



---

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA  
HERRAMIENTA DE 3-EJES CON  
TECNOLOGÍA CNC PARA  
OPERACIONES DE MAQUINADO**

---

**Autores:**

Carlos Andres Cárdenas Perez

Elías Jose Muñoz Montenegro

Jairo Luis Saenz Benavides

William Sánchez Rosales

Universidad del Norte  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Puerto Colombia, Colombia

2019



# **DISEÑO DE UNA MÁQUINA HERRAMIENTA DE 3-EJES CON TECNOLOGÍA CNC PARA OPERACIONES DE MAQUINADO**

## **Autores:**

**Carlos Andres Cárdenas Perez**

**Elías Jose Muñoz Montenegro**

**Jairo Luis Saenz Benavides**

**William Sánchez Rosales**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Mecánico**

## **Tutor:**

Ing. Heriberto Enrique Maury Ramirez, PhD

Ing. Leonardo Augusto Blanco Nuñez, M.sc.

## **Grupo de Investigación:**

Laboratorio de Diseño y mecánica de máquinas

Universidad del Norte

División de Ingenierías

Departamento de Ingeniería Mecánica

Puerto Colombia, Colombia

2019

# Contenido

<b>Lista de Tablas</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>9</b>
<b>Resumen Ejecutivo</b>	<b>12</b>
<b>1. Formulación del Proyecto</b>	<b>14</b>
1.1. Planteamiento del Problema . . . . .	14
1.2. Justificación del Proyecto . . . . .	16
1.3. Marco Conceptual . . . . .	17
1.3.1. Proceso de Mecanizado . . . . .	17
1.3.2. Fundamentos de la Robotica . . . . .	30
1.4. Alcance . . . . .	33
1.5. Objetivos . . . . .	33
1.5.1. Objetivo General . . . . .	33
1.5.2. Objetivos Específicos . . . . .	33
1.6. Metodología . . . . .	34
1.7. Cronograma . . . . .	35
<b>2. Definición de Especificaciones</b>	<b>36</b>
2.1. Revisión del Estado del Arte y de la Técnica . . . . .	36
2.1.1. Estado del Arte . . . . .	36
2.1.2. Estado de la Técnica . . . . .	45
2.1.3. Revisión de Patentes . . . . .	48
2.2. Definición de Especificaciones . . . . .	52
2.2.1. Despliegue de Función de Calidad (QFD) . . . . .	52
2.2.2. Listado de referencia de especificaciones . . . . .	54

2.3. Normas . . . . .	56
<b>3. Diseño Conceptual</b>	<b>57</b>
3.1. Metodología del Diseño Conceptual . . . . .	57
3.2. Descomposición y Síntesis Funcional del Sistema . . . . .	58
3.2.1. Despliegue de Funciones . . . . .	58
3.2.2. Análisis Funcional . . . . .	60
3.3. Definición y ponderación de criterios de selección . . . . .	62
3.3.1. Descripción detallada de las criterios de selección . . . . .	62
3.3.2. Matriz de comparación de los criterios de selección . . . . .	63
3.4. Selección de la tecnología de Robot Herramienta . . . . .	65
3.5. Análisis morfológico . . . . .	66
3.6. Generación de Alternativas . . . . .	67
3.6.1. Alternativa 1: Máquina Herramienta Convencional . . . . .	67
3.6.2. Alternativa 2: Máquina Herramienta Ponchohedron . . . . .	70
3.6.3. Alternativa 3: Máquina Herramienta RRPRR . . . . .	73
3.7. Proceso Analítico de Jerarquía (AHP) . . . . .	78
3.8. Alternativa Escogida . . . . .	82
<b>4. Diseño Básico</b>	<b>83</b>
4.1. Metodología del Diseño Básico . . . . .	83
4.2. Diseño Básico del Husillo . . . . .	85
4.2.1. Parámetros de corte recomendados para fresas HSS-Co8 . . . . .	85
4.2.2. Potencias y Pares requeridos para fresado. . . . .	88
4.2.3. Diseño básico de transmisión de potencia . . . . .	90
4.3. Diseño Básico del Mecanismo . . . . .	92
4.3.1. Análisis Cinemático . . . . .	92
4.3.2. Comparativo con modelo SimMechanics . . . . .	97
4.3.3. Dimensionamiento Cinemático del Mecanismo . . . . .	105
4.3.4. Análisis de Rigidez del Mecanismo . . . . .	111
4.3.5. Dimensionamiento Cinético del Mecanismo . . . . .	116
<b>5. Diseño Detallado</b>	<b>118</b>
5.1. Diseño Detallado del Husillo . . . . .	118
5.1.1. Selección del motor-husillo . . . . .	118

5.1.2.	Diseño sistema de transmisión . . . . .	120
5.1.3.	Planos . . . . .	128
5.1.4.	Diseño del eje . . . . .	131
<b>6.</b>	<b>Análisis Economico del Proyecto</b>	<b>137</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>140</b>
<b>7.</b>	<b>Anexos</b>	<b>146</b>
7.1.	Cronograma . . . . .	146
7.2.	Análisis Cinemático . . . . .	147
7.2.1.	Análisis de Posiciones . . . . .	147
7.2.2.	Análisis de Velocidades . . . . .	149
7.2.3.	Análisis de Aceleraciones . . . . .	150
7.3.	Análisis de Rigidez . . . . .	152

# Lista de Tablas

1.1. Parametros de corte para fresado . . . . .	30
1.2. Cronograma Resumido . . . . .	35
2.1. Resumen del estado de los robots . . . . .	45
2.2. Empresas fabricantes de maquinas herramientas . . . . .	46
2.3. Máquinas Fresadoras de 3 ejes actuales . . . . .	47
2.4. Revisión de Patentes . . . . .	52
2.5. QFD . . . . .	53
2.6. Lista de referencia de especificaciones . . . . .	55
2.7. Requerimientos para Máquina CNC de 3 ejes . . . . .	56
2.8. Normas a utilizar . . . . .	56
3.1. Matriz de comparación de los criterios de selección . . . . .	64
3.2. Selección de Tecnología . . . . .	65
3.3. Diagrama Morfológico . . . . .	66
3.4. Morfología de la Alternativa 1 . . . . .	67
3.5. Presupuesto de la Alternativa 1 . . . . .	69
3.6. Morfología de la Alternativa 2 . . . . .	70
3.7. Presupuesto de la Alternativa 2 . . . . .	73
3.8. Morfología de la Alternativa 3 . . . . .	74
3.9. Presupuesto de la Alternativa 3 . . . . .	78
3.10. Ponderación del Costo de Adquisición . . . . .	78
3.11. Ponderación del Costo de Mantenimiento . . . . .	78
3.12. Ponderación del Costo de Operativo . . . . .	79
3.13. Ponderación de la Precisión . . . . .	79
3.14. Ponderación de la Compacidad . . . . .	79
3.15. Ponderación de la Reconfigurabilidad . . . . .	79

3.16. Ponderación de la Seguridad . . . . .	80
3.17. Ponderación del Sistema de Control . . . . .	80
3.18. Ponderación de la Capacidad de Carga . . . . .	80
3.19. Matriz de decisión de alternativas . . . . .	80
3.20. Analisis de sensibilidad para alternativas . . . . .	81
4.1. Parametros de corte para el Acero blando y aluminio . . . . .	85
4.2. Profundidad y ancho de corte para aluminio . . . . .	87
4.3. Profundidad y ancho de corte para acero . . . . .	87
4.4. Presion de corte especifica . . . . .	88
4.5. potencia actual aluminio . . . . .	88
4.6. potencia actual acero . . . . .	89
4.7. Par requerido de corte . . . . .	89
4.8. Relaciones de Transmición . . . . .	90
4.9. Número de dientes . . . . .	90
4.10. Lista de Materiales para el análisis de rigidez . . . . .	114
4.11. Configuraciones de los elementos . . . . .	114
4.12. Parámetros iniciales y finales para probar el mecanismo . . . . .	116
5.1. Características del motor . . . . .	119
5.2. Diseño cinemático de los engranajes . . . . .	121
5.3. Calculo de esfuerzo flexionante según AGMA . . . . .	124
5.4. Calculo de factor de seguridad para fatiga flexionanteFuente:Elaboracion Propia	124
5.5. Calculo de esfuerzos superficiales según AGMA . . . . .	125
5.6. Calculo de factor de seguridad para fatiga superficial . . . . .	125
5.7. Fuerzas y momentos sobre el Eje . . . . .	131
6.1. capex . . . . .	138
6.2. Opex . . . . .	139
6.3. Resumen financiero . . . . .	140
7.1. Cronograma Completo . . . . .	147



# Lista de Figuras

1.1. Sección transversal de proceso de maquinado. . . . .	17
1.2. Operación de torneado. . . . .	19
1.3. Trabajos más comunes con Torno . . . . .	21
1.4. Operación de taladrado. . . . .	22
1.5. Tipos de agujeros en el taladrados . . . . .	23
1.6. Operaciones basicas de fresado . . . . .	24
1.7. Operaciones de fresado periférico . . . . .	25
1.8. Dos formas de fresado . . . . .	26
1.9. Fresado Frontal . . . . .	27
1.10. Fresado periferico que muestra la entrada de la fresa . . . . .	28
1.11. Distancias de aproximación y recorrido adicional . . . . .	29
1.12. Esquema de la Metodología a Utilizar . . . . .	34
2.1. Publicaciones por año . . . . .	37
2.2. Comparación de Maquina herramienta y Robot herramienta . . . . .	37
2.3. Conceptos de Robots seriales . . . . .	38
2.4. Múltiples poses para un mismo punto . . . . .	40
2.5. Arquitectura propuesta por Sarabandi et al. (2018) . . . . .	41
2.6. Robot delta simulado en ADAMS . . . . .	42
2.7. Modelo 3D del robot paralelo . . . . .	43
2.8. Arquitectura SDelta . . . . .	43
2.9. Metodología propuesta . . . . .	44
2.10. Robot de 5-GDL conexión híbrida . . . . .	49
2.11. Estructura para máquina paralela . . . . .	50
3.1. Despliegue de Funciones de la Máquina Herramienta . . . . .	59
3.2. Caja Negra de la Máquina Herramienta . . . . .	61

3.3. Caja Transparente de la Máquina Herramienta . . . . .	62
3.4. Plano Explosionado y lista de materiales de la alternativa 1 . . . . .	68
3.5. Plano Explosionado y lista de materiales de la alternativa 2 . . . . .	71
3.6. Lista de materiales, alternativa 3 . . . . .	75
3.7. Lista de materiales Brazo, alternativa 3 . . . . .	76
3.8. Renderizado de la Alternativa Escogida . . . . .	82
4.1. Subsistemas presentes en la máquina . . . . .	84
4.2. Profundidad y ancho de corte recomendada del fresado . . . . .	86
4.3. Esquema básico del sistema de transmisión . . . . .	91
4.4. Lazos Vectoriales del mecanismo . . . . .	93
4.5. Esquema del modelo en SimMechanics . . . . .	97
4.6. Trayectoria seguida . . . . .	98
4.7. Perfil de velocidades . . . . .	98
4.8. Comparación de posiciones de las revolutas $\theta, \beta$ . . . . .	99
4.9. Comparación de posiciones de los actuadores $q$ . . . . .	100
4.10. Comparación de velocidades de las revolutas $\dot{\theta}, \dot{\beta}$ . . . . .	101
4.11. Comparación de velocidades de los actuadores $\dot{q}$ . . . . .	102
4.12. Comparación de aceleraciones de las revolutas $\ddot{\theta}, \ddot{\beta}$ . . . . .	103
4.13. Comparación de aceleraciones de los actuadores $\ddot{q}$ . . . . .	104
4.14. Índice Global de Desempeño Cinematico . . . . .	110
4.15. Índices de desempeño en el espacio de trabajo . . . . .	111
4.16. Elemento de Marco Espacial . . . . .	112
4.17. Esquema de la discretización del mecanismo . . . . .	113
4.18. Comparación del comportamiento de la rigidez a lo largo del espacio de trabajo	117
4.19. Comparación del mecanismo en una posición . . . . .	117
5.1. Rendimiento cualitativo de los motores . . . . .	119
5.2. Esquema sistema de transmisión . . . . .	126
5.3. Vista explosionada sistema final . . . . .	126
5.4. Exploxionado eje intermedio . . . . .	127
5.5. Exploxionado eje de salida . . . . .	127
5.6. Plano del Servo motor . . . . .	128
5.7. Plano del engranaje . . . . .	129
5.8. Plano del eje . . . . .	130

5.9. DCL eje . . . . .	131
5.10. DCL plano xz . . . . .	132
5.11. Cortante en plano xz . . . . .	132
5.12. Momento en plano xz . . . . .	133
5.13. DCL plano xy . . . . .	134
5.14. Cortante en plano xy . . . . .	134
5.15. Momento en plano xy . . . . .	135

# Resumen Ejecutivo

En barraquilla, el sector metal-mecánico encargado de operaciones de mecanizado como el fresado y torneado con máquinas CNC es limitado, lo que se traduce en un pobre desarrollo en la industria metal-mecánica. El manejo limitado de la maquinaria CNC para mecanizado se debe al elevado costo de los equipos que se requieren para el mecanizado de piezas con geometría compleja y altas tolerancias de fabricación. En el departamento del atlántico según Lora & Pinedo (2012) tiene un 4% de participación en la industria metal-mecánica. Viendo el porcentaje de la industria en el atlántica se observa una oportunidad de negocio, donde se plantea la idea de diseñar una maquina CNC para fresado de tres ejes con la cual se trabajarían aluminios y aceros dúctiles con un bajos costo de inversión y con una disminución en consumo de energía durante la operación. Con este fin los estudiantes de pregrado de la universidad del norte se han propuesto a diseñar una maquina herramienta de tres ejes para mecanizado.

El presente trabajo cubre un marco teórico donde se describen los procesos de mecanizado, las fases de diseño conceptual, diseño básico y diseño de detalle de una maquina herramienta CNC para fresado, enfocado principalmente al direccionamiento de los componentes de la arquitectura del mecanismo que siguen las trayectorias de la operación, siguiendo la metodología Dieter & Schmidt (2012). El proyecto comenzó con el planteamiento del problema, una revisión del estado del arte, de la técnica y una revisión de patentes; donde se encontraron opciones de arquitecturas y puntos donde se puede mejorar algo ya existente, la definición de requerimientos y especificaciones utilizando el método de despliegue de la función de la calidad (QFD). Posteriormente se realizó una descomposición funcional donde se identificaron las funciones de primer, segundo y tercer nivel, teniendo así tres alternativas de la solución teniendo en cuentas diferentes concetos de la solución para cada función. Las tres alternativas generadas se evaluaron con el método AHP. Por último, se realizó el diseño básico y detallado de la alternativa seleccionada.

Como resultado del proyecto realizado se determinó el uso como mecanismo de actuación una arquitectura de robot paralelo RRPRR basado en Petko & Karpiel (2005) con la cual se

busca una disminución de los costos de consumo energético, una precisión competitiva y un costo de adquisición menor en comparación maquinas CNC con similar espacio de trabajo que se encuentran en el mercado actual. Además, se lograron tener dimensiones optimas del mecanismo con el uso de algoritmos genéticos.

# Capítulo 1

## Formulación del Proyecto

### 1.1. Planteamiento del Problema

En el sector de la industria metal-mecánica en Barranquilla, el costo de la maquinaria para el mecanizado es una de las principales problemáticas para el desarrollo industrial, debido a que estos requieren costosos equipos de altos niveles desempeño y operabilidad, para satisfacer las geometrías complejas de las piezas a manufacturar.

En Colombia, de acuerdo con Lora & Pinedo (2012) en el 2009 existieron 9,135 establecimientos dedicado a la industria, Donde el 17 % (1,618) corresponde al sector metal mecánico. De estos 1,618 establecimientos de metalmecánica según Lora & Pinedo (2012) 1,521 pertenecen a las Pymes (Pequeñas y medianas empresas). Estas se distribuyen con 51 % en Bogotá y Cundinamarca, Antioquia con 18 %, valle del cauca 14 %, Atlántico con un 4 % y el 13 % se distribuye en los demás departamentos. En el país, la producción de piezas metalmecánicas se lleva a cabo a través de procesos de fabricación tradicionales, tales como la fundición, extrusión, laminados, rolado, entre otros; los cuales son limitados con respecto a la complejidad de las piezas a fabricar y/o con el acabado deseado en algunos casos. Las piezas de geometría compleja en la industria barranquillera, generalmente son fabricadas a través de fundición, la cual, en una producción en masa es una opción acertada, ya que según Groover (2007) algunos procesos por fundición son capaces de producir pieza de forma neta, como la fundición en molde permanente, donde las tolerancias y acabados superficiales no requieren procesos posteriores para llevar la pieza a fin, pero cuando se requiere una pieza específica estos procesos se vuelven ineficientes, dado que los costos de dicho proceso son altos. Sin embargo, de acuerdo con Groover (2007) hay otros procesos de fundición que son más económicos, como la fundición con molde desechable que sirven para dar una forma inicial a la

pieza para un proceso posterior, para obtener las tolerancias y acabados requeridos, como el mecanizado.

Por lo que el mecanizado, como un proceso intermedio-final, permite obtener piezas con geometrías complejas con excelentes acabados superficiales. Pese a esto, es un bajo número de empresas o lugares que cuentan con este tipo de proceso, debido a los considerables costos iniciales y operativos de una máquina herramienta automatizada. A causa de esto, una relevante cantidad de empresas implementan el mecanizado manual; el cual otorga piezas de baja calidad (comparada con las producidas con las CNC), aumenta el tiempo de manufactura, incrementa los costos de mano de obra, demanda personal calificado y no permite un alto nivel de competitividad en el mercado internacional.

Esta problemática afecta directamente a las Pymes, ya que estas no cuentan con los suficientes recursos para adquirir herramientas automatizadas de mecanizado como un centro de mecanizado de 5 ejes que según lo consultado en (Alibaba, 2019) tiene un precio de 10000 a 20000 dólares. Entre las consecuencias que esta problemática conlleva, encontramos el lento crecimiento de las Pymes, debido a que estas deben recurrir a fabricantes o proveedores externos ya industrializados al momento de necesitar piezas específicas, elevando así los costos en general y reduciendo las ganancias y creando así cierta dependencia. Por otra parte, podemos encontrar la baja competitividad que tiene el mercado nacional con respecto a el mercado global, debido a la dificultad de crear piezas de alta calidad que cumplan con los estándares internacional.

El objetivo de este proyecto es proponer la creación un centro de mecanizado que implemente una máquina herramienta de bajo costo para la función de fresado empleando tecnología de robots y de control automatizado; que permitan impulsar el sector metalmeccánico del país como de la ciudad, al fortalecer las capacidades de manufacturación de la PyME. Todo esto con el fin de tecnificar e innovar los procesos en estas empresas que conlleven a su crecimiento económico, además de desarrollar sus capacidades de innovación. De todo lo anterior, se plantea la pregunta de investigación: ¿Es posible desarrollar una máquina herramienta económica que permita impulsar las PyME de la industria metalmeccánica barranquillera?

## 1.2. Justificación del Proyecto

En la actualidad, Colombia posee una industria manufacturera muy diversificada, la cual presenta negocios en sectores como el alimenticio, caucho –plástico, químico, metalmecánico, entre otros; además de lograr producir alrededor de 74.500.000 millones de pesos (DANE, 2015), de los cuales el 73 % es producido en las principales ciudades del país, Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla. En el caso del departamento del Atlántico, el 65 % de las empresas manufactureras entran en la categoría de PyME, generando 55 % del valor de producción local. De igual manera, el departamento es capaz de generar exportaciones con valores de US\$1.400 millones, solo en el año 2015, en donde 91 % de estas son producidas por el sector manufacturera, siendo estos repartidos entre el sector químico, con un 41 %, otras industrias, con 21 %, bienes metalmecánicos, 11.6 % (Lechuga Cardozo et al., 2018).

Pese a la importante participación del Atlántico en el sector manufacturera, este solo es capaz de generar el 7.2 % del total nacional; esto debido a que el 65 % de sus empresas son PyME, según lo mostrado por Camargo Acuña et al. (2017), todavía les falta reforzar retos de la gestión y operación, que les otorgue más capacidades dinámicas de innovación y adaptabilidad a los entornos dinámicos. Así mismo, el interés por mejorar las capacidades de innovación de las pequeñas y medianas empresas (PyME) es debida a que estas son pieza fundamental para el desarrollo económico del país, y al incrementar su nivel de competitividad y productividad les permitirá afrontar de manera eficaz los desafíos del mercado internacional mediante el desarrollo de nuevos productos y/o servicios.

Debido a todo lo anterior, el presente proyecto nace como una respuesta a esta problemática, en donde se propone el desarrollo de tecnología CNC para las pequeñas y medianas empresas enfocadas del sector metalmecánico en el departamento; que les permita desarrollar nuevos productos a bajo costo, sin importar el nivel de complejidad de la geometría de las piezas, conservando la calidad de exportación. Obteniendo la región un desarrollo económico, tanto en su sector manufacturero como en los demás sectores que se beneficien de este.

Por lo tanto, el proyecto plantea el diseño de una máquina herramienta de 3-ejes que permita la fabricación de piezas de alta complejidad geométrica al ser controladas por medio de un computador y de un mecanismo que le otorgue menores requerimientos energéticos, además poseer elementos más ligeros y así reducir tanto los costos iniciales como operativos.



## 1.3. Marco Conceptual

### 1.3.1. Proceso de Mecanizado

Los procesos de maquinado convencional hacen parte de la rama más importante de la familia de procesos de remoción de materia donde también hacen parte los procesos abrasivos, donde de forma mecánica se remueve materia mediante la acción de partículas duras y los procesos no tradicionales, que utilizan otras formas de energía aparte de la herramienta de corte aguda o de partículas abrasivas (Groover, 2007).

El maquinado es un proceso de manufactura donde se remueve un exceso de materia de una pieza de trabajo con el uso de una herramienta de corte, con el fin que el material remanente sea la forma deseada de la pieza. La acción predominante en este proceso es la formación de viruta mediante la deformación cortante del material. Los materiales donde es más frecuentes la implementación de este tipo de procesos son los metales. La figura 1.1 se ilustra como es el proceso (Groover, 2007).

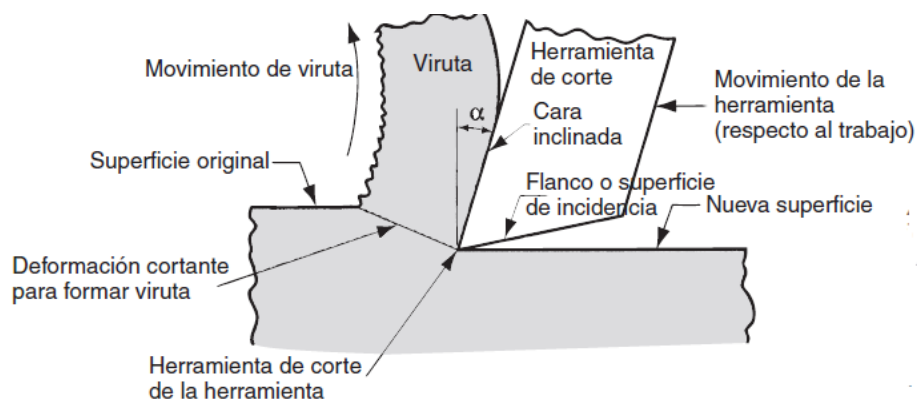


Figura 1.1: Sección transversal de proceso de maquinado.

(Groover, 2007)

El mecanizado a lo largo de la historia ha sido de los procesos de manufactura el más importante, ya que con el desarrollo de varias de las operaciones de maquinado se puede describir en gran parte la revolución industrial y el crecimiento de las economías basadas en la manufactura. Las siguientes razones exponen la importancia de las operaciones de maquinado desde el punto de vista comercial y tecnológico (Groover, 2007).

- **Amplia gama de materiales de trabajo:** El maquinado se puede aplicar a una

gran variedad de materiales. Casi todos los metales sólidos pueden aplicarse a procesos de maquinado, al igual que los compuestos plásticos. Por otro lado, se presentan dificultades al tratar maquinaer cerámica por su dureza y fragilidad; no obstante, se puede cortar por medio de maquinado abrasivo (Groover, 2007).

- **Variación de formas y características geométricas:** El maquina puede ser usado para formar cualquier geometría regular, como superficies planas, agujeros redondos y cilindros. Cuando se introducen variaciones en las trayectorias y forma de las herramientas, se pueden crear formas irregulares, como cuerdas de tornillos y ranuras T. Al implementar en secuencia operaciones de maquinado, se puede producir forma de complejidad y variedad ilimitada (Groover, 2007).
- **Precisión dimensional:** El mecanizado puede producir piezas de trabajo con tolerancias muy estrechas de menos de  $\pm 0,025$  mm ( $\pm 0,001$  in). Es más preciso que otros procesos (Groover, 2007).
- **Acabados superficiales de calidad:** Los acabados superficiales con los cuales se puede llegar con el maquinado son mejores que 0.4 micras ( $16 \mu\text{in}$ ) (Groover, 2007).

Por otra parte, en los procesos de remoción de material existe ciertas desventajas:

- **Desperdicio de material:** El proceso de maquinado es inherentemente un desperdicio de materia. En general la viruta generada es la operación es el desperdicio. Aunque, por lo general, la viruta generada puede ser reciclada (Groover, 2007).
- **Consumo de tiempo:** El maquinado por lo general toma más tiempo en la formación la pieza que los procesos alternos de formado como el fundido o forjado (Groover, 2007).

## Tipos de operaciones de maquinado

### Torneado

Es la operación de mecanizado se lleva a cabo mediante movimientos básicos: el movimiento de corte de material, que es rotativo sobre la pieza, y el movimiento de avance es perpendicular al eje de la rotación y es realizado por la herramienta de corte (Fenoll et al., 2009).

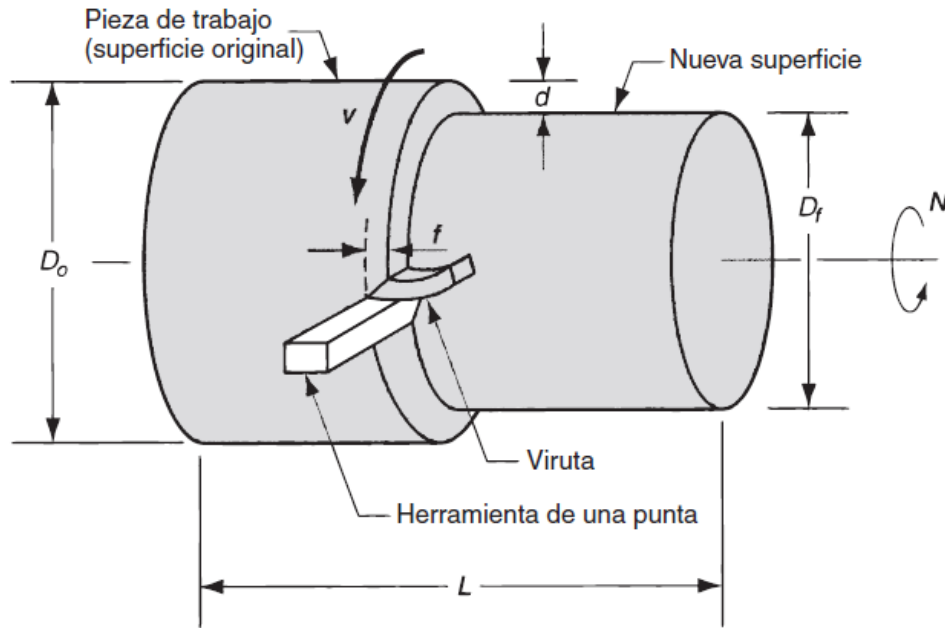


Figura 1.2: Operación de torneado.  
(Groover, 2007)

### Parámetros de corte del torneado.

La velocidad de rotación que usa en el torneado esta relacionada con la velocidad de corte requerida en la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{v}{\pi D_o} \quad (1.1)$$

Donde  $N$ : es la velocidad de rotación que dada en,  $Rev./min$ ;  $v$ : es la velocidad de corte dada en  $m/min(ft/min)$ ; y  $D_o$  : Es el diámetro original de la pieza y está dado en  $m(ft)$ .

Cuando en la operación de torneado se quiere reducir el diámetro de trabajo  $D_o$  al diámetro final  $D_f$  , el cambio de estos destrema la profundidad de corte  $d$ :

$$D_f = D_o - 2d \quad (1.2)$$

El avance en el torneado por lo general se expresa en  $mm/rev(in/rev)$ . El avance se puede convertir en velocidad de avance lineal en  $mm/min$  mediante la fórmula:

$$f_r = Nf \quad (1.3)$$

donde  $f_r$ : es velocidad de avance y esta dada en  $mm/min(in/min)$ ; y  $f$ : es avance y esta en  $mm/rev(in/rev)$ .

El tiempo que toma la operación de torneado de una extremo a otro a una pieza esta dada por:

$$T_m = \frac{L}{f_r} \quad (1.4)$$

donde  $T_m$  es el tiempo de maquinado en  $min$ ; y  $L$  es la longitud de la pieza cilíndrica en  $mm(in)$ . Un cálculo más directo del tiempo de maquinado lo proporciona la ecuación siguiente:

$$T_m = \frac{\pi D_0 L}{fv} \quad (1.5)$$

La velocidad volumetrica de Remoción de un materia en  $mm^3/min(in^3/min)$  y se puede determinar más convencionalmente con la siguiente ecuación:

$$R_{MR} = vfd \quad (1.6)$$

### Trabajos más usuales realizados en un torno

El torno normalmente es usado en trabajos de cilindrado, el torneado cónico, el refrentado, el roscado, el taladrado y el maletado (Fenoll et al., 2009).

- **Cilindrado:** Esta operación permite dar forma uniforme a los diámetros de la pieza cilíndrica mediante desplazamientos de la herramienta de corte paralelamente al eje de giro y el corte perpendicular a este. Con el cilindrado se puede reducir diámetros exteriores y aumentar los diámetros interiores (Fenoll et al., 2009) (Figura:1.3a).
- **Torneado cónico:** Esta operación trabaja con un desplazamiento de la cuchilla no paralela al eje de giro dando piezas con formas cónicas (Fenoll et al., 2009)(Figura:1.3b).
- **Refrentado:** Mediante esta operación se logran planos que son perpendiculares al eje de giro (Fenoll et al., 2009)(Figura:1.3c).
- **Roscado:** Con el torno se pueden lograr mecanizar rosca, tanto para superficies internas como externas y logra una correcta unión de elementos (Fenoll et al., 2009)(Figura:1.3d).
- **Taladrado:** Esta operación puede lograrse en el torno con lo broca en el cabezal móvil, y solo se puede hacer en el centro de la pieza (Fenoll et al., 2009)(Figura:1.3e).

- **Moletado:** En este proceso, para dar a la pieza la forma deseada, en lugar de utilizar cuchillas se usan moletas que presionan la pieza mientras gira (Fenoll et al., 2009)(Figura:1.3f).

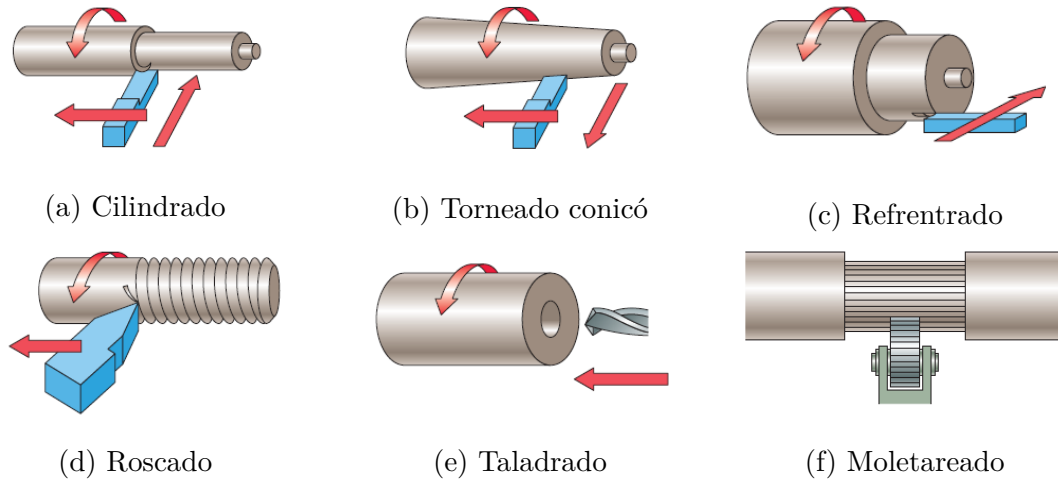


Figura 1.3: Trabajos más comunes con Torno

Fuente: (Fenoll et al., 2009)

## Taladrado

Es una operación de maquinado donde se usa una herramienta rotativa cilíndrica que tiene bordes cortantes, dicha herramienta tiene un avance hacia dentro de la pieza de trabajo para formar un agujero cuyo diámetro es determinado por el diámetro de broca (Groover, 2007)(Figura: 1.4).

