de la automatización, lo que implica un mayor rango de aplicaciones y usuarios. La mecanización de estas máquinas facilita la interacción del beneficiario con el mecanismo, implicando una reducción significativa en las competencias requeridas para operar la ruteadora que, a su vez, supone una mayor población apta para su utilización.



Figura 27: Espacio de trabajo y posibles clientes en la industria

3.6. Necesidades del cliente

Para especificar las necesidades generales del cliente, la compañía KUZU SL [20] enumera las 6 ventajas principales de las máquinas CNC, lo que nos facilita identificar qué es lo que busca el consumidor de esta tecnología.

Las necesidades del cliente varían dependiendo de la aplicación específica que este le quiera dar y, propiamente, de la industria en la que este se encuentre. Sin embargo, hay ciertos aspectos propios de la CNC que resultan fundamentales independiente de estos elementos y, por tanto, son demandas que suelen obviarse, pero son elementales en el correcto funcionamiento de la máquina y la resultante satisfacción del consumidor.

Hoy día, las industrias especializadas en la manufactura, especialmente manufactura de piezas, se ven expuestas a un crecimiento desenfrenado en su clientela, una mayor y rigurosa demanda de resultados, y un requerimiento por tiempos de producción cada vez más reducidos. Frente a esto, las compañías buscan una manera de aumentar su eficiencia, producción y calidad de producto mientras

reducen gastos e incertidumbres en el proceso.

Para vencer estos retos, la tecnología de control numérico por computador ha entrado en auge. A manera de ejemplo, en la industria de los metales, estas herramientas son unas de las mejores opciones para el mecanizado por decoletaje, donde se llevan a cabo procesos de fresado, taladrado, ranurado, corte y desbaste.

Para este segmento de la población objetivo, los clientes potenciales buscan emplear la potencia de la máquina CNC para acabar con los procesos manuales tradicionales que consumen mucho tiempo, generan costos de producción altos, y niveles de estrés elevados en los trabajadores que, en consecuencia, limitan la productividad y reducen los beneficios de la empresa.

Para lograr su acometido, los consumidores requieren una máquina con ciertas cualidades generales, tanto técnicas como de diseño. En términos generales, estos buscan una relación calidad precio adecuada. Por este motivo, el precio del mecanismo debe ser asequible y acorde a los beneficios que ofrece la herramienta. Debe tener o suponer una vida útil larga, materiales de calidad, factor de seguridad alto, dimensiones apropiadas, componentes optimizados, estética, reducción de la implicación del trabajador, operabilidad simple, interfaz gráfica sencilla e intuitiva, chasis rígido, pero seguro, buen manejo de cables, sistema de sensores para evaluar el desempeño y controlar el proceso, fácil mantenimiento y, de ser el caso, fácil ensamble, entre otros.

En términos técnicos y de funcionalidad, los clientes solicitan un mecanismo que ofrezca gran precisión, no solo en las operaciones CAM (Computer Aided Manufacturing), también en las CAD (Computer Aided Design). En otras palabras, se busca precisión en el proceso de manufactura, ósea, la reducción de errores, calidad óptima de los resultados, repetibilidad y fácil intercambio de la mecanización para diferentes piezas. Adicional a esto, la precisión en el CAM implica que la máquina sea fiel al diseño que se busca obtener desarrollado inicialmente en el software de modelación. Para lograr esto, la CNC debe integrar correctamente el CAD con el CAM, pero, de igual forma, el mecanismo debe ser estable, lo que implica una tolerancia geométrica y dimensional adecuada, rigidez y fatiga óptima, y buena distribución del peso.

Igualmente, otro requerimiento puede ser la eficiencia energética y la reducción de residuos. La máquina debe ser capaz de traducir la máxima cantidad de energía de la fuente en funcionalidad tangible, y este funcionamiento debe reducir a su máxima capacidad la producción de residuos y minimizar los movimientos innecesarios. Esto quiere decir que el proceso es optimizado para brindar la mayor eficiencia posible.

Finalmente, la máquina debe tener una gran adaptabilidad para ajustarse a las dinámicas industriales que estén a la vanguardia. Es decir, el producto debe ser flexible para poder producir una gran variedad de diseños y no tornarse obsoleto después de un corto periodo de uso. Por ende, la maquinaria CNC debe poder ejecutar procesos complejos y variables únicamente realizando pequeñas configuraciones a la máquina e integrar los programas relevantes.

3.7. Cronograma general

Fecha	Entregable
5 de agosto	Entrega del concepto
19 de agosto	Entrega de planos
7 de octubre	Entrega del modelo
18 de noviembre	Entrega de cálculos

Tabla 6: Fechas de entrega

3.8. Cronograma por etapas

Semana	Actividad
Semana 1 a 3	Concepto de diseño (Entrega de informe)
Semana 3 a 5	Selección de concepto ganador y desarrollo de planos (Entrega de informe)
Semana 5 a 12	Manufactura de la máquina (Entrega de máquina)
Semana 12 a 18	Cálculos de la máquina (Entrega de informe)

Tabla 7: Etapas del proyecto

3.9. Cronograma por semanas

Tabla 8: Cronograma por semanas

Semana	Actividad
Semana 1 (18 de julio)	Desarrollo de requerimientos técnicos de diseño, estructura funcional del sistema y síntesis topológica del mecanismo.
Semana 2 (25 de julio)	Desarrollo del estado del arte, brief, boceto del concepto seleccionado, cálculos tentativos y demás adiciones.
Semana 3 (01 de agosto)	Desarrollo de presentación con diseños finales, selección del concepto ganador, creación del informe final (agrupación de los PDFs) y revisión conjunta de los informes individuales. Entrega del informe para el concepto. Desarrollo de planos y creación de las listas de partes y material.
Semana 4 (08 de agosto)	Mejora del concepto con la retroalimentación. Desarrollo de planos y mejora de las listas de partes y material.
Semana 5 (15 de agosto)	Creación del informe final con todos los planos. Entrega de planos. Programación del sistema de control.
Semana 6 (22 de agosto)	Semana para adelantar. Programación del sistema de control.
Semana 7 (29 de agosto)	Mejora de planos con retroalimentación. Compra de piezas y componentes. Programación del sistema de control.

Continúa en la siguiente página

Tabla 8 – *Continuación de la página anterior*

Semana	Actividad
Semana 8 (05 de septiembre)	Inicio de la construcción. Construcción del chasis. Programación del sistema de control.
Semana 9 (12 de septiembre)	Construcción del mecanismo. Programación del sistema de control.
Semana 10 (19 de septiembre)	Ensamble de la máquina, disposición de la parte electrónica, desarrollo de pruebas y corrección de errores. Programación del sistema de control.
Semana 11 (26 de septiembre)	Corrección de errores, optimización, parte estética y de seguridad, reorganización del cableado, e instalación de suiches y botones. Programación del sistema de control.
Semana 12 (03 de octubre)	Corrección de detalles. Entrega del modelo. Inicio de los cálculos.
Semana 13 (10 de octubre)	Desarrollo de análisis cinemático.
Semana 14 (17 de octubre)	Desarrollo de análisis cinemático. Desarrollo de análisis estático.
Semana 15 (24 de octubre)	Desarrollo de análisis estático. Desarrollo de análisis de falla.
Semana 16 (31 de octubre)	Desarrollo de análisis de falla. Análisis de elementos finitos del chasis.
Semana 17 (07 de noviembre)	Desarrollo de análisis de falla. Análisis dinámico de la máquina, cálculos eléctricos y del sistema de control, y demás adicionales.
Semana 18 (14 de noviembre)	Corrección de errores. Creación del informe final con todos los formatos de cálculos diligenciados. Entrega de la memoria de cálculo.

4. Arquitectura del diseño

4.1. Especificaciones básicas de diseño

Para este proyecto se desea hallar un mecanismo que permita el diseño y posterior manufactura de una ruteadora CNC con movimiento confinado al plano horizontal. El mecanismo debe facilitar el posicionamiento de la herramienta de corte en una coordenada dada (x,y) con un ángulo de orientación dado (Φ).

De igual forma, es imperativo brindar estabilidad, rigidez y dinamismo a la máquina. En consecuencia, se procura ubicar los sistemas de actuación sobre la barra de chasis, de forma que las masas suspendidas del mecanismo sean mínimas y así potenciar las respuestas a la hora de llevar a cabo su función.

En este orden de ideas, aunque resulta más viable la ubicación del sistema de actuación en el chasis, también es posible la modelación de mecanismos con manivela-biela-corredera invertida. No obstante, estas propuestas pueden resultar considerablemente más complejas que las demás en el hecho de que uno de los sistemas de actuación tendrá que estar suspendido. El peso de estos componentes más la herramienta de corte representa un valor mayúsculo en contraste con las demás piezas del mecanismo. Derivando entonces en inestabilidad, imprecisión, falta de dinamismo, e incluso, fallos notables en el funcionamiento de la CNC.

Con base a lo anterior, el mecanismo solución debe tener 2 Grados de Libertad, de modo que se pueda ubicar la herramienta de corte en la locación y orientación deseada.

En consecuencia, a raíz de la acción sincronizada de ambos grados de libertad, es fundamental que estos sean acoplados. Dado que la herramienta estará localizada sobre una barra móvil del mecanismo, únicamente aquellas cadenas cinemáticas donde al menos una de las barras posea una movilidad de 2 grados de libertad serán útiles. Esto conlleva a marcar de inválidos cualquier opción que presente ciclos o bucles independientes pues, en estos casos, su geometría impediría el movimiento esperado.

Del mismo modo, cabe señalar que el mecanismo no necesariamente tiene que fundarse en el movimiento de la herramienta de corte. Análogamente, el mecanismo puede basarse en el movimiento de la mesa de corte mientras que la herramienta permanece fija. Este funcionamiento es completamente válido y será explorado en el proceso de síntesis, no obstante, para el proyecto únicamente se tomarán en cuenta mecanismos donde sea el motortool el que se mueva. Por tanto, la exploración de estos mecanismos asume un papel secundario con fines didácticos.

Concerniente al orden de las barras y pares cinemáticos, las barras de orden ternario y cuaternario resultarían una opción viable en la síntesis del mecanismo. Por otra parte, aunque en teoría las cadenas cinemáticas con pares ternarios también son útiles, estas representan un diseño considerablemente más complejo, implicando un sistema de actuación coaxial. Esto restringiría la posibilidad de usar actuadores lineales o, en el caso de actuadores rotativos, supondría montajes de actuación complejos.

Análogo a la topología del mecanismo, por cuestiones de facilidad de manufactura y estética, se buscará simetría en las cadenas cinemáticas. Una cadena cinemática simétrica se traduce a un mecanismo con un proceso de modelación, confección y ensamblado fundamentalmente más simple. Adicional a este criterio, es esencial que el mecanismo presente una buena área de movimiento y no se vea limitado a un espacio reducido por factores como barras de soporte.

A continuación, se presenta el resumen de las especificaciones básicas de diseño:

- Mecanismo con 2 GdL.
- Mecanismo con grados de libertad acoplados (sin ciclos o bucles independientes).
- Mecanismo con sistemas de actuación sobre el mismo plano del chasis.
- Mecanismo con al menos 1 barra donde actúen los 2 GdL.
- Mecanismo con simetría.

- Mecanismo con una buena área de movimiento.
- Mecanismo sin pares de leva.
- Mecanismo con herramienta de corte móvil y mesa de corte estática.
- Mecanismo sin pares ternarios o de mayor orden.
- Mecanismos sin barras cuaternarias o de mayor orden.