### Parámetros de corte en el taladrado

En la operación de taladrado la velocidad de corte es la velocidad en la superficie del diámetro exterior de la herramienta de corte. Este parámetro se especifica así por conveniencia, sin embargo, casi toda la operación de corte se realiza a velocidad mas bajas cercanas al eje de rotación. Para fijar una velocidad de corte requerida en el taladrado, se necesita determinar la velocidad de giro de la broca por su diámetro. Si  $N$  representa las  $rev/min$  del, entonces (Groover, 2007):

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad (1.7)$$

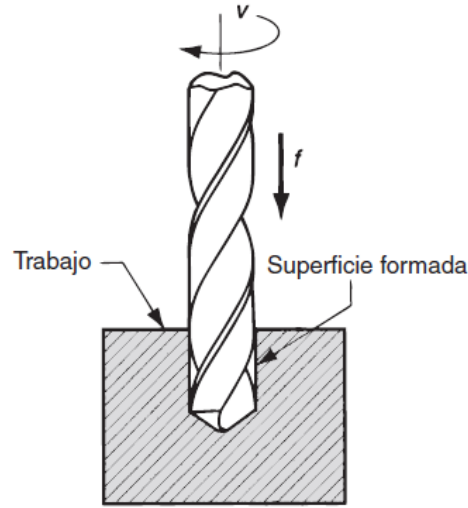


Figura 1.4: Operación de taladrado.

(Groover, 2007)

Donde  $v$  es la velocidad de corte ( $in/mm$ ), el diámetro de la broca es  $D$ ,  $mm(in)$ . En el taladrado alguna operación la superficie de la pieza de trabajo gira sobre la herramienta, pero la fórmula se aplica igual(Groover, 2007).

En la operación de taladrado, el avance  $f$  esta dado en  $mm/rev(in/rev)$ . Lo que se recomienda es que la velocidades sean aproximadamente proporcionales al diámetro de la broca. Generalmente los avances altos se dan con brocas con diámetros grandes. El avance se puede convertir en velocidad de avance si se usa la misma ecuación de torneado(Groover, 2007):

$$f_r = N n_t f \quad (1.8)$$

Donde  $f_r$  es la velocidad de avance en  $mm/min(in/min)$ . La operación de taladrado puede hacer dos tipos de agujero; agujeros ciegos (Figura:1.5b) y agujeros completos (Figura:1.5a). En los agujeros completos o pasados, la broca atraviesa la pieza de trabajo; en los agujeros ciego no es así. Para determinar el tiempo requerido para hacer un agujero pasado se usa la siguiente fórmula(Groover, 2007):

$$T_m = \frac{t + A}{f_r} \quad (1.9)$$

Donde  $T_m$  es el tiempo de maquinado (taladrado) expresado en minutos(min), con un espesor en la pieza de trabajo  $t$  en  $mm(in)$ , una velocidad de avance  $f_r$  en  $mm/min(in/min)$  y  $A$  es la tolerancia de aproximación la cual tiene en consideración el ángulo de la punta de la

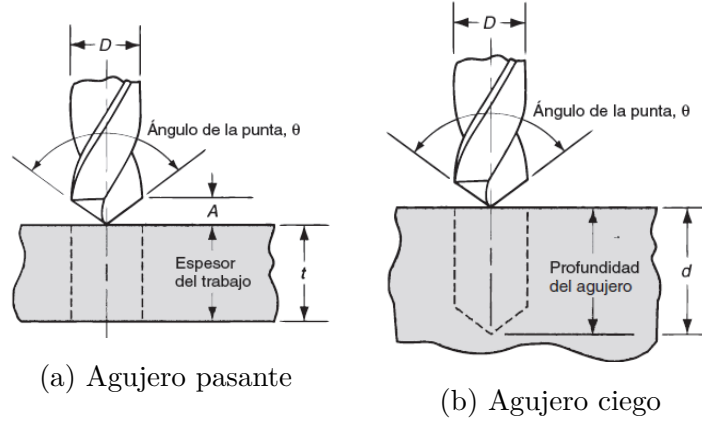


Figura 1.5: Tipos de agujeros en el taladrados  
Fuente: (Groover, 2007)

broca, esta tolerancia esta se halla de la siguiente forma(Groover, 2007):

$$A = 0,5 * D * \tan(90 - \frac{\theta}{2}) \quad (1.10)$$

Donde  $A$  es la tolerancia de aproximación en  $mm(in)$  y  $theta$  es el ángulo de la punta de la broca.

Por otro lado, en un agujero ciego la profundidad  $d$  esta definida como la distancia entre la superficie de la pieza de trabajo y la punta del agujero como se ve en la Figura:1.5b. En este caso por la definición anterior el ángulo no afecta en el tiempo de maquinado. Por ende, el tiempo de maquinado este dado por lo siguiente:

$$T_m = \frac{d}{f_r} \quad (1.11)$$

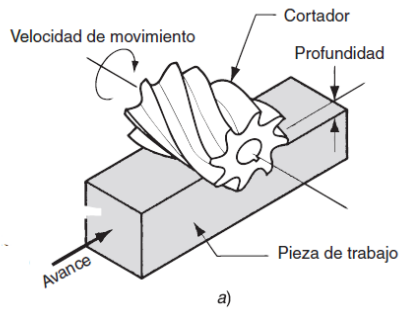
La velocidad de remoción de materia en el taladrado se puede obtener con el producto entre sección transversal de la broca y la velocidad de avance. La siguiente ecuación solo es validad después que la broca alcance el diámetro completo y no incluye la aproximación de la broca a la pieza de trabajo(Groover, 2007):

$$R_{MR} = \frac{\pi D^2 f_r}{4} \quad (1.12)$$

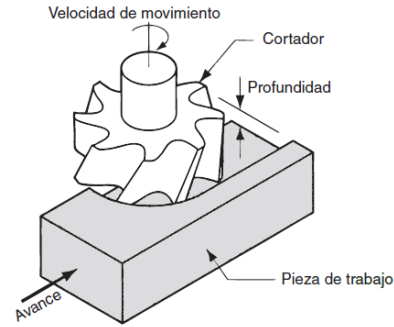
## Fresado

La operación de fresado consiste en corte la superficie de la una pieza con una herramienta rotativa, que esta provista de múltiples aristas cortantes que se encuentra ubicadas simétricamente alrededor del eje gira (Fenoll et al., 2009).

Hay dos operaciones básicas de fresado, fresado periférico (1.6a) y fresado Frontal(1.6b).



(a) Fresado periférico



(b) Fresado Frontal

Figura 1.6: Operaciones básicas de fresado

Fuente: (Groover, 2007)

## Fresado periférico

El fresado periférico o también llamado fresado plano trabaja con el eje de la herramienta paralelo a la superficie de la pieza que se está maquinando como se ve en la figura 1.6a. La operación se realiza por la periferia exterior del cortador.

El fresado periférico se puede clasificar en varios tipos como:

- **Fresado de placa:** Esta es la operación básica del fresado periférico donde el ancho de la fresa se extiende más allá de la pieza de trabajo en ambos extremos(figura1.7a).
- **Fresado de Ranurado:** Esta operación el ancho de la fresa es menor que el ancho de la pieza de trabajo, esto produce una ranura en la pieza. Cuando la fresa es muy delgada esta operación se puede usar para tallar ranuras angostas o corta una pieza en dos, esta última variante se conoce como fresado aserrado (figura1.7b).
- **Fresado lateral:** Esta operación es la cual, la fresa el lado de una pieza (figura1.7c).
- **Fresado paralelo simultáneo:** Esta operación en esencia es el mismo fresado natural con la diferencia que, el corte realizado es en ambos lados de la pieza de trabajo(figura1.7d).

La operación fresado periférico tiene dos direcciones de rotación para realizar los cortes. Estas direcciones son conocidas como fresado convencional o ascendente y fresado descendente. La dirección ascendente, la dirección del movimiento de los dientes es opuesto a la dirección de avance como se muestra en figura1.8a. En el fresado ascendente, la viruta por cada diente de cortador comienza siendo muy delgada y aumenta su espesor con el paso



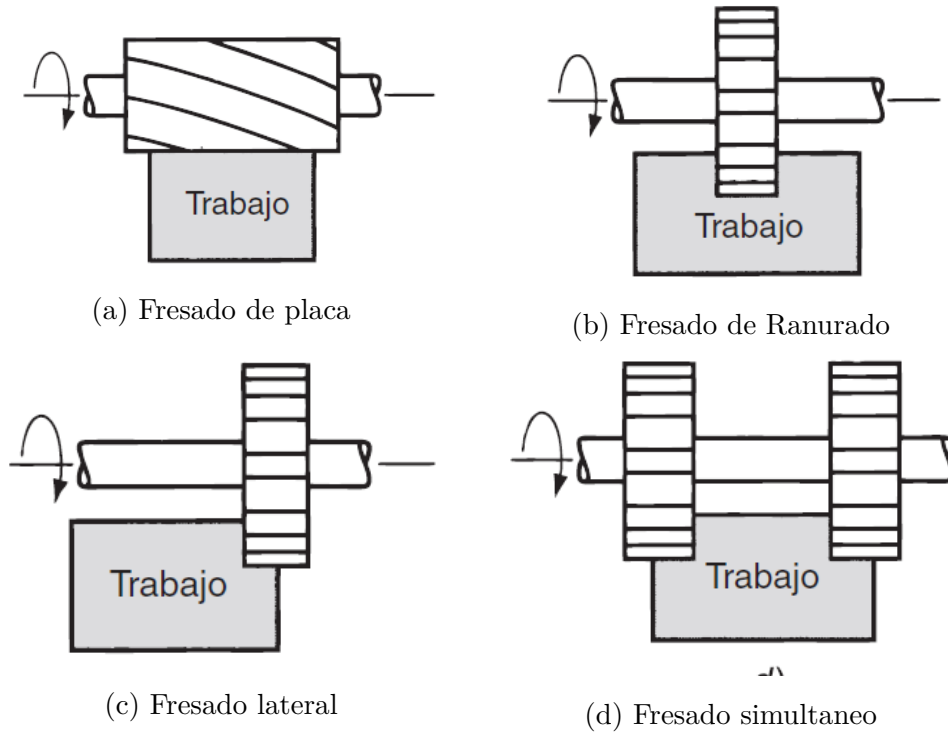


Figura 1.7: Operaciones de fresado periférico

Fuente: (Groover, 2007)

del diente. Por otro lado, el fresado descendente la dirección del movimiento va a favor de la dirección del avance. la viruta empieza gruesa y se va reduciendo con el paso del diente (Groover, 2007) (figura1.8b).

La dirección de la fuerza es tangencial a la periferia de la herramienta de corte. En el fresado ascendente tiende a levantar la pieza ya que al salir los dientes salen de la pieza de trabajo. En el fresado descendente, la dirección de la fuerza de corte es hacia abajo, por esa razón la pieza de trabajo se mantiene contra la base de la máquina de fresado (Groover, 2007).

### Fresado frontal

La característica del Fresado frontal que el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el mecanizado se realiza tanto en las orillas, como en el extremo y fuera de la periferia de la fresa. Como en el fresado de periferia, el fresado frontal tiene diversas formas como (figura 1.9):

- **Fresado frontal convencional:** En esta operación el diámetro de la fresa es mas

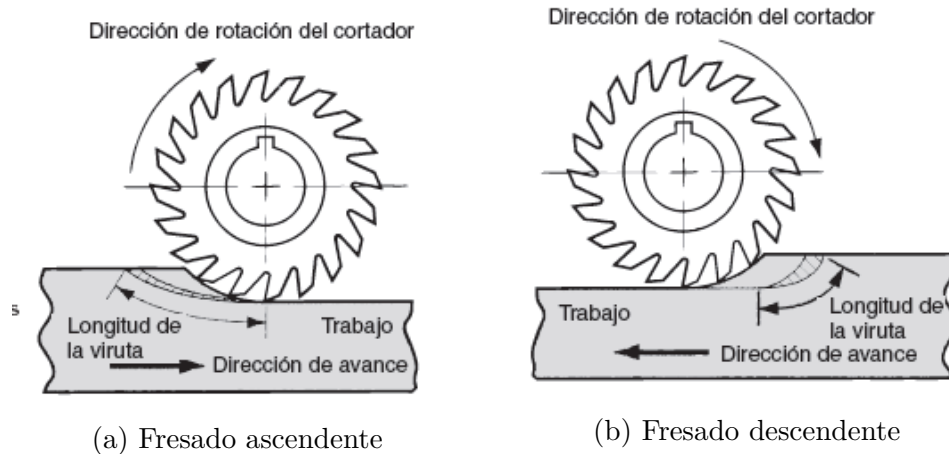


Figura 1.8: Dos formas de fresado

Fuente: (Groover, 2007)

grande que el ancho de pieza a trabajar, de tal modo que la fresa sobre pasa la pieza en ambos extremos(figura1.9a).

- **Fresado frontal parcial:** En esta operación la fresa solo sobrepasa una de los extremos de la pieza(figura1.9b).
- **Fresado terminal:** En esta operación el diámetro es menor que el ancho de la pieza de trabajo, formando una ranura dentro de la pieza(figura1.9c).
- **Fresado de perfiles:** Esta operación es similar a l fresado terminal, con la diferencia que se corta una pieza plana en la periferia(figura1.9d).
- **Fresado de cavidades:** Esta operación es también similar al fresado terminal que se usa para fresar cavidades en superficies planas(figura1.9e).
- **Fresado de contorno superficial:** En esta operación una fresa con punta de bola se coloca a avanzar hacia delante y hacia atrás, y hacia un lado y otro del trabajo, a lo largo de una trayectoria curvilínea a pequeños intervalos para crear una superficie tridimensional(figura1.9f).

### Parámetros de corte del fresado

La velocidad de corte se determina con el diámetro exterior de la fresa. Esta velocidad de corte se puede convertir en velocidad de rotación del husillo con la siguiente formula:

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad (1.13)$$

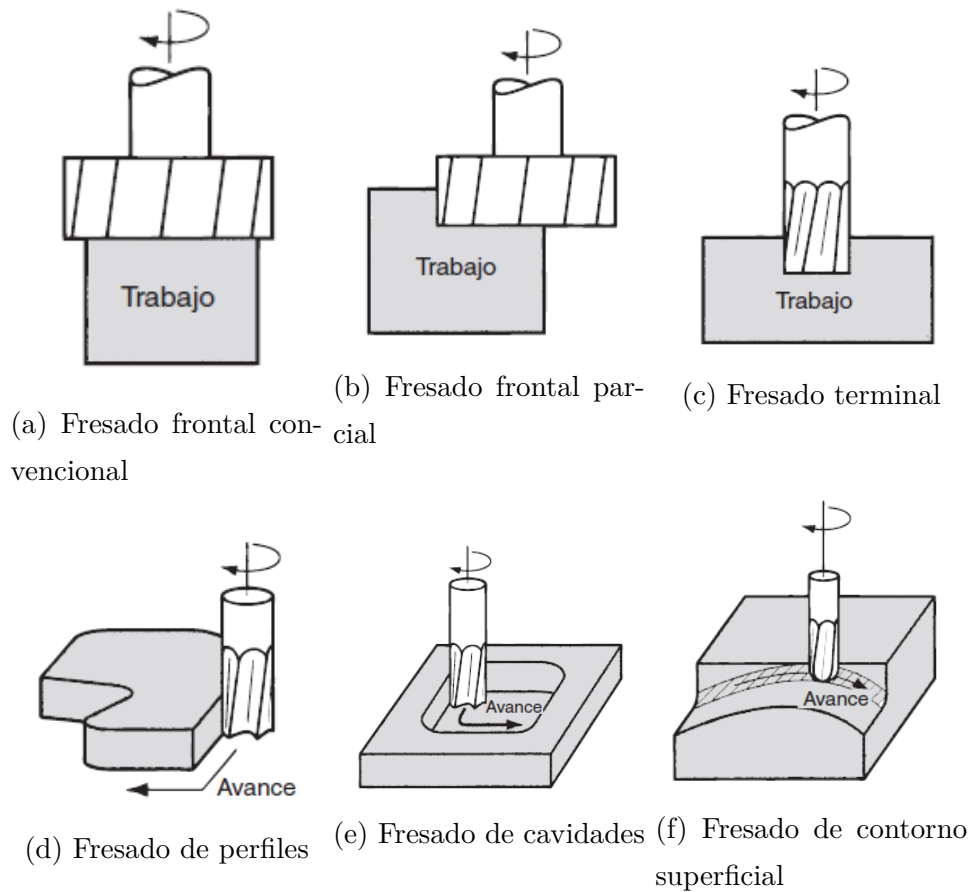


Figura 1.9: Fresado Frontal

Fuente: (Groover, 2007)

El avance del fresado por lo general se determina como el avance por diente cortante o también llamado **carga de viruta**, este representa el tamaño de la viruta. Esto se puede traducir a velocidad de avance, considerando la velocidad del husillo y el número de diente de la fresa, como en lo siguiente (Groover, 2007):

$$f_r = N n_t f \quad (1.14)$$

Donde  $f_r$  es la velocidad de avance en  $mm/min(in/min)$ ,  $N$  es la velocidad del husillo en  $rev/min$ ,  $n_t$  es el número de dientes de la fresa y el  $f$  es la carga de viruta en  $mm/diente(in/dientes)$ .

En el fresado la remoción de materia se determina con el producto de la velocidad de avance con el área transversal del corte. Siendo así, si una operación de fresado corta una pieza la velocidad de remoción estar dada por el ancho  $w$ , la profundidad  $d$  y la ecuación es

(Groover, 2007):

$$R_{MR} = wdf_r \quad (1.15)$$

Este cálculo ignora la entrada inicial de la fresa antes de su enganche por completo. Aplicar la ecuación anterior es conveniente en los fresados terminales, lateral, frontal y otras operaciones, haciendo ajustes al cálculo del área transversal de la sección recta del corte (Groover, 2007).

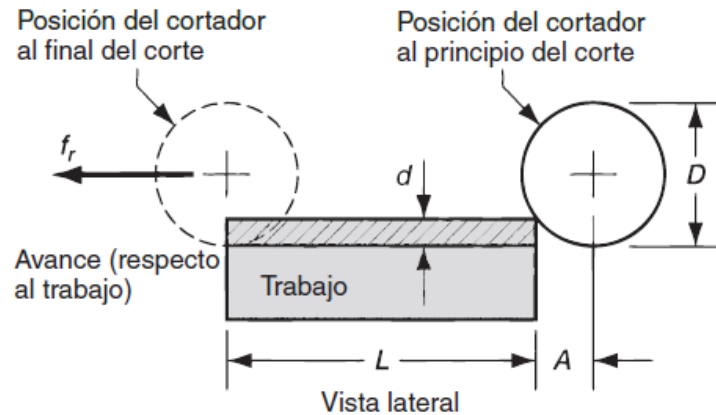


Figura 1.10: Fresado periférico que muestra la entrada de la fresa

Fuente: (Groover, 2007)

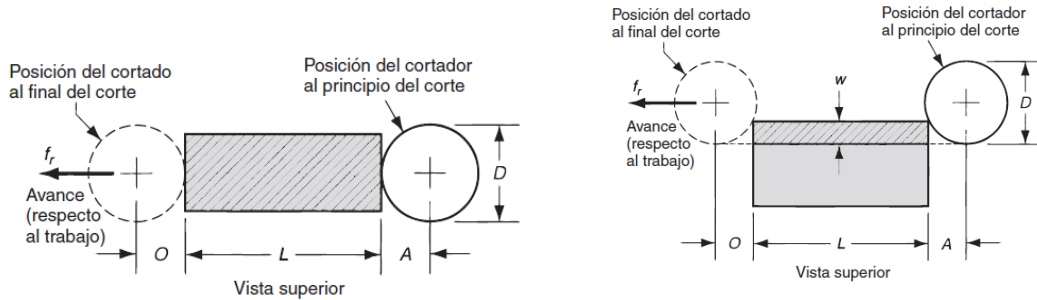
El tiempo que requiere la operación de fresado en una pieza de trabajo con una longitud  $L$  debe tomar en consideración la longitud de aproximación requerida para enganchar la pieza completamente. Si se considera el caso del fresado periférico que se observa en la figura 1.10, para determinar el tiempo de la operación de fresado en la placa, la distancia de aproximación  $A$  para alcanzar la velocidad de corte se determina mediante la siguiente fórmula (Groover, 2007):

$$A = \sqrt{d(D - d)} \quad (1.16)$$

Donde  $d$  es la profundidad de corte en mm(in) y  $D$  es el diámetro de la fresa. Por lo tanto, el cálculo de tiempo de fresado  $T_m$  es:

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad (1.17)$$

Para el fresado frontal hay dos casos posibles para lo cuales se acostumbra dejar, aparte de una distancia de aproximación  $A$  una distancia  $O$ . En los dos casos la distancia  $A = O$ . En primer caso es cuando la fresa se centra sobre la pieza de trabajo rectangular (figura 1.11a).



(a) Fresador centrado en la pieza de trabajo

(b) Cortador con desplazamiento hacia un lado del trabajo

Figura 1.11: Distancias de aproximación y recorrido adicional

Fuente: (Groover, 2007)

En este caso  $A$  y  $O$  son iguales a la mitad del diámetro.

$$A = O = \frac{D}{2} \quad (1.18)$$

Para el caso dos (figura 1.11b) donde sobresale uno de los lados del trabajo, las distancias de aproximación y la adicional en tanta dadas por: Donde  $w$  es el ancho de corte en mm(in). Por lo tanto, el tiempo de fresado por este dado por:

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \quad (1.19)$$

Los parámetros de velocidad de corte y profundidad dependen de la vida útil de la herramienta. Para ser conservadores estos valores se toman de algunos fabricantes de la herramienta de corte. Los valores tienen en cuenta el material de la pieza de trabajo y el tipo de operación. Ejemplo de esto se observa en la tabla 1.1, en donde se muestra los parámetros de corte para fresado de para acero endurecido (45- 55 HRC).

Diametro de la fresa (mm)	Revoluciones (RPM)	Avance (mm/min)	Profundidad radial	Profundidad axial
2	8000	120	0.05D	1D para escuadra 0.05D para ranurado
3	5000	120	0.05D	1D para escuadra 0.1D para ranurado
4	4000	120	0.05D	1D para escuadra 0.1D para ranurado

Diametro de la fresa (mm)	Revoluciones (RPM)	Avance (mm/min)	Profundidad radial	Profundidad axial
5	3200	120	0.05D	1D para escuadra 0.1D para ranurado
6	2700	120	0.05D	1D para escuadra 0.1D para ranurado
8	2000	110	0.05D	1D para escuadra 0.1D para ranurado
10	1600	100	0.05D	1D para escuadra 0.1D para ranurado
12	1300	100	0.05D	1D para escuadra 0.1D para ranurado

Fuente:(Interempresas.Net, 2018)

Tabla 1.1: Parametros de corte para fresado

### 1.3.2. Fundamentos de la Robotica

#### Criterio de Diseño y Movilidad

Los grados de libertad (GDL) de un mecanismo representa la cantidad de movimientos independientes que pueden desarrollar el mecanismo. Otra interpretación es el número de entradas independientes que requeridos para satisfacer completamente de la configuración del dispositivo. Para determinar los grados de libertad de un mecanismo es utilizado el criterio de Chebyshev–Grübler–Kutzbach (Taghirad, 2013), ver ecuación 1.20. Este criterio hace una relación del número de eslabones del mecanismo, incluyen la base, además del número y tipo de juntas, con los grados de libertad del mecanismo; por otra parte, para esta relación se define los grados de libertad de movimiento permitidos en este espacio, siendo  $\lambda = 3$  para mecanismos planos y  $\lambda = 6$  para un mecanismo general en el espacio.

$$F = \lambda (n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (1.20)$$

donde:

- $F$  : Grados de libertad del mecanismo

- $\lambda$  : Grados de libertad del espacio
- $n$  : número de eslabones en el mecanismo, incluyendo la base
- $j$  : número de juntas binarias en el mecanismo
- $f_i$  : grados de movimiento relativo permitidos por la  $i$ -ésima junta.

## Cinemática

La cinemática relaciona el movimiento de los cuerpos sin considerar las fuerzas y momentos que lo generan, siendo una herramienta fundamental para el diseño del robot, análisis, control y simulación. Por lo tanto, la comunidad académica ha centrado en aplicar eficientemente representaciones de las posiciones y orientaciones, como sus derivadas con respecto al tiempo, para resolver los problemas fundamentales de la cinemática (Waldron & Schmiedeler, 2016).

### Posiciones y Traslaciones

La posición de un elemento relativo  $i$  a un sistema coordenado  $A$  es denotado por un vector,  ${}^A\vec{P}_i$ , de 3 componentes, en una columna, las cuales son las respectivas proyecciones del vector sobre los ejes coordenados. Del mismo modo, el vector puede ser representado por coordenadas cilíndricas o esféricas, las cuales tienen ventajas en el análisis de mecanismo en donde se incluyen juntas esféricas o revolutas (Waldron & Schmiedeler, 2016).

$${}^A\vec{P}_i = \begin{bmatrix} {}^AP_{ix} \\ {}^AP_{iy} \\ {}^AP_{iz} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Una traslación es un desplazamiento en donde ningún punto en el cuerpo rígido permanece en su posición inicial y todas las líneas rectas del cuerpo rígido mantienen paralelas a su orientación original.

### Orientación y Rotación

Una rotación es un desplazamiento en donde al menos un punto en el cuerpo rígido permanece en la posición inicial y no todas las líneas en el cuerpo permanece paralelo a la orientación inicial (Waldron & Schmiedeler, 2016). Un método conveniente de describir las rotaciones es por medio de las matrices de rotación, una matriz 3x3 que muestra el

movimiento del sistema coordenado  $B$  con respecto al sistema coordenado  $A$  (Taghirad, 2013).

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Considerando la rotación solo es a lo largo de uno de los ejes cartesianos, la matrices obtenidas serían las siguientes:

$${}^A R_B = R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (1.23a)$$

$${}^A R_B = R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (1.23b)$$

$${}^A R_B = R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.23c)$$



## **1.4. Alcance**

El proyecto busca crear una empresa en el sector metalmecánico que ofrezca los servicios de alquiler y venta de las máquinas herramientas a las demás empresas del sector. Esto incluirá el diseño de una máquina herramienta que permita desarrollar las operaciones de maquinado (Fresado y Taladrado) necesarias para la producción y elaboración de piezas con geometría compleja. Llevando a cabo la definición de especificaciones, selección de la tecnología a utilizar, generación de alternativas, y realizar el diseño básico y detallado del mecanismo de la máquina. El alcance de la propuesta es únicamente el diseño detallado del mecanismo, y se excluye la fabricación.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

Diseñar una máquina herramienta de 3-ejes con tecnología CNC para operaciones de maquinado (Fresado y Taladrado) que sea asequible para pequeñas y medianas empresas del sector metalmecánico.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Garantizar el bajo costo de la máquina herramienta diseñada en comparación a las maquinarias con especificaciones similares en el mercado.
- Asegurar un espacio de trabajo libre de singularidades, así como un buen desempeño cinemático del mecanismo.
- Diseñar y/o seleccionar los sistemas de actuación y los componentes actuados para cumplir con los requerimientos mecánicos, precisión y de seguridad.
- Establecer los procesos de fabricación necesarios para la puesta a punto de la maquina.

## 1.6. Metodología

Para cumplir con los objetivos establecidos se debe cumplir con ciertas pautas. Por lo general se estima que deben aplicarse el procedimiento y tecnología más modernos, soluciones que puedan ser óptima técnicamente, pero no financieramente.

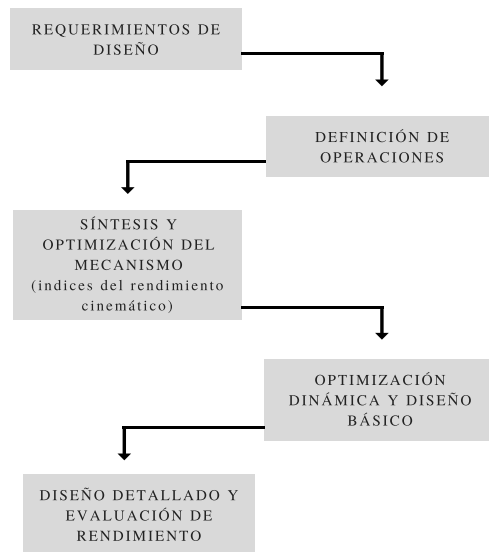


Figura 1.12: Esquema de la Metodología a Utilizar

Fuente: Elaboración propia

El estudio técnico determina los requerimientos del diseño, en la cual se define y analiza las características y las especificaciones que posee el sistema, las necesidades de espacios físicos para su normal operación, considerando las normas y principios de la administración de la producción, también la definición de las operaciones, seguido de la síntesis y optimización del mecanismo, que depende las operaciones que debe realizar por medio de los índices de rendimiento cinemática, que define las variables cinemáticas.

El diseño básico del sistema requiere de una optimización dinámica, que define la geometría de los eslabones para cumplir con la precisión y capacidad de carga establecida. Por último se realiza el diseño detallado y la evaluación de rendimiento.

## 1.7. Cronograma

El cronograma detalla los tiempos en que se realizarán las operaciones, además de apoyar el cumplimiento del proyecto durante la ejecución. En la siguiente tabla, ver tabla 1.2, muestra una versión resumida del cronograma, el cuál es planteado teniendo en cuenta un calendario hábil (Lunes a Viernes) en horario de oficina (8am a 6pm). En el anexo estará el cronograma completo, ver Tabla 7.1.

Nombre de la Tarea	Duración	Inicio
Formulacion del proyecto	10 días	Lunes 29/07/19
Revision del estado del arte y de la tecnica	5 días	Lunes 12/08/19
Definición de especificaciones	5 días	Lunes 19/08/19
Redacción del primer entregable	5 días	Lunes 26/08/19
Diseño conceptual	10 días	Lunes 02/09/19
Diseño básico	22 días	Lunes 16/09/19
Diseño detallado	16 días	Lunes 16/10/19

Tabla 1.2: Cronograma Resumido

# Capítulo 2

## Definición de Especificaciones

### 2.1. Revisión del Estado del Arte y de la Técnica

En la definición de las especificación necesarias para la máquina herramienta se procedió a una revisión dentro la literatura, las soluciones comerciales y las patentes creadas en base a esta temática. Por esto, este sección presentará lo encontrado en estos aspectos.

#### 2.1.1. Estado del Arte

En las últimas décadas, la industria manufacturera ha sido beneficiada por las desarrollos alcanzados en la industria robótica, que han permitido una modernización de los procesos de manufactura, alcanzando altas prestaciones en cuanto a capacidad dinámica, rigidez, precisión (Serje & Pacheco, 2017) así como en flexibilidad, eficiencia, bajo costo y seguridad (Yuan et al., 2018; Stipančić et al., 2012; Švaco et al., 2014). La robótica no solo ha llamado la atención de la industria manufacturera, sino también a investigadores y académicos, esto es mostrado en la Figura 2.1, donde se muestra el número de publicaciones con palabras clave “robótica” en Scopus (Yuan et al., 2018).

#### Robot Herramienta Serial

La industria de la robótica ha dejado a un lado los mecanismos convencionales para las máquinas herramientas, ver Figura 2.2a, para utilizar una arquitectura serial, o de lazo abierto, la cual consiste por una serie de eslabones unidos mediante juntas que permiten el movimiento relativo, ver Figura 2.2b. Las primeras investigaciones sobre estos datan a inicios de los años 90' s, y desde entonces han sido intensamente investigado alrededor del mundo

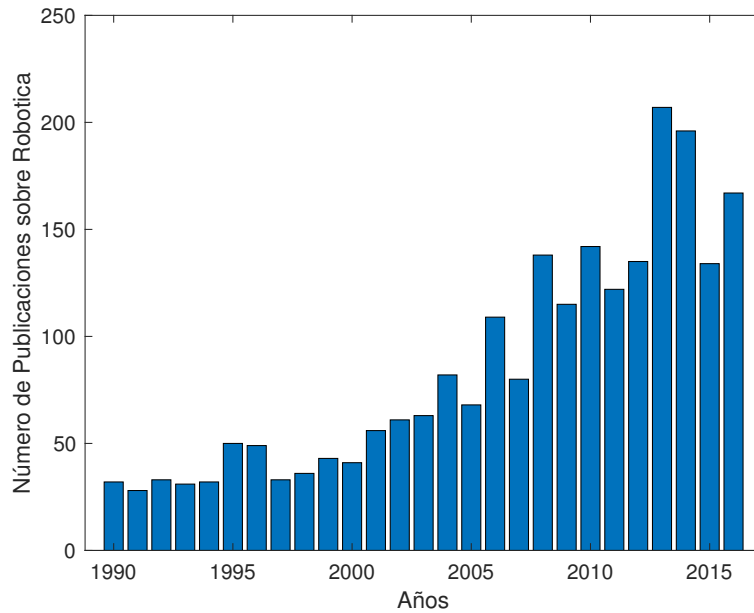
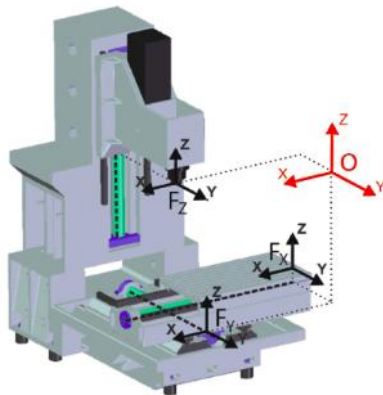


Figura 2.1: Publicaciones por año

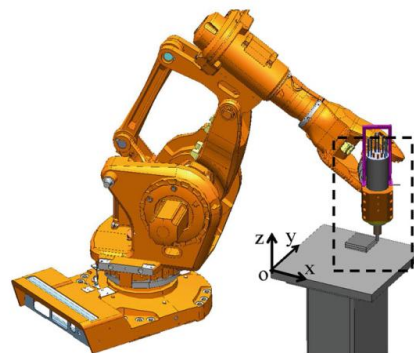
Fuente:(Yuan et al., 2018)

por su potencial de ser aplicado en distintos procesos de maquinado y manufactura (Chen & Dong, 2013). Estas investigaciones abarcan temas como el diseño (Denkena et al., 2017), análisis de condición cinemática (Zargarbashi et al., 2012), análisis de rigidez por su postura (Guo et al., 2015), la utilización de redundancias [11], y el control de los mismo [12].



(a) Máquina Herramienta Cartesiana

Fuente:(Szipka et al., 2018)



(b) Robot Herramienta Serial

Fuente:(Mejri et al., 2016)

Figura 2.2: Comparación de Maquina herramienta y Robot herramienta

En el diseño de robot seriales, Denkena et al. (2017) en su trabajo «Design and optimization of a machining robot» explica que para los robots seriales presentan una serie de debilidades y limitaciones frente a las máquinas herramientas convencionales. Siendo que la principal limitación es la rigidez del robot, debido a que es inferior si es comparada con las máquinas convencionales, y es importante en la precisión de la trayectoria a seguir así como en la productividad del mismo. Por esto, los autores antes de realizar el diseño detallado y optimización del robot, realizan una evaluación cinemática de los conceptos de máquinas, mostrando que esta desventaja puede ser eliminada utilizando una cinemática adaptada con menor número de juntas, ver Figura 2.3.

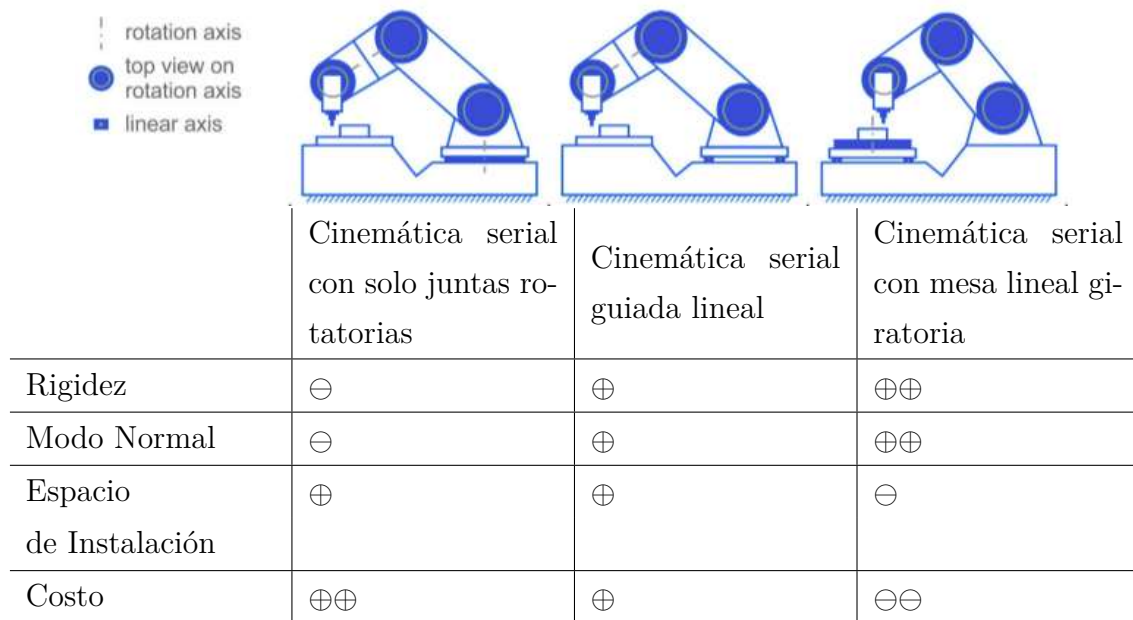


Figura 2.3: Conceptos de Robots seriales

Fuente:(Denkena et al., 2017)

Por otra parte, en el análisis de condición cinemática, Zargarbashi et al. (2012) en «The Jacobian condition number as a dexterity index in 6R machining robots» detalla sobre la utilización de un número de condición basado en el jacobiano como índice de desempeño. Teniendo en cuenta que este índice no tendría en cuenta los efectos dinámicos debido a las condiciones de trabajo durante el maquinado, siendo bajas velocidades, los efectos del husillo afectan la estructura y los altos modos de frecuencia del sistema. El número de condición trabaja teniendo en cuenta un pequeño error en las juntas,  $\delta\dot{\theta}$ , que produce un error en movimiento del efector,  $\delta t$ ; recordando que las velocidades de estos elementos se relacionan a través de la matriz jacobiana, Ecuación 2.1a, y que la inducción de este error en

la posición,  $\delta\theta$ , afecta igualmente al jacobiano,  $J(\theta + \delta\theta)$ , sin embargo, puede ser aproximado de la siguiente manera  $J(\theta + \delta\theta) \approx J(\theta)$ . Por lo que los errores de velocidades pueden ser expresados por la Ecuación 2.1b, simplificados de la forma Ecuación 2.1c, y en base a esto, el número de condición se obtiene relacionando la ecuación 2.1c con la ecuación 2.1a, ver ecuaciones 2.1d y 2.1e. El número de condición manejaría valores entre 1 y  $\infty$ , siendo que entre más pequeño el número de condición más uniforme será el cambio de las juntas sobre el efector.

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) t \quad (2.1a)$$

$$\dot{\theta} + \delta\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) (t + \delta t) \quad (2.1b)$$

$$\delta\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) \delta t \quad (2.1c)$$

$$\frac{\|\delta\dot{\theta}\|}{\|\dot{\theta}\|} \leq \kappa(J) \frac{\|\delta t\|}{\|t\|} \quad (2.1d)$$

$$\kappa(J) = \|J(\theta)\| \cdot \|J^{-1}(\theta)\| \quad (2.1e)$$

En el análisis de rigidez, el Guo et al. (2015) y su artículo «Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications» especifica un método optimización de postura de un robot serial que apunta a incrementar su rigidez, debido a que estos robots presentan múltiples soluciones para una posición del efector final (Zhu et al., 2013), como el ejemplo donde un robot de taladrado para un punto y dirección de un agujero no aplica una única pose, en la Figura 2.4 se muestra dos posibles poses del efector para taladrar un mismo agujero. Por eso, Guo et al. (2015) mediante la utilización del modelo de rigidez del robot para seleccionar dentro de todas las poses posibles la que más óptima, es decir aquella que maximice la rigidez del sistema.

En la implementación de redundancias, Subrin et al. (2013) para su investigación «New redundant architectures in machining: serial and parallel robots» evalúa el desempeño de una arquitectura redundante de robot serial, observando como la implementación de lazo cerrado mejora el rendimiento cinemático como el rendimiento de rigidez de un manipulador serial.

Para la calibración y control de los robots seriales, Andres et al. (2011) en trabajo «Calibration and control of a redundant robotic workcell for milling tasks» detalla el procedimiento para la sintonización de un manipulador serial *KUKA<sup>TM</sup>*, en donde propone un método para la calibración de este dispositivo en el sitio, usando sensores láser de desplazamiento y con una restricción de plano de no contacto. Estos procedimientos son sencillos de

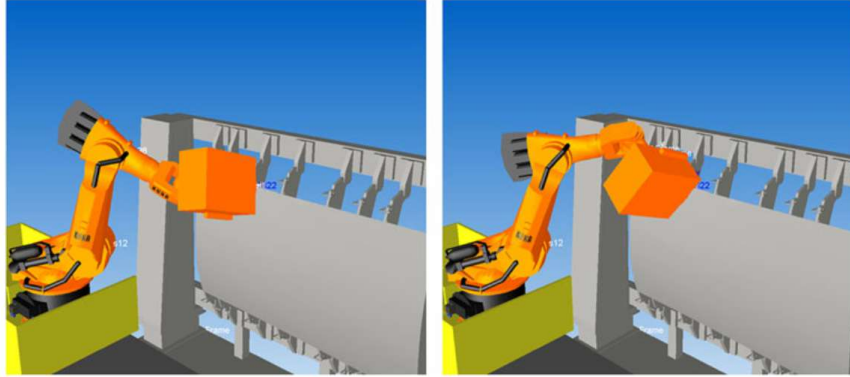


Figura 2.4: Múltiples poses para un mismo punto

Fuente: (Zhu et al., 2013)

implementar y los recomienda para la mayoría de los robots industriales por su rapidez en el sitio.

En breve de los robots seriales, son mecanismos con una cadena cinemática abierta, la cuál le otorga un amplio espacio de trabajo, múltiples posturas para un misma posición y sencillez en el control, pero del mismo modo, produce baja estabilidad y rigidez en el sistema.

### **Robot Herramienta Paralelo**

La creciente demanda de productos con mejores especificaciones ha llevado a la industria de la fabricación a incrementar los requerimientos y el rendimiento de los robots industriales, exigiendo mayores niveles de precisión operacional, capacidad de trabajo, confiabilidad y ciclo de vida. Una tendencia para la satisfacción de estas demandas radica en la implementación de manipuladores paralelos, los cuales poseen un potencial de trabajo alto, resaltando características como su alta rigidez, alta precisión y alta capacidad de carga (Zhang, 2010), además de ciertas ventajas como forma isotrópica, espacio libre de singularidades, rendimiento kinostático uniforme y reconfigurabilidad (Lin et al., 2015; Ur-Rehman et al., 2009; Zeng et al., 2014); por esto han sido implementado en la rehabilitación de brazo, mover y poner, maquinado de precisión o simulador de braquiterapia (Briot & Bonev, 2009; Cardou et al., 2010; Höppner et al., 2015; Martini et al., 2015).

Por esto en la literatura se estudia a los mecanismos paralelos desde el análisis de una configuración (Sarabandi et al., 2018), análisis cinemático (Gallardo-Alvarado et al., 2014), análisis dinámico (Xu et al., 2017), el diseño (Li & Angeles, 2018), Optimización (Kelaiaia et al., 2012) y el control (Cazalilla et al., 2016).

En el análisis de configuración, está el caso de Sarabandi et al. (2018), quien en su ar-



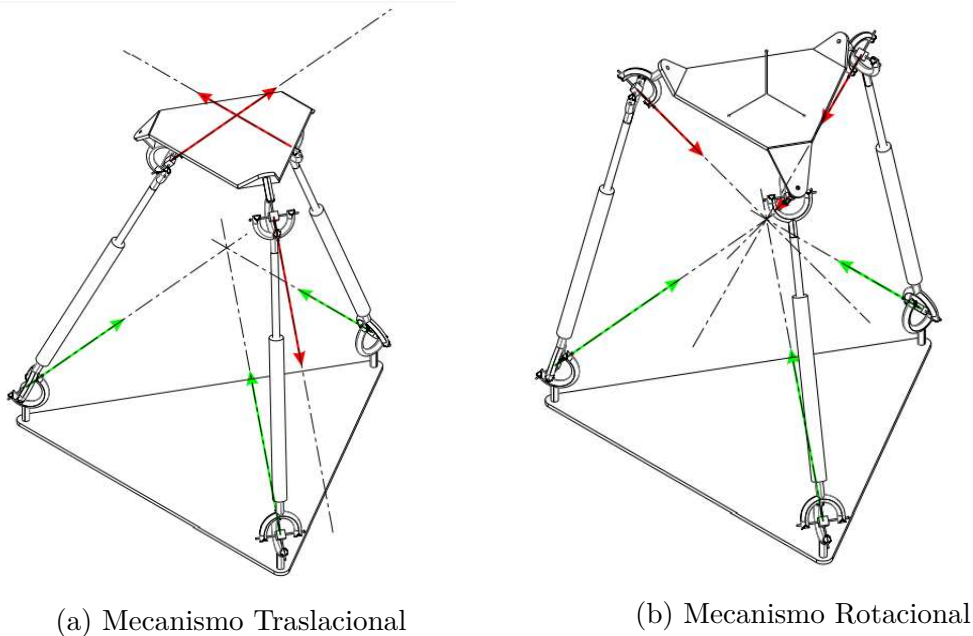


Figura 2.5: Arquitectura propuesta por Sarabandi et al. (2018)

título «A Reconfigurable Asymmetric 3-UPU Parallel Robot» analiza la arquitectura UPU, *Universal - Prismática - Universal*, por la posibilidad que tiene un mecanismo de tres brazos con esta arquitectura de presentar un movimiento puramente traslacional o puramente rotacional según su modo de ensamble. Esta configuración fue previamente estudiada por Di Gregorio & Parenti-Castelli (1998), quien determinó cuales son las condiciones que deben cumplir las universales, más específicamente el par de revolutas que la conforman, para producir movimientos de traslación; por otro lado, Karouia & Hervé (2000) estudio las condiciones constructivas que permiten un movimiento completamente rotacional en la plataforma. Sin embargo, el mecanismo presenta una sensibilidad a errores y zonas de su espacio de trabajo donde tiene un movimiento mixto, traslación –rotación, y es por esto que los autores introducen una configuración asimétrica que permita prevenir estos inconvenientes de la arquitectura.

En el análisis cinemático, Gallardo-Alvarado et al. (2014) en su trabajo «An application of screw theory to the kinematic analysis of a Delta-type robot» detalla los pasos de un análisis cinemático para un mecanismo tipo delta, ver Figura 2.6, explicando el método por (Pierrot et al., 1990) para resolver el problema de cinemática inversa de este; para después realizar el análisis de velocidades aplicando teoría de tornillo, un recurso matemático que hace uso de las coordenadas de Plücker para simbolizar el estado de movimiento de cada revoluta además de la forma de Klein de la algebra de Lie para calcular las velocidades; por

último, el análisis de aceleración aplica la misma teoría; los resultados son verificados con un software de simulación llamado ADAMS.

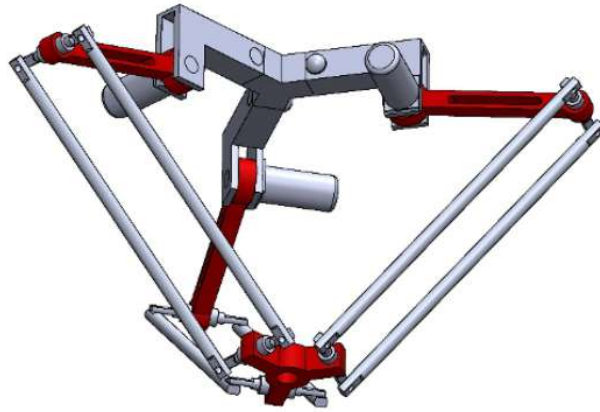


Figura 2.6: Robot delta simulado en ADAMS

Fuente: (Gallardo-Alvarado et al., 2014)

En el análisis dinámico, Xu et al. (2017) explica, en «Dynamic analysis of a linear Delta robot in hybrid polishing machine based on the principle of virtual work», un método llamado trabajo virtual para resolver el análisis dinámico de un robot delta lineal, ver Figura 2.7; dicho método apunta a resolver las fuerzas motrices de las juntas prismáticas, teniendo en cuenta las fuerzas y momentos inerciales de cada cuerpo móvil alrededor del punto de pivote. Por otro lado, esta metodología recibe su nombre debido a que se supone un desplazamiento virtual, interrelacionando los desplazamientos de cada cuerpo con las entradas a través de matrices jacobianas, con esto se calcula los trabajos realizados por todas las fuerzas externas del mecanismo, y por último, se determinan las fuerzas de los actuadores.

En el diseño, Li & Angeles (2018) trabaja el diseño de un robot paralelo con configuración 3-CPS, esto lo hace en el artículo «The design of a 3-CPS parallel robot for maximum dexterity». En la primera etapa del diseño se selecciona la arquitectura con la que se va a trabajar, especificando sus ventajas y desventajas, para su caso escogieron los SDelta, ver Figura 2.8, debido a que son robots paralelos con 6 grados de libertad, esto implementando 3 brazos, de ahí que eviten interferencia entre los brazos, así como baja carga inercial. Además todos sus motores están ubicados en la base. Luego de esto, el procedimiento de diseño continúa con los análisis cinemáticos y cinéticos, determinando la cinemática inversa o la directa, un análisis de singularidades y por último, un análisis de fuerzas. Esto es hecho para mirar el comportamiento del mecanismo ante una medidas determinadas. El diseño prosigue con una optimización dimensional, la cual se hace es llevada a cabo midiendo un índice de

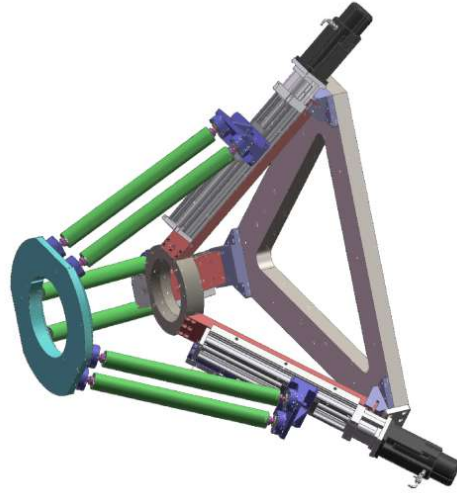


Figura 2.7: Modelo 3D del robot paralelo

Fuente: (Xu et al., 2017)

desempeño. Este índice o conjunto de índice son escogidos en función de los requerimientos de la aplicación.

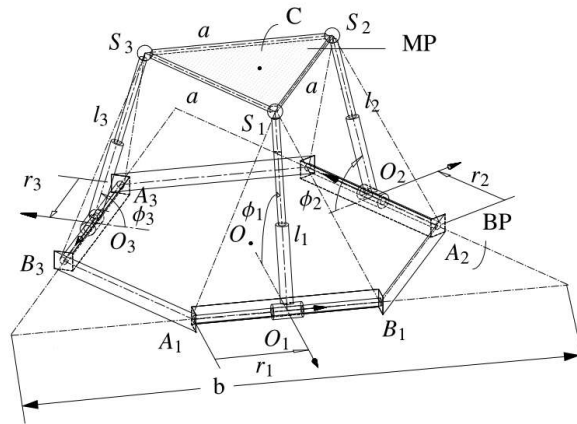


Figura 2.8: Arquitectura SDelta

Fuente: (Li & Angeles, 2018)

En la Optimización, Kelaiaia et al. (2012) en su trabajo «Multiobjective optimization of a linear Delta parallel robot» muestra como la síntesis dimensional es vital para el buen diseño de un robot paralelo. Propone una metodología para este problema, ver Figura 2.9, el cual es expresado en términos de una optimización multiobjetivos teniendo en cuenta varios criterios de rendimiento. Dichos criterios de evaluación miden el rendimiento del espacio de trabajo, la rigidez, así como el comportamiento cinemático y dinámico. Para llevar a

cabo la optimización utilizan un algoritmo genético SPEA-II, configurado con 200 miembros de la población, 200 generaciones, 90 % de probabilidad de cruzamiento y probabilidad de mutación del 10 %.

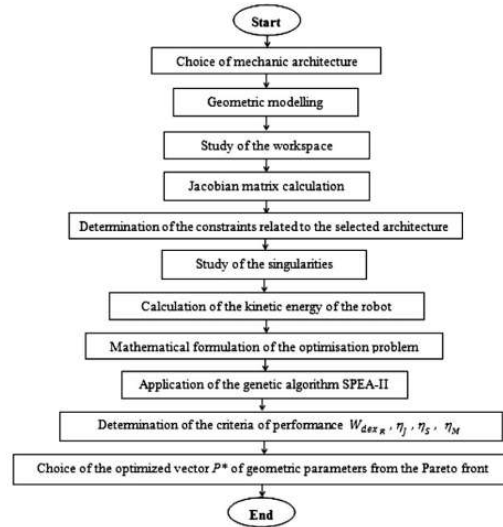


Figura 2.9: Metodología propuesta

Fuente: (Kelaiaia et al., 2012)

En breve, los robots paralelos presentan una serie de ventajas cinemáticas y dinámicas, comparados con las otras dos tecnologías. Para aprovechar estas ventajas en la etapa de diseño, se deben analizar desde la arquitectura, pasando por cada uno de los análisis cinemáticos y cinéticos, así como otros necesarios para los criterios de la aplicación, hasta la parte de la síntesis dimensional del mecanismo.

Comparativo de las arquitectura		
Características	Serial	Paralela
Cinemática	★★★★★	★★
	Simple	Compleja
Capacidad Dinamica	★★★	★★★★★
	Limitada	Elevada
Rigidez	★★	★★★★★
	Pobre	Elevado
Destreza	★★★★★	★★★
	Excelente	Alto

<b>Características</b>	<b>Serial</b>	<b>Paralela</b>
Control	★ ★ ★ ★ ★ Simple	★★ Compleja
Modularidad	★ ★ ★ Alto	★ ★ ★ ★ ★ Excelente

Tabla 2.1: Resumen del estado de los robots

### 2.1.2. Estado de la Técnica

En la industria actual existe una amplia oferta de equipos para llevar a cabo procesos de fabricación de piezas de alta calidad como el maquinado. En cuanto al proceso de fresado existen 3 tipos de soluciones comerciales actuales muy competitivas en el mercado.

<b>EUROPA</b>		
<b>Empresas</b>	<b>Ejes</b>	<b>Aplicación</b>
Demaurex/Delta	3	Manipulador
PKMtricept SL	5	Maquinado, Ensamblaje
Carl Zeiss Jena, Physik Instrumente	6	Posicionamiento
Lapic Company	6	Medición de coordenadas
Fooke (Triomax)	3	Corte agua/láser
Urane SX (Renault)	3	Taladrado de alta velocidad
<b>Universidad-empresa</b>		
WZL Aachen –Ingersoll	6	Maquinado
IfW Stuttgart –INA (Hexact)	5	Maquinado
ETH Zurich –Mikron (Triaglide)	3	Maquinado
<b>Universidades</b>		
ISW Stuttgart (Linapod)	3	Maquinado
IWF –Hannover	3	Maquinado láser
ETH Zurich (Hexaglide), ITIA –CNR (Acrobat)	6	Maquinado
<b>ESTADOS UNIDOS</b>		
<b>Empresa</b>		

Tornado 2000 (Hexel), Rotapod (Hexel), Vari-  
riax (Giddings and Lewis) 6 Maquinado

### ASIA

#### Universidad-empresa

Eclipse –Universidad de Seul, Leadwell (X-  
700R), Okuma, HexaM 6 Maquinado  
Honda Engineering 3 Maquinado  
Fanuc Robotics (F-200i) 6 Soldadura

Fuente: (Serje & Pacheco, 2017)

Tabla 2.2: Empresas fabricantes de maquinas herramientas

En los últimos años han surgido diversas iniciativas investigativas y propuestas sobre la aplicación de robots con arquitecturas paralelas como solución a ciertas limitaciones de las máquinas herramientas seriales. Algunos de estos diseños se han logrado comercializar ofreciendo mejoras en las capacidades dinámicas y rigidez de las máquinas herramientas entrando a la competencia de la industria de la fabricación y a su vez presentando nuevos retos de diseño y control. En la siguiente tabla se presentan algunas de las maquinas herramientas fabricadas hasta la fecha y las aplicaciones que estas han tenido.

Fabricante	Modelo	Arquitectura	Velocidad [ $m/min$ ]	ET [ $mm$ ]	ET/VM [%]
CharlyRobot	Charly4U	Paralela	6	310x220x160	–
Chiron	V-Concept	Hibrida	120	450x300x300	2.77
DMG mori	CMX600 V	Cartesiana	30	600x560x510	1.07
	CMX800 V	Cartesiana	30	800x560x510	0.82
	CMX1100 V	Cartesiana	30	1100x560x510	0.95
Fatronic	Ulyses	Paralela	50	500x500x500	–
Hass	VF-1	Serial	16.5	508x406x508	0.63
Automation	Minimill2	Serial	15.2	508x406x356	0.55
	OM-1A	Serial	19.2	203x203x305	0.52
Heckert	SKM400	Paralela	100	630x630x630	–
Hitachi Seiki	PA35II	Paralela	100	350x350x200	–
Honda	HVS500	Hibrida	60	650x500x400	–
HullerHille	Specht- Xperimental	Hibrida	120	630x630x750	–

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Arquitectura</b>	<b>Velocidad</b> [ <i>m/min</i> ]	<b>ET</b> [ <i>mm</i> ]	<b>ET/VM</b> [%]
Index	V100	Paralela	50	280x280x145	0.09
ISWstuttgart	Linapod	Paralela	45	400x400x400	0.46
IRCCyN	Orthoglide	Paralela	100	200x200x200	0.46
JSWAY	JDV850	Paralela	10	800x500x500	1.04
Krauseco	QuickStep	Paralela	80	630x630x500	–
Mauser	HS500				
Leadwell CNC	V-20i	Cartesiana		510x350x400	–
Machines	V-30	Cartesiana		600x400x300	–
Light Machines Corp	Spectra light200	serial	0.76	216x114x140	1.73
Mazak	VC-300A	Paralela	24	350x300x305	0.50
	VC-500C	Paralela	30	500x1000x510	0.07
	VC- 500A/2PC	Paralela	30	505x505x510	4.70
Mikron	Triaglide	Paralela		170x120x250	0.16
OKuma	MB-46V	Paralela	32	500x460x460	0.75
	MB-500H	Paralela	60	500x500x460	0.28
Sharp	LMV-50	Paralela		812,279x127	4.25
	TMV	Paralela		711x381x127	2.14
	LMV	Paralela		635x279x127	3.83
Techno Inc	RG5950	Paralela	20.32	1500x1300x254	6.58
Mikron	Triaglide	Paralela		170x120x250	0.16
University of Belgrade	LOLA	Paralela	10	120x100x35	0.35
WZL Aachen	DynaM	Hibrida	90	630x630x500	2.21

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3: Máquinas Fresadoras de 3 ejes actuales

La tabla anterior realiza una comparativa de algunas especificaciones de fresadoras de 3 ejes abarcando una amplia gama de capacidades, distintos fabricantes y arquitecturas. Como resultado de esta encontramos velocidades lineales promedio de 45m/min para espacios de trabajo de 550x450x370 mm con una compacidad de la máquina de 1.5%. La tabla es

resultado de elaboración propia con adaptaciones de Serje & Pacheco (2017).

### 2.1.3. Revisión de Patentes

En la parte de patentes sobre máquinas herramientas se ha encontrado distintas tecnologías aplicadas como los son manipuladores paralelos, robots serial y cartesianos, además de mecanismos híbridos entre seriales y paralelos. Estas patentes son mostradas a continuación en detalle, y al final serán resumida en la tabla 2.4.

**CN109676587A** - *A kind of four-degree-of-freedom high speed parallel robot* (张建政 et al., 2019): La patente proporciona un robot paralelo de alta velocidad de cuatro grados de libertad. Este es compuesto por una base, una plataforma de movimiento, efector final, cuatro cadenas de ramificación. La plataforma de movimiento está compuesta por una plataforma superior, una inferior un acople giratorio y un mecanismo amplificador de ángulo. Este mecanismo amplificador de ángulo está dispuesto entre la plataforma inferior y la superior. Se utilizan juntas esféricas y giratorias.

**AU2007297702B2** - *Systems, devices, and methods for surgery on a hollow anatomically suspended organ*. (Chang et al., 2013): La patente expone un dispositivo (Robot) para el uso de operaciones microquirúrgicas (ocular), El dispositivo posee un robot híbrido esclavo que tiene al menos dos brazos robóticos (cada brazo robótico tiene un robot en serie conectado a un robot paralelo) y un maestro tele-robótico que tiene al menos dos esclavos maestros controlados por el usuario interfaces ( joysticks).

**WO2019091425A1** - *Few-joint over-constrained five-freedom-degree hybrid connection robot* (赵永生 et al., 2019): La patente aporta un robot con una conexión híbrida de pocas articulaciones con cinco grados de libertad, ver Figura 2.10. Este está compuesto por: una plataforma fija (11), marcos verticales de tipo erecto (10), un marco de rotación de par de rotación simple (8), doble marco de rotación de par de rotación (6), una plataforma móvil (3), una plataforma de trabajo (1), tres cadenas de ramificación (4,5, 9) de una misma estructura y un cabezal de ajuste de postura de dos grados de libertad (2).

**CN109091233A** - *Puncturing operation robot based on series and parallel structure* (赵保亮 et al., 2018): Esta patente pertenece al campo técnica de los dispositivos médicos, es un robot para cirugía de punción basado en una estructura en serie-paralela. La máquina está compuesta de una base, un mecanismo de ajuste y postura y un mecanismo de inserción de aguja. Las acciones del robot de cirugía de punción del control a través de los cinco grados de libertad de la estructura serie- paralela.

**ES2433664T3** - *Dispositivo guiador dirigible* (Choset et al., 2013): Esta patente pre-



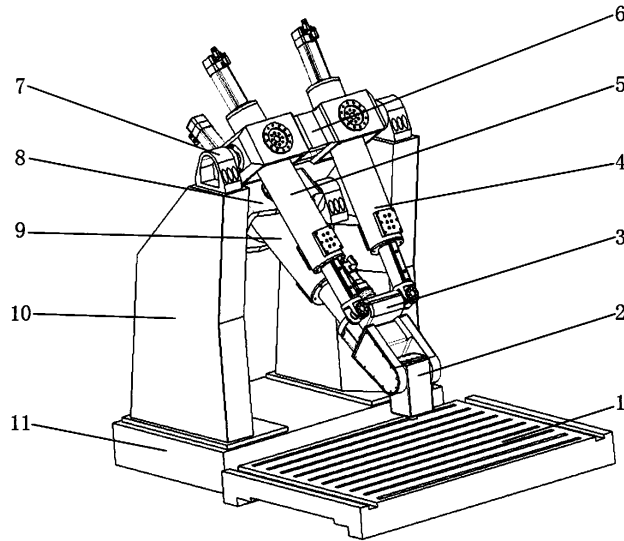


Figura 2.10: Robot de 5-GDL conexión híbrida

Fuente:(赵永生 et al., 2019)

senta una sonda robótica articulada, con 2 mecanismo que pueden operar coordinados o según la configuración que se necesite, flácido o rígido.