De manera más general, otras especificaciones básicas de diseño son, pero no se limitan, a los siguientes aspectos:

- Estabilidad y precisión en los movimientos del mecanismo.
- Factor innovador del mecanismo.
- Rigidez en la estructura.
- Larga vida útil.
- Costo de elaboración moderado.
- Fácil manufactura y ensamble.
- Tamaño optimó.
- Fácil mantenimiento.
- Interfaz usuario/máquina intuitiva y simplificada.
- Estética en su chasis y elementos adicionales.
- Seguridad para el usuario.
- Manejo de cables adecuado.

4.2. Síntesis de número

En grandes rasgos, la síntesis es un proceso donde se definen los tamaños, formas y topología, en otras palabras, la geometría de un mecanismo de tal modo que este desempeñe el trabajo deseado.

La síntesis de número es parte de una subcategoría de la síntesis llamada síntesis estructural. Este método iterativo nos permite determinar las características de los eslabones y sus juntas (clase y orden) necesarias para producir movimientos definidos.

Para identificar las diferentes cadenas cinemáticas, la síntesis de número emplea las siguientes cuatro ecuaciones:

$$N/2 = \text{orden maximo de los pares y barras} \quad (1)$$

$$n_2 = N - n_3 - n_4 - n_5 - \dots \quad (2)$$

$$N - G - 3 = (n_3 + p_3) + 2(n_4 + p_4) + 3(n_5 + p_5) + \dots \quad (3)$$

$$p_2 = \frac{1}{2}(2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + \dots - 3p_3 - 4p_4 - \dots) \quad (4)$$

Donde N es el número máximo de barras del eslabonamiento, G son los grados de libertad del eslabonamiento, n_i es el número de barras de orden $i - \text{esimo}$, p_i es el número de pares cinemáticos de orden $i - \text{esimo}$.

La primera ecuación indica el orden máximo que pueden presentar los pares y barras en una cadena cinemática en función del número total de barras asignado para la síntesis del mecanismo. A manera de ejemplo, si un eslabonamiento posee 4 barras, el orden máximo de sus barras y pares cinemáticos es de 2 o binarias. Para eslabonamientos con número de barras impar se debe redondear el orden máximo al entero inmediatamente inferior o superior.

Esta primera expresión tiene la importante función de limitar la extensión de las ecuaciones 2, 3 y 4 al proponer el valor máximo que puede tomar el subíndice i en las variables n_i y p_i .

Una vez acotadas las ecuaciones 2 a 4, y disponiendo del número de barras N y grados de libertad G requeridos para la síntesis, se realiza una solución iterativa de estas ecuaciones.

4.2.1. Síntesis de número para mecanismo 5 barras, 2 GdL

La cadena cinemática cerrada más simple que puede garantizar 2 GdL es una de 5 barras, por tanto, se procede con el problema de síntesis numérica para el cálculo de todas las posibles cadenas cinemáticas que cumplan con estos dos requerimientos. Para ello, se hace uso de la ecuación 1 para hallar el orden máximo de las barras y pares cinemáticos.

$$N/2 = 2,5$$

Ya que el número de barras es impar, se aproxima el resultado de la expresión al entero inmediatamente superior. Por tanto, las barras y pares de cualquier posible cadena cinemática resultante tendrán un orden máximo de 3 (ternario). Conocido este valor, se continua con la acotación de las ecuaciones 2 a 4:

$$n_2 = N - n_3 \quad (5)$$

$$N - G - 3 = (n_3 + p_3) \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{1}{2}(2n_2 + 3n_3 - 3p_3) \quad (7)$$

Estas tres ecuaciones se reorganizan de forma que los términos asociados a la variable de iteración n_3 queden a la derecha de la igualdad, mientras que los términos asociados a las variables incógnitas n_2 , p_2 y p_3 queden a la izquierda de la igualdad:

$$n_2 = N - n_3 \quad (8)$$

$$p_3 = N - G - 3 - n_3 \quad (9)$$

$$-2n_2 + 2p_2 + 3p_3 = 3n_3 \quad (10)$$

Reemplazando los valores para el número de barras N y grados de libertad G, se procede a expresar estas tres ecuaciones como un sistema lineal de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_2 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 - n_3 \\ -n_3 \\ 3n_3 \end{bmatrix}$$

La tabla 7 presenta las iteraciones realizadas para la variable n_3 y los resultados del sistema de ecuaciones.

n_3	n_2	p_2	p_3
0	5	5	0
1	4	7	-1

Tabla 9: Cadenas cinemáticas para mecanismos 5 barras, 2 GdL

De igual forma, otro método para solucionar este sistema de ecuaciones es por medio de Matlab. El profesor Ronald Mauricio Martinod desarrolló un programa que sirvió de plantilla para la programación de soluciones de síntesis de número. Este programa toma en consideración el número de barras, los grados de libertad, y las diferentes ecuaciones disponibles para plantear un sistema de ecuaciones que, tras un proceso de iteración, nos entrega todas las diferentes cadenas cinemáticas. Los diferentes códigos de Matlab referenciados a lo largo del texto vienen adjuntos al documento en formato “.m”.

Tras realizar los debidos cambios, la solución del sistema 5 barras, 2 GdL viene dada por el siguiente código:

```

1 clc, clear all, format compact
2
3 % mechanisms configuration
4 G = 2; % number of DOF
5 N = 5; % number of bars
6 M = G + 3; % mobility
7 m = N/2; % max. order of bars & joints
8
9 % lineal eq. system: B = X*A
10 % [n3 p2 p3]
11 A = [ 1 0 0 ; % eq.4
12      -1 0 -1 ; % eq.5
13      -3 2 3]; % eq.6
14
15 % iteration process
16 for(n2 = 4:N)
17     % constrains

```

```

18      B = [N-n2; % eq.4
19          M-N; % eq.5
20          2*n2]; % eq.6
21
22      X = linsolve(A,B);
23
24      fprintf ('\n(%d,%d,%d,%d)',n2,round(X(2)),round(X(1)),round(X(3)))
25 end

```

Como se puede observar, este itera el valor de n_2 para así entregarnos las siguientes soluciones:

- (4,7,1,-1)
- (5,5,0,0)

Basados en ambos métodos, la única solución posible es la cadena cinemática (5, 5, 0, 0). A raíz de la simetría de su único isómero (fig. 30a), solo es posible aplicar una inversión cinemática (fig. 30b), y, de esto, obtener dos mecanismos derivados de la cadena cinemática (fig. 30c y 30d).

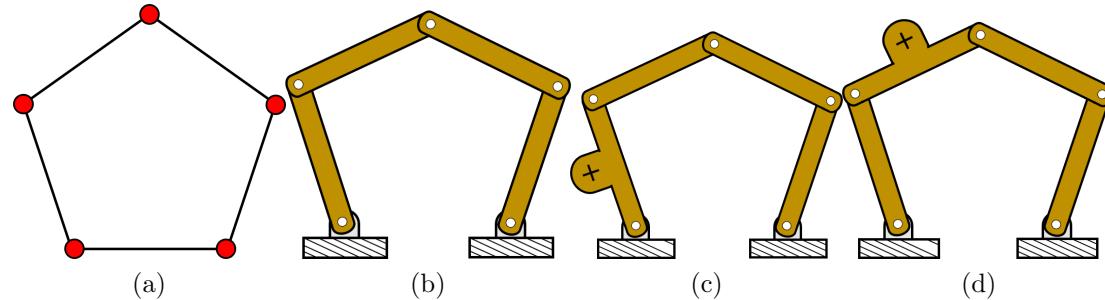


Figura 28: (a) único isómero, (b) única inversión cinemática, y (c), (d) únicos mecanismos de la cadena cinemática (5,5,0,0)

De estos dos mecanismos podemos descartar de manera inmediata el de la figura 28c. Esto a razón de que la barra no tendría 2 grados de libertad, pues el actuador ubicado en la derecha no tiene control sobre este segmento del mecanismo.

Por otro lado, el mecanismo de la figura 28d si cumple con los requerimientos. Por tanto, empleando reglas de transformación cinemática, es decir, modificación de pares cinemáticos sin modificación de grados de libertad, se procede a cambiar los pares R por pares P. Aplicando estas transformaciones se obtienen conceptos como los de la figura 29.

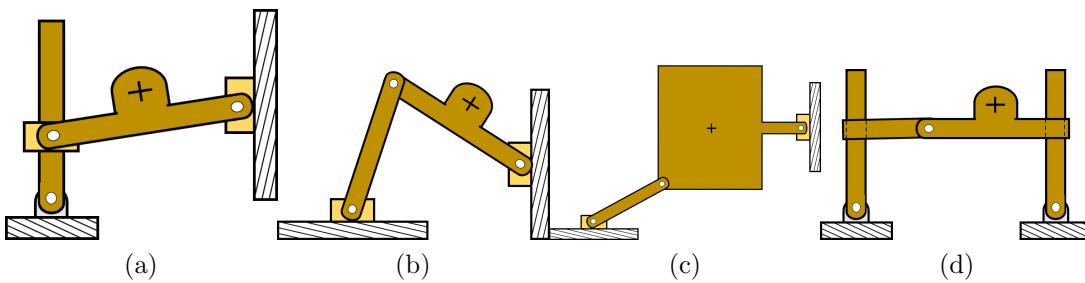


Figura 29: Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 5, 0, 0)

4.2.2. Síntesis de número para mecanismo 7 barras, 2 GdL

Obtenidas las propuestas para el mecanismo 5 barras, se continúa con los diseños para un 7 barras, 2 GdL. Es importante recordar que, para números de grados de libertad pares, la solución requiere de cadenas cinemáticas con números de barras impares. Por ende, el siguiente conjunto de soluciones se puede hallar en eslabonamientos de 7 barras.

Como en el anterior caso, se realizará exactamente el mismo procedimiento para la síntesis de número, por tal razón, por efectos prácticos se será mucho más conciso esta ocasión, haciendo énfasis en los resultados más que en el procedimiento paso a paso.

Inicialmente, se emplea la primera ecuación para hallar el orden máximo de las barras y los pares cinemáticos:

$$N/2 = 3,5$$

Al aproximar el resultado al entero directamente superior podemos deducir que cualquier cadena cinemática que sea solución del problema solo puede tener barras y pares de orden máximo cuaternario.