**US5715729A** - *Machine tool having parallel structure* (Toyama et al., 1995): Trata del diseño de un robot paralelo con seis grados de libertad, Figura 2.11, con 6 brazos y 6 motores, una placa base fija y una sección móvil, destinado a trabajar materiales duros y a un enfoque industrial.

**ES2392059B2** - *Robot de estructura cinemática híbrida para el guiado de la inserción de agujas, catéteres y elementos quirúrgicos para procedimientos de cirugía mínimamente invasiva.* (Saltaren Pazmiño et al., 2013):

**CN109348795A** - *A kind of replanting system and its implementation based on parallel robot* (周昕 et al., 2019): La invención describe con un sistema de transporte basado en un robot paralelo y un método de implementación del sistema. EL sistema está compuesto por Una estructura de marco, robot paralelo y un dispositivo de transporte.

**US8776632B2** - *Actuación de baja carrera para un robot en serie.* (Gao & Ihrke, 2014): Esta patente fue financiada por el gobierno de USA, específicamente la NASA se refiere al control de movimiento y Diseño de empaque de un dedo tendón y otra articulaciones

FIG. 3

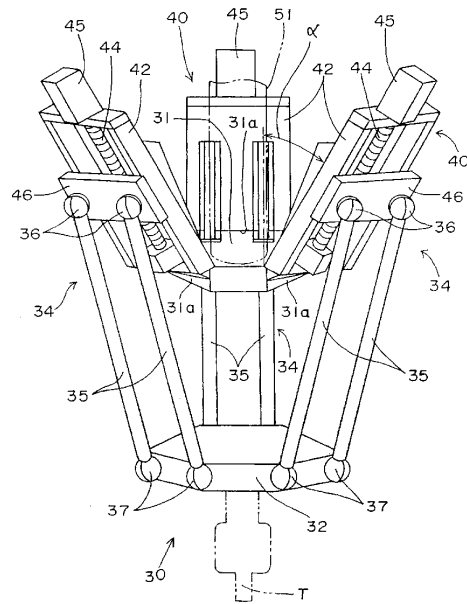


Figura 2.11: Estructura para máquina paralela

Fuente:(Toyama et al., 1995)

Patente	Ventajas	Desventajas
CN109676587A	Fuerzas de fricción pequeñas entre los accesorios. Se puede ajustar el coeficiente de amplificación de ángulo. Cadenas de ramificación simples.	Volumen de la máquina.
ES2588015	Gran espacio de trabajo, logra realizar geometrias muy complejas.	Baja compacticidad ,Necesita una base giratoria.
WO2019091425A1	Una mejora en la rigidez integral de la estructura. Reducción en la dificultad de control.	

Patente	Ventajas	Desventajas
ES2392059B2	Análisis cinemático es simple y respuesta dinámica buena. Por la combinación de cabezal oscilante de dos grados de libre la plataforma móvil, se amplía el espacio de trabajo de una máquina de herramienta.	
	Mecanismo hibrido, Diseño modular, 6 grados de libertad, Sistema hibrido, bajo peso, cuenta con un sistema guiado por laser. .	Sistema de control complejo, estructura ligeramente debil.
CN109091233A	La operación de ajuste y postura de la aguja se pueden completar automáticamente. Una estructura simple en general.	Un tamaño pequeño conveniente para el uso médico, pero no para el uso industrial
ES2433664T3	Puede ser utilizado en multiples campos por su adaptibilidad. Se pueden adaptar camaras, medicamentos entre otros al interior del dispositivo, es muy flexible. Ideal para espacios reducidos (Tuberias).	Solo maneja 3 ejes, maneja bajas cargas, se necesitan una gran cantidad de sensores y controladores para operar correctamente. Se hace necesario la sincronizacion del mecanismo interno con el externo.
US5715729A	Trabajo con grandes cargas, sistema de control "sencillo"	
AU2007297702B2	Altamente preciso, portable, cuenta con herrramientas modulares.	Espacio de trabajo reducido, se debe de tener en cuenta las posibles singularidades, en funcion de su area de trabajo, es poco compacto.
US8776632B2	Sistema de control "sencillo", liviano, bajo costo.	Trabaja con bajas cargas, rango de movilidad limitado.
CN109348795A	Mejora de la eficiencia enormemente.	

Patente	Ventajas	Desventajas
	<p>El sistema es más liviano.</p> <p>Una estructura simple y es más conveniente para la operación en comparación de un robot serie.</p>	

Tabla 2.4: Revisión de Patentes

Fuente: Elaboración Propia

## 2.2. Definición de Especificaciones

### 2.2.1. Despliegue de Función de Calidad (QFD)

La matriz QFD es una parte fundamental del proceso de diseño que facilita la generación de especificaciones de el producto o maquina a fabricar, permite hacer una comparación entre las características que intervienen en este teniendo en consideracion los requerimientos del cliente y de diseño. La matriz QFD presenta de manera resuminda y confronta las características requeridas, los pros y contras, de manera que se traduzcan tales requerimientos en variables de ingenieria (medibles) y de este modo facilitar la toma de desciciones y la propuesta de alternativas.

Escala		Quiénes										Cómo																											
Importancia Quién VS Qué 0 a 100 %	Relación Qué VS Cómo 9 = Fuerte 3 = Media 1 = Débil 0 = Ninguna (blanco)	Fabricante	Empresa	Operario	Mantenimiento	Nº piezas	Nº Uniones desmontables	Nº Uniones permanentes	Pasos para instalación	Frecuencia de mantenimiento	Tempo de mantenimiento	Tempo para configurar el equipo	Norma CEN TC143	Potencia actuadores	Potencia motor del Husillo	Velocidad motor de Husillo	Velocidad lineal	Esfuerzos máximos	Tempo de maquinado	Volumen de Trabajo	Precisión	Volumen de la maquina	Peso	Vida útil															
	Qué	Nº	Nº	Nº	días	h	min	MPa	m/min	rpm	m/min	MPa	min	m3	µm	m3	min	kg	años																				
Costos	Bajo costo de adquisición	5	10	5									9	9	3	1	1		3	9	9	1	1	3															
	Bajo costo operacional		10											9	9	3	3		9	3	9			1															
	Bajo costo de mantenimiento		5	15					3	9	9			1	1						9	3	9																
Ensamblaje y Mantenimiento	Fácil ensamble	20		20										3	3	1	1		3	3	3	3	9																
	Facilidad para la limpieza y reparación		5	5	10				1	3										3		3	3																
Operación	Baja complejidad en el Control	10		20	10	1								1	1	1			3	3	3	9																	
	Operación Segura	20		30	20									3	9	9	3	1	9	3	3	3		1															
	Alta precisión	10	15						1	1				1	3	9	3	3	3	1	9	3																	
Desempeño	Alta calidad superficial	10	15	20					3	3					9	9	3	1	1	1	9																		
	Alta capacidad de producción	10	20	10						9	9				3	9	3	3	9		3	9		9															
	Mayor espacio de trabajo posible	10	10											3	3					9		1																	
Prestaciones	Menor tamaño posible	5	5		10									3	3	1	1			9		9	3																
	Buena Estabilidad		5	5										3	3	1	1				9	1	3																
	Fácilmente ajustable a cada proceso a realizar			10	10															9		3	1																
		Importancia																																					
		Fabricante		8,83		5,52		4,78		4,14		2,39		3,31		4,32		7,36		10,67		7,36		4,42		2,02		6,53		6,44		6,35		7,18		3,68		2,30	
		Empresa		8,86		4,07		2,39		3,19		5,58		5,14		1,86		6,20		11,25		5,67		5,14		3,45		6,38		5,31		10,63		5,76		1,77		3,90	
		Operario		4,09		2,66		1,02		0,92		3,17		7,06		5,52		6,85		11,76		9,71		6,24		3,37		9,00		5,62		8,28		8,38		0,82		2,45	
		Mantenimiento		12,46		7,59		4,19		8,76		2,82		4,09		4,38		6,62		6,04		4,38		1,85		0,39		4,38		7,89		5,26		7,98		7,59		0,68	

Tabla 2.5: QFD

## 2.2.2. Listado de referencia de especificaciones

La lista de referencia es una estrategia de diseño que busca desarrollar una lista de especificaciones iniciales suficientes, las cuales se construyen a partir de los estudios del estado del arte, estado de la técnica y análisis del QFD donde se intenten abordar todos los aspectos y elementos del diseño y apuntar a la obtención de especificaciones completas.

Concepto	Determinaciones
Funcion	Descripción de las funciones principales, ocasionales y accidentales del producto.
Dimensión	Espacios, Volúmenes, masas, longitudes, alturas, anchuras, diámetros; número y disposición de elementos
Movimientos	Tipos de movimiento; desplazamientos, secuencias y tiempos; trayectorias, velocidades y aceleraciones.
Fuerzas	Magnitud, dirección y sentido de fuerzas y momentos; variación en el tiempo; desequilibrios y deformaciones admisibles.
Energía	Accionamientos mecánicos y otros convertidores de energía: alimentación y control; transmisiones; potencia y rendimiento.
Materiales	Flujo, transporte y transformación de materiales; limitaciones o preferencias sobre su uso; condicionantes de mercado.
Señales y control	Señales de entrada y salida; sensores y actuadores; funciones del sistema de control.
Fabricación y montaje	Volumen previsto de producción y cadencia en el tiempo; limitaciones o preferencias en procesos y equipamientos; variantes en el producto de flexibilidad en la fabricación.
Transporte y distribución	Embalaje y transporte: dimensiones, masas, orientación, golpes; instalación, montaje y puesta a punto.
Vida útil y Mantenimiento	Vida prevista; fiabilidad y mantenibilidad; tipo de mantenimiento e intervalos de servicio; criterios sobre recambios.
Costes y plazos	Costes de desarrollo y preparación de utillaje; plazos de desarrollo y tiempo para el mercado.
Seguridad y ergonomía	Sistemas y dispositivos de seguridad; relación con el usuario; operación, inteligibilidad, confort y aspecto.
Impacto ambiental	Consumos de energía y materiales; limitaciones al impacto ambiental en la fabricación, utilización y fin de vida.

Concepto	Determinaciones
Apectos legales	Cumplimiento de noremativas (Funcion de los usos y mercados); evitar la colision con patentes.

Tabla 2.6: Lista de referencia de especificaciones

Fuente: Riba (2002)

La tabla mostrada es el modelo de lista de referencia del método MEPEIS y se utilizó para la construcción del listado de referencia propio.

Concepto	R/D	Descripcion
Función	R	Realizar operaciones de Fresado y Taladrado
Dimensión	R	Relación Espacio de Trabajo/Volumen de la Máquina superior a 1,3%
	D	Espacio de Trabajo superior a 500 × 500 × 500 mm
Movimientos	D	Entradas paralelas
	R	Presicion de 0.005 mm
Fuerzas	R	Disminución de par requerido
Energía	R	Ahorro Energético de los motores
Materiales	R	Rigidez (Vibraciones)
	R	Resistencia a Fatiga
Señales y Control	R	RPM
	R	Velocidad de avance
	D	Aceleraciones
	R	Posición
	D	Torque
Vida Útil y Mantenimiento	D	Vida útil mayor a 10 años
Fabricación y Montaje	D	Fabricación con piezas estándares y montaje modular
	D	Fácil remplazo de piezas dañadas, sea por la facilidad de comercialización (piezas estándar) o la capacidad de fabricar las mismas
	D	Facil mantenimiento por diseño moludar
Costos de Fabricación	D	Costos de Fabricación inferiores a 40 Millones de pesos
Seguridad	R	Alta proteccion al operario
	R	Protecciones Electricas y Termicas de la maquina

Tabla 2.7: Requerimientos para Máquina CNC de 3 ejes

Fuente: Elaboración propia

## 2.3. Normas

<b>Estandar</b>	<b>Norma</b>	<b>Titulo</b>
CEN	TC 143	Standardization in the field of safety of machine tools, their accessories and tools designed to form and to machine cold metal both with and without the removal of metal.
ISO	230-2	Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes.
ISO	TR 230-8	Test code for machine tools-Vibrations.
ISO	3685	Tool-life testing with single-point turning tools.
ISO	1985	Machine tools-Test conditions for surface grinding machines with vertical grinding wheel spindle and reciprocating table-Testing of accuracy.
ISO	230-3	Determination of thermal effects.
ISO	8373	Manipulating industrial robots.
ISO	9409-2	Manipulación de robots industriales. Interfaces mecánicas. Parte 2: Ejes.

Tabla 2.8: Normas a utilizar

Fuente: Elaboración Propia



# Capítulo 3

## Diseño Conceptual

### 3.1. Metodología del Diseño Conceptual

En el apartado del diseño de la solución esta presenta la fase conceptual, en donde el diseño está más enfocado en la generación y selección de conceptos de solución. Esta fase se caracteriza por tener presentar diferentes metodologías o maneras de generar alternativas, así como de evaluar estas. Algunos ejemplos de estas metodologías de generación de alternativas están presentes en el libro de Dieter & Schmidt (2012), donde explica métodos creativos como la lluvia de ideas, la sinéctica y el diseño biomimético, así como métodos sistemáticos como la descomposición y síntesis funcional, el análisis morfológico y la teoría de la resolución inventiva de problemas (conocida como TRIZ por sus siglas en ruso). Por otro lado, en las metodologías de evaluación, Dieter & Schmidt (2012) muestra los métodos sistemáticos de evaluación por medio de matrices de decisión, determinado por criterios ponderados, y en los cuales se destaca la Asignación Directa, el Árbol de Objetivos y el Proceso Analítico de Jerarquía (AHP por sus siglas en inglés).

Para este proyecto se hará de la metodología sistemática tanto para la generación como la evaluación de alternativas de diseño. En el parte de la generación se hará uso de la descomposición y síntesis funcional, así como del análisis morfológico; mientras que en la evaluación se hará uso del método AHP. Estos serán dispuestos de la siguiente manera:

1. Descomposición y Síntesis Funcional.
2. Definición y ponderación de criterios de selección
3. Selección de tecnología de maquina herramientas
4. Análisis morfológico.
5. Generación de Alternativas.

6. Proceso Analítico de Jerarquía (AHP).

## 3.2. Descomposición y Síntesis Funcional del Sistema

Este método de diseño conceptual, la descomposición y síntesis funcional, se basa en la estrategia común de descomponer un sistema complejo en unidades más sencillas que describan lo describan significativamente. Esta descomposición, además de ser obvia para el equipo desarrollador, debe reflejar ciertas agrupaciones naturales que comprenden una entidad o que sean mutuamente acordados por los usuarios. Por otra parte, este procedimiento es útil para comprender la tarea de diseño y asignarle recursos (Dieter & Schmidt, 2012).

Basado en lo descrito por Dieter & Schmidt (2012), este método consta de 3 partes, una Descomposición Física, una Representación Funcional (o Despliegue de Funciones) y una Estructura Funcional (o Análisis Funcional).

Para este proyecto se llevará a cabo el Despliegue de Funciones (ver Sec. 3.2.1) y el Análisis Funcional (ver Sec. 3.2.2).

### 3.2.1. Despliegue de Funciones

El despliegue de funciones consiste de una descomposición del sistema a diseñar, partiendo desde la función global del dispositivo, pasando por cada una de las funciones que debe llevar a cabo y finalizando en las subfunciones necesarias. Con estos tres niveles funcionales se diseña el esquema del despliegue de funciones de la máquina herramienta, ver Figura 3.1. Aparte de esto, especifican las funciones del mecanismo en la siguiente subsección.

#### Descripción detallada de las funciones

El buen funcionamiento de la máquina herramienta se lleva a cabo a través de las funciones presentadas a continuación:

**Iniciar el sistema:** Es necesario suministrar energía eléctrica a la máquina, de esta manera encender el sistema de control que esta posee. Al iniciar este proceso se verifican los componentes de la máquina y se recibe una confirmación por parte del sistema de control indicando que la máquina se encuentra lista para empezar a ser configurada para la operación.

**Recibir/Procesar información:** El técnico encargado de la operación de maquinado se encargará de suministrar la información sobre el material, herramientas de corte y parámetros de la operación. así mismo el técnico suministra lo geometría de la pieza de trabajo (geometría inicial y final). Es necesario que antes de la operación tener un punto cero de



Figura 3.1: Despliegue de Funciones de la Máquina Herramienta

Fuente: Elaboración Propia

referencia. Teniendo ya los datos anteriores el software definirá las trayectorias y velocidades a las que se realizarán los cortes. El software confirmara que todos los parámetros estén bien definidos y mostrará un resumen de operación para que el técnico de pueda dar inicio a la

operación.

**Preparar operación de maquinado:** Una vez el operario haya iniciado el sistema procederá a realizar el montaje de la materia prima con la que se realizará el trabajo, así como el montaje de la herramienta de corte idónea para los resultados y/o requerimientos finales de la pieza a fabricar. En estos procesos de maquinado donde el desbaste de material genera una cantidad de calor considerable resulta importante contar con un sistema de refrigeración el cual será montado por el operario. Para finalizar y garantizar el buen funcionamiento el operario debe confirmar los montajes realizados.

**Iniciar proceso de maquinado:** Una vez finalizadas las funciones previas, la máquina debe transformar la energía eléctrica a energía mecánica para comenzar con el movimiento de los elementos de la máquina. Partiendo del movimiento de los actuadores se debe transmitir el movimiento a la herramienta, teniendo en cuenta las potencias requeridas. En este punto la máquina-herramienta se encuentra lista para empezar con la remoción de material. Hasta el final del proceso de remoción de material la máquina debe suministrar fluido de refrigeración a la zona en herramienta pieza que se encuentran en operación. En caso de alguna emergencia o mal funcionamiento se debe poder detener la operación. Si todo el procedimiento se lleva a cabo de manera adecuada se recibirá una confirmación de finalización de la operación.

**Desmontar y limpiar pieza y área de trabajo:** Después de que la operación de maquinado haya finalizado, la máquina comenzará una limpieza preliminar con un chorro de aire para retirar la viruta de la superficie de la pieza maquinada. Después el técnico encargado retirará la pieza de trabajo y dará inicio a la limpieza del área de trabajo.

**Apagar de sistema:** Una vez finalizado todo es proceso de mecanizado y limpieza, sabiendo que no se hará otra operación de maquinado el técnico que opera la máquina apagará el software y quitará el fluido eléctrico de la máquina.

### 3.2.2. Análisis Funcional

El análisis funcional busca producir un diagrama de bloques, que represente los flujos de energía, material, y señal (o información) como flechas etiquetadas tomando un camino entre los bloques de funciones. El análisis funcional más general consta de un simple bloque de función, la cual describe la función global del dispositivo; este diagrama se conoce como «caja negra» y es un punto de partida para el diseño de nuevos equipos o dispositivos. Luego de esto, y con ayuda de lo encontrado en el despliegue de funciones, es posible generar un diagrama que interrelacione todas las subfunciones del producto, así como los flujos que conectan a estas; este nuevo diagrama se le conoce como «Caja transparente» (Dieter &

Schmidt, 2012).

Los diagramas obtenidos para este proyecto se pueden observar en las figuras 3.2 y 3.3.

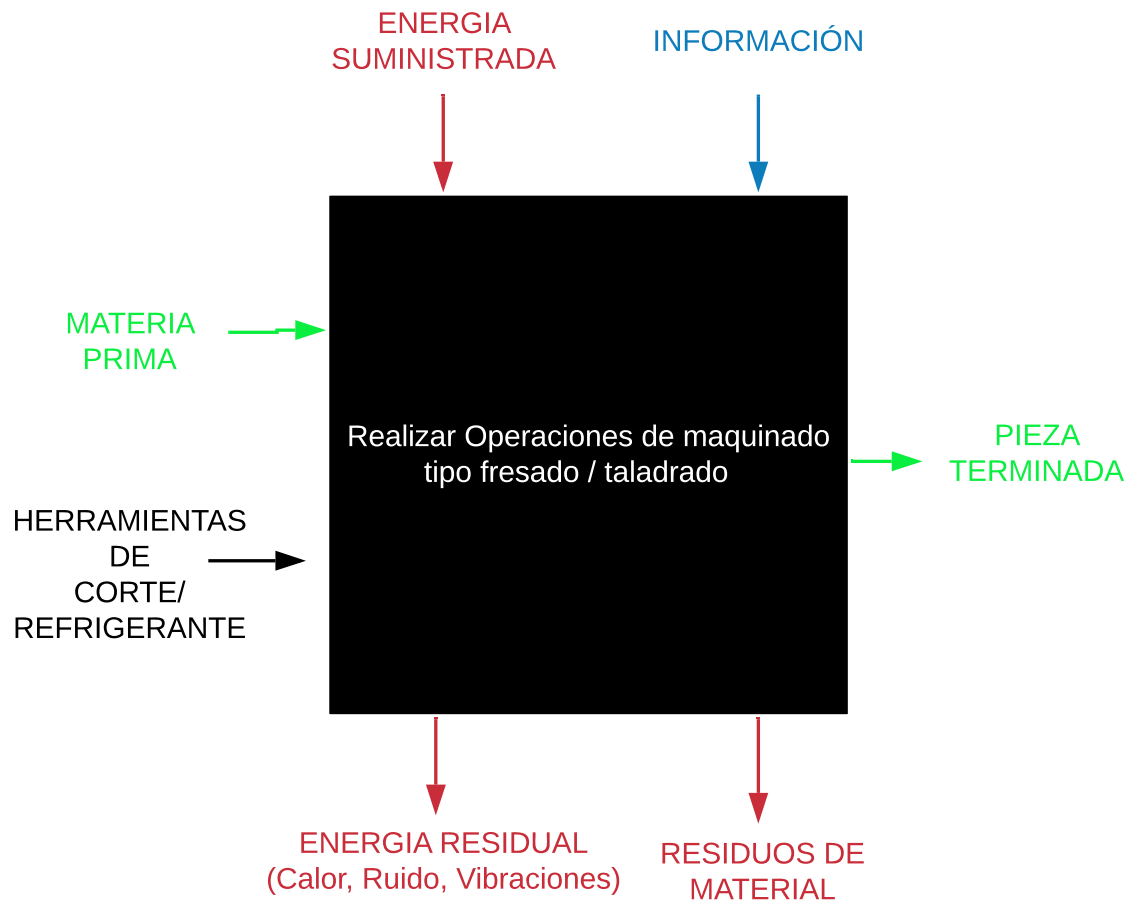


Figura 3.2: Caja Negra de la Máquina Herramienta

Fuente: Elaboración Propia

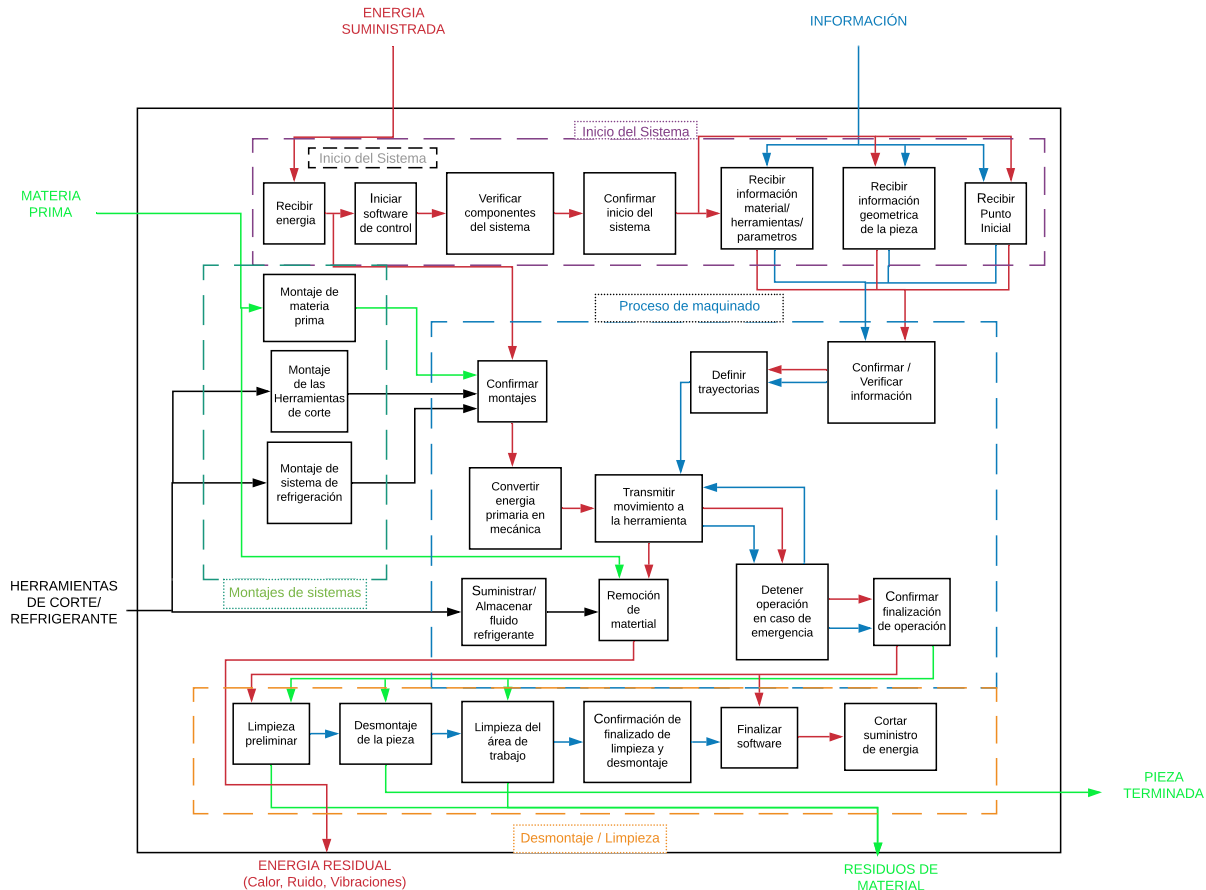


Figura 3.3: Caja Transparente de la Máquina Herramienta

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. Definición y ponderación de criterios de selección

Las alternativas de diseño de conceptuales que se sean planteadas deben satisfacer unos criterios para ser seleccionada como mejor alternativa. Estos criterios, aparte de las especificaciones de diseño, son indicadores del nivel de rendimiento de la solución, de ahí que se implemente un método sistemático cuantitativo para la evaluación de las alternativas. Para este proyecto se harán uso de nueve criterios que diseño, que compren factores económicos, rendimiento mecánico, diseño amigable con el medio ambiente y seguridad.

#### 3.3.1. Descripción detallada de las criterios de selección

**Costo de Adquisición:** Es altamente deseable un bajo costo de adquisición para la maquina puesto que el mercado objetivo son las Pymes y la solución brindada debe estar

asequible.

**Costo de Mantenimiento:** Se requiere que sea mínimo para reducir costos operativos y de producción, se relaciona con el número de piezas, modularidad y estandarización de las piezas de la máquina.

**Costo operativo/ Operación Ecológica:** Se requiere que sean bajos ya que te permite estimar la minimización de los costos del producto final.

**Precisión/Rigidez:** Se requiere una alta precisión y rigidez en la maquina herramienta debido a que se producirán piezas con bajas tolerancias y de alta calidad que logren ser competitivas en un mercado internacional.

**Seguridad:** Es altamente deseado, ya que permite que durante el proceso de producción tanto la pieza como el operador sufra una pérdida significativa.

**Compacidad:** Se desea una relación de compacidad alta donde la maquina pueda optimizar el espacio disponible en campo y conservar un espacio de trabajo para poder trabajar con piezas de mayor tamaño.

**Re configurabilidad:** El modularidad hace referencia a la posibilidad de hacer módulos (sistemas interconectables e intercambiables) de manera tal que facilite la posibilidad de hacer modificaciones de módulos en particular, ya sea para mejora de un módulo o para cambiar la función de este.

**Control:** Es altamente deseado, este disminuye el tiempo operativo, aumenta la precisión, minimiza las vibraciones, y aumenta la capacidad de operación hace referencia al control tanto de la máquina operativa como control en los factores externos.

**Capacidad de Carga:** Es altamente deseada para aumentar la productividad, poder maquinar materiales más resistentes, manejar mayores velocidades de maquinado y mayor durabilidad de los componentes de la máquina.

### 3.3.2. Matriz de comparación de los criterios de selección

Matriz de comparación por pares - CRITERIOS																	
Criterios	Costo de Adquisición	Costo de Mantenimiento	Costo operativo	Precision / Rigidez	Seguridad	Compacidad	Reconfigurabilidad	Control	Capacidad de Carga	Matriz Normalizada							
	1	5	5	1/5	1/3	9	5	3	5	0,10	0,17	0,24	0,06	0,15	0,13	0,33	0,22
Costo de Mantenimiento	1/5	1	1/3	1/7	1/5	5	1	1/5	1/3	0,02	0,03	0,02	0,04	0,05	0,03	0,02	0,01
Costo operativo	1/5	3	1	1/5	1/5	8	6	1/3	1	0,02	0,10	0,05	0,06	0,05	0,14	0,04	0,04
Precision / Rigidez	5	7	5	1	1	9	7	2	5	0,49	0,23	0,24	0,29	0,27	0,15	0,18	0,22
Seguridad	3	5	5	1	1	9	7	2	5	0,29	0,17	0,24	0,29	0,27	0,15	0,18	0,22
Compacidad	1/9	1/5	1/8	1/9	1/9	1	1/4	1/9	1/5	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01
Reconfigurabilidad	1/5	1	1/6	1/7	1/7	4	1	1/7	1/5	0,02	0,03	0,01	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01
Control	1/3	5	3	1/2	1/2	9	7	1	5	0,03	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15	0,11	0,22
Capacidad de Carga	1/5	3	1	1/5	1/5	5	5	1/5	1	0,02	0,10	0,05	0,06	0,05	0,08	0,13	0,04
<b>Total</b>	10,24	30,20	20,63	3,50	3,69	9,00	39,25	8,99	22,73								
<b>Promedio</b>	16,52	3,46	7,20	25,48	22,57	1,44	2,87	14,27	6,19								
<b>AxP</b>	1,84	0,32	0,70	2,83	2,43	0,14	0,27	1,47	0,61	$\bar{\lambda}$	CI	RI	CR				
$\lambda$	11,11	9,35	9,75	11,13	10,79	9,53	9,32	10,28	9,87	10,12	0,14	1,45	0,09				

Tabla 3.1: Matriz de comparación de los criterios de selección

Fuente: Elaboración Propia



### 3.4. Selección de la tecnología de Robot Herramienta

2 A partir de lo encontrado en la definición de especificaciones (ver Capítulo 2), fueron encontradas 3 tecnologías de mecanismos empleados como máquinas herramientas, estos son las máquinas convencionales (con sistema cartesiano), robots seriales (con lazo abierto) y manipuladores paralelos (lazo cerrado). Cada uno con sus ventajas y desventajas, por lo que para una buena generación de alternativas se comparó el rendimiento de estas tecnologías según los criterios de selección y determinar cuál es la mejor tecnología para esta aplicación. Se empleó un método de asignación directa para la evaluación, y las ponderaciones se basan de lo visto en la literatura. A parte de esto, se realiza un análisis de robustez de la solución, donde se concluye que las opciones convencionales y paralelas son las mejores para este proyecto.

	Ponderación	Ponderación 1	Ponderación 2	Ponderación 3	Convencional	Serial	Paralela
Costo de Adquisición	16.52	19.52	6.52	22.52	8	6	7
Costo Mantenimiento	3.46	5.54	2.46	3.54	9	7	5
Costo Operativo	7.20	14.20	5.20	10.20	7	5	10
Precisión/Rigidez	25.48	15.48	8.48	31.48	8	5	10
Seguridad	22.57	12.11	17.46	3.48	8	7	9
Compacidad	1.44	8.56	24.56	1.44	7	10	5
Modularidad	2.87	3.13	6.87	8.87	7	7	10
Control	14.27	10.27	15.27	17.27	9	8	7
Capacidad de carga	6.19	11.19	13.19	1.19	7	5	9
Total	100	100	100	100			
	Ponderación	8.000	6.243	8.544			
	Ponderación 1	7.787	6.347	8.168			
	Ponderación 2	7.679	7.287	8.510			
	Ponderación 3	7.991	6.133	8.510			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2: Selección de Tecnología

### 3.5. Análisis morfológico

Con el objetivo de conformar diversas alternativas, se decidió realizar un análisis morfológico el cual permitiera identificar posibles soluciones que cumplieren las subfunciones planteadas anteriormente en el despliegue de funciones. En este análisis se evaluaron 3 posibles soluciones para cada subfunción y se plasmó el conjunto en una tabla.