Posteriormente, una vez acotadas y reorganizadas las ecuaciones 2, 3 y 4, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$n_2 = N - n_3 - n_4 \quad (11)$$

$$p_3 = N - G - 3 - n_3 - 2(n_4 + p_4) \quad (12)$$

$$- 2n_2 + 2p_2 + 3p_3 = 3n_3 + 4n_4 - 4p_4 \quad (13)$$

El cual puede ser expresado como un sistema lineal de ecuaciones de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_2 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7 - n_3 - n_4 \\ 2 - n_3 - 2(n_4 + p_4) \\ 3n_3 + 4n_4 - 4p_4 \end{bmatrix}$$

Para este arreglo de ecuaciones se asumirán valores para $[n_3, n_4, p_4]$ empezando desde $[0,0,0]$ e incrementando iterativamente una de las variables hasta que la solución presente un valor negativo, volviéndola así invalida. Al obtener una solución de este tipo, se incrementa la siguiente variable y

se repite el mismo ciclo para así calcular todas las posibles cadenas cinemáticas que cumplan con los requerimientos. De este proceso iterativo, y una vez excluidas las soluciones inválidas, obtenemos el siguiente conjunto de soluciones:

n_3	n_4	p_4	n_2	p_2	p_3
0	0	0	7	4	2
1	0	0	6	6	1
2	0	0	5	8	0
0	1	0	6	8	0
0	0	1	7	5	0

Tabla 10: Cadenas cinemáticas para mecanismos 7 barras, 2 GDL

Como en el caso del 5 barras, el código base de Matlab es modificado para acomodarse a los parámetros actuales. El resultado es el siguiente código:

```

1 clc, clear all, close all, format compact
2
3 % mechanisms configuration
4 G = 2;           % number of DOF
5 N = 7;           % number of bars
6 M = G + 3;       % movility
7 fprintf ('\n Mechanism config.: M%dB %dDOF\n Chain:\n',N,G)
8
9 cont = 1;
10 for(n2 = 4 : N)
11     for(n4 = 0 : N)
12         for(p4 = 0 : N)
13             % Equations
14             % [n3    p3    p2    constrans]
15             eqs = [[ 1    0    0    N-n2-n4]                      % eq.4
16                   [-1   -1    0    (M-N)+2*(n4+p4)]          % eq.5
17                   [-3    3    2    2*n2+4*n4-4*p4]];        % eq.6
18
19             % lineal eq. system: B = X*A
20             A = eqs(:,1:3);
21             B = eqs(:,4);
22
23             X = linsolve(A,B);
24
25             % to discard the no.valid results
26             X = round(X);
27             if(X >= 0)
28                 n3      = X(1);
29                 p3      = X(2);
30                 p2      = X(3);

```

```

31         fprintf( ' (%d , %d , %d , %d , %d , %d ) \n ' , n2 , p2 , n3 , p3 , n4 , p4 ) ;
32     end
33 end
34 end
35 end

```

Este realiza un proceso de iteración para los valores de n_2 , n_4 y p_4 que finalmente ofrece el siguiente conjunto de soluciones:

- (5,8,2,0,0,0)
- (6,6,1,1,0,0)
- (6,8,0,0,1,0)
- (7,4,0,2,0,0)
- (7,5,0,0,0,1)

Ya calculadas las numeraciones de las cadenas cinemáticas, se puede identificar los isómeros de dichas numeraciones. En las siguientes figuras se presentan algunos isómeros identificados de las cadenas cinemáticas (5, 8, 2, 0, 0, 0), (6, 6, 1, 1, 0, 0), (6, 8, 0, 0, 1, 0), (7, 4, 0, 2, 0, 0), y (7, 5, 0, 0, 0, 1) respectivamente.

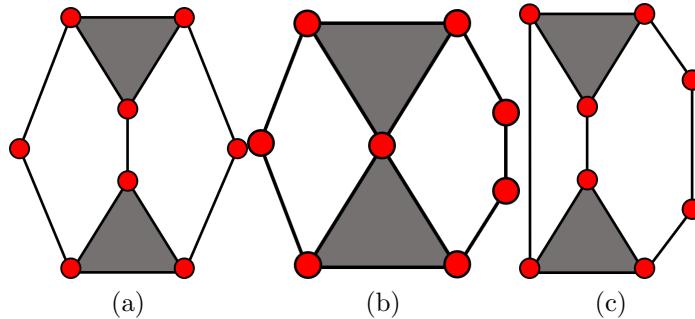


Figura 30: Isómeros de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0)

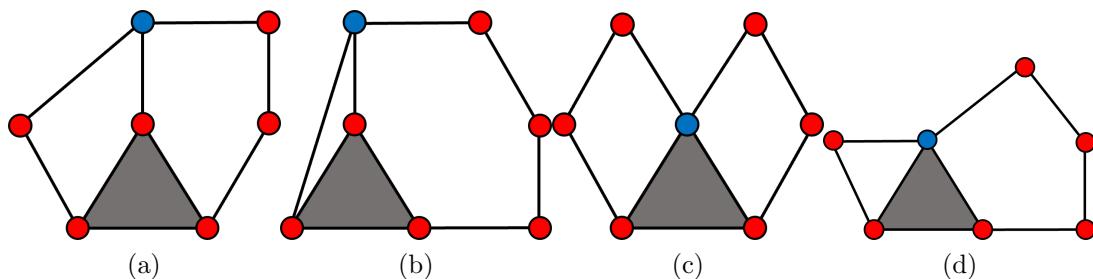
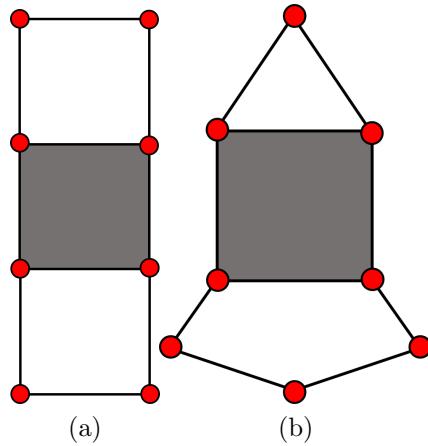
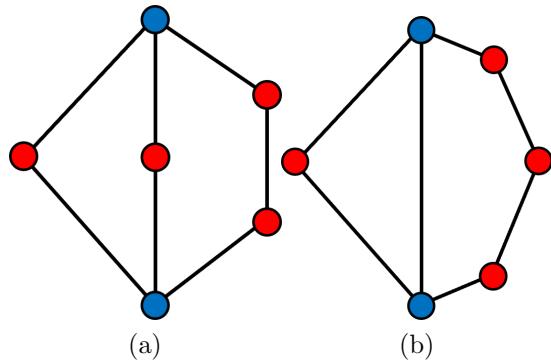
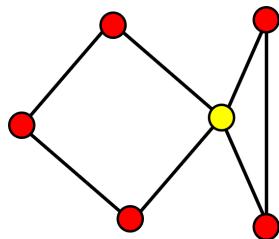


Figura 31: Isómeros de la cadena cinemática (6, 6, 1, 1, 0, 0)

Figura 32: Isómeros de la cadena cinemática $(6, 8, 0, 0, 1, 0)$ Figura 33: Isómeros de la cadena cinemática $(7, 4, 0, 2, 0, 0)$ Figura 34: Isómero de la cadena cinemática $(7, 5, 0, 0, 0, 1)$

A continuación, en la tabla 9, se realiza la evaluación de los isómeros obtenidos a la luz de las especificaciones básicas de diseño por medio de una matriz de PUGH.

Isómero	Ciclos independientes	Simetría	Pares ternarios o de mayor orden	Barras cuaternarias o de mayor orden	Evaluación
Fig. 32a (Ref)	-	-	-	-	-
Fig. 32b	0	0	0	0	0
Fig. 32c	0	0	0	0	0
Fig. 33a	0	-1	-1	0	-2
Fig. 33b	0	-1	-1	0	-2
Fig. 33c	-1	0	-1	0	-2
Fig. 33d	-1	-1	-1	0	-3
Fig. 34a	0	0	-1	0	-1
Fig. 34b	0	0	-1	0	-1
Fig. 35a	-1	0	0	-1	-2
Fig. 35b	-1	0	0	-1	-2
Fig. 36	-1	-1	-1	0	-3

Tabla 11: Matriz de PUGH para isómeros de 7 barras, 2 GdL

Para comprender a mayor detalle los criterios de evaluación, en la tabla 10 se describe como se califica cada uno. Cabe aclarar, la evaluación se realiza con respecto al mecanismo escogido como referencia.

Parámetro	Calificación -1	Calificación 0	Calificación +1
Ciclos independientes	Tiene mayor cantidad de ciclos independientes	Tiene la misma cantidad de ciclos independientes	Tiene menor cantidad de ciclos independientes
Simetría	No existe simetría con respecto a un eje	Existe simetría con respecto a uno o más ejes	N/A
Pares ternarios o de mayor orden	Tiene mayor cantidad de pares ternarios o de mayor orden	Tiene la misma cantidad de pares ternarios o de mayor orden	Tiene menor cantidad de pares ternarios o de mayor orden
Barras cuaternarias o de mayor orden	Tiene mayor cantidad de barras cuaternarias o de mayor orden	Tiene la misma cantidad de barras cuaternarias o de mayor orden	Tiene menor cantidad de barras cuaternarias o de mayor orden

Tabla 12: Criterios de evaluación de matriz de PUGH

De la tabla 10 se evidencia que solo hay 3 isómeros útiles derivados de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0). Una vez delimitados los isómeros disponibles para conceptualización, se procede a realizar la inversión cinemática de la barra de chasis. Las inversiones cinemáticas de estos eslabonamientos se presentan en la figura 35.

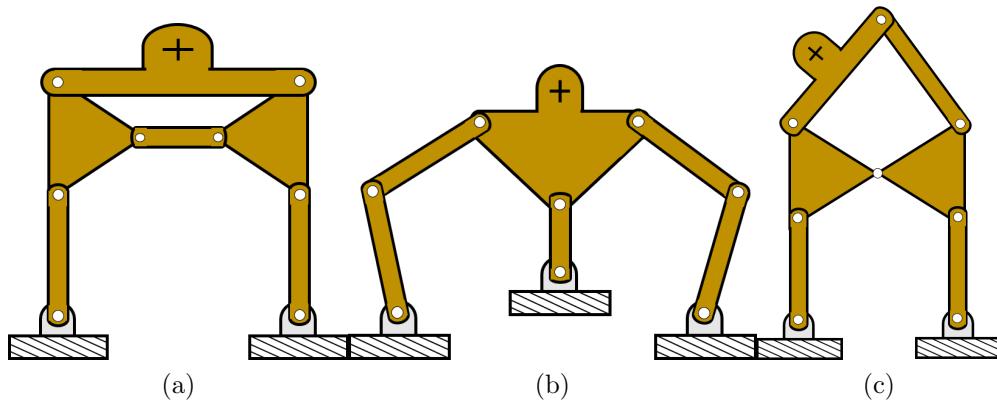


Figura 35: Mecanismos resultantes de las inversiones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0)

Haciendo uso de la ecuación de Grubler es posible verificar que los mecanismos obtenidos en efecto poseen 2 GdL.

$$GdL = 3(N - 1) - 2(P) \quad (14)$$

$$GdL = 3(7 - 1) - 2(8) = 2$$

De estos mecanismos resultantes, se utilizan las reglas de transformación cinemática para materializar los conceptos (figura 36).

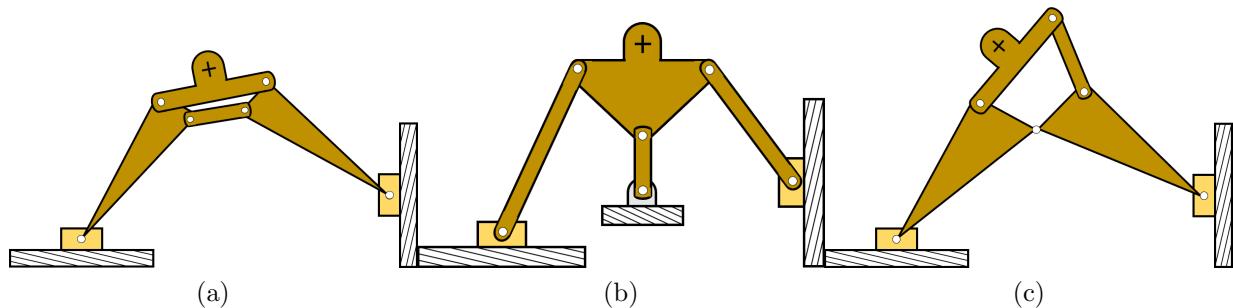


Figura 36: Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0)

De la exploración realizada para concebir estos mecanismos, se diseñó un mecanismo para la cadena cinemática (6, 6, 1, 1), el cual, aunque no va a ser utilizado, se presenta a continuación (figura 37) como muestra de este proceso.

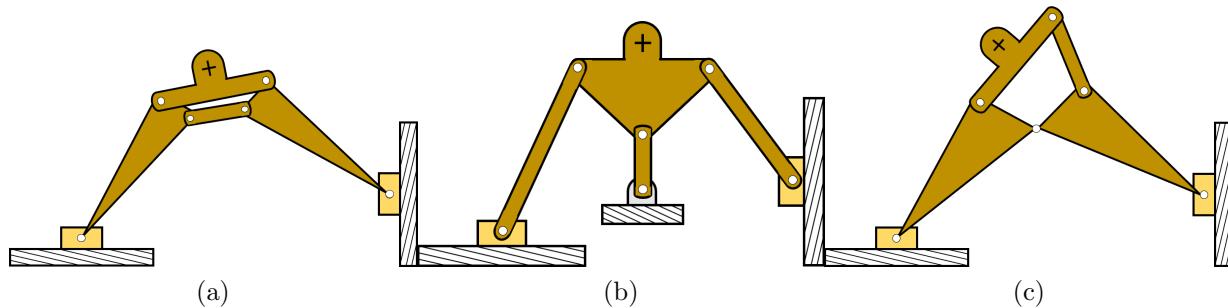


Figura 37: Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 8, 2, 0, 0, 0)

De la exploración realizada para concebir estos mecanismos, se diseñó un mecanismo para la cadena cinemática (6, 6, 1, 1, 0, 0), el cual, aunque no va a ser utilizado, se presenta a continuación (figura 38) como muestra de este proceso.

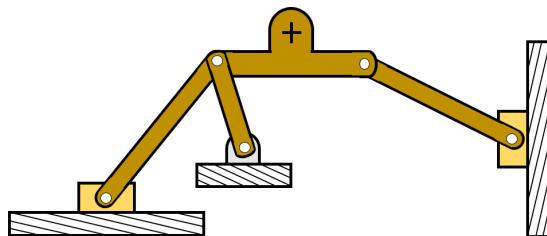


Figura 38: Mecanismo resultante de la transformación cinemática de la cadena cinemática (6, 6, 1, 1, 0, 0)

4.2.3. Síntesis de número para mecanismo 9 barras, 2 GdL

El procedimiento empleado anteriormente se volverá a aplicar en este nuevo caso de estudio. Inicialmente, valiéndose de la primera ecuación, inferimos que el orden máximo será quinario, obteniendo así el sistema de ecuaciones:

$$n_2 = N - n_3 - n_4 - n_5 \quad (15)$$

$$p_3 = N - G - 3 - n_3 - 2(n_4 + p_4) - 3(n_5 + p_5) \quad (16)$$

$$- 2n_2 + 2p_2 + 3p_3 = 3n_3 + 4n_4 + 5n_5 - 4p_4 - 5p_5 \quad (17)$$

Posteriormente, se reescribe como un sistema lineal de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_2 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 - n_3 - n_4 - n_5 \\ 4 - n_3 - 2(n_4 + p_4) - 3(n_5 + p_5) \\ 3n_3 + 4n_4 + 5n_5 - 4p_4 - 5p_5 \end{bmatrix}$$

Realizando el proceso iterativo se obtienen los siguientes resultados válidos:

n_3	n_4	n_5	p_4	p_5	n_2	p_2	p_3
0	0	0	2	0	9	5	0
0	0	0	1	0	9	4	2
0	0	0	0	1	9	5	1
0	0	0	0	0	9	3	4
0	1	0	1	0	8	8	0
0	1	0	0	0	8	7	2
1	0	0	1	0	8	6	1
0	0	1	0	0	8	9	1
1	0	0	0	1	8	7	0
1	0	0	0	0	8	5	3
0	2	0	0	0	7	11	0
1	1	0	0	0	7	9	1
2	0	0	1	0	7	8	0
1	0	1	0	0	7	11	0
2	0	0	0	0	7	7	2
2	1	0	0	0	6	11	0
3	0	0	0	0	6	9	1
4	0	0	0	0	5	11	0

Tabla 13: Cadenas cinemáticas para mecanismos 9 barras, 2 GdL

Para este caso, el código de Matlab usado es el siguiente:

```

1 clc, clear all, close all, format compact
2
3 % mechanisms configuration
4 G = 2;           % number of DOF
5 N = 9;           % number of bars
6 M = G + 3;       % movility
7 fprintf('\n Mechanism config.: M%dB %dDOF\n Chain:\n',N,G)
8
9 cont = 1;
10 for(n2 = 4 : N)
11     for(n4 = 0 : N)
12         for(p4 = 0 : N)
13             for(n5 = 0 : N)
14                 for(p5 = 0 : N)
15                     % Equations
16                     % [n3    p3    p2    constrans]
17                     eqs = [[ 1      0      0      N-n2-n4-n5]          % eq.4
18                            [-1     -1      0      (M-N)+2*(n4+p4)+3*(n5+p5)]      %
19                            [-3      3      2      2*n2+4*n4+5*n5-4*p4-5*p5]];      %
19                     eq.6
20

```

```

21          % lineal eq. system: B = X*A
22          A = eqs(:,1:3);
23          B = eqs(:,4);
24
25          X = linsolve(A,B);
26
27          % to discard the no.valid results
28          X = round(X);
29          if(X >= 0)
30              n3      = X(1);
31              p3      = X(2);
32              p2      = X(3);
33              fprintf(' (%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d)\n',n2,p2,n3,
34                                p3,n4,p4,n5,p5);
35          end
36      end
37  end
38 end
39 end

```

Este realiza un proceso de iteración para los valores de n_2 , n_4 , p_4 , n_5 , y p_5 que finalmente ofrece el siguiente conjunto de soluciones:

- (5,11,4,0,0,0,0,0)
- (6,9,3,1,0,0,0,0)
- (6,11,2,0,1,0,0,0)
- (7,7,2,2,0,0,0,0)
- (7,11,1,0,0,0,1,0)
- (7,8,2,0,0,1,0,0)
- (7,9,1,1,1,0,0,0)
- (7,11,0,0,2,0,0,0)
- (8,5,1,3,0,0,0,0)
- (8,7,1,0,0,0,0,1)
- (8,9,0,1,0,0,1,0)
- (8,6,1,1,0,1,0,0)
- (8,7,0,2,1,0,0,0)
- (8,8,0,0,1,1,0,0)

- (9,3,0,4,0,0,0,0)
- (9,5,0,1,0,0,0,1)
- (9,4,0,2,0,1,0,0)
- (9,5,0,0,0,2,0,0)

Ya calculadas las numeraciones de las cadenas cinemáticas se puede identificar los isómeros de dichas numeraciones. En las siguientes figuras se presentan algunos isómeros identificados de las cadenas cinemáticas (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0), (6, 9, 3, 1, 0, 0, 0, 0), (6, 11, 2, 0, 1, 0, 0, 0), (7, 7, 2, 2, 0, 0, 0, 0), (7, 8, 2, 0, 0, 1, 0, 0), (7, 9, 1, 1, 1, 0, 0, 0), (7, 11, 0, 0, 2, 0, 0, 0), (8, 5, 1, 3, 0, 0, 0, 0), y (8, 8, 0, 0, 1, 1, 0, 0) respectivamente.

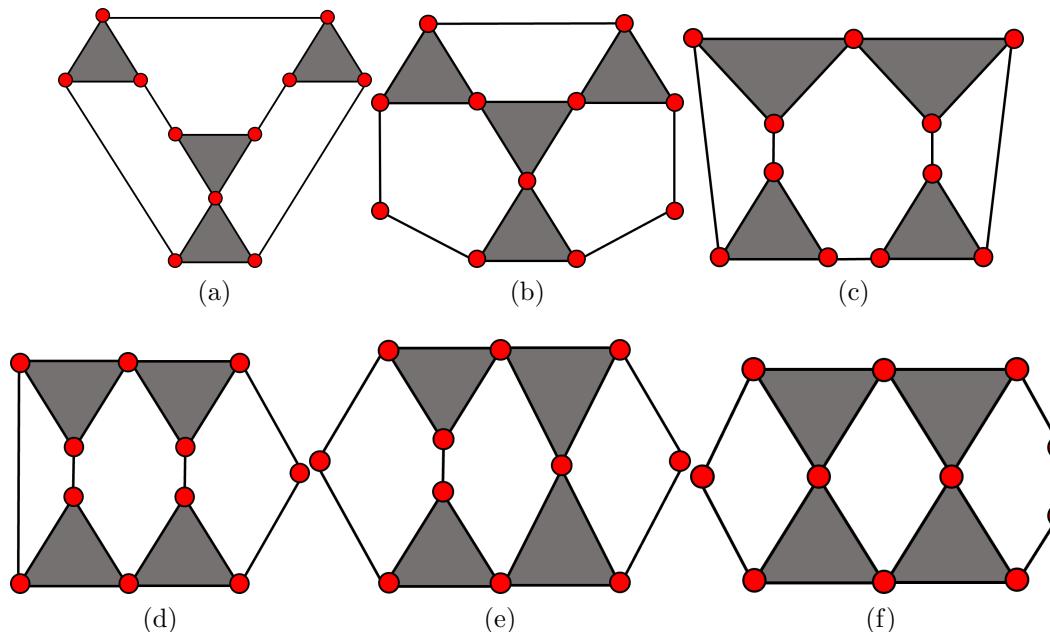


Figura 39: Isómeros de la cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0)

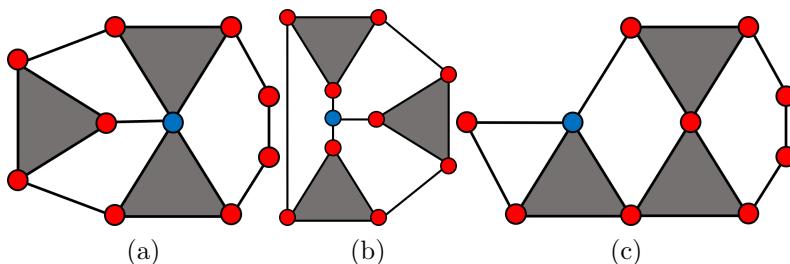
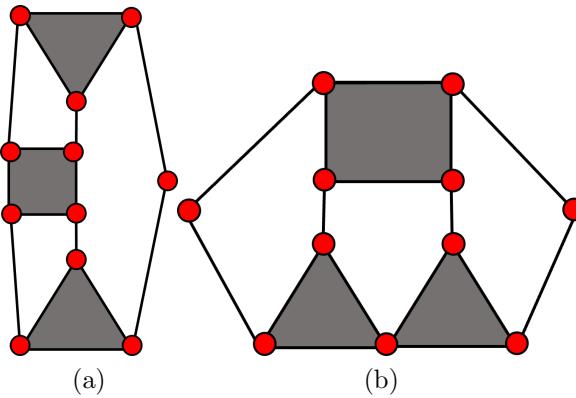
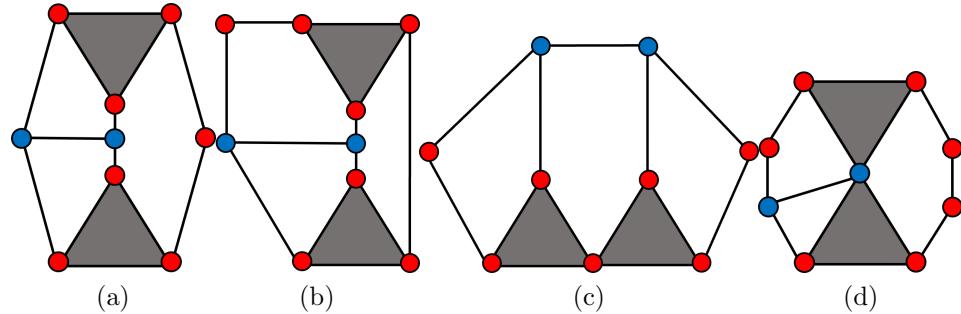
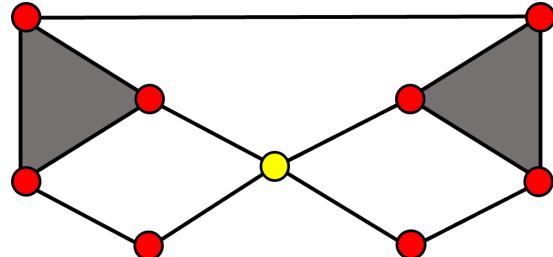