Función	N	Subfunción	Concepto de solución 1	Concepto de solución 2	Concepto de solución 3
Iniciar Sistema	1	Tipo de alimentación de energía	Electrica	Hidraulica	Neumatica
	2	Transmitir energía hacia los componentes	Conexiones eléctrica	Tuberia hidraulica	Tuberia Neumatica
	3	Sistema de control	Computarizado	Manual	Semiautomático
	4	Software	Arduino	Python	LabVIEW
Preparar Montajes	5	Montaje de herramienta de corte	Acople magnético	Acople tipo mordaza	
	6	Sujeción de materia prima	Mordazas mecánicas	Mordazas hidráulicas	Mordazas neumáticas
	7	Sistema de refrigeración	Refrigeración por aire	Refrigeración por liquido	Refrigeración Mixto
Mecanizar	8	Cinemática	Convencional	Paralela (Try-Piramid)	Paralela (UPU)
	9	Actuadores	Motor paso a paso	Motores síncronos	
	10	Sistema de guiado	Rieles	Ejes	Cable
	11	Sistema de transmisión de movimiento	Tornillo de potencia	Cilindro-pistón	Transmisión por correa
	12	Sistema de parada de emergencia	Sistema mecánico bloqueante	Sistema corta corriente	
Finalizar operación	13	Sistema de limpieza	Aire comprimido	Agua a presión	Barrido manual
	14	Confirmar finalización de operación	Indicador led	Indicador digital	Indicador sonoro

Tabla 3.3: Diagrama Morfológico

## 3.6. Generación de Alternativas

### 3.6.1. Alternativa 1: Máquina Herramienta Convencional

#### Resumen de la alternativa

La principal característica que presenta la alternativa 1 es la estructura tipo cartesiana que brinda 3 grados de libertad conforme a los ejes cartesianos. En este caso, el mecanismo de la maquina es movido por 3 motores paso a paso ubicados en cada eje, los cuales mueven un carro mediante un tornillo de potencia. El movimiento de cada carro es guiado por un sistema de rieles ubicados de forma tal que permitan alcanzar el espacio de trabajo deseado. El mecanismo consta de un motor ubicado en el eje z (Vertical) que es el encargado de mover la herramienta de corte. En el carro correspondiente al eje Y, se dispone un sistema de guiado en el cual se montan unas mordazas mecánicas las cuales son las encargadas de sujetar el material a mecanizar. Por otra parte, el proceso de mecanizado será llevado a cabo por un proceso de control numérico computarizado, específicamente con el interfaz de Python.

#### Descripción

Con base al análisis morfológico y la síntesis funcional, se selecciono los conceptos para el funcionamiento de la alterativa 1, generando el siguiente diagrama morfológico de la alternativa.

Función	N	Subfunción	Concepto de solución 1
Iniciar Sistema	1	Tipo de alimentación de energía	Electrica
	2	Transmitir energía hacia los componentes	Conexiones eléctrica
	3	Sistema de control	Computarizado
	4	Software	Python
Preparar Montajes	5	Montaje de herramienta de corte	Acople tipo mordaza
	6	Sujeción de materia prima	Mordazas mecánicas
	7	Sistema de refrigeración	Refrigeración Mixta
Estructura	8	Cinemática	Convencional
	9	Actuadores	Motor paso a paso
Mecanizar	10	Sistema de guiado	Rieles
	11	Sistema de transmisión de movimiento	Tornillo de potencia
	12	Sistema de parada de emergencia	Sistema corta corriente
Finalizar sistemas	13	Sistema de limpieza	Aire comprimido
	14	Confirmar finalización de operación	Indicador digital

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.4: Morfología de la Alternativa 1

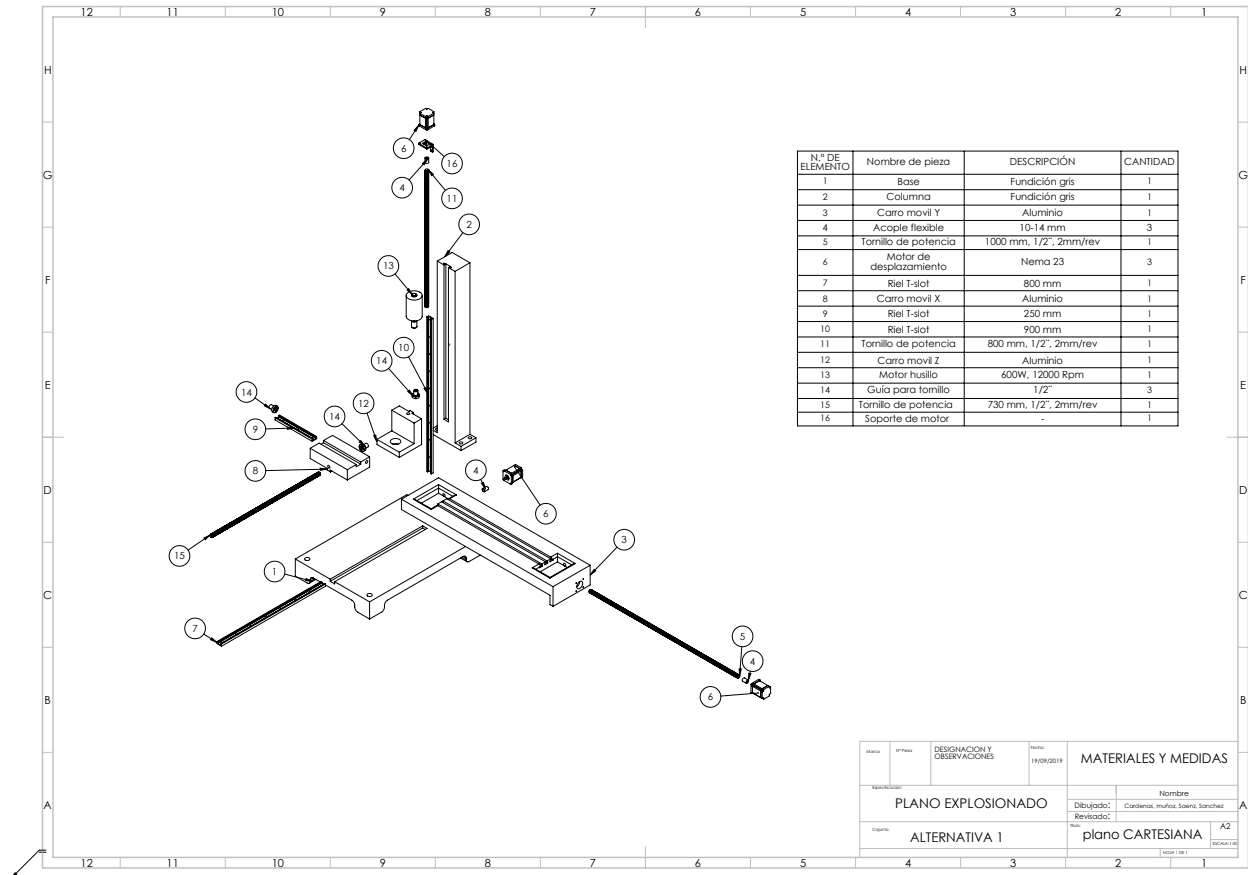


Figura 3.4: Plano Explosionado y lista de materiales de la alternativa 1

Fuente: Elaboración Propia

## Presupuesto

Una vez con el concepto de la alternativa establecido, se procedió a realizar un presupuesto, el cuál tenga en cuenta las diferentes fases de vida de la alternativa, es decir desde el diseño hasta la fabricación para la posterior evaluación de viabilidad de la alternativa.

	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
Diseño	Ingeniero de calculo	\$ 150.000,00	40,00	horas	\$ 6.000.000,00
	Memorias y plano	\$ 15.000,00	80,00	horas	\$ 1.200.000,00
	Software	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	Interfaz	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	<b>Subtotal Diseño</b>				<b>\$ 8.200.000,00</b>
	Motor Paso a Paso Nema 23 28.55 Kg.cm	\$ 225.676,00	3,00	-	\$ 677.028,00

	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
Lista de Componentes	Motor-Husillo 600W max,48 V max, 1200 Rpm max, DC	\$ 400.000,00	1,00	-	\$ 400.000,00
	Tornillo de potencia 12 mm	\$ 45.000,00	3,00	-	\$ 135.000,00
	Acople Flexible D30L42 10X14 mm	\$ 35.890,00	3,00	-	\$ 107.670,00
	Riel T slot	\$ 75.000,00	3,00	-	\$ 225.000,00
	Guia para tornillo	\$ 120.000,00	3,00	-	\$ 360.000,00
	Columna	\$ 5.000,00	87,00	Kg	\$ 435.000,00
	Base	\$ 5.000,00	155,00	-	\$ 775.000,00
	Driver motor paso a paso Nema 23	\$ 65.000,00	3,00	-	\$ 195.000,00
	Carro movil eje Z	\$ 15.000,00	4,00	Kg	\$ 60.000,00
	Carro movil eje Y	\$ 15.000,00	39,00	Kg	\$ 585.000,00
	Carro movil eje X	\$ 4.000,00	6,00	Kg	\$ 24.000,00
	Ordenador PC	\$ 3.600.000,00	1,00	-	\$ 3.600.000,00
	Accesorios electricos	\$ 300.000,00	1,00	-	\$ 300.000,00
	Tornilleria	\$ 300.000,00	1,00	-	\$ 300.000,00
	Sistema de limpieza	\$ 400.000,00	1,00	-	\$ 400.000,00
	Sistema de refrigeración	\$ 600.000,00	1,00	-	\$ 600.000,00
	Sistema de sujeccion	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
<b>Subtotal Lista de Componentes</b>					<b>\$ 9.678.698,00</b>
Fabricación	Emsablador	\$ 10.000,00	24,00	horas	\$ 240.000,00
	Ayudante	\$ 6.000,00	24,00	horas	\$ 144.000,00
	Supervisor	\$ 100.000,00	8,00	horas	\$ 800.000,00
	<b>Subtotal Fabricación</b>				
Equipos	Pintura	\$ 20.000,00	4,00	m2	\$ 80.000,00
	Herramientas	\$ 350.000,00	1,00	-	\$ 350.000,00
	Centro de mecanizado	\$ 90.000,00	16,00	horas	\$ 1.440.000,00
	<b>Subtotal Sección</b>				
<b>Subtotal</b>					<b>\$ 20.932.698,00</b>
<b>Imprevistos (30 %)</b>					<b>\$ 6.279.809,40</b>
<b>Total</b>					<b>\$ 27.212.507,40</b>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.5: Presupuesto de la Alternativa 1

### 3.6.2. Alternativa 2: Máquina Herramienta Ponchohedron

#### Resumen de la alternativa

La principal característica que presenta la alternativa 2 es su inspiración en lo encontrado en el trabajo de Zeng et al. (2014), en donde se presenta una familia de mecanismos del estilo Try-Pyramid. El robot escogido para la solución consta de una base triangular, en donde los bordes de esta son las prismáticas de las entradas. Los carros están conectados a la plataforma por medio de una paralelogramo formado por dos brazos y juntas universales. Por la plataforma, la cual posee una forma hexagonal que permiten conectar los tres paralelogramos. Esto generando tres grados de libertad lineales, lo que implica utilizar tres entradas, y que para este mecanismo deben ser lineales. Para esto, se utiliza la combinación de motor paso a paso acoplado a un eje roscado. La sujeción de la pieza a la máquina se realiza por medio de un sistema neumático que estará soportado en una estructura aparte. Por otra parte, el proceso de mecanizado será llevado a cabo por un proceso de control numérico computarizado, específicamente en Arduino.

#### Descripción

Con base al análisis morfológico y la síntesis funcional, se selecciono los conceptos para el funcionamiento de la alterativa 2, generando el siguiente diagrama morfológico de la alternativa.

Función	N	Subfunción	Concepto de solución 2
Iniciar Sistema	1	Tipo de alimentación de energía	Electrica
	2	Transmitir energía hacia los componentes	Conexiones eléctrica
	3	Sistema de control	Computarizado
	4	Software	Arduino
Preparar Montajes	5	Montaje de herramienta de corte	Acople tipo mordaza
	6	Sujeción de materia prima	Mordazas neumáticas
	7	Sistema de refrigeración	Refrigeración por aire
Estructura	8	Cinemática	Paralela (Try-Piramid)
Mecanizar	9	Actuadores	Motor paso a paso
	10	Sistema de guiado	Ejes
	11	Sistema de transmisión de movimiento	Tornillo de potencia
	12	Sistema de parada de emergencia	Sistema corta corriente
Finalizar sistemas	13	Sistema de limpieza	Aire comprimido
	14	Confirmar finalización de operación	Indicador LED

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.6: Morfología de la Alternativa 2

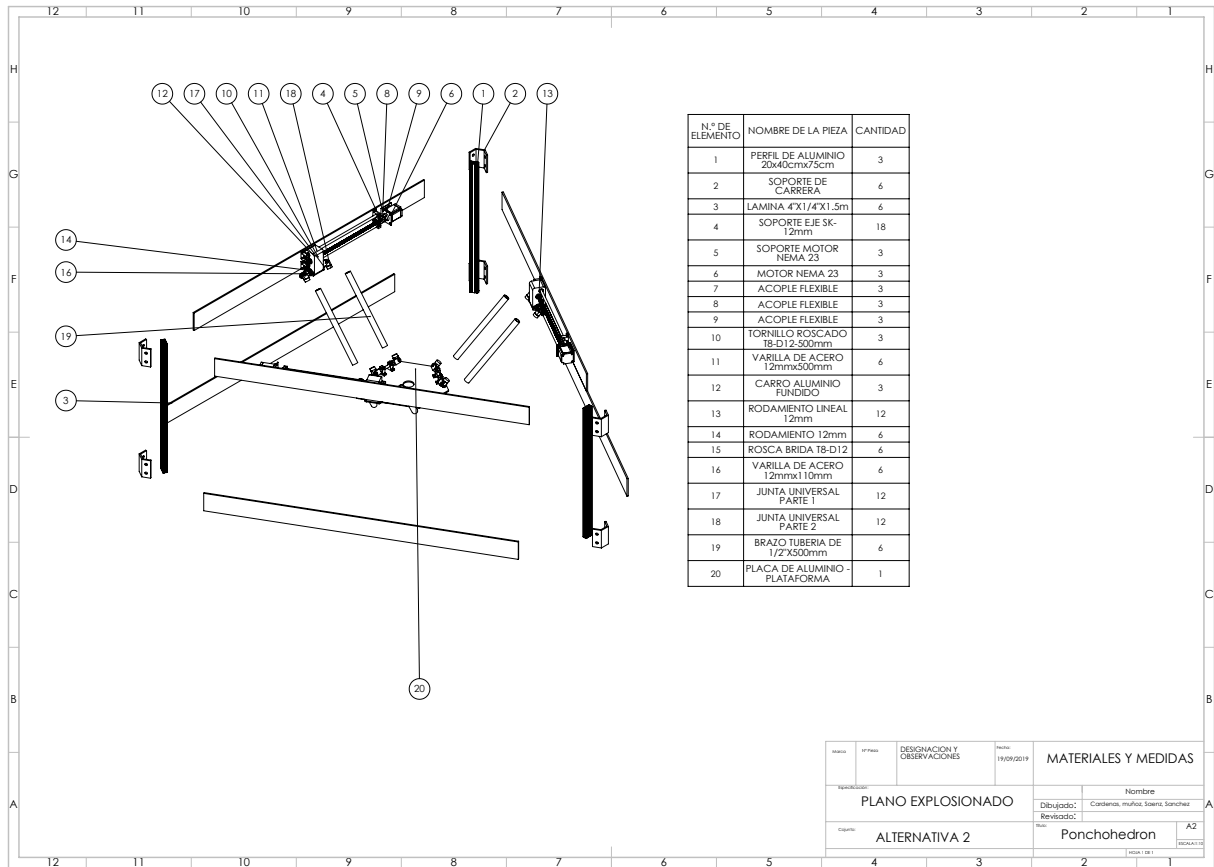


Figura 3.5: Plano Explosionado y lista de materiales de la alternativa 2  
Fuente: Elaboración Propia

## Presupuesto

Una vez con el concepto de la alternativa establecido, se procedió a realizar un presupuesto para la posterior evaluación de viabilidad de la alternativa.

	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
Diseño	Ingeniero de calculo	\$ 150.000,00	60,00	horas	\$ 9.000.000,00
	Memorias y plano	\$ 15.000,00	40,00	horas	\$ 600.000,00
	Software	\$ 750.000,00	1,00	-	\$ 750.000,00
	Interfaz	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	<b>Subtotal Diseño</b>				
	Motor Paso a Paso Nema 23 28.55 Kg.cm	\$ 225.676,00	3,00	-	\$ 677.028,00
	Motor-Husillo 600W max,48 V max, 1200 Rpm max, DC	\$ 400.000,00	1,00	-	\$ 400.000,00
	Tornillo de potencia 12 mm	\$ 45.000,00	3,00	-	\$ 135.000,00
	Acople Flexible D30L42 10 mm X 12 mm	\$ 40.038,91	3,00	-	\$ 120.116,72
	Rosca Brida T8 - D 12 mm	\$ 36.904,86	3,00	-	\$ 110.714,58
	Varilla de acero 12 mm x 0.5 m	\$ 34.653,00	6,00	-	\$ 207.918,00
	Soporte Eje SK-12 mm	\$ 6.178,00	18,00	-	\$ 111.204,00
	Lamina de aluminio de 4.5 pulg x 1/4 pulg x 1.5 m	\$ 25.000,00	3,00	-	\$ 75.000,00
	Perfil de aluminio 20 mm x 40 mm x 0.75 m	\$ 72.900,00	3,00	-	\$ 218.700,00
	Driver motor paso a paso Nema 23	\$ 65.000,00	3,00	-	\$ 195.000,00
	Soporte Motor NEMA 23	\$ 16.400,00	3,00	-	\$ 49.200,00
	Brazos - Tuberia 1/2 pulg x 0.5 m	\$ 30.000,00	6,00	-	\$ 180.000,00
	Carro Brazos	\$ 15.000,00	3,30	kg	\$ 49.500,00
	Plataforma	\$ 40.000,00	2,00	kg	\$ 80.000,00
	Soporte de Carrera	\$ 24.000,00	6,00	-	\$ 144.000,00
	Rodamiento Lineal LM16UU	\$ 14.875,00	14,00	-	\$ 208.250,00
	Chumacera K004 FL001	\$ 12.300,00	3,00	-	\$ 36.900,00
	Ordenador PC	\$ 3.600.000,00	1,00	-	\$ 3.600.000,00
	Accesorios electricos	\$ 400.000,00	1,00	-	\$ 400.000,00
	Tornilleria	\$ 200.000,00	1,00	-	\$ 200.000,00



	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
	Sistema de limpieza	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	Sistema de refrigeración	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	Sistema de sujecion	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	<b>Subtotal Lista de Componentes</b>				<b>\$ 8.698.531,30</b>
Fabricación	Emsablador	\$ 10.000,00	80,00	horas	\$ 800.000,00
	Ayudante	\$ 6.000,00	80,00	horas	\$ 480.000,00
	Supervisor	\$ 100.000,00	40,00	horas	\$ 4.000.000,00
	<b>Subtotal Fabricación</b>				<b>\$ 5.280.000,00</b>
Equipos	Pintura	\$ 20.000,00	3,00	m2	\$ 60.000,00
	Herramientas	\$ 350.000,00	1,00	-	\$ 350.000,00
	Centro de mecanizado	\$ 90.000,00	16,00	horas	\$ 1.440.000,00
	<b>Subtotal Sección</b>				<b>\$ 1.850.000,00</b>
<b>Subtotal</b>					<b>\$ 26.678.531,30</b>
<b>Imprevistos (30 %)</b>					<b>\$ 8.003.559,39</b>
<b>Total</b>					<b>\$ 34.682.090,69</b>

Tabla 3.7: Presupuesto de la Alternativa 2

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.3. Alternativa 3: Máquina Herramienta RRPRR

#### Resumen de la alternativa

La principal característica que presenta la alternativa 2 es su inspiración en lo encontrado en el trabajo de Petko & Karpel (2005), en donde se presenta una familia de mecanismos del estilo RRPRR. El robot escogido para la solución consta de una base triangular, en donde los vértices de esto son los puntos de acople para una revolutas de giro vertical. El eslabón acoplado a esto, posee otra revoluta en su extremo opuesto pero esta gira horizontalmente. Luego de esto, está una prismática, la cual es la entrada de movimiento del sistema. Esto generando tres grados de libertad lineales, lo que implica utilizar tres entradas, y que para este mecanismo deben ser lineales. Para esto, se utiliza la combinación de motor paso a paso acoplado a un eje roscado. La sujeción de la pieza a la máquina se realiza por medio de un sistema neumático que estará soportado en una estructura aparte. Por otra parte, el proceso de mecanizado será llevado a cabo por un proceso de control numérico computarizado, específicamente en python.

#### Descripción

Función	N	Subfunción	Concepto de solución 3
Iniciar Sistema	1	Tipo de alimentación de energía	Electrica
	2	Transmitir energía hacia los componentes	Conexiones eléctrica
	3	Sistema de control	Computarizado
	4	Software	Python
Preparar Montajes	5	Montaje de herramienta de corte	Acople tipo mordaza
	6	Sujeción de materia prima	Mordazas mecánica
	7	Sistema de refrigeración	Refrigeración combinada
Estructura	8	Cinemática	Paralela (RRPRR)
Mecanizar	9	Actuadores	Motor paso a paso
	10	Sistema de guiado	Ejes
	11	Sistema de transmisión de movimiento	Tornillo de potencia
	12	Sistema de parada de emergencia	Sistema corta corriente
Finalizar sistemas	13	Sistema de limpieza	Aire comprimido
	14	Confirmar finalización de operación	Indicador digital

Tabla 3.8: Morfología de la Alternativa 3

Fuente: Elaboración Propia

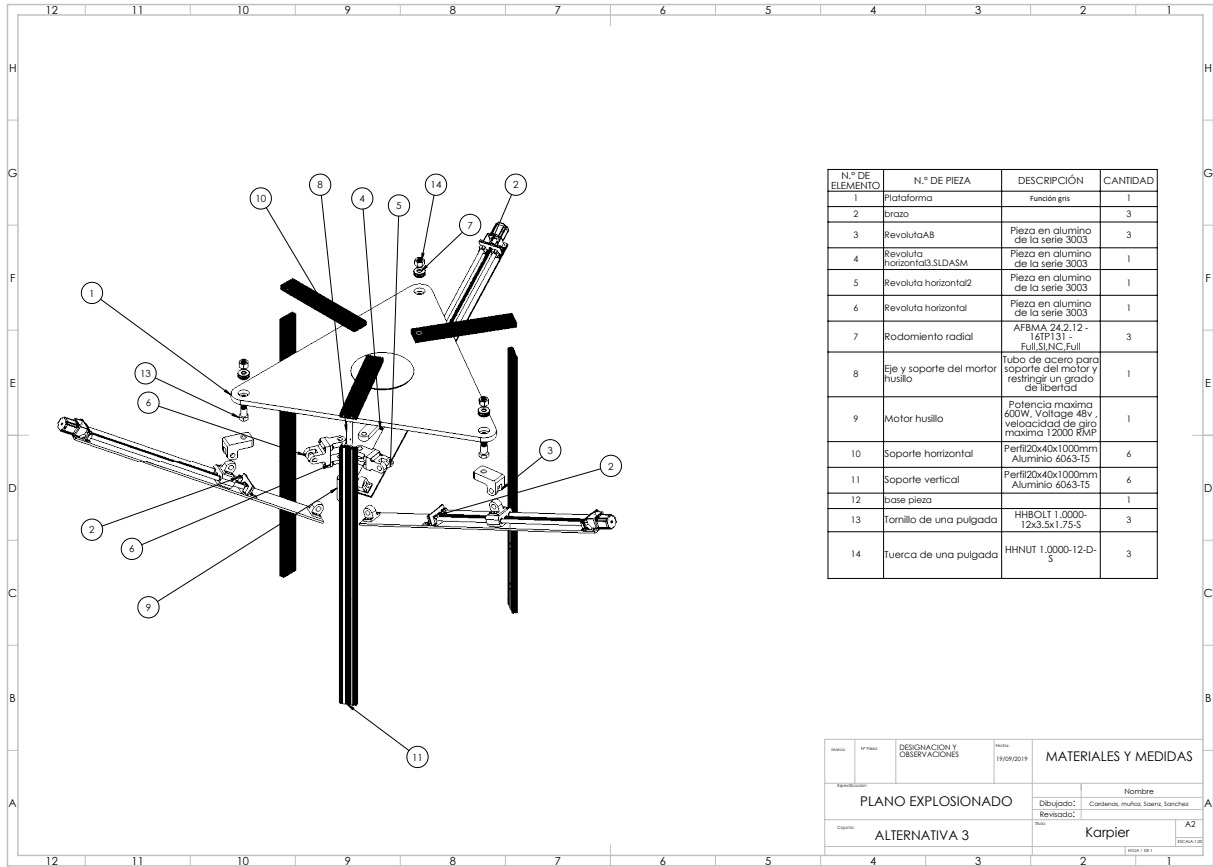


Figura 3.6: Lista de materiales, alternativa 3

Fuente: Elaboración Propia

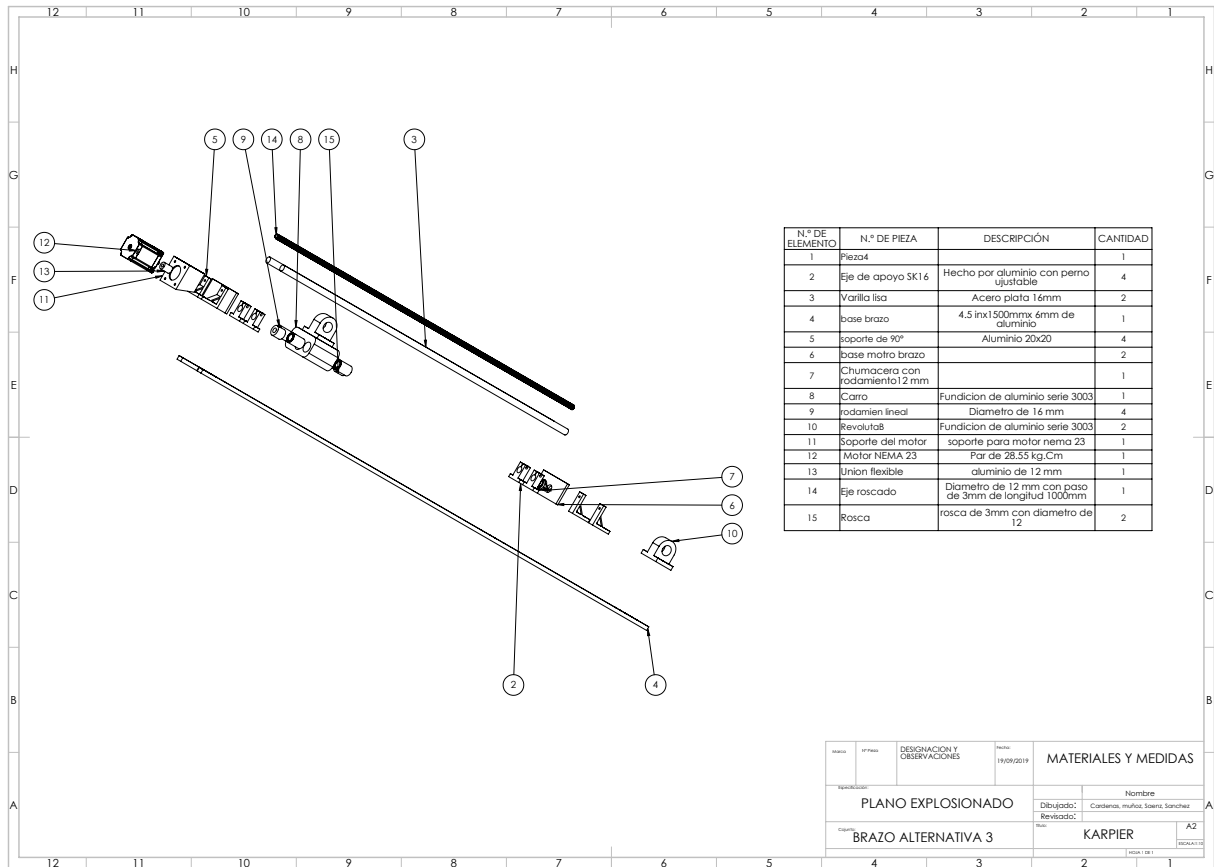


Figura 3.7: Lista de materiales Brazo, alternativa 3

Fuente: Elaboración Propia

## Presupuesto

Una vez con el concepto de la alternativa establecido, se procedió a realizar un presupuesto para la posterior evaluación de viabilidad de la alternativa.