Figura 40: Isómeros de la cadena cinemática (6, 9, 3, 1, 0, 0, 0, 0)

Figura 41: Isómeros de la cadena cinemática $(6, 11, 2, 0, 1, 0, 0, 0)$ Figura 42: Isómeros de la cadena cinemática $(7, 7, 2, 2, 0, 0, 0, 0)$ Figura 43: Isómero de la cadena cinemática $(7, 8, 2, 0, 0, 1, 0, 0)$

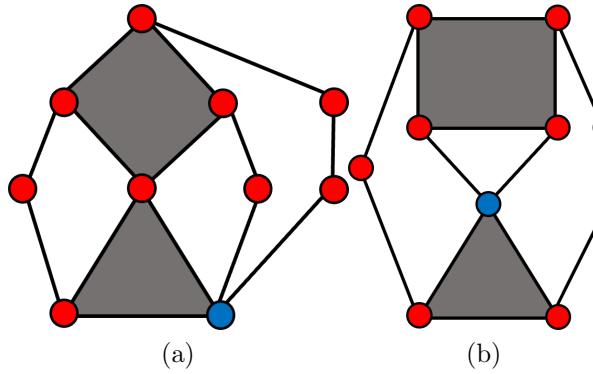


Figura 44: Isómeros de la cadena cinemática (7, 9, 1, 1, 1, 0, 0, 0)

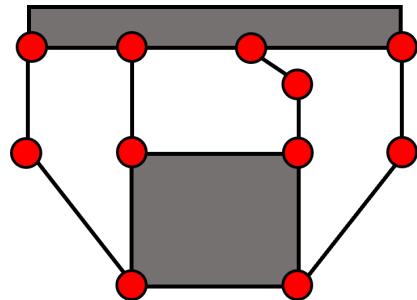


Figura 45: Isómero de la cadena cinemática (7, 11, 0, 0, 2, 0, 0, 0)

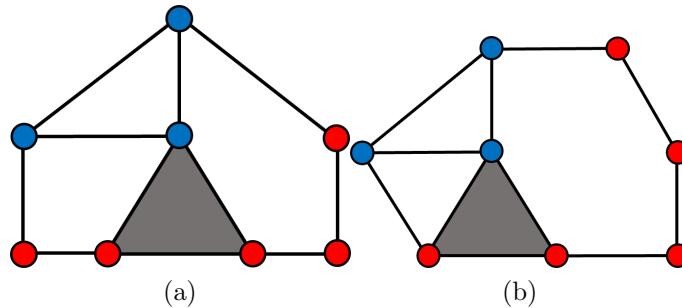


Figura 46: Isómeros de la cadena cinemática (8, 5, 1, 3, 0, 0, 0, 0)

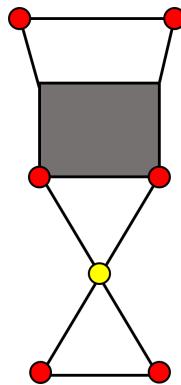


Figura 47: Isómero de la cadena cinemática (8, 8, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0)

A continuación, en la tabla 12, se realiza la evaluación de los isómeros obtenidos a la luz de las especificaciones básicas de diseño por medio de una matriz de PUGH.

Isómero	Ciclos independientes	Simetría	Pares ternarios o de mayor orden	Barras cuaternarias o de mayor orden	Evaluación
Fig. 41a (Ref)	-	-	-	-	-
Fig. 41b	0	0	0	0	0
Fig. 41c	0	0	0	0	0
Fig. 41d	0	0	0	0	0
Fig. 41e	0	0	0	0	0
Fig. 41f	0	0	0	0	0
Fig. 42a	0	0	-1	0	-1
Fig. 42b	0	0	-1	0	-1
Fig. 42c	-1	-1	-1	0	-3
Fig. 43a	0	0	0	-1	-1
Fig. 43b	0	0	0	-1	-1
Fig. 44a	0	0	-1	0	-1
Fig. 44b	0	-1	-1	0	-2
Fig. 44c	0	0	-1	0	-1
Fig. 44d	0	-1	-1	0	-2
Fig. 45a	0	0	-1	0	-1
Fig. 46a	0	-1	-1	-1	-3
Fig. 46b	0	0	-1	-1	-2
Fig. 47	0	-1	0	-1	-2
Fig. 48a	0	-1	-1	0	-2
Fig. 48b	0	-1	-1	0	-2
Fig. 49	-1	-1	-1	-1	-4

Tabla 14: Matriz de PUGH para isómeros de 9 barras, 2 GdL

De la tabla 12 se evidencia que solo hay 6 isómeros útiles derivados de la cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0). Una vez delimitados los isómeros disponibles para conceptualización, se procede

a realizar la inversión cinemática de la barra de chasis únicamente para los isómeros de la figura 39a y 39b, pues se considera que estos son los que mejor se pueden adaptar al problema tratado. Las inversiones cinemáticas de estos eslabonamientos se presentan en la figura 48.

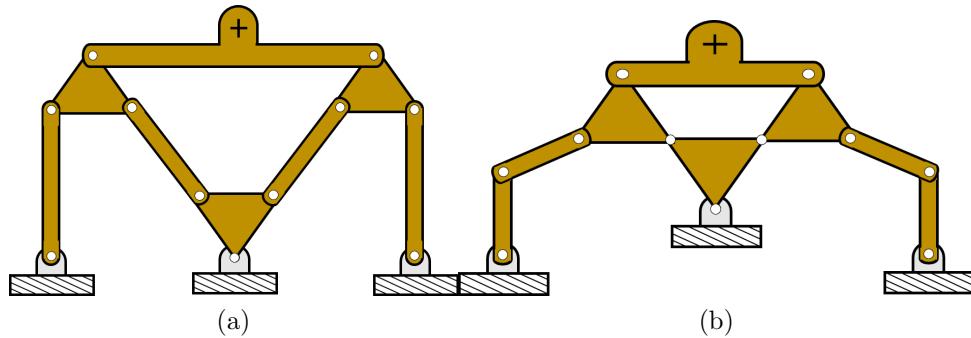


Figura 48: Mecanismos resultantes de las inversiones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0)

Haciendo uso de la ecuación de Grubler es posible verificar que los mecanismos obtenidos en efecto poseen 2 GdL.

$$GdL = 3(9 - 1) - 2(11) = 2$$

De los mecanismos resultantes, se utilizan las reglas de transformación cinemática para materializar los conceptos (figura 49).

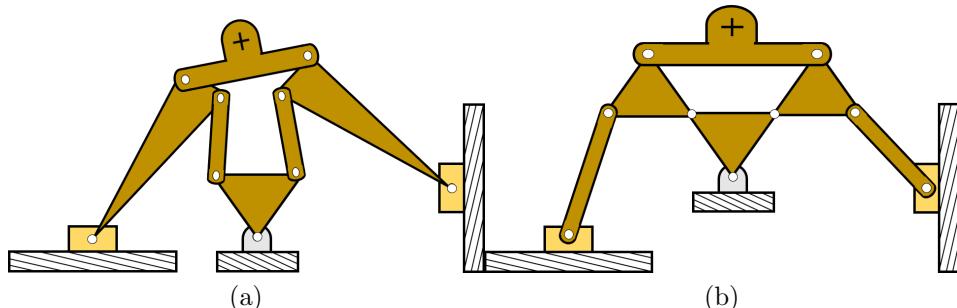


Figura 49: Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de la cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0)

De la exploración realizada para concebir estos mecanismos, se diseñaron diferentes conceptos para las cadenas cinemáticas (6, 9, 3, 1, 0, 0, 0, 0), (7, 7, 2, 2, 0, 0, 0, 0), (7, 9, 1, 1, 1, 0, 0, 0), y (7, 11, 0, 0, 2, 0, 0, 0), los cuales, aunque no van a ser utilizados, se presentan a continuación (figura 50) en el orden previamente mencionado.

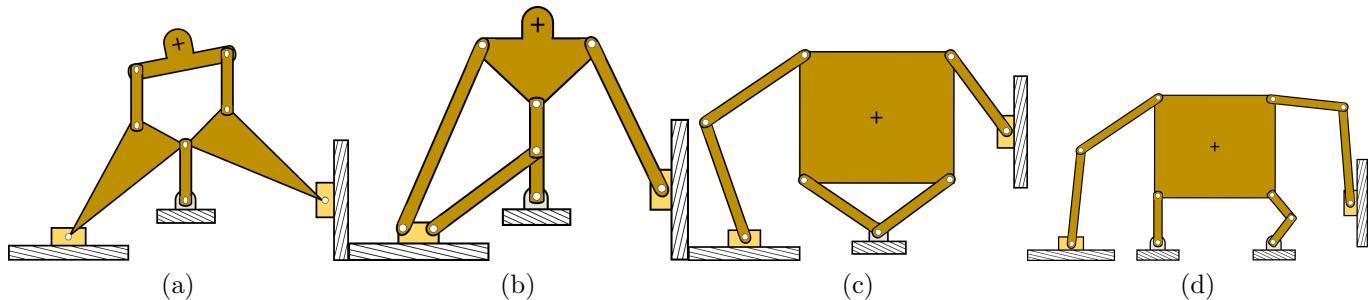


Figura 50: Mecanismos resultantes de las transformaciones cinemáticas de las cadenas cinemáticas (a) (6, 9, 3, 1, 0, 0, 0, 0), (b) (7, 7, 2, 2, 0, 0, 0, 0), (c) (7, 9, 1, 1, 1, 0, 0, 0), y (d) (7, 11, 0, 0, 2, 0, 0, 0)

4.3. Selección del mecanismo para la propuesta

Tras el proceso de descarte realizado para cada conjunto de cadenas cinemáticas, obtenemos un grupo de los diseños más prometedores, como se puede observar en la figura 51.