	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
Diseño	Ingeniero de calculo	\$ 150.000,00	80,00	horas	\$ 12.000.000,00
	Memorias y plano	\$ 15.000,00	40,00	horas	\$ 600.000,00
	Software	\$ 750.000,00	1,00	-	\$ 750.000,00
	Interfaz	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
<b>Subtotal Diseño</b>					<b>\$ 13.850.000,00</b>
	Motor Paso a Paso Nema 23 28.55 Kg.cm	\$ 225.676,00	3,00	-	\$ 677.028,00
	Motor-Husillo 600W max,48 V max, 1200 Rpm max, DC	\$ 400.000,00	1,00	-	\$ 400.000,00

	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
Lista de Componentes	Tornillo de potencia 12 mm x 1 m	\$ 45.000,00	3,00	-	\$ 135.000,00
	Acople Flexible D30L42 10 mm X 14 mm	\$ 35.890,00	3,00	-	\$ 107.670,00
	Rosca Brida T8 - D 12 mm	\$ 36.904,86	3,00	-	\$ 110.714,58
	Varilla de acero 16 mm x 0.5 m	\$ 68.300,00	6,00	-	\$ 409.800,00
	Apoyo para varilla lisa de 16 mm	\$ 8.400,00	12,00	-	\$ 100.800,00
	Lamina de aluminio de 4.5 pulg x 1/4 pulg x 1.5 m	\$ 25.000,00	3,00	-	\$ 75.000,00
	Perfil de aluminio 20 mm x 40 mm x 1m	\$ 72.900,00	6,00	-	\$ 437.400,00
	Perfil de aluminio 20 mm x 40 mm x 1.5m	\$ 90.200,00	6,00	-	\$ 541.200,00
	Driver motor paso a paso Nema 23	\$ 65.000,00	3,00	-	\$ 195.000,00
	Revoluta Horizontal tipo 1	\$ 15.000,00	1,00	kg	\$ 15.000,00
	Revoluta Horizontal tipo 2	\$ 15.000,00	6,24	kg	\$ 93.600,00
	Revoluta Horizontal tipo 3	\$ 15.000,00	3,47	kg	\$ 52.000,00
	Carro Brazos	\$ 15.000,00	2,63	kg	\$ 39.465,00
	Plataforma	\$ 50.000,00	16,98	kg	\$ 849.060,00
	Rodamiento Lineal LM16UU	\$ 14.875,00	14,00	-	\$ 208.250,00
	Chumacera K004 FL001	\$ 12.300,00	3,00	-	\$ 36.900,00
	Ordenador PC	\$ 3.600.000,00	1,00	-	\$ 3.600.000,00
	Accesorios electricos	\$ 400.000,00	1,00	-	\$ 400.000,00
	Tornilleria	\$ 200.000,00	1,00	-	\$ 200.000,00
	Sistema de limpieza	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
Sistema de refrigeración	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00	
Sistema de sujeccion	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00	
<b>Subtotal Lista de Componentes</b>					<b>\$ 10.183.887,58</b>
Fabricación	Emsablador	\$ 10.000,00	40,00	horas	\$ 400.000,00
	Ayudante	\$ 6.000,00	40,00	horas	\$ 240.000,00
	Supervisor	\$ 100.000,00	20,00	horas	\$ 2.000.000,00
<b>Subtotal Fabricación</b>					<b>\$ 2.640.000,00</b>
Equipos	Pintura	\$ 20.000,00	4,00	m2	\$ 80.000,00

	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
	Herramientas	\$ 350.000,00	1,00	-	\$ 350.000,00
	Centro de mecanizado	\$ 90.000,00	16,00	horas	\$ 1.440.000,00
<b>Subtotal Sección</b>					<b>\$ 1.870.000,00</b>
<b>Subtotal</b>					<b>\$ 28.543.887,58</b>
<b>Imprevistos (30 %)</b>					<b>\$ 8.563.166,27</b>
<b>Total</b>					<b>\$ 37.107.053,85</b>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.9: Presupuesto de la Alternativa 3

### 3.7. Proceso Analítico de Jerarquía (AHP)

#### COSTO DE ADQUISICION

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	0.2	0.3333	0,1111	0,1304	0,0769	0.1061
Alternativa 2	5	1	3	0,5555	0,6521	0,6923	0.6333
Alternativa 3	3	0.3333	1	0,33	0,2173	0,2307	0.2604
Total	9	1.53	4.33				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.10: Ponderación del Costo de Adquisición

#### COSTO DE MANTENIMIENTO

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	5	3	0,6521	0.5556	0,6923	0.6333
Alternativa 2	0.2	1	0.3333	0,1304	0,1111	0,0769	0.1061
Alternativa 3	0.3333	3	1	0.2173	0,33	0,2307	0.2604
Total	9	1.53	4.33				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.11: Ponderación del Costo de Mantenimiento

#### COSTO DE OPERATIVO

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	0.2	0.1428	0,0769	0.0322	0,1063	0.0718
Alternativa 2	5	1	0.2	0,3846	0,1612	0,1489	0.2316
Alternativa 3	7	5	1	0.5384	0,8064	0,7446	0.6965
Total	13	6.2	1.3428				

Tabla 3.12: Ponderación del Costo de Operativo

**PRECISIÓN/RIGIDEZ**

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	0.5	0.2	0.125	0.0769	0,428	0.1149
Alternativa 2	2	1	0.2	0,25	0,1538	0,1428	0.1822
Alternativa 3	5	5	1	0.625	0,7692	0,7142	0.7028
Total	8	6.5	1.4				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.13: Ponderación de la Precisión

**COMPACIDAD**

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	5	3	0,6521	0,5555	0,6920	0.6333
Alternativa 2	0.2	1	0.3333	0,1304	0,1111	0,0769	0.1061
Alternativa 3	0.3333	0.3	1	0,2127	0,3333	0,2307	0.2604
Total	1.5333	9	4.3333				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.14: Ponderación de la Compacidad

**RECONFIGURABILIDAD**

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	5	3	0,6521	0.5555	0,6923	0.6333
Alternativa 2	0.2	1	0.3333	0,1304	0,1111	0,0769	0.1061
Alternativa 3	0.3333	3	1	0.2173	0,3333	0,2307	0.2604
Total	1.5333	9	4.3333				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.15: Ponderación de la Reconfigurabilidad

**SEGURIDAD**

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	5	3	0,6521	0.5555	0,6923	0.6333
Alternativa 2	0.2	1	0.3333	0,1304	0,1111	0,0769	0.1061
Alternativa 3	0.3333	3	1	0.2173	0,3333	0,2307	0.2604
Total	1.5333	9	4.3333				

Tabla 3.16: Ponderación de la Seguridad

Fuente: Elaboración Propia

**SISTEMA DE CONTROL**

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	0.2	0.25	0,1	0.1304	0,0588	0.0964
Alternativa 2	5	1	3	0,5	0,6521	0,7058	0.6093
Alternativa 3	4	0.3333	1	0.4	0,2173	0,2352	0.2842
Total	10	1.5333	4.25				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.17: Ponderación del Sistema de Control

**CAPACIDAD DE CARGA**

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Promedio
Alternativa 1	1	0.2	0.1428	0,0769	0.0476	0,0967	0.0737
Alternativa 2	5	1	0.3333	0,3846	0,2380	0,2258	0.2828
Alternativa 3	7	3	1	0.5348	0,7142	0,6774	0.6433
Total	13	4.2	1.4761				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.18: Ponderación de la Capacidad de Carga

**MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

<b>Criterios</b>	Costo de Adquisición	Costo de Mantenimiento	Costo operativo	Precisión / Rigidez	Seguridad	Compatibilidad	Reconfigurabilidad	Control	Capacidad de Carga	Total
Alternativa 1	0.1062	0.6333	0.0719	0.1149	0.6333	0.6333	0.0738	0.0964	0.0738	0.246
Alternativa 2	0.6333	0.1062	0.2316	0.1822	0.1062	0.1062	0.6434	0.6194	0.2828	0.321
Alternativa 3	0.2605	0.2605	0.6965	0.7028	0.2605	0.2605	0.2828	0.2842	0.6434	0.432
Ponderación	0.1652	0.0346	0.072	0.2548	0.2257	0.0144	0.0287	0.1427	0.0619	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.19: Matriz de decisión de alternativas



**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA ALTERNATIVAS**

<b>Criterios</b>	Costo de Adquisición	Costo de Mantenimiento	Costo operativo	Precision / Rigidez	Seguridad	Compacidad	Reconfigurabilidad	Control	Capacidad de Carga	Total	Ponderación 1	Ponderación 2	Ponderación 3
Alternativa 1	0.1062	0.6333	0.0719	0.1149	0.6333	0.6333	0.0738	0.0964	0.0738	0.246	0.235	0.332	0.145
Alternativa 2	0.6333	0.1062	0.2316	0.1822	0.1062	0.1062	0.6434	0.6194	0.2828	0.321	0.328	0.292	0.4
Alternativa 3	0.2605	0.2605	0.6965	0.7028	0.2605	0.2605	0.2828	0.2842	0.6434	0.432	0.437	0.376	0.455
Ponderación	0.1652	0.0346	0.702	0.2548	0.2257	0.0144	0.0287	0.1427	0.0619				
Total	0.1652	0.0346	0.072	0.2548	0.2257	0.0144	0.0287	0.1427	0.0619				
Ponderación 1	0.1952	0.054	0.1420	0.1548	0.1211	0.0856	0.0313	0.1027	0.1119				
Ponderación 2	0.0652	0.0246	0.0520	0.0848	0.1746	0.2456	0.0687	0.1527	0.1319				
Ponderación 3	0.2252	0.0354	0.1020	0.3148	0.0348	0.0144	0.0887	0.1727	0.0119				

Tabla 3.20: Análisis de sensibilidad para alternativas

Fuente: Elaboración Propia

### 3.8. Alternativa Escogida



(a) Sistema Completo



(b) Brazo Completo

Figura 3.8: Renderizado de la Alternativa Escogida

# Capítulo 4

## Diseño Básico

### 4.1. Metodología del Diseño Básico

Posterior a la fase de diseño conceptual de la solución, se presenta el diseño básico del mismo, en donde se divide el dispositivo en una serie de subsistemas. Esto con el propósito facilitar el entendimiento de los principios físicos que describen el comportamiento de las diferentes partes del equipo, así como las teorías de diseño empleadas para el dimensionamiento de sus partes. De estas teorías se destacan las de diseño mecánico, las cuales permite el dimensionamiento de un elemento sometido a una condición de esfuerzos, dada una geometría, como son las teorías de fallas para materiales dúctiles (Esfuerzo cortante máximo, Energía de distorsión y Mohr Coulomb dúctil) y para materiales frágiles (Esfuerzo normal máximo, Mohr Coulomb frágil y Mohr modificada) (Shigley, 2011).

Para este proyecto, la máquina a diseñar se dividió en 6 apartados (también ver Figura 4.1):

- El Husillo, es el sistema de accionamiento de la herramienta de corte.
- El Mecanismo, es el sistema que transmite el movimiento de los actuadores a la herramienta de corte.
- El Accionamiento, es el sistema de actuación que convierten la energía primaria en energía mecánica.
- La Estructura, es el sistema que brinda el soporte y el cual sostiene todos los demás subsistemas.
- El Sistema de Control, es el sistema que manipula el sistema de accionamiento para posicionar la herramienta durante el corte.
- El Sistema de Refrigeración, es el sistema que mantiene la temperatura, tanto de la pieza como la de herramienta, en valores aceptables para el proceso.

El alcance del proyecto llegará hasta el diseño básico del accionamiento, dejando para próximos proyectos y/o trabajos el diseño de las demás subsistemas de esta máquina. En las siguientes secciones de este capítulo se desarrollará el diseño de cada apartado.

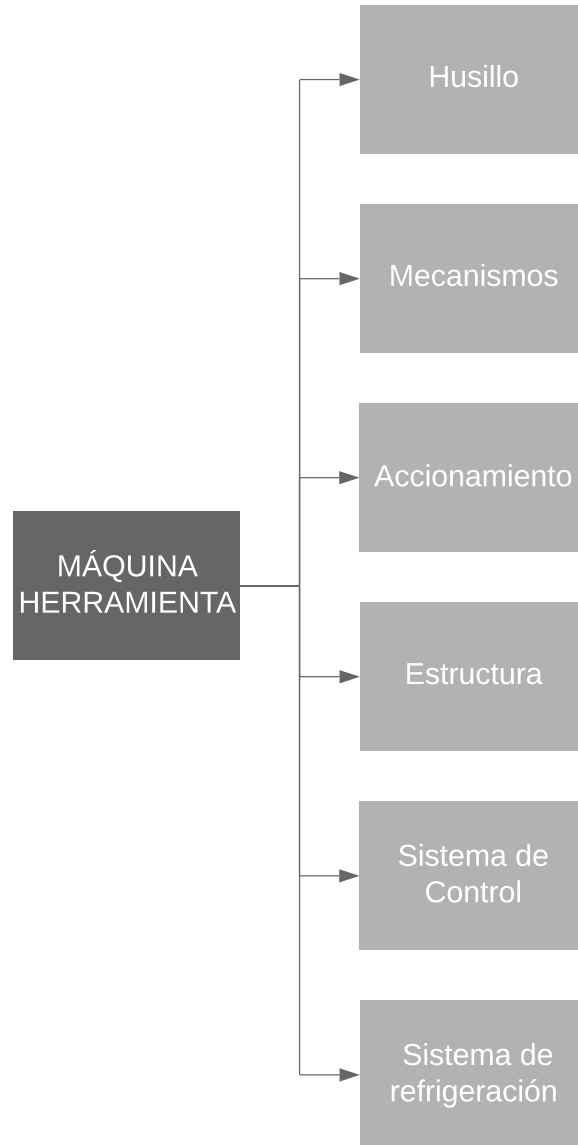


Figura 4.1: Subsistemas presentes en la máquina

## 4.2. Diseño Básico del Husillo

Para el básico del sistema de corte motor-husillo se toma como guía los catálogos de herramientas de corte Mitsubishi (2014) y Celesa (2017), para así obtener los parámetros de corte y variables a considerar para el cálculo de potencia de corte ( $P_c$ ).

### 4.2.1. Parámetros de corte recomendados para fresas HSS-Co8

En el dimensionamiento del motor-husillo se utilizaron parámetros de corte recomendados por el fabricante de fresas Celesa (2017) donde especifica las velocidades de corte ( $V_C$ ) y velocidades de avance ( $V_f$ ) dependiendo del material del que está hecha la pieza de trabajo y las características de la herramienta de corte fresa. En este mismo catálogo también recomiendo ancho de corte ( $e_p$ ) y profundidad de corte ( $a_p$ ), los cuales dependen del diámetro de la herramienta de corte y el tipo de operación. Los diámetros con los que se quiere trabajar en las operaciones de fresado están entre 2 a 18 mm y los materiales de las piezas a trabajar serán aluminio y acero blando. Los parámetros se presentaron en la tabla 4.1.

			Diámetro (mm)					
			2	4	8	10	18	
Acero blando	Velocidad de corte (m / min)	N ° de filos	Velocidad angular(RPM)					
	39		6207	3104	1552	1241	690	
Resistencia a la tracción 70 Kg / mm <sup>2</sup>	Velocidad de avance (mm/min)	2	50	56	84	82	80	
		3	75	84	126	123	120	
		4	100	112	168	164	160	
Aluminio	Velocidad de corte (m / min)	N ° de filos	Velocidad angular(RPM)					
	230		36606	18303	9152	7321	4067	
	Velocidad de avance (mm/min)		2	293	329	494	400	230
			3	440	494	741	600	345
4		586	658	988	800	460		

Fuente:(Celesa, 2017)

Tabla 4.1: Parámetros de corte para el Acero blando y aluminio

En la Figura 4.2 se presenta las profundidades recomendadas para tres distintas operaciones.

Para preservar la vida útil de herramienta de corte y tener un menor consumo de potencia se plantea que para el aluminio en el fresado Basto la profundidad de corte ( $a_p$ ) a partir del diámetro de 8 mm en adelante será de 10 mm y para el fresado ranurado o vaciado la profundidad es 0,3

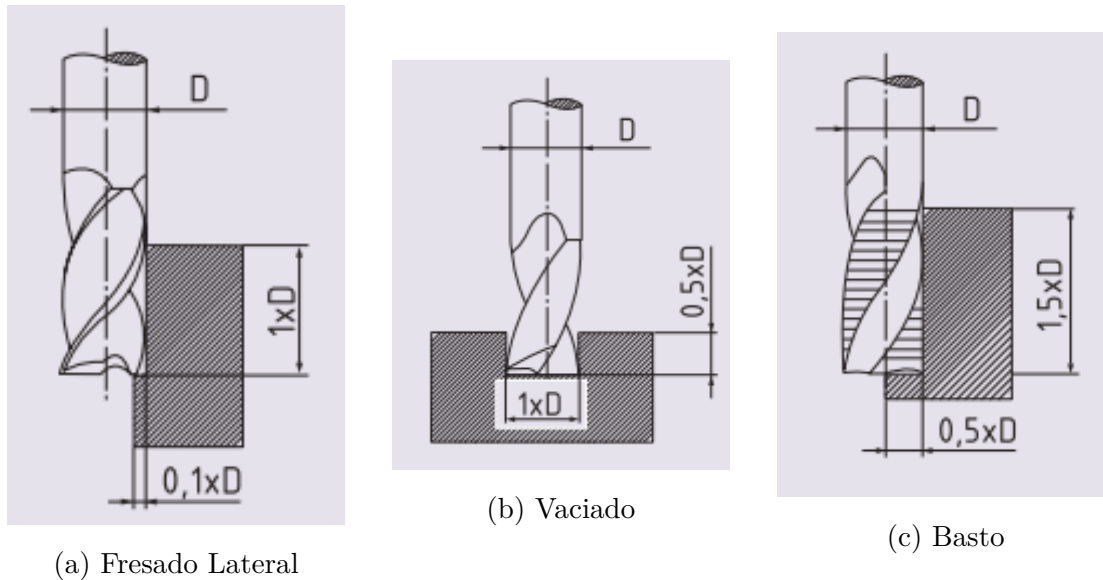


Figura 4.2: Profundidad y ancho de corte recomendada del fresado  
Fuente: (Celesa, 2017)

el diámetro de la fresa. De igual forma para el acero blando se toma también una profundidad de corte similar a la de fresado basto pero el ancho de corte será 0,25 el diámetro de la herramienta, y en el ranurado la profundidad de corte será 0,2 el diámetro de la herramienta de fresado. En la tabla 4.2 y la tabla 4.3 se presentará el ancho y profundidad de corte para los tipos de fresado .

Con los parámetros ya obtenidos, se procede a usar la expresión encontrada en catálogo de Mitsubishi (2014) donde, relacionan los parámetros de corte con un término llamado presión específica de corte que está tabulada con respecto al avance por diente. La ecuación 4.1 es la expresión para el cálculo de la potencia de corte.

Diametro (mm)		2	4	8	10	18
Fresado Lateral						
Profundidad de corte (mm)	ap	2	4	8	10	18
	ep	0,2	0,4	0,8	1	1,8
Vaciado						
Profundidad de corte(mm)	ap	0,6	1,2	2,4	3	5,4
	ep	2	4	8	10	18
Basto						

Profundidad de corte(mm)	ap	3	6	10	10	10
Ancho de corte(mm)	ep	1	2	4	5	9

Fuente:Celesa (2017)

Tabla 4.2: Profundidad y ancho de corte para aluminio

Diametro ( <i>mm</i> )		2	4	8	10	18
Fresado Lateral						
Profundidad de corte (mm)	ap	2	4	8	10	18
Ancho de corte (mm)	ep	0,2	0,4	0,8	1	1,8
Vaciado						
Profundidad de corte(mm)	ap	0.4	.8	1.6	2	3.6
Ancho de corte(mm)	ep	2	4	8	10	18
Basto						
Profundidad de corte(mm)	ap	3	6	10	10	10
Ancho de corte(mm)	ep	0.5	1	2	2.5	4.5

Fuente:Celesa (2017)

Tabla 4.3: Profundidad y ancho de corte para acero

$$P_c = \frac{a_p * a_e * f_r * K_c}{60 * 10^6 * \eta} \quad (4.1)$$

Donde  $a_e$  es el ancho de corte en (*mm*),  $a_p$  es la profundidad de corte en *mm*,  $f_r$  es la velocidad de avance en (*mm/min*),  $\eta$  es la eficiencia de la operación que depende del desgaste de la herramienta y de la máquina, y  $K_c$  es la presión específica de corte que depende del materia y de la carga de viruta  $f$ .

### 4.2.2. Potencias y Pares requeridos para fresado.

En catalogo Mitsubishi (2014) existe la tabla la cual relaciona la el avance por diente o la carga de viruta con la presión específica  $K_c$  de distintos materiales como acero dulce, acero para herramientas, titanio y aluminios. Se tomará la presión específica de corte con la carga de viruta de  $0.1mm/diente$  ya que este da el mayor valor de este parámetro para cada material. Los materiales que se tomaron para el cálculo fueron una aleación ligera de aluminio (Al-Zn-Mg-Cu) y un acero con una resistencia a la tracción similar a la del catálogo Celesa (2017) el cual fue un acero para herramientas con una resistencia a la tracción de  $670 Mpa$ . En la tabla 4.4 se muestra los valores de la la presión específica de corte.

Materia	Resistencia a la tracción (Mpa)	Presión de corte específica (Mpa) 0.1 mm/diente
Acero para Herramientas	670	1980
Aleación ligera (Al-Zn-Mg-Cu)	570	880

Fuente:(Mitsubishi, 2014)

Tabla 4.4: Presión de corte específica

Las potencias de actuales para el fresado del aluminio y el acero blando se calcularon con la ecuación 4.1 y presentan en las tablas 4.5 y 4.6 respectivamente. Con los resultados de las potencias se busca los pares máximos que requiere para los distintos materiales (aluminio, acero) con la ecuación 4.2.

N° de dientes	Aluminio														
	Potencia actuar Fresado Lateral (Kw)					Potencia actuar Fresado Ranurado (Kw)					Potencia actuar Fresado Basto(Kw)				
	Diametro (mm)														
	2	4	8	10	18	2	4	8	10	18	2	4	8	10	18
2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,0	0,1	0,4	0,5	0,6
3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,0	0,0	0,3	0,5	0,8	0,0	0,1	0,6	0,8	0,9
4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,0	0,1	0,4	0,6	1,0	0,0	0,2	0,8	1,0	1,1

Fuente:Elaboración propia

Tabla 4.5: potencia actual aluminio



N° de dientes	Acero Blando														
	Potencia actuar Fresado Lateral (Kw)					Potencia actuar Fresado Ranurado (Kw)					Potencia actuar Fresado Basto(Kw)				
	Diametro (mm)														
	2	4	8	10	18	2	4	8	10	18	2	4	8	10	18
2	0,00	0,00	0,03	0,04	0,12	0,00	0,01	0,05	0,08	0,24	0,00	0,02	0,08	0,10	0,17
3	0,00	0,01	0,04	0,06	0,18	0,00	0,01	0,08	0,12	0,37	0,01	0,02	0,12	0,14	0,25
4	0,00	0,01	0,05	0,08	0,24	0,00	0,02	0,10	0,15	0,49	0,01	0,03	0,16	0,19	0,34

Fuente:Elaboración propia

Tabla 4.6: potencia actual acero

$$T_r = \frac{P_c}{w_c} \quad (4.2)$$

Donde  $w_c$  es la velocidad angular de la herramienta de corte,  $P_c$  la potencia actual y  $T_r$  es el Par requerido para la operación de fresado. En la tabla 4.7 se presenta los pares máximos para la operación de corte en aluminio y acero blando.

N° de dientes	Par requerido acero	Par requerido aluminio
	T[Nm]	T[Nm]
2	2,35	1,33
3	3,52	2,21
4	4,70	2,66

Elaboración propia

Tabla 4.7: Par requerido de corte

### 4.2.3. Diseño básico de transmisión de potencia

Se necesita diseñar un sistema Reductor-Amplificador de velocidades con relación variable, con el fin de proveer el par necesario y las velocidades requeridas provenientes del motor husillo hacia la herramienta de corte, se necesitan múltiples etapas debido a la variedad de materiales que se podrán mecanizar con la maquina CNC, estos constan con diferentes propiedades, por lo cual se hace necesario diferentes parámetros de corte, entre estos la velocidad de giro de la herramienta.

### Datos y suposiciones

Con base a los datos de velocidades de giro críticas de la herramienta y las especificaciones del husillo, se determinan las relaciones de transmisión y el número de etapas necesarias para la operación (tabla 4.8)

Motor AC 1500-8000 Rpm, 9.5Nm			
Velocidad del motor	Velocidades angulares de la herramienta (Rpm)	Relación de transmisión	Material
1500	690	0.5	Aero blando
1500-4500	4067	3-1	Aluminio
1500	1552	1	Aero blando
6000	18303	3	Aluminio

Fuente:Elaboración Propia

Tabla 4.8: Relaciones de Transmisión

Dientes $N^\circ$	$N^\circ$ de dientes
1	34
2	34
3	51
4	17
5	45
6	23
7	34
8	34

Tabla 4.9: Número de dientes

En la figura 4.3, se presenta un esquema de la caja de transmisión con el cual se trabajará a detalle posteriormente, esta cuenta con 8 engranajes y tres ejes, uno de entrada, uno de salida y

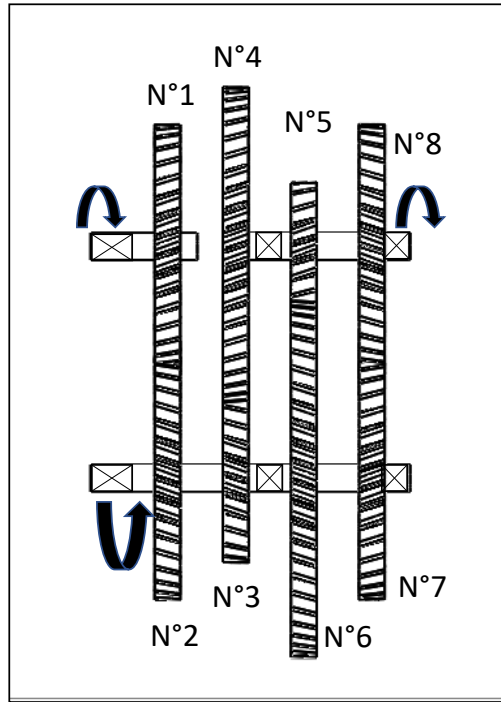


Figura 4.3: Esquema básico del sistema de transmisión  
Fuente: Elaboración propia

uno intermedio. El número de dientes de cada engranaje se especifican en la tabla 4.9.

## 4.3. Diseño Básico del Mecanismo

Para el diseño básico del mecanismo se trata en dos partes de análisis y dos partes de síntesis o dimensionamiento, esto ocurre porque se trata en dos niveles: el cinemático y el cinético. El primer nivel hace referencia a la parte de movimiento, sin tener en cuenta que lo produce. Por lo que en esta parte se eligen las dimensiones, conocidas como longitudes, que influyen el movimiento. El segundo nivel trata las causas del movimiento, analizando las fuerzas y/o torques necesarios para cumplir las trayectorias definidas.

Para el diseño básico de mecanismo se trabajará primero el nivel cinemático, con su respectivo análisis y dimensionamiento, para luego trabajar el nivel cinético, en donde se determinarán las relaciones para obtener las fuerzas de los actuadores, posterior a eso se plantea un diseño de rigidez que permita manejar los desplazamientos producidos durante la operación. Todo para que por medio de un método de optimización permite dimensionar el mecanismo para que no falle por desplazamiento.

### 4.3.1. Análisis Cinemático

#### Definición de lazos de posición

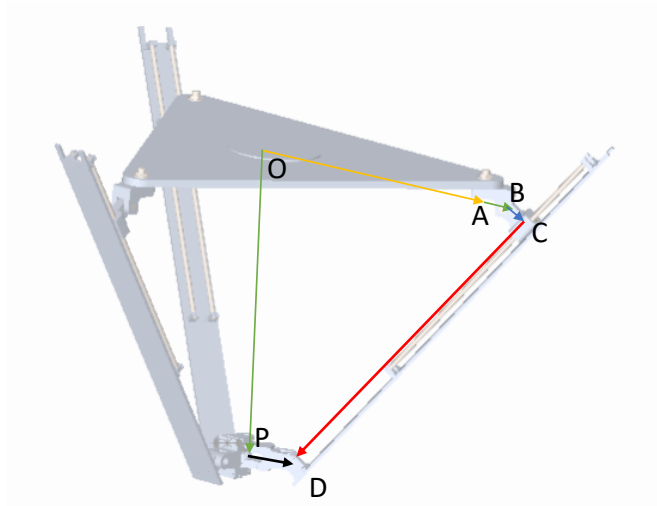
Para el mecanismo propuesto se plantean los lazos cinemáticos del sistema, teniendo como referencia el sistema coordenado en el centro de la base triangular,  $O$  (Ver Figura 4.4). Por la simétrica del mecanismo, sus tres brazos presentan lazos vectoriales idénticos, por lo tanto, se puede describir el lazo de manera generalizada para el análisis.

Como se muestra en la Figura 4.4a, la cadena cinemática presenta 6 puntos importantes. Estos puntos representan la ubicación de cada una de las juntas revolutas del dispositivo ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$ ), la ubicación del origen del sistema de referencia ( $O$ ) y la ubicación de la herramienta de corte ( $P$ ); en donde se interconectan la revoluta final de cada brazo.

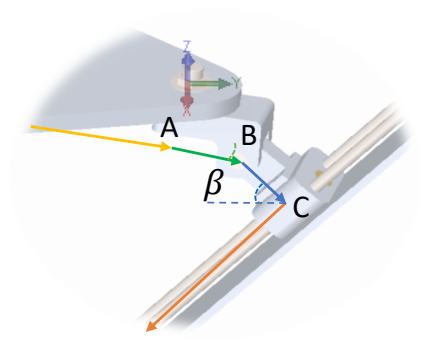
Para el caso de las revolutas  $B$  y  $D$  poseen su eje de giro normal al vector  $\vec{CD}$ , lo que producen el ángulo de elevación (en inglés *pitch angle*) del brazo; además su ángulo,  $\beta_i$  se mide con respecto al eje X local del eslabón  $AB$  (ver Figura 4.4b). Mientras que las revolutas  $A$  y la ubicada en  $P$  poseen su eje de giro a lo largo del eje Z, lo que simboliza el ángulo de giro (en inglés *yaw angle*) del brazo; y su ángulo de posición,  $\theta_i$ , es relativo a la dirección del vector  $\vec{OA}$  (ver Figura 4.4c).

Las medidas del mecanismo son simbolizadas de la siguientes manera: la distancia entre los puntos  $O$  y  $A$  se simboliza con  $R_b$  y se conoce como radio de la base; para la distancia entre  $A$  y  $B$  se representa con  $L_A$ ; para el vector  $\vec{BC}$  su magnitud se simboliza con  $e$ ; para el vector  $\vec{CD}$  la magnitud es  $q_i$  y esta es la posición del actuador; por último,  $PD$  es representado por  $L_D$ .

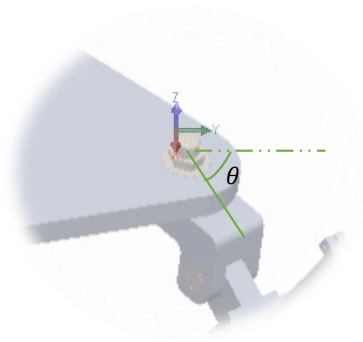
Referente al vector  $\vec{OP}$  es representa la posición de la herramienta referente al sistema coordenado utilizando.



(a) Lazos Vectoriales a lo largo de un brazo



(b) vista de detalle de los puntos ABC



(c) Posición angular de  $\theta$

Figura 4.4: Lazos Vectoriales del mecanismo

La cadena cinemática queda de la forma:

$$\vec{OA} + \vec{AB} + \vec{BC} + \vec{CD} = \vec{OP} + \vec{PD} \quad (4.3)$$

## Análisis de posiciones

Para resolver el problema de posiciones del mecanismo, se hace uso de la ecuación cinemática establecida para un brazo general. Puesto que el efector final,  $P$ , del mecanismo tiene un movimiento lineal en espacio, su posición se representa con un vector de 3 coordenadas cartesianas cualquiera (ver Ecuación 4.4). Por otro lado, los eslabones que son conectan por revolutas, se representa por la combinación de matrices de rotación (sección 1.3.2).

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Con el fin de obtener las expresiones matemáticas generales para las posiciones, las variables de cada brazo manejan un subíndice  $i$ , el cual indica el brazo correspondiente por eso maneja los valores de 1, 2, y 3. Además de los parámetros dimensionales explicados en la sección anterior, es necesario la definición de  $\alpha_i$ , el ángulo que determina la posición de la revoluta  $A$ .

$$\alpha_i = \frac{2\pi}{3} (i - 1) \quad (4.5)$$

Luego de esto, la primera expresión obtenida es la que asocia la posición del efector final,  $P$ , con el ángulo de giro  $\theta_i$  de cada brazo:

$$\theta_i = \arctan \left( \frac{P_y - R_b \sin(\alpha_i)}{P_x - R_b \cos(\alpha_i)} \right) - \alpha_i \quad (4.6)$$

Ya obtenido el valor de  $\theta_i$  es posible determinar  $q_i$ , sin embargo, para poderlo calcular es necesario determinar  $M_i$  (ver ecuación 4.7b):

$$q_i = \sqrt{M_i - e^2} \quad (4.7a)$$

$$M_i = \begin{aligned} & (R_b \cos(\alpha_i) + (L_A - L_D) \cos(\theta_i + \alpha_i) - P_x)^2 \\ & + (R_b \sin(\alpha_i) + (L_A - L_D) \sin(\theta_i + \alpha_i) - P_y)^2 \\ & + P_z^2 \end{aligned} \quad (4.7b)$$

La última expresión obtenida es la que determina el valor de  $\beta_i$ , en donde se necesita de la tercera componente de  $P$  y el valor de  $q_i$ :

$$\beta_i = 2 \arctan \left( \frac{e + \sqrt{-P_z^2 + e^2 + q_i^2}}{P_z + q_i} \right) \quad (4.8)$$

El desarrollo matemático para la obtención de estas expresiones mostrado en el anexo 7.2.1.

## Análisis de velocidades

El análisis de velocidades comienza con la obtención del lazo de velocidades del brazo, para eso se deriva la cadena cinemática (Ecuación 4.3):

$$\dot{A}\dot{B} + \dot{B}\dot{C} + \dot{C}\dot{D} = \dot{O}\dot{P} + \dot{P}\dot{D} \quad (4.9)$$

Con esta nueva expresión aparecen incógnitas relacionadas con la velocidad de cambio de  $\theta$ ,  $q$  y  $\beta$ , además el sistema de ecuaciones que se genera es lineal por lo que se puede transformar en ecuaciones matriciales que modelen el comportamiento de la cada variable con respecto a la velocidad del punto  $P$  (ver Ecuación 4.11), y que estén de la siguiente forma:

$$X = J_X \dot{P} \quad (4.10)$$

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

En donde  $\dot{X}$  simboliza el vector con la incógnita para los 3 brazos, y  $J_X$  es la matriz jacobiana que relaciona las velocidades del efector con la de las incógnitas, esto manejando la siguiente notación  $C_X = \cos(X)$  y  $S_X = \sin(X)$ .

La primera matriz obtenida  $J_q$ , la cual determina las velocidades de los actuadores ( $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3$ ):

$$J_q = \begin{bmatrix} -C_{\alpha_1+\theta_1}C_{\beta_1} - \frac{eC_{\alpha_1+\theta_1}S_{\beta_1}}{q_1} & -S_{\alpha_1+\theta_1}C_{\beta_1} - \frac{eS_{\alpha_1+\theta_1}S_{\beta_1}}{q_1} & -S_{\beta_1} + \frac{eC_{\beta_1}}{q_1} \\ -C_{\alpha_2+\theta_2}C_{\beta_2} - \frac{eC_{\alpha_2+\theta_2}S_{\beta_2}}{q_2} & -S_{\alpha_2+\theta_2}C_{\beta_2} - \frac{eS_{\alpha_2+\theta_2}S_{\beta_2}}{q_2} & -S_{\beta_2} + \frac{eC_{\beta_2}}{q_2} \\ -C_{\alpha_3+\theta_3}C_{\beta_3} - \frac{eC_{\alpha_3+\theta_3}S_{\beta_3}}{q_3} & -S_{\alpha_3+\theta_3}C_{\beta_3} - \frac{eS_{\alpha_3+\theta_3}S_{\beta_3}}{q_3} & -S_{\beta_3} + \frac{eC_{\beta_3}}{q_3} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

La segunda obtenida,  $J_\theta$ , determina las velocidades de  $\theta$  ( $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$ ):

$$J_\theta = \begin{bmatrix} S_{\alpha_1+\theta_1}/k_1 & -C_{\alpha_1+\theta_1}/k_1 & 0 \\ S_{\alpha_2+\theta_2}/k_2 & -C_{\alpha_2+\theta_2}/k_2 & 0 \\ S_{\alpha_3+\theta_3}/k_3 & -C_{\alpha_3+\theta_3}/k_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.13a)$$

$$k_i = L_D - L_A + q_i C_{\beta_i} + e S_{\beta_i} \quad (4.13b)$$

La última obtenida,  $J_\beta$ , determina las velocidades de  $\beta$  ( $\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\beta}_3$ ):

$$J_\beta = \begin{bmatrix} eC_{\alpha_1+\theta_1}S_{\beta_1}/q_1 & eS_{\alpha_1+\theta_1}S_{\beta_1}/q_1 & eC_{\beta_1}/q_1 \\ eC_{\alpha_2+\theta_2}S_{\beta_2}/q_2 & eS_{\alpha_2+\theta_2}S_{\beta_2}/q_2 & eC_{\beta_2}/q_2 \\ eC_{\alpha_3+\theta_3}S_{\beta_3}/q_3 & eS_{\alpha_3+\theta_3}S_{\beta_3}/q_3 & eC_{\beta_3}/q_3 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

## Análisis de aceleraciones

El análisis de aceleraciones comienza con la obtención del lazo de aceleraciones del brazo, para eso se deriva la cadena de velocidades (Ecuación 4.9).

$$\ddot{A}\vec{B} + \ddot{B}\vec{C} + \ddot{C}\vec{D} = \ddot{O}\vec{P} + \ddot{P}\vec{D} \quad (4.15)$$

A partir de eso se busca obtener expresiones para las aceleraciones de  $\theta$ ,  $q$  y  $\beta$ , conociendo la aceleración del efector (ver Ecuación 4.17). las cuales mantendrán la siguiente forma:

$$\ddot{X} = J_X \ddot{P} + B_X \quad (4.16)$$

$$\ddot{P} = \begin{bmatrix} \ddot{P}_x \\ \ddot{P}_y \\ \ddot{P}_z \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

En donde  $J_X$  es el mismo jacobiano obtenido en velocidades, mientras que  $B_X$  es un vector donde está contenido los efectos de las aceleraciones normales, así como la aceleración de coriolis experimentado por los brazos.

$$B_q = \begin{bmatrix} L_A \dot{\theta}_1^2 (q_1 C_{\beta_1} + e S_{\beta_1}) / q_1 - e \left( 2e \dot{\beta}_1^2 + e \dot{\theta}_1^2 - e \dot{\theta}_1^2 C_{2\beta_1} + q_1 \dot{\theta}_1^2 S_{2\beta_1} \right) / 2q_1^2 \dots \\ \quad - \left( q_1 \dot{\beta}_1^2 + q_1 \dot{\theta}_1^2 C_{\beta_1}^2 + 2e \dot{\beta}_1 \dot{q}_1 + e \dot{\theta}_1^2 S_{2\beta_1} / 2 \right) \\ L_A \dot{\theta}_2^2 (q_2 C_{\beta_2} + e S_{\beta_2}) / q_2 - e \left( 2e \dot{\beta}_2^2 + e \dot{\theta}_2^2 - e \dot{\theta}_2^2 C_{2\beta_2} + q_2 \dot{\theta}_2^2 S_{2\beta_2} \right) / 2q_2^2 \dots \\ \quad - \left( q_2 \dot{\beta}_2^2 + q_2 \dot{\theta}_2^2 C_{\beta_2}^2 + 2e \dot{\beta}_2 \dot{q}_2 + e \dot{\theta}_2^2 S_{2\beta_2} / 2 \right) \\ L_A \dot{\theta}_3^2 (q_3 C_{\beta_3} + e S_{\beta_3}) / q_3 - e \left( 2e \dot{\beta}_3^2 + e \dot{\theta}_3^2 - e \dot{\theta}_3^2 C_{2\beta_3} + q_3 \dot{\theta}_3^2 S_{2\beta_3} \right) / 2q_3^2 \dots \\ \quad - \left( q_3 \dot{\beta}_3^2 + q_3 \dot{\theta}_3^2 C_{\beta_3}^2 + 2e \dot{\beta}_3 \dot{q}_3 + e \dot{\theta}_3^2 S_{2\beta_3} / 2 \right) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$B_\theta = \begin{bmatrix} \left( 2e \dot{\beta}_1 \dot{\theta}_1 C_{\beta_1} + 2\dot{\theta}_1 \left( \dot{q}_1 C_{\beta_1} - q_1 \dot{\beta}_1 S_{\beta_1} \right) \right) / k_1 \\ \left( 2e \dot{\beta}_2 \dot{\theta}_2 C_{\beta_2} + 2\dot{\theta}_2 \left( \dot{q}_2 C_{\beta_2} - q_2 \dot{\beta}_2 S_{\beta_2} \right) \right) / k_2 \\ \left( 2e \dot{\beta}_3 \dot{\theta}_3 C_{\beta_3} + 2\dot{\theta}_3 \left( \dot{q}_3 C_{\beta_3} - q_3 \dot{\beta}_3 S_{\beta_3} \right) \right) / k_3 \end{bmatrix} \quad (4.19a)$$

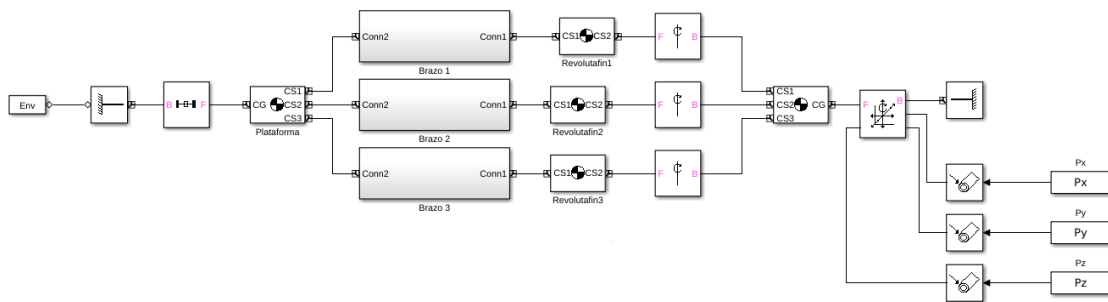
$$k_i = L_D - L_A + q_i C_{\beta_i} + e S_{\beta_i} \quad (4.19b)$$

$$B_\beta = \begin{bmatrix} \left( -(L_A - L_D) \dot{\theta}_1^2 S_{\beta_1} + e \left( \dot{\beta}_1^2 + \dot{\theta}_1^2 S_{\beta_1}^2 \right) + q_1 S_{2\beta_1} \dot{\theta}_1^2 / 2 + 2\dot{\beta}_1 \dot{q}_1 \right) / q_1 \\ \left( -(L_A - L_D) \dot{\theta}_2^2 S_{\beta_2} + e \left( \dot{\beta}_2^2 + \dot{\theta}_2^2 S_{\beta_2}^2 \right) + q_2 S_{2\beta_2} \dot{\theta}_2^2 / 2 + 2\dot{\beta}_2 \dot{q}_2 \right) / q_2 \\ \left( -(L_A - L_D) \dot{\theta}_3^2 S_{\beta_3} + e \left( \dot{\beta}_3^2 + \dot{\theta}_3^2 S_{\beta_3}^2 \right) + q_3 S_{2\beta_3} \dot{\theta}_3^2 / 2 + 2\dot{\beta}_3 \dot{q}_3 \right) / q_3 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

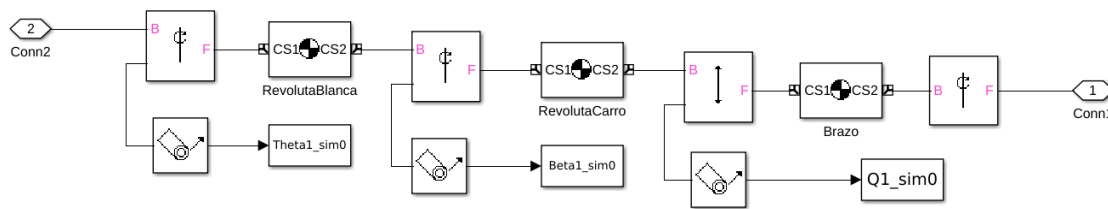


### 4.3.2. Comparativo con modelo SimMechanics

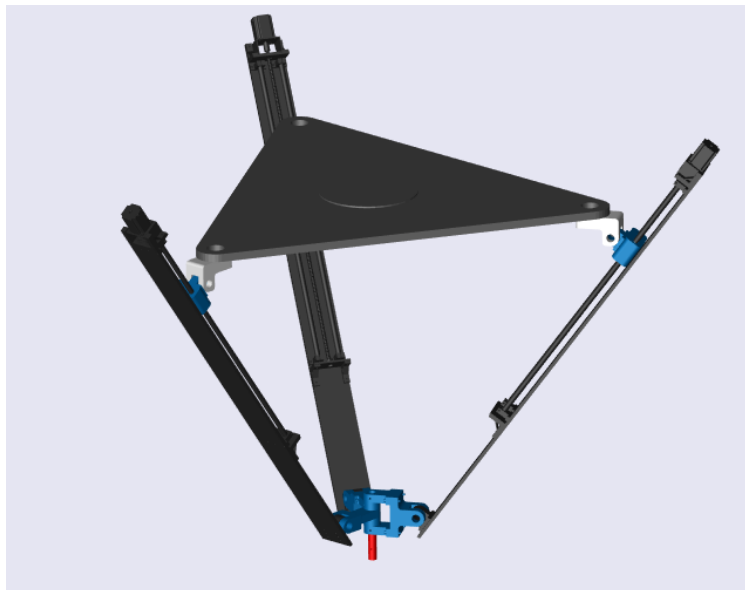
Para la validación de las expresiones obtenidas en la sección anterior, se estableció un modelo en MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup>, haciendo del paquete de simulación de múltiples cuerpos, SimMechanics. Para llevar a cabo esta comparación se dispusieron de las siguientes dimensiones:  $R_b = 683,01 \text{ mm}$ ,  $L_A = 70,00 \text{ mm}$ ,  $L_D = 200,00 \text{ mm}$  y  $e = 57 \text{ mm}$ .



(a) Esquema del Simulink General



(b) Esquema del Simulink Brazo



(c) Visualización del SimMechanics

Figura 4.5: Esquema del modelo en SimMechanics

Para la comparación de los modelos se definió una curva a lo largo de los vértices del espacio de trabajo con unos perfiles de velocidad trapezoidales con velocidades máximas de  $40 \text{ mm}/\text{min}$ .

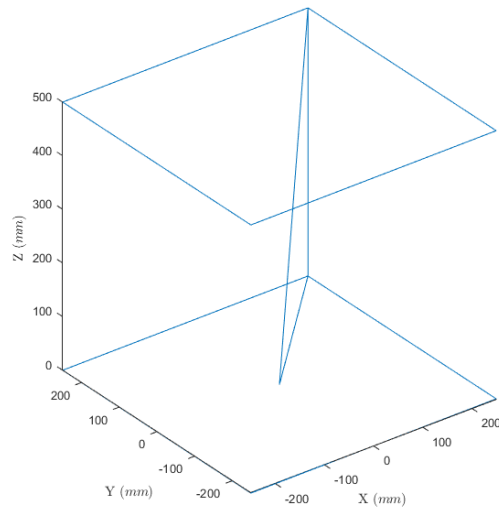


Figura 4.6: Trayectoria seguida

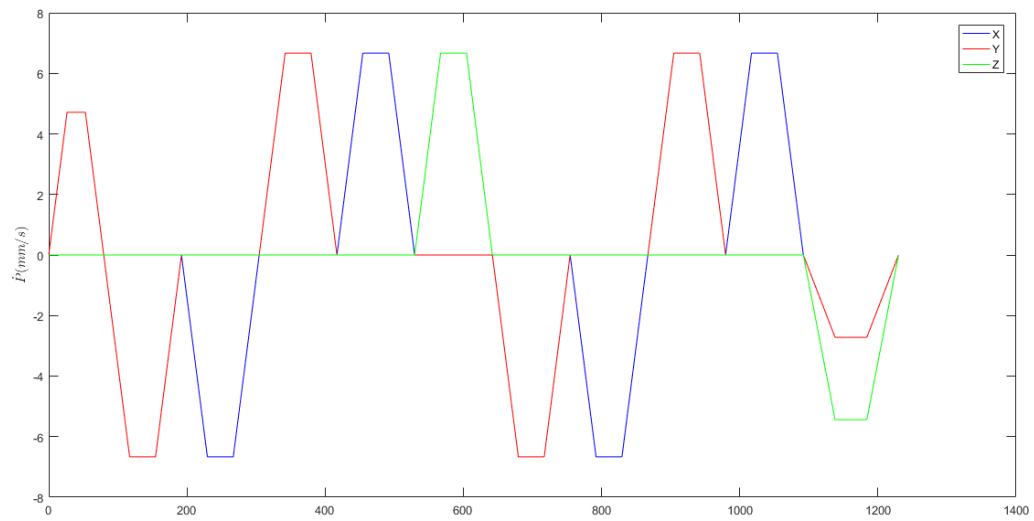
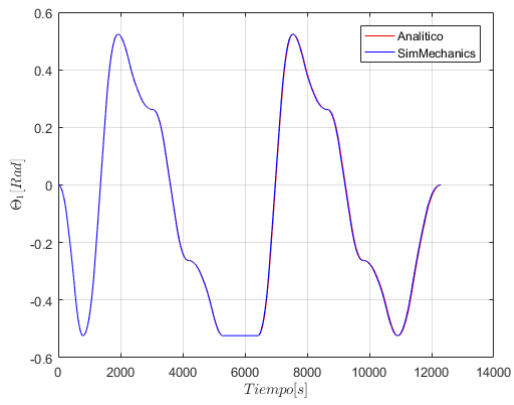
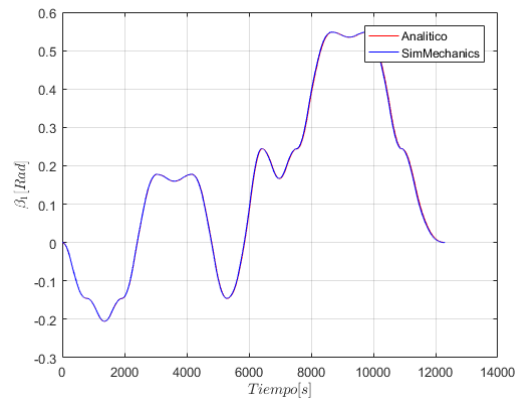


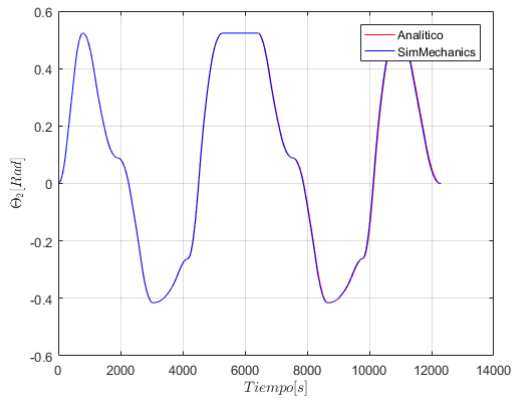
Figura 4.7: Perfil de velocidades



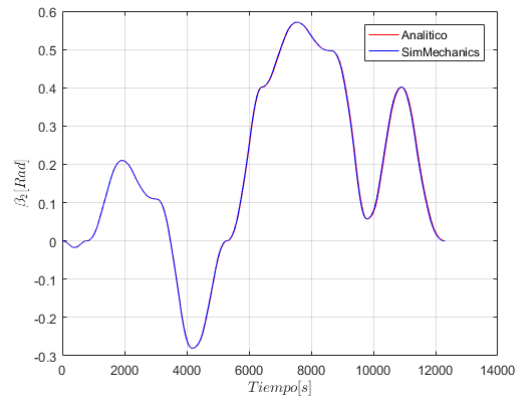
(a)  $\theta_1$



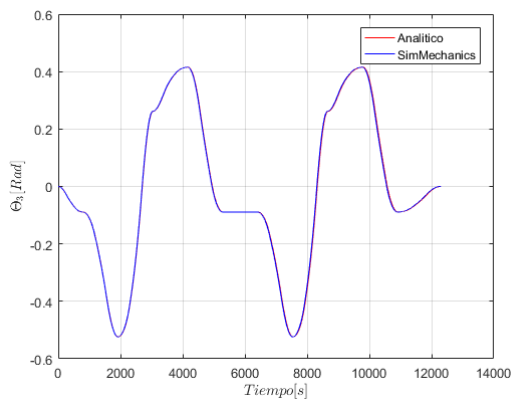
(b)  $\beta_1$



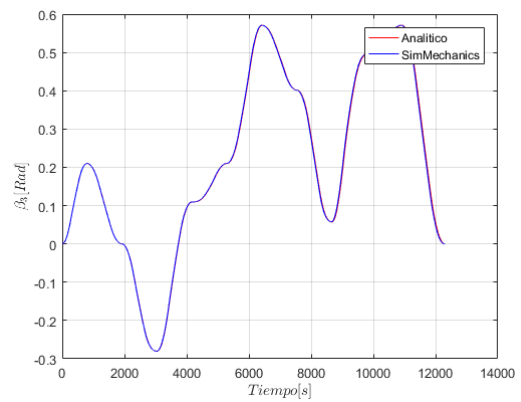
(c)  $\theta_2$



(d)  $\beta_2$

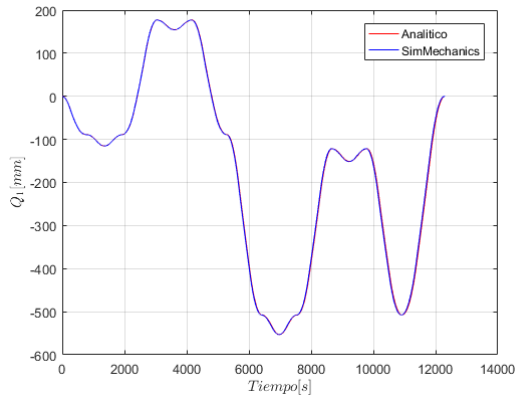


(e)  $\theta_3$

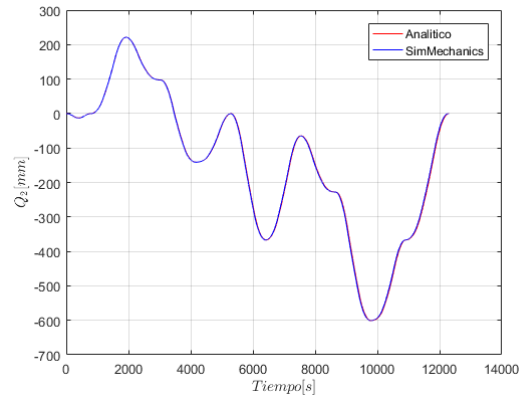


(f)  $\beta_3$

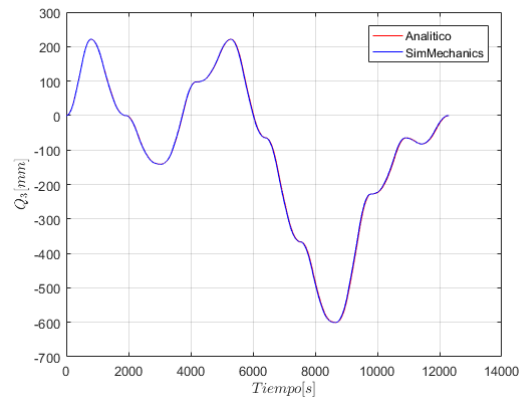
Figura 4.8: Comparación de posiciones de las revolutas  $\theta$ ,  $\beta$



(a)  $q_1$

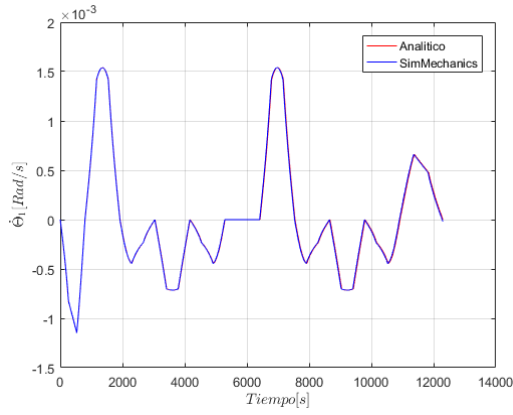


(b)  $q_2$

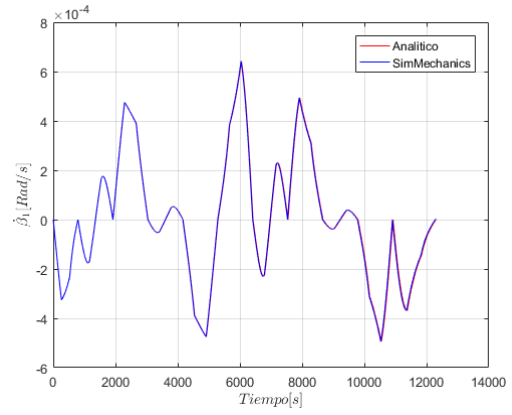


(c)  $q_3$

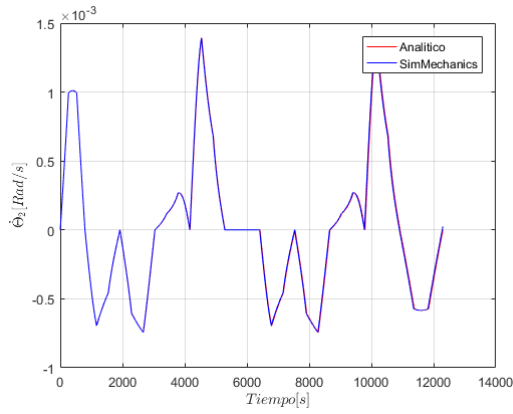
Figura 4.9: Comparación de posiciones de los actuadores  $q$



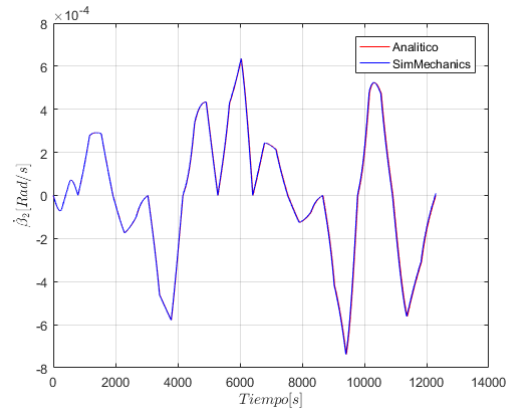
(a)  $\dot{\theta}_1$



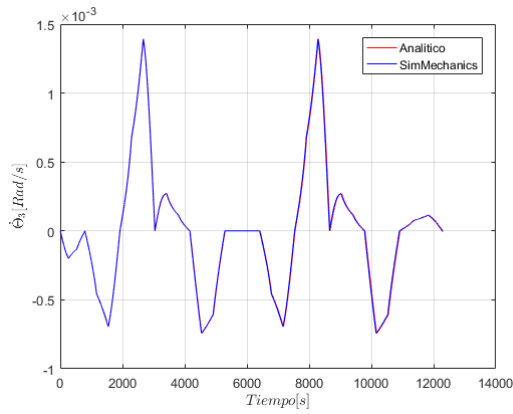
(b)  $\dot{\beta}_1$



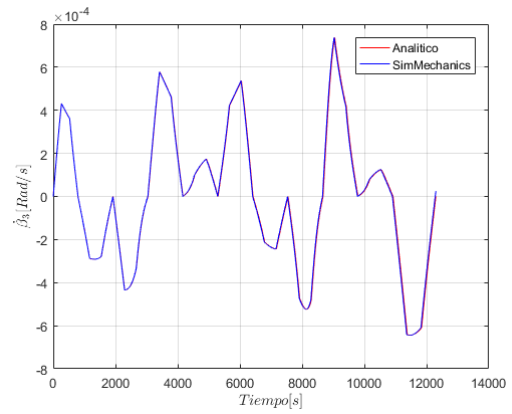
(c)  $\dot{\theta}_2$



(d)  $\dot{\beta}_2$

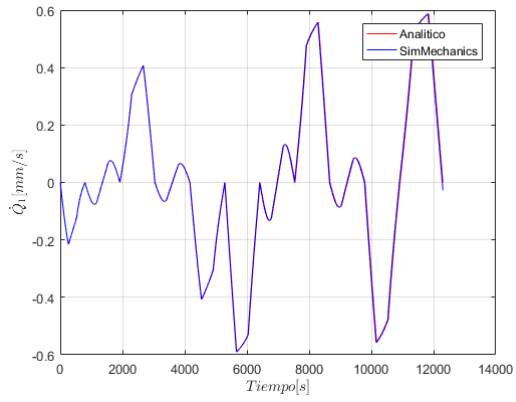


(e)  $\dot{\theta}_3$

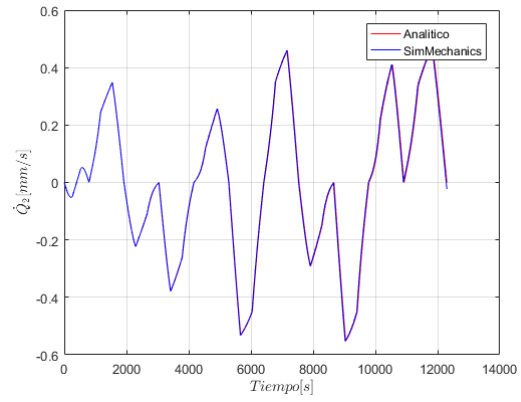


(f)  $\dot{\beta}_3$

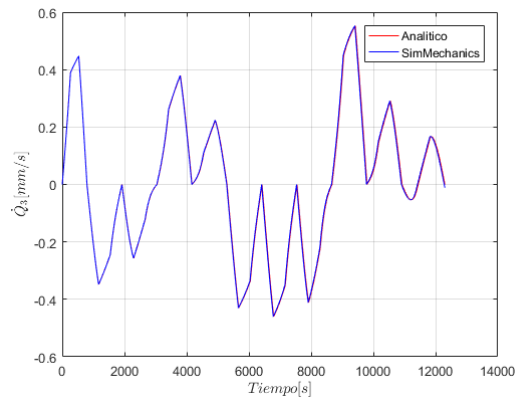
Figura 4.10: Comparación de velocidades de las revolutas  $\dot{\theta}$ ,  $\dot{\beta}$



(a)  $\dot{q}_1$

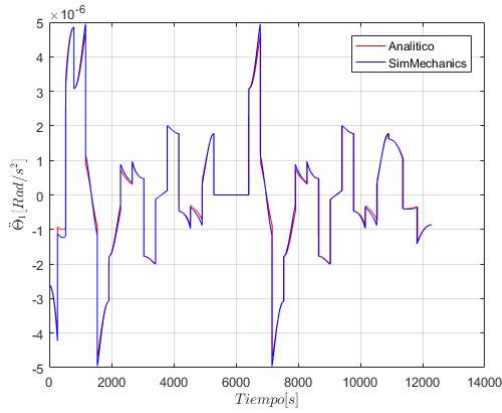


(b)  $\dot{q}_2$

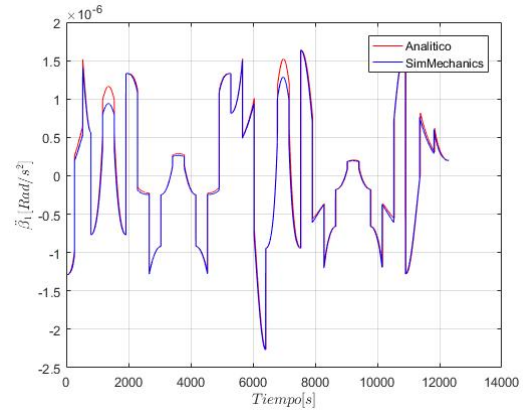


(c)  $\dot{q}_3$

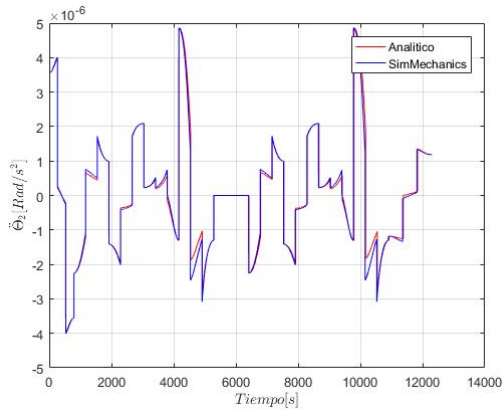
Figura 4.11: Comparación de velocidades de los actuadores  $\dot{q}$



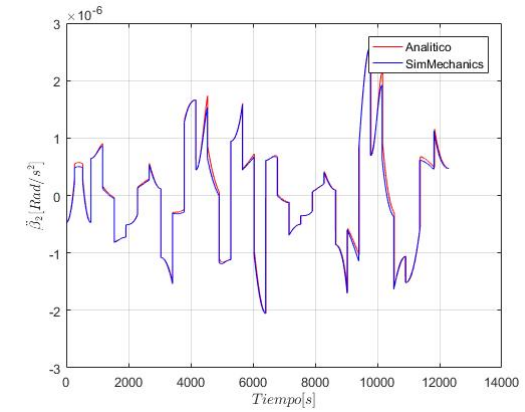
(a)  $\ddot{\theta}_1$



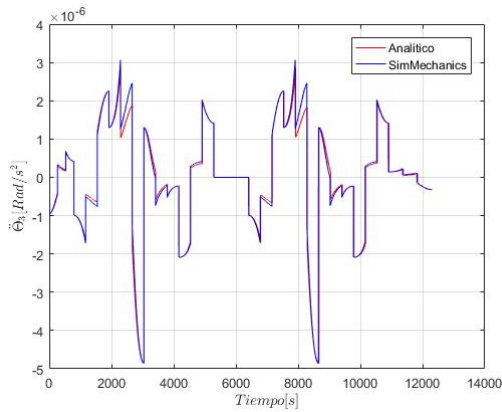
(b)  $\ddot{\beta}_1$



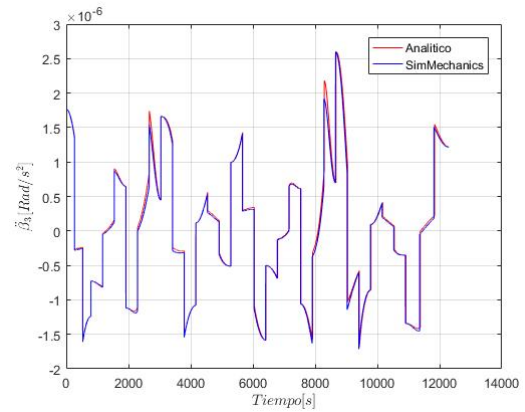
(c)  $\ddot{\theta}_2$



(d)  $\ddot{\beta}_2$

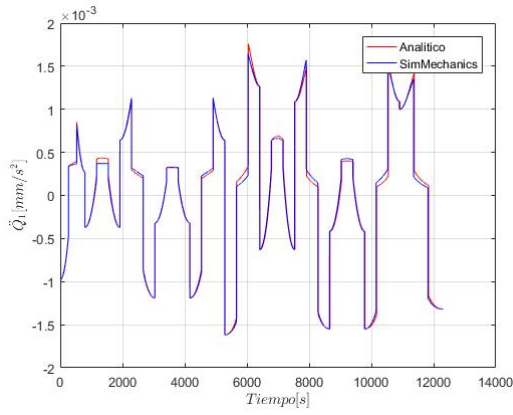


(e)  $\ddot{\theta}_3$

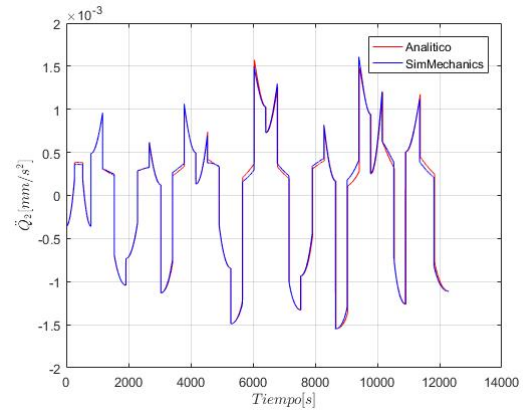


(f)  $\ddot{\beta}_3$

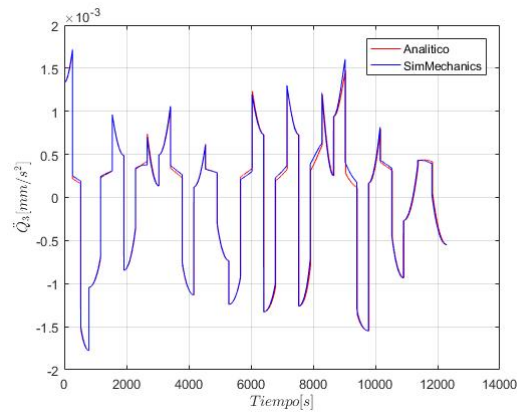
Figura 4.12: Comparación de aceleraciones de las revolutas  $\ddot{\theta}$ ,  $\ddot{\beta}$



(a)  $\ddot{q}_1$



(b)  $\ddot{q}_2$



(c)  $\ddot{q}_3$

Figura 4.13: Comparación de aceleraciones de los actuadores  $\ddot{q}$



### 4.3.3. Dimensionamiento Cinematico del Mecanismo

En el diseño cinemático del mecanismo resulta de vital importancia un adecuado dimensionamiento de los elementos debido a el impacto que estos tienen en el desempeño del mismo. Esto lleva a buscar una manera de cuantificar y evaluar el desempeño cinemático de los robots por lo cual se propone utilizar alguno índices de desempeños propuestos en la literatura que relacionan las dimensiones y cinemática del mecanismo con el control, precisión, destreza e isotropía por todo el espacio de trabajo. Para la evaluación del desempeño cinemático del mecanismo se utiliza el Índice global de desempeño cinemático (Pu Zhang, 2014) el cual está basado en la combinación de 4 índices de desempeño cinemático que son:

#### Manipulabilidad

El índice de manipulabilidad brinda una medida de la capacidad general de posicionamiento y orientación de los actuadores sobre el efector final del mecanismo.

$$M_r = \sqrt[m]{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m} / l^2 \quad (4.21)$$

$\lambda_i$  son los autovalores del jacobiano

$l$  es la suma de todas las longitudes de los elementos del mecanismo.