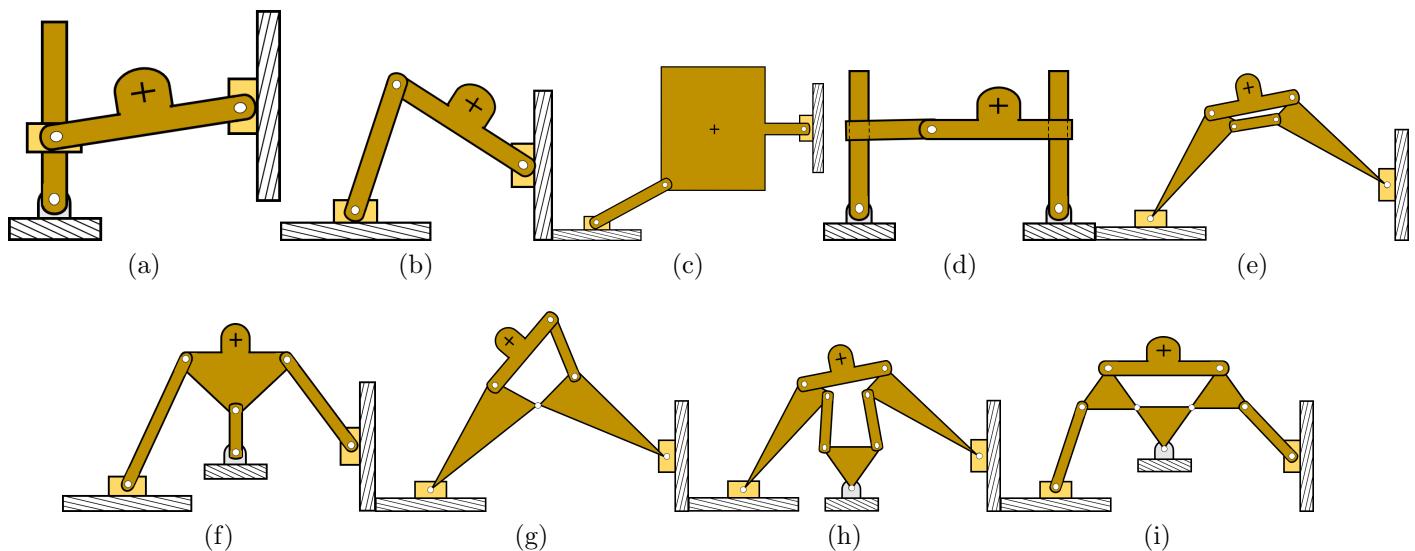


Figura 51: Mecanismos finalistas en el proceso de filtrado

De entrada, se puede descartar el mecanismo 53c. Uno de los requerimientos básicos indica que solo se buscan diseños con herramienta de corte móvil y mesa de corte fija, algo que este modelo no cumple.

De igual forma, los mecanismos 53a y 53d no cumplen con el requisito de tener los sistemas de actuación sobre el mismo plano del chasis. Este requerimiento surge por cuestiones de estabilidad y facilidad de manufactura. El sistema de actuación que será empleado tiene un peso considerable, lo que implica no solo la construcción de un soporte lo suficientemente rígido para soportar el motor, las guías y el tornillo de potencia, sino que también debe facilitar la rotación de este conjunto de

piezas de la manera más estable posible para que la herramienta de corte no sufra desbalances.

Tras prescindir de estas tres opciones, se continúa el proceso de filtrado con los mecanismos remanentes. Para ello, se aplicará de nuevo una matriz de PUGH, donde se evaluarán aspectos más específicos mencionados en los requerimientos básicos de diseño.

Mecanismo	Factor innovador	Movilidad	Facilidad de manufactura y ensamble	Estabilidad	Evaluación
Fig. 53b (Ref)	-	-	-	-	-
Fig. 53e	0	-1	-1	0	-2
Fig. 53f	0	0	-1	0	-1
Fig. 53g	0	-1	-1	+1	-1
Fig. 53h	+1	0	-1	+1	+1
Fig. 53i	+1	0	-1	+1	+1

Tabla 15: Matriz de PUGH para mecanismos seleccionados

Para comprender a mayor detalle los criterios de evaluación, en la siguiente tabla se detalla cómo se califica cada uno. En este caso particular, el método de evaluación es un poco más subjetivo y está sujeto a mi interpretación y análisis de lo que logro percibir de los mecanismos. Por tanto, otra persona puede fácilmente reevaluar los diseños bajo su propio juicio o incluso utilizar otros parámetros de evaluación.

Parámetro	Calificación -1	Calificación 0	Calificación +1
Factor innovador	N/A	El mecanismo presenta un diseño igual de común popularmente seleccionado	El mecanismo presenta un diseño innovador escasamente seleccionado
Movilidad	Tiene menor movilidad debido a barras que limitan su movimiento y área de trabajo	Tiene un buen rango de movimiento y área de trabajo, y no se ve limitado por ninguna barra	Tiene un rango de movimiento y área de trabajo sobresalientes, y un diseño optimizado
Facilidad de manufactura y ensamble	Su proceso de manufactura y ensamble resulta más laborioso, ya sea por la cantidad de barras o por el orden de estas	Su proceso de manufactura y ensamble es igual de laborioso	Su proceso de manufactura y ensamble es menos laborioso
Estabilidad	Tiene una menor estabilidad estructural, provocando imprecisión en los resultados	Tiene una estabilidad estructural similar	Tiene una mayor estabilidad estructural

Tabla 16: Criterios de evaluación de matriz de PUGH

Con base al resultado de la evaluación, los mecanismos 51h y 51i son los más óptimos para ser corporizados y formalizados. No obstante, más por una apreciación personal que por decisión técnica,

se decidió continuar con el mecanismo 51h y, por tanto, la propuesta se basará en este. Con base a esta decisión, podemos realizar la matriz de adyacencia para representar la topología del mecanismo. Esta matriz se fundamenta en la siguiente enumeración:

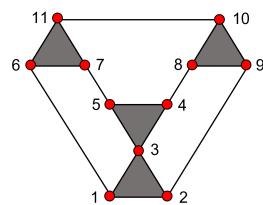


Figura 52: Enumeración de los pares para la matriz de adyacencia

La matriz es la siguiente:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
3	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
5	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
7	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
8	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
9	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
11	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0

Tabla 17: Matriz de adyacencia del mecanismo 51h

5. Diseño conceptual

5.1. Caja negra

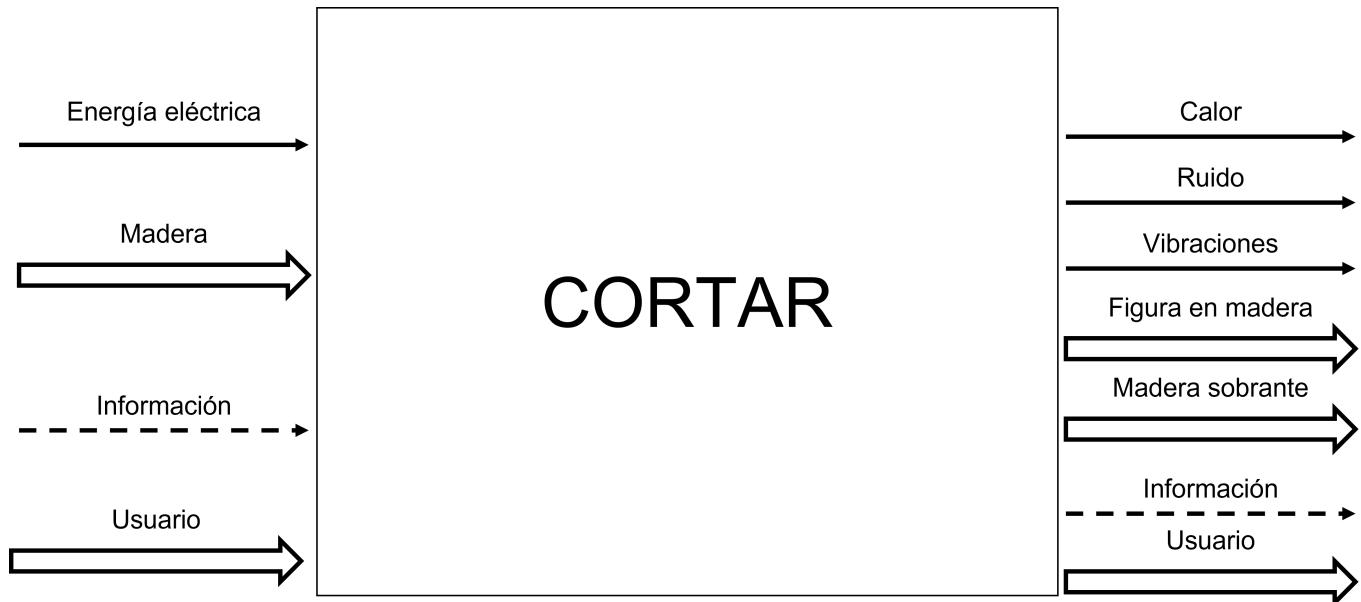


Figura 53: Caja negra

5.2. Estructura funcional

Portador	Función básica	Base funcional	Flujo de entrada	Flujo de salida
Computador	Separar	Extraer	Usuario	Datos de corte, usuario y datos de retroalimentación
Microcontrolador	Transformar	Convertir	Datos de corte	Señal digital de pulsos
Enchufe	Transportar	Importar	e.e	e.e
Cable	Transportar	Transportar	e.e	e.e
Fuente	Variar	Decrementar	e.e voltaje alto	e.e voltaje bajo
Controlador	Unir	Actuar	e.e & señal digital de pulsos	Encendido controlado
Motor	Transformar	Convertir	Encendido controlado	e.m.r
Acople	Transportar	Transferir	e.m.r	e.m.r
Tornillo	Transformar	Convertir	e.m.r	e.ml actuación
Guías	Transportar	Transferir	e.ml actuación	e.ml actuación
Mecanismo	Transformar	Convertir	e.ml actuación	Desplazamiento y fuerza de efección
Motortool	Transformar	Convertir	e.e	e.m.r
Motortool	Unir	Acoplar	Desplazamiento y fuerza de efección &	Energía localizada de corte y calor e.m.r
Fijación	Almacenar	Asegurar	Pieza de corte	Pieza asegurada
Chasis	Almacenar	Soportar	Mecanismo	Mecanismo soportado
Fresa	Separar	Dividir	Pieza de corte	Pieza cortada, madera sobrante, ruido, y vibración

Tabla 18: Lista de portadores de función. El flujo **e.e** es abreviación para **energía eléctrica**, mientras **e.m.r** y **e.m.l** es para **energía mecánica rotacional** y **energía mecánica lineal**.

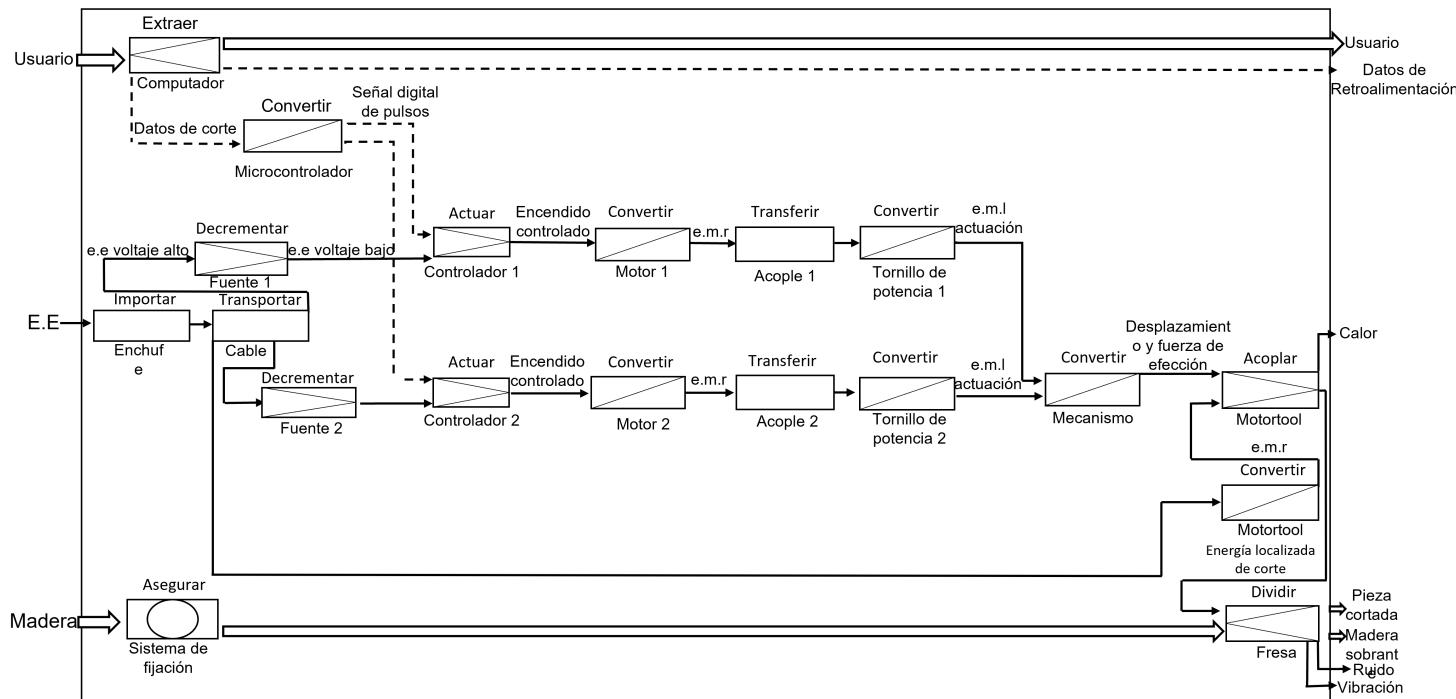


Figura 54: Estructura funcional de la ruteadora CNC propuesta

5.3. Requerimientos técnicos

Tabla 19: Requerimientos técnicos para la ruteadora CNC basados en el concepto de la fig. 9. Se emplean las siguientes abreviaciones: C.P - Característica de Producto, C.F - Característica Funcional, L.C - Límite de característica. Nota: al inicio de cada elemento se especifica en la columna de clasificación a qué clasificación pertenece cada métrica de ese punto en adelante. En algunos casos, hay dos clasificaciones por elemento. En estos casos, una vez haya una métrica con diferente clasificación, se usará la abreviación para indicar la nueva clasificación a la que pertenecen todas las métricas de ese punto en adelante.

Nombre	Elemento funcional	Atributo	Clasificación	Métrica	Valor
Energía eléctrica	Flujo de entrada	Adjetivo	C.F	Voltaje	12-60 V
				Amperaje	6A
				Tipo de corriente	Continua
Cable	Portador	Adjetivo	C.P	Longitud	$\leq 1m$
Lámina de madera	Flujo de entrada	Adjetivo	C.P	Tipo	Madera blanda
				Dureza	Pendiente de cálculo
				Ancho	$\leq 20cm$
				Largo	$\leq 20cm$

Continúa en la siguiente página

Tabla 19 – Continuación de la página anterior

Nombre	Elemento funcional	Atributo	Clasificación Métrica	Valor	
Sistema de fijación (mesa de corte)	Portador	Adjetivo	C.P	Alto Materiales Tipo Componentes Falla estática Fatiga Pandeo Deflexión admisible Fuerzas de reacción Momentos	$\geq 5\text{mm}$ Pendiente de diseño Pendiente de diseño Pendiente de diseño Pendiente de cálculo Pendiente de cálculo Fuente de cálculo Pendiente de cálculo Fuente conmutada de 24 VCD a 10 A AC110-220V Voltaje de entrada Frecuencia de entrada Voltaje de salida Amperaje de salida Largo Ancho Alto Peso Protección Material de Shell
Fuente	Portador	Adjetivo	C.P	L.C Potencia máxima de salida 240 W	24V 50/60Hz 24V 10 A 20 cm 11 cm 5 cm 629 g Cortocircuito / sobrecarga / sobretensión metal / base de aluminio
Usuario	Flujo de entrada	Adjetivo	C.F	Tipo de archivo Software Formato Tamaño del archivo	CAM SOLIDWORKS SLDPRT o SLDASM $\leq 50\text{MB}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 19 – *Continuación de la página anterior*

Nombre	Elemento funcional	Atributo	Clasificación	Métrica	Valor
Computador	Portador	Adjetivo	C.P	Procesador (CPU) Memoria RAM Tarjeta gráfica (GPU) Almacenamiento Memoria Programas Puertos Formato	\geq IntelCorei5 $\geq 4GB$ AMD Radeon o Nvidia Geforce $\geq 500GB$ $\geq 4GB$ y $\geq 3200MHz$ Matlab USB-C o USB 3.0 Código G
Datos de corte	Flujo de salida	Adjetivo	C.F	Tamaño del archivo	$\leq 50MB$
Extracción de datos de corte	Función	Adverbio	C.F	Tiempo de procesamiento	$\leq 1min$
Arduino	Portador	Adjetivo	C.P	Tipo Microcontrolador Peso Longitud Ancho Velocidad de reloj Voltaje de trabajo Voltaje de entrada Corriente DC por pin Pinout Puertos Memoria	Arduino Uno R3 ATMega328P 25g 68.6mm 53.4mm 16 MHz 5V 7 a 12 V 20mA 14 pines digitales (6 PWM) y 6 pines analógicos 1 puerto serial por hardware 32 KB Flash (0.5 para bootloader), 2KB SRAM y 1KB Eeprom
Señal digital de pulsos	Flujo de salida	Adjetivo	C.F	Frecuencia de pulso	$\geq 490Hz$ y $\leq 980Hz$
				Voltaje de pulso	5V

Continúa en la siguiente página

Tabla 19 – *Continuación de la página anterior*

Nombre	Elemento funcional	Atributo	Clasificación Métrica	Valor	
Conversión de Código G a pulsos	Función	Adverbio	C.F	Eficiencia	
Driver	Portador	Adjetivo	C.P	Modelo Peso Alto Ancho Largo Voltaje de entrada Temperatura de trabajo Salida de corriente Corriente de señal lógica Resistencia de aislamiento Comunicación	HB860H 580 g 151 mm 52 mm 97 mm VDC: 30 V a 100 V, VAC: 20 V a 70 V -20°C a 80°C 8.2 A $\geq 7 \text{ y } \leq 16mA$ 500MΩ
		L.C	Máxima corriente de impulso	5 A	
Encendido controlado	Flujo de salida	Adjetivo	C.F	Frecuencia de pulso Voltaje del pulso	
Decodificación Función y transmisión de pulsos		Adverbio	C.F	Eficiencia	
Motor	Portador	Adjetivo	C.P	Modelo Peso Alto Ancho Largo Longitud total Ángulo de paso Corriente de fase Resistencia de fase	86HB250-118BJ (Nema 34) 4.15 kg $85.8 \pm 2 \text{ mm}$ $85.8 \pm 2 \text{ mm}$ $118 \pm 1 \text{ mm}$ $\geq 118 \text{ y } \leq 146mm$ 1.8° 6 A $0.5\Omega \times 10\%$

Continúa en la siguiente página

Tabla 19 – *Continuación de la página anterior*

Nombre	Elemento funcional	Atributo	Clasificación Métrica	Valor
			Inductancia de fase	4.6 mH×20 %
			Capacidad de torque	86.7 kg/cm (8.5 N/m)
			AB/ABZ (PPR)	1000 rpm
			Diámetro de boquilla	73 mm
			Longitud del eje	32 ± 1 mm
			Diametro del eje	14 mm
			Alambrado	Unipolar/Bipolar
			Secuencia de encendido	Medio paso
			Soporte del eje	rodamientos
		L.C	Velocidad máxima	2000 rpm
e.m.r motor	Flujo de salida	Adjetivo	C.F	Torque Velocidad angular
				8.5 N/m $\geq 1000\text{rpm}$ y $\leq 2000\text{rpm}$
Tornillo de potencia (Ball Screw-kit)	Portador	Adjetivo	C.P	Número de pieza industrial
				SFU1
			Precisión de husillo de bolas	C7
			Diámetro del husillo de bolas	12 mm
			Longitud del husillo de bolas	500 mm
			Paso de rosca del husillo de bolas	4 mm
			Perfil de diente del husillo	Circular
			Número de hilos del husillo	1

Continúa en la siguiente página

Tabla 19 – *Continuación de la página anterior*

Nombre	Elemento funcional	Atributo	Clasificación Métrica	Valor
Guías	Portador	Avance de la tuerca	4 mm	
		Diámetro de bolas	2.381 mm	
		Carga nominal dinámica	400 kg	
		Carga nominal estática	670 kg	
		Diámetro de brida	42 mm	
		Barril de brida	22 mm	
		Superficies planas de la brida (superficie a superficie)	34 mm	
		Longitud de la tuerca	36 mm	
		Materiales	Pendiente de diseño	
		Falla estática	Pendiente de cálculo	
		Fatiga	Pendiente de cálculo	
		Pandeo	Pendiente de cálculo	
		Deflexión admisible	Pendiente de cálculo	
		Fuerzas de reacción	Pendiente de cálculo	
		Momentos	Pendiente de cálculo	
Análisis de posición	Pendiente de cálculo			
Análisis de velocidad	Pendiente de cálculo			
Análisis de aceleración	Pendiente de cálculo			
Longitud	400 mm			
Falla estática	Pendiente de cálculo			
Fatiga	Pendiente de cálculo			
Pandeo	Pendiente de cálculo			
Deflexión admisible	Pendiente de cálculo			
Fuerzas de reacción	Pendiente de cálculo			
Momentos	Pendiente de cálculo			

Continúa en la siguiente página

Tabla 19 – *Continuación de la página anterior*

Nombre	Elemento funcional	Atributo	Clasificación Métrica	Valor
e.m.l de actuación	Flujo de salida	Adjetivo	C.F	Fuerza lineal Velocidad lineal
Conversión e.m.r a e.m.l	Función Mecanismo	Adverbio	C.F	Eficiencia
Mecanismo	Portador	Adjetivo	C.P	Largo Ancho Alto Materiales Número de barras Número de pares cinemáticos Área de trabajo eje X Área de trabajo eje Y Área de trabajo eje Z Velocidad de desplazamiento Precisión de trabajo Falla estática Fatiga Pandeo Deflexión admisible Fuerzas de reacción Momentos Análisis de posición Análisis de velocidad Análisis de aceleración
Estructura del chasis	Portador	Adjetivo	C.F	Materiales

Continúa en la siguiente página

Tabla 19 – Continuación de la página anterior

Nombre	Elemento funcional	Atributo	Clasificación Métrica	Valor
			Componentes	Pendiente de diseño
			Falla estática	Pendiente de cálculo
			Fatiga	Pendiente de cálculo
			Pandeo	Pendiente de cálculo
			Deflexión admisible	Pendiente de cálculo
			Fuerzas de reacción	Pendiente de cálculo
			Momentos	Pendiente de cálculo
			Fuerza	Pendiente de cálculo
Desplazamiento y fuerza de efección	Flujo de salida	Adjetivo	C.F	
Motortool	Portador	Adjetivo	C.P	Desplazamiento Modelo Alto Ancho Largo Paso Material Voltaje Velocidad angular Potencia Largo del cable Potencia de rotación Velocidad angular Torque Momento Trabajo Modelo Tipo de fresa Tipo de punta Medida Orificios de montaje Dureza
e.m.r tortool	mo	Flujo de salida	Adjetivo	C.F
Fresa	Portador	Adjetivo	C.P	Pendiente de cálculo Dremel Stylo+ 6 cm 17 cm 29.5 cm 0.62 kg Poliuretano Bivolt 5000 – 22000 rpm 60 W 3 mts 60 W 5000 – 22000 rpm Pendiente de cálculo Pendiente de cálculo Pendiente de cálculo 105 Fresa de grabado Punta redonda 0.8 mm 6 orificios de montaje en la tuerca de brida Pendiente de cálculo

6. Propuesta de diseño

Fundado en la investigación y el proceso de diseño llevado a cabo en este documento, se decide plantear la siguiente propuesta como muestra de los aspectos generales que describirían la ruteadora.

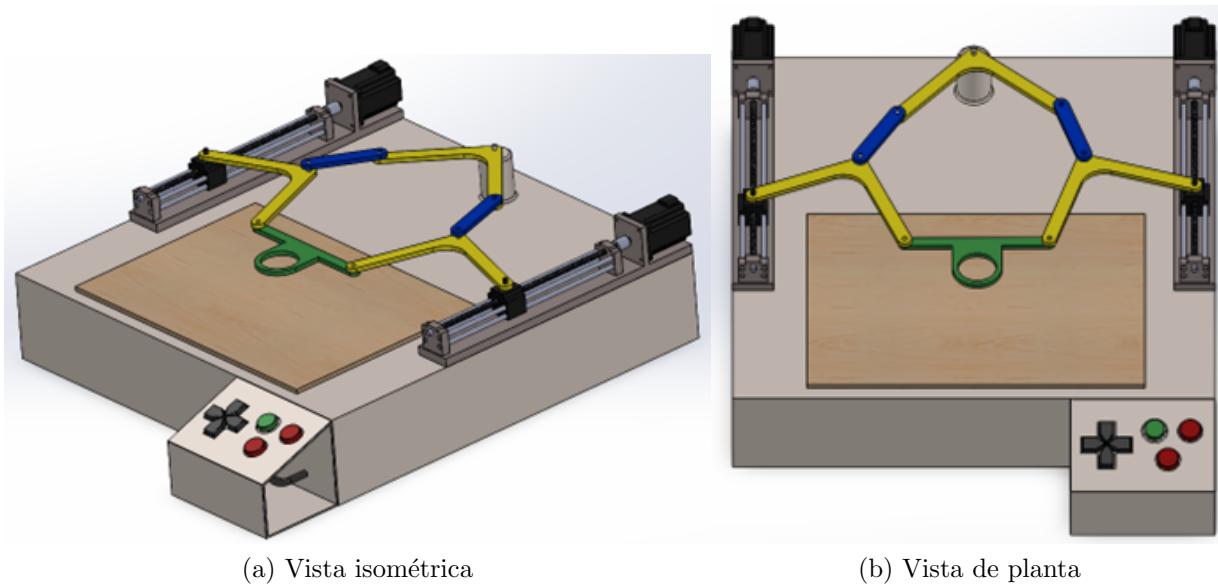


Figura 55: Propuesta para ruteadora con mecanismo 9 barras, 2 GdL, de cadena cinemática (5, 11, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 0)

Como se puede observar en la figura 55, la propuesta realizada se compone de dos actuadores (conjunto de motores y tornillos de potencia) en el mismo plano y fijos al chasis, 9 barras (4 ternarias y 5 binarias), 11 pares binarios, y 2 grados de libertad. Para efectos prácticos, las ternarias tienen color amarillo (incluyendo tierra), y las binarias color azul, verde (barra donde se conecta la herramienta de corte), y negro (carros conectados a los tornillos de potencia).

La función que cumple el chasis es, adicional a soportar el mecanismo, almacenar los componentes eléctricos de manera ordenada, facilitando la organización de los cables y aportando a la estética de la máquina. Para representar esto, en el panel de control de donde se enciende, apaga y controla manualmente el mecanismo, se puede evidenciar como los cables ingresan al espacio interior del chasis para reorganizarse y dirigirse a sus respectivos destinos.

La complejidad de este mecanismo se puede justificar no solo en su factor innovador, sino que también en la posibilidad de modificar las longitudes de las barras y las ubicaciones de los pares, de tal forma que se pueda obtener una mayor ventaja mecánica o geométrica. Asimismo, aspectos como su estabilidad, área de trabajo, y demás, le otorgan a la propuesta un valor agregado

Por último, cabe recalcar que este modelo está sujeto a cambios, por tanto, las dimensiones de las barras, las orientaciones de los actuadores, la ubicación y organización de la barra ternaria de tierra, las dimensiones del chasis, y demás características, pueden ser modificadas para lograr el mejor desempeño y cumplir con los requerimientos.

7. Cálculos tentativos

Para lograr la construcción y el correcto funcionamiento de la ruteadora es necesario realizar numerosos cálculos que nos permitan predecir el funcionamiento del mecanismo e identificar donde pueden ocurrir fallas que puedan afectar su funcionalidad.

A continuación se mencionan algunos de los cálculos principales obligatorios para la buena ejecución del proyecto.

7.1. Análisis cinemático

El análisis cinemático nos permitirá conocer las posiciones, velocidades y aceleraciones del mecanismo en todo su recorrido. Por una parte, el análisis de posición indica la posición de todos los componentes del mecanismo, en este caso, en los ejes X y Y a lo largo del tiempo. Con base a estos datos, podemos identificar si existen interferencias entre componentes, determinar las curvas trazadas por el movimiento del mecanismo en su área de trabajo.

El análisis de velocidad nos ayuda a reconocer las velocidades de los diferentes componentes en función de la velocidad angular del motor, y así identificar con qué velocidad se mueve la herramienta de corte en los diferentes ejes.

El análisis de aceleración indica las aceleraciones de los componentes del mecanismo. Tomando esto en consideración, nuestro principal interés en este análisis es establecer los puntos donde la aceleración es máxima, pues serán estos los puntos donde las piezas resistirán las fuerzas máximas, y donde serán más propensos a fallar.

Fundado en estas motivaciones, algunos de los cálculos necesarios para el análisis cinemático serán:

- Desplazamiento lineal y angular de las barras en función de la corredera, el tornillo y el motor
- Velocidad lineal y angular de las barras en función de la corredera, el tornillo y el motor
- Aceleración lineal y angular de las barras en función de la corredera, el tornillo y el motor
- Desplazamiento lineal y angular de la corredera en función del tornillo y el motor
- Velocidad lineal y angular de la corredera en función del tornillo y el motor
- Aceleración lineal y angular de la corredera en función del tornillo y el motor
- Desplazamiento angular del tornillo en función del motor
- Velocidad angular del tornillo en función del motor
- Aceleración angular del tornillo en función del motor

7.2. Análisis estático

El análisis estático nos permitirá conocer los efectos de las fuerzas sobre el mecanismo mientras se ignora la inercia y las cargas que varían en el tiempo. Para lograr esto, se analizará el mecanismo congelado en el tiempo en diferentes posiciones con cargas continuas ya establecidas. De esto, podremos calcular diferentes valores de gran importancia para el análisis de falla como:

- Sistema de fuerzas internas de las barras
- Cargas y fuerzas de reacción en los pinos
- Fuerza de compresión en los tornillos
- Fuerzas transversales sobre las guías
- Fuerza lineal de actuación de los tornillos de potencia en función del torque del motor
- Fuerza de efección del mecanismo en función de la fuerza lineal de los tornillos de potencia

7.3. Análisis de falla

El análisis de falla consiste en el cálculo de diferentes esfuerzos y estados de cargas y como estos inciden en los componentes del mecanismo. A grandes rasgos, la función principal que desempeñan estos cálculos es indicarnos como se comportan las piezas al ser expuestas a diferentes esfuerzos y así establecer si estas soportan las cargas combinadas o si, por el contrario, sufren deformaciones que afecten su correcto funcionamiento.

Fundados en los resultados obtenidos del análisis estático, podemos hallar diferentes valores correspondientes a los elementos del mecanismo. Algunos de los posibles cálculos por pieza se muestran a continuación:

- **Tornillo de potencia:** Esfuerzo de flexión, esfuerzo cortante, esfuerzo de compresión, deflexión de cuerpo rígido admisible, pandeo, fatiga, etc.
- **Guías del par P:** Esfuerzo de flexión, esfuerzo cortante, esfuerzo de compresión, deflexión de cuerpo rígido admisible, pandeo, fatiga, etc.
- **Barras:** Esfuerzo de flexión, esfuerzo cortante, tracción, deflexión de cuerpo rígido admisible, deflexión elástica admisible fatiga, etc.
- **Pares R:** Esfuerzo de flexión, esfuerzo cortante, esfuerzo de compresión, esfuerzo de torsión, deflexión de cuerpo rígido admisible, pandeo, fatiga, etc.

7.4. Cálculos adicionales

- Análisis de elementos finitos del chasis
- Análisis dinámico de la máquina
- Análisis estático 3D en software

- Cálculos eléctricos
- Cálculos del sistema de control
- Selección de rodamientos

Referencias

- [1] mundocompresor.com, “Cnc (control numérico por computadora),” 2022.
- [2] G. Castro, “ImplementaciÓn de un sistema de control remoto en un pantÓgrafo cnc para m-a-nufactura 2d,” 2017.
- [3] D. M. Y. Herramientas, “Introducción a la tecnología cnc,” 2015.
- [4] Gemak, “¿cuáles son los tipos de maquinado cnc?,” 2021.
- [5] Inoxform, “Descubre los diferentes tipos de máquinas cnc,” 2022.
- [6] P. Rolón, “Tipos de cnc,” 2011.
- [7] Autycom, “Tipos de máquina de control numérico cnc,” 2022.
- [8] S. Castaño, “¿qué es un lazo abierto y uno cerrado?,” 2022.
- [9] 330ohms, “Diferencia entre router y fresadora,” 2017.
- [10] SIDEKO, “¿quÉ es un router cnc?,” 2022.
- [11] SIDEKO, “Conozca los componentes principales de un router cnc,” 2017.
- [12] A. 21, “Qué es un servomotor y para qué sirve,” 2022.
- [13] TEM, “Motor paso a paso – tipos y ejemplos del uso de motores paso a paso,” 2020.
- [14] B. Elephant, “Las 10 mejores máquinas de enrutador cnc recomendadas 2021,” 2021.
- [15] B. Elephant, “Router cnc de madera para muebles de madera,” 2022.
- [16] B. Elephant, “Máquina de enrutador cnc 2040 atc con dispositivo giratorio,” 2022.
- [17] B. Elephant, “Máquina de troquelado digital comercial grande para papel de corte de cuchillo cnc, tela, artesanía,” 2022.
- [18] HI-TEC, “Aplicaciones de los tornos de cnc para diferentes industrias,” 2021.
- [19] G. L. F. Techno, “¿quÉ es una mÁquina cnc?,” 2022.
- [20] KUZU, “Las 6 principales ventajas de utilizar maquinaria cnc,” 2017.