#### Velocidad Mínima

El índice de velocidad minima da un medida de la capacidad de respuesta del efector final en la dirección de menor rendimiento frente a cambios en los actuadores del sistema.

$$V_{rmin} = \sqrt{\min(\lambda_i)} / l \quad (4.22)$$

#### Isotropía de la Velocidad

El índice de isotropia mide la capacidad de transmisión de movimiento de manera uniforme en todas las direcciones y con un desempeño uniforme para ellas.

$$\mu_{riso} = \sqrt[m]{\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{avg}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{avg}}\right) \dots \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{avg}}\right)} \quad (4.23)$$

$\sigma$  son los valores singulares del Jacobiano.

#### Precisión

El índice de precisión está relacionado con los errores de manufactura, errores de ensamblaje y errores en el control de posición. A medida que el índice aumenta la sensibilidad del mecanismo a estos errores es menor, es decir, presenta un mayor rendimiento.

$$K_j = \frac{1}{\|J\| \cdot \|J^+\|} \quad (4.24)$$

La evaluación de cada índice se realiza en todos los puntos del espacio de trabajo de manera discretizada, con los cuales se calcula un índice integral que considera diferentes aspectos de la distribución del mismo.

$$\xi_{integr} = (\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4)(|\xi_{avg}||\xi_{vol}||\xi_{skew}||\xi_{kurt}|)^T \quad (4.25)$$

Donde:

$\xi_{avg}$  es el valor promedio del índice  $\xi$  en el espacio de trabajo.

$\xi_{vol}$  es la volatilidad del índice en el espacio de trabajo.

$\xi_{skew}$  es una medida de la asimetría de la distribución del índice.

$\xi_{kurt}$  es el curtosis de la distribución del índice en el espacio de trabajo.

$\alpha_i$  es el peso relativo de cada parámetro dentro del índice integral.

El índice de desempeño global se calcula considerando los 4 índices calculados previamente

$$(\mathbf{GI}_{kine})_{integr} = \frac{\beta_1(M_r)_{integr}}{(M_r)_{norm}} + \frac{\beta_2(V_{rmin})_{integr}}{(V_{rmin})_{norm}} + \frac{\beta_3(\mu_{riso})_{integr}}{(\mu_{riso})_{norm}} + \frac{\beta_4(K_j)_{integr}}{(K_j)_{norm}} \quad (4.26)$$

Donde:

$\beta_i$  es el peso de cada índice dentro del índice Global de Desempeño del mecanismo.

En busca del mayor desempeño cinemático posible se desarrolló un algoritmo genético con el fin de optimizar las dimensiones del mecanismo de forma tal que el Índice Global de Desempeño del robot sea el mayor posible. El algoritmo fue desarrollado en python y se presenta a continuación la rutina principal.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import ga
import GlobalIndexKinematical as km

# Variables Range
span = [[500,50,50,-100],
        [1000,250,250,100]]

num_var = 4      #Numero de Variables a Optimizar
num_kromo = 10
pop_size = (num_kromo, 1)

new_pop1 = np.random.uniform(span[0][0], span[1][0], size=pop_size)
```

```

new_pop2 = np.random.uniform(span[0][1], span[1][1], size=pop_size)
new_pop3 = np.random.uniform(span[0][2], span[1][2], size=pop_size)
new_pop4 = np.random.uniform(span[0][3], span[1][3], size=pop_size)
new_population = np.concatenate((new_pop1, new_pop2, new_pop3,
                                new_pop4), axis=1)

# Point Cloud - Workspace
P = km.WorkspaceDesired(500.0, 650.0, 50.0)
num_parents = int(num_kromo/2) # Number of Parents
k = 120 # Number of Generations
Global_fitness, Avg_fitness, Mf_chromo = [], [], []

for i in range(k):
    fitness = ga.fitnessK(new_population, P)
    Global_fitness.append(max(fitness))
    Avg_fitness.append(sum(fitness)/len(fitness))
    parents = ga.select_parents(new_population, fitness, num_parents)
    offspring_cross = ga.crossover(parents, num_kromo)
    mut_prob = 0.6
    offspring_mut = ga.mutation(offspring_cross, span, mut_prob)
    new_population = np.concatenate((parents, offspring_mut))

fitness = ga.fitnessK(new_population, P)
Global_fitness.append(max(fitness))
winner_chromo = new_population[fitness.index(max(fitness))]

win_local_idx = km.AllIndex(winner_chromo, P)
np.savetxt('win_local_idx.csv', win_local_idx, delimiter=',')
np.savetxt('Global_idx.csv', Global_fitness, delimiter=',')
plt.plot(Global_fitness, 'b-')
plt.plot(Avg_fitness, 'r-')
plt.xlabel('# Generaciones')
plt.show()

```

El proceso de optimización con el algoritmo genético inicia con la generación de una población aleatoria de cromosomas, es decir, generar un conjunto de soluciones posibles `new_Population`. El siguiente paso es evaluar el desempeño de tal población, para esto se considera el cálculo del índice

global de desempeño cinemático en los puntos discretizados P del espacio de trabajo. Para cada cromosoma de la población se obtienen los 4 índices descritos previamente, la integración de estos y el valor del índice global.

```

def fitnessK(population ,P):
    fitness_population = []
    for L in population:
        I = km.AllIndex(L,P)
        I = km.IntegratedIndex(I)
        I = km.GlobalIndex(I).tolist()
        fitness_population.append(I[0][0])
    return fitness_population

```

A continuación se realiza la selección de los cromosomas elites (aquellos con el desempeño más alto), los cuales sobrevivirán y serán base para la generación siguiente.

```

def select_parents(pop, fitness, num_parents):
    parents = np.zeros([num_parents, pop.shape[1]])
    for parent_num in range(num_parents):
        max_fit_index = np.where(fitness == np.max(fitness))
        max_fit_index = max_fit_index[0][0]
        parents[parent_num, :] = pop[max_fit_index, :]
        fitness[max_fit_index] = -999999999
    return parents

```

Estos cromosomas seleccionados pasarán por ciertos operadores genéticos con lo cual se crearán nuevos cromosomas, es decir, nuevas soluciones. Entre los operadores genéticos se encuentra la función de entrecruzamiento, donde se generan nuevos cromosomas resultado de la combinación de genes de los padres seleccionados. Dentro de esta descendencia ocurre una operación genética adicional, mutación, donde de manera aleatoria un cierto número de cromosomas mutan modificándose un gen aleatorio dentro de estos por un valor aleatorio dentro del rango posible definido.

```

def crossover(parents, num_children):
    children = np.zeros([num_children, parents.shape[1]])
    crossover_point = np.int(parents.shape[1]/2)
    for child in range(num_children):
        parent1_index = child%parents.shape[0]
        parent2_index = (child+1)%parents.shape[0]
        if (child < num_children/2):
            children[child, 0:crossover_point] =

```

```

        parents[parent1_index,0:crossover_point]
children[child, crossover_point:] =
        parents[parent2_index, crossover_point:]
else:
    children[child, 0:crossover_point] =
        parents[parent2_index,0:crossover_point]
    children[child, crossover_point:] =
        parents[parent1_index, crossover_point:]

return children

def mutation(offspring_cross, span, threshold):
    for child in range(offspring_cross.shape[0]):
        p = np.random.uniform(0,1,1)
        if p < threshold :
            k = np.random.randint(0, offspring_cross.shape[1])
            print('Mutation on child:', child, 'Gen:', k, '\n')
            mut_value = np.random.uniform(span[0][k], span[1][k], 1)
            offspring_cross[child,k] = mut_value

return offspring_cross

```

Estos nuevos cromosomas se juntan a los cromosomas elites para formar la nueva población o nueva generación que sera evaluada nuevamente, y asi de manera repetitiva durante un cierto número de generaciones. Con este procedimiento generación tras generación el indice de desempeño cinematico global del mecanismo va mejorando, cabe resaltar la importancia de la mutacion de los genes con el fin de no estancarse en maximos locales.

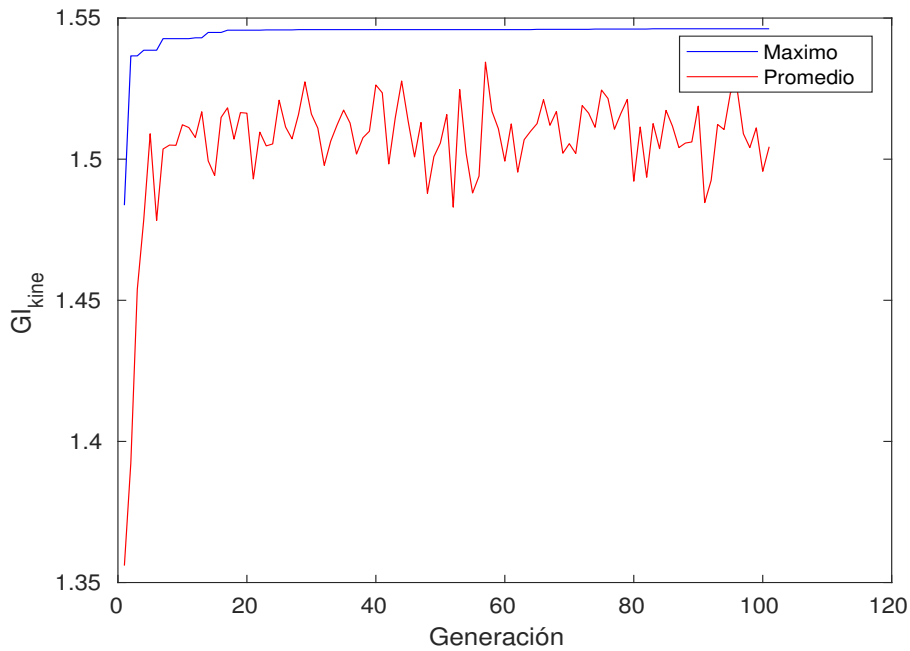


Figura 4.14: Índice Global de Desempeño Cinemático

El algoritmo genético de optimización se ejecutó 120 generaciones para una población de 25 cromosomas teniendo en cuenta las siguientes variables a optimizar y sus rangos de valores admisibles.

$$R_b = [500: 1000] \text{ mm}$$

$$L_A = [50: 250] \text{ mm}$$

$$L_D = [50: 250] \text{ mm}$$

$$e = [-100: 100] \text{ mm}$$

Los resultados del algoritmo genético nos proporcionaron las siguientes medidas para un dimensionamiento óptimo, obteniendo un índice global de desempeño cinemático de 1.5462

$$R_b = 675.0946 \text{ mm}$$

$$L_A = 50.0819 \text{ mm}$$

$$L_D = 249.3099 \text{ mm}$$

$$e = 0.0048 \text{ mm}$$

A continuación, se presenta la distribución de los índices de desempeño de manera normalizada en el espacio de trabajo, apreciando los cambios de estos respecto a la solución inicial

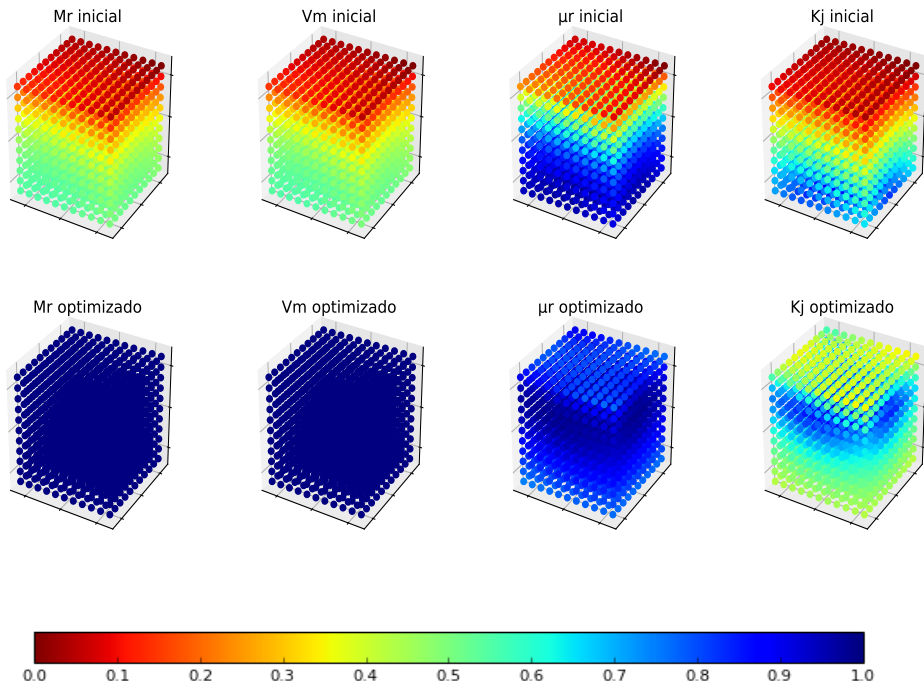


Figura 4.15: Índices de desempeño en el espacio de trabajo

#### 4.3.4. Análisis de Rigidez del Mecanismo

Para el diseño de una herramienta CNC, la precisión es una de las especificaciones más importantes, debido a que esta determina la calidad de los productos, denotando un modo de falla distintivo para estos mecanismos. Puesto que la falta de precisión es producto de las deformaciones a las que está sometido el mecanismo, un método válido para analizar este factor en un mecanismo es el análisis de rigidez del sistema. Más específicamente, el método de elementos finitos, representando la rigidez del mecanismo por medio de matrices de rigidez; las cuales tienen en cuenta comportamientos elásticos y lineales dentro del sistema.

El elemento utilizado para la representación de los cuerpos es el Elemento de Marco Espacial (en inglés, Space Frame Element), por lo que es un elemento finito tridimensional con 12 grados de libertad. Esto es producto de sus dos nodos, los cuales poseen los 3 grados de libertad traslaciones y rotacionales cada uno. Aparte de esto, el elemento de marco espacial conserva las siguientes propiedades constantes: Densidad  $\rho$ , Modulo de Elasticidad  $E$ , Modulo de Cortante Elástico  $G$ , Área transversal  $A$ , Momentos de Inercia de área  $I_y$  y  $I_z$ , Momento Polar de Inercia  $G$  y la longitud  $L$ .

La matriz de rigidez para este elemento es dada por la siguiente matriz:

$$k = T^T k' T \quad (4.27)$$

En donde  $T$  es la matriz de rotación del sistema coordenado global al sistema local del elemento, la cual está conformada por  $T_i$  que es una matriz  $3 \times 3$  de cosenos directores,  $T^T$  simboliza la transpuesta de esta matriz,  $k$  es la matriz de rigidez del elemento en el sistema global mientras que  $k'$  su versión en el sistema local.

$$T = \begin{bmatrix} T_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_i \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$k' = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Por consecuencia de la definición del elemento de marco espacial, una estructura con  $n$  nodos, la matriz de rigidez de la estructura,  $K$ , será de  $6n \times 6n$ . Además, para ensamblar la matriz de rigidez global es necesario sumar la submatrices de rigidez de cada elemento en sus respectivos

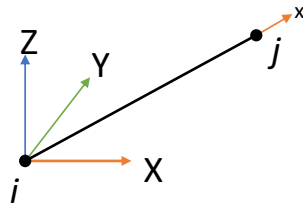


Figura 4.16: Elemento de Marco Espacial



espacios, esto al final genera la siguiente ecuación:

$$\vec{F} = K\vec{U} \quad (4.30)$$

Donde  $\vec{U}$  es un vector que contiene los desplazamientos globales, tanto translaciones como angulares, de todos los nodos y  $\vec{F}$  son las fuerzas y momentos globales aplicadas en cada nodo.

Para el modelo del mecanismo en elementos finitos se hicieron dos modificaciones, con el facilitar el modelamiento del mismo (Ver Figura 4.17). La primera modificación fue realizada en la base, que se transformó de una placa triangular con los vértices redondeados a una serie de tubos de rectangular que cumplan la disposición geométrica de la placa forma. La segunda modificación fue eliminar el sistema paralelo de dos ejes sobre el perfil, a solo haber un eje en paralelo con el perfil. Cabe resaltar que el sistema de accionamiento no fue considerado para este análisis. El procedimiento utilizado para el modelo fue obtenido de Kattan (2010).

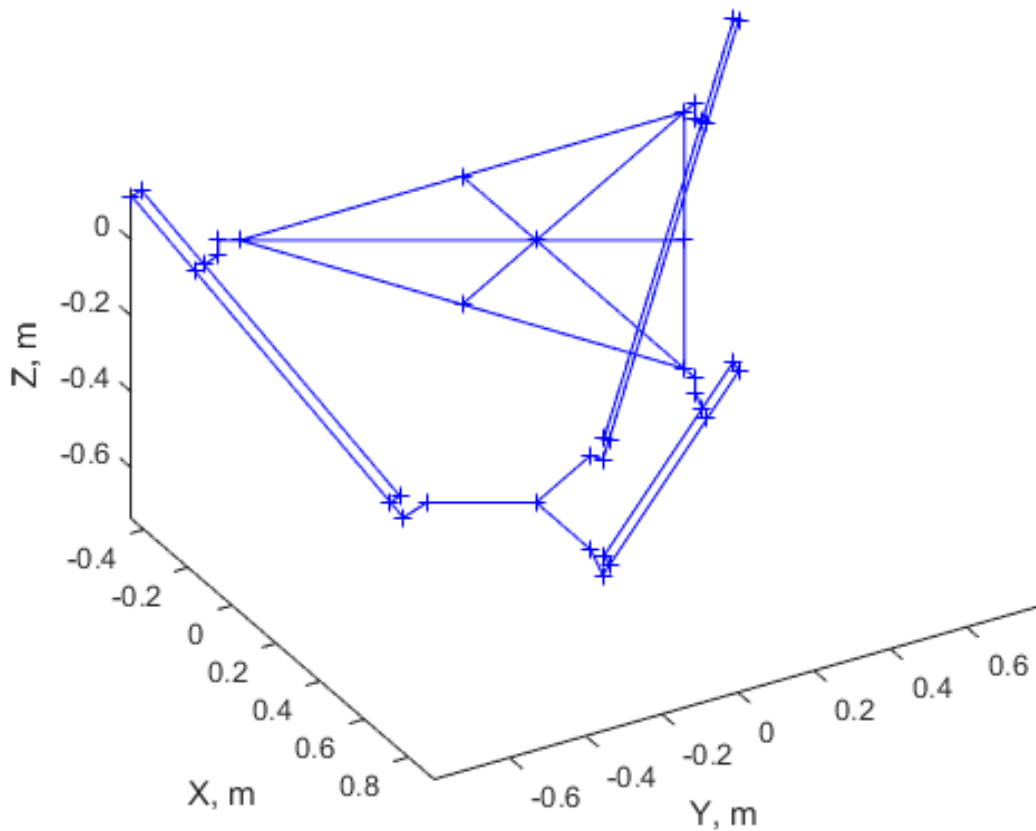


Figura 4.17: Esquema de la discretización del mecanismo

El modelo maneja dos tipos de material, más específicamente el acero y el aluminio, esto con el objetivo de obtener pesos ligeros en los materiales que no presentan deformaciones significativas y resistencia en aquellos elementos críticos. Los valores utilizados para la simulación son los siguientes:

Material	Densidad $\rho$ [ $kg/m^3$ ]	Modulo de Elasticidad $E$ [ $GPa$ ]	Modulo de Cortante $G$ [ $GPa$ ]
Acero	7850,00	200,00	79,3
Aluminio	2700,00	69,00	27,00

Tabla 4.10: Lista de Materiales para el análisis de rigidez

A partir de la discretización del mecanismo (ver Figura 4.17) se establecieron 38 nodos distribuidos en 48 elementos que siguen la siguiente configuración:

Elemento	Material	Perfil Transversal	Componente	Dimensiones
1 : 12	Acero	Tubería Rectangular $\square$	Base	$B, H, t$
13 : 15	Aluminio	Rectangular $\blacksquare$	Revoluta AB	$B, H$
16 : 18	Aluminio	Rectangular $\blacksquare$	Revoluta AB	$B, H$
19 : 21	Aluminio	Rectangular $\blacksquare$	Revoluta BC	$B, H$
22 : 24	Acero	Circular $\bullet$	Eje del Brazo	$D$
25 : 27	Aluminio	Rectangular $\blacksquare$	Soporte del Eje	$B, H$
28 : 33	Aluminio	Viga en T $\mathbf{T}$	Brazo	$B, H, t$
34 : 36	Aluminio	Rectangular $\blacksquare$	Revoluta D	$B, H$
37 : 39	Aluminio	Rectangular $\blacksquare$	Revoluta DP	$B, H$
40 : 42	Aluminio	Viga en T $\mathbf{T}$	Brazo	$B, H, t$
43 : 45	Aluminio	Rectangular $\blacksquare$	Soporte del Eje	$B, H$
46 : 48	Acero	Rectangular $\blacksquare$	Eje del Brazo	$B, H$

Tabla 4.11: Configuraciones de los elementos

Posterior a esto, las condiciones de frontera utilizadas para resolver este sistema son los nodos 3, 5 y 7 son nodos fijos, es decir, para el análisis no presentan ningún tipo de desplazamiento o empujados. Además, por las condiciones normales de operación se pueden desprestigiar los efectos de las aceleraciones dentro del sistema; quedando fuerzas externas al mecanismo, las fuerzas de corte y los pesos de los mismos elementos.

Para el caso de las fuerzas aplicadas en los centros de gravedad de los elementos,  $f_{cg}$ , se trasladan a los nodos,  $f_n$ , utilizando la metodología de trabajo de deformación, y su expresión para esto es

la siguiente:

$$f_n = T^T \xi T_i f_{cg} \quad (4.31)$$

en donde:

$$\xi = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ L/12 & 0 & 0 \\ 0 & L/12 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ -L/12 & 0 & 0 \\ 0 & -L/12 & 0 \end{bmatrix}; \quad (4.32)$$

### 4.3.5. Dimensionamiento Cinético del Mecanismo

Para el dimensionamiento cinético del mecanismo aplicado para las operaciones de maquinado se deben seguir diseñar contra los modos de falla más críticos de la operación. Para este caso el diseño básico se centró en la falla por deformación excesiva, la cual causa una pérdida de la precisión y seguimiento a la trayectoria por parte del dispositivo. Con este fin se dispuso del análisis de rigidez, sirviendo de herramienta matemática la obtención del resto de las dimensiones del mecanismo. Esto recordando que las longitudes fueron determinadas en el diseño cinemático, siendo estas  $R_b = 675 \text{ mm}$ ,  $L_A = 50 \text{ mm}$ ,  $L_D = 249 \text{ mm}$  y  $e = 0 \text{ mm}$ .

El dimensionamiento fue realizado por un método iterativo se suponían unas dimensiones de las secciones transversales de los distintos elementos, observando la distribución de los desplazamientos que podía alcanzar el efector final a lo largo del espacio de trabajo. además se supuso que las fuerzas de corte estaba alineadas en el eje X y con un valor de  $1,5 \text{ kN}$ .

Componente	Perfil Transversal	Dimensiones	Parámetros iniciales mm	Parámetros finales mm
Base	Tubería Rectangular $\square$	$H, B, t$	70, 40, 5	50, 150, 10
Revoluta AB	Rectangular $\blacksquare$	$H, B$	80, 45	80, 45
	Rectangular $\blacksquare$	$H, B$	20, 80	20, 80
RevolutaBC	Rectangular $\blacksquare$	$H, B$	45, 45	30, 45
Eje del Brazo	Circular $\bullet$	$D$	16	25,4
Soporte del Eje	Rectangular $\blacksquare$	$H, B$	45, 45	45, 45
Brazo	Viga en T $\mathbf{T}$	$H, B, t$	150, 100, 10	150, 100, 15
Revoluta D	Rectangular $\blacksquare$	$H, B$	60, 60	70, 70
Revoluta DP	Rectangular $\blacksquare$	$H, B$	60, 60	50, 70

Tabla 4.12: Parámetros iniciales y finales para probar el mecanismo

Luego de establecer los parámetros, prosiguió a evaluar bajo las condiciones de operación los desplazamientos alcanzados por el efector a lo largo del espacio de trabajo discretizado en una nube de puntos. Generando el siguiente histograma, ver Figura 4.18, en donde se puede observar la distribución de los desplazamientos de  $P$ , mostrando que los parámetros iniciales presenta una alta variabilidad a lo largo del espacio de trabajo mientras que los parámetros finales presenta una baja variabilidad y un promedio mucho más bajo que el de los iniciales.

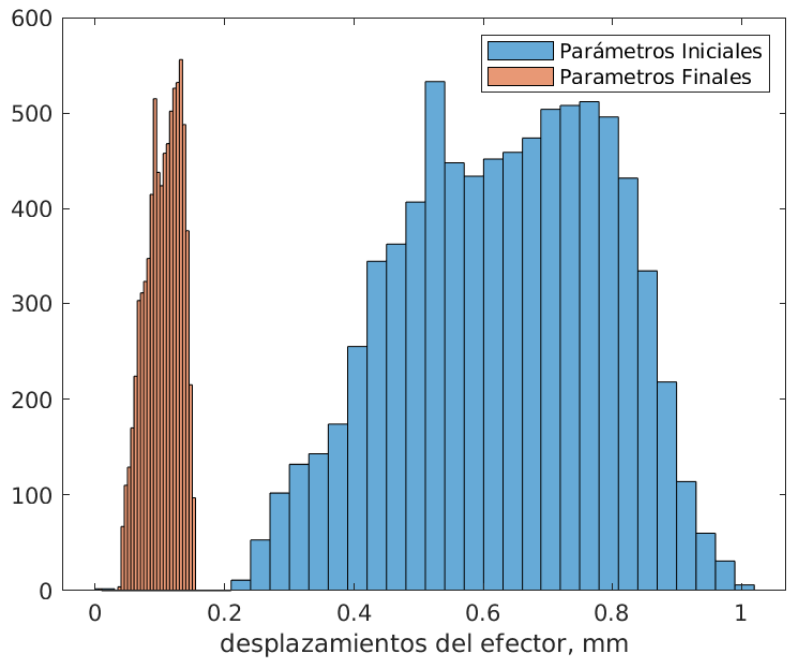
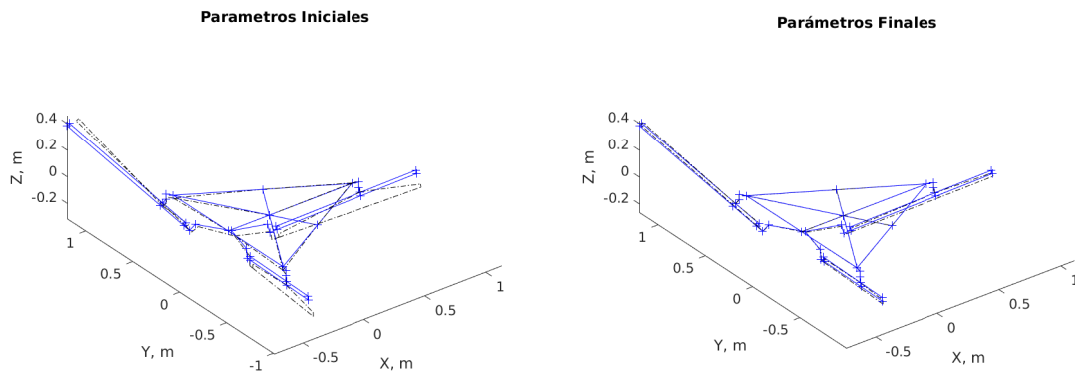


Figura 4.18: Comparación del comportamiento de la rigidez a lo largo del espacio de trabajo



(a) Parámetros iniciales

(b) Parámetros finales

Figura 4.19: Comparación del mecanismo en una posición

# Capítulo 5

## Diseño Detallado

### 5.1. Diseño Detallado del Husillo

Para el diseño y selección de los elementos del subsistema motor-husillo se tiene en cuenta la arquitectura paralela de la herramienta, potencia requerida, velocidades y pares necesarios para la operación de fresado. El subsistema del motor-husillo esto compuesto un motor, una caja de transmisión y un eje flexible.

#### 5.1.1. Selección del motor-husillo

Para la selección del motor se toma la potencia de corte, velocidad y par que requiere la operación de fresado. La potencia de corte ( $P_c$ ) se multiplica por un factor de servicio ( $F_s$ ) y con esta potencia requerida se procede a seleccionar el tipo de motor y posteriormente el motor que se requiere para la operación de fresado.

$$P_s = F_s \times P_c = 1,1kW \times 1,3 = 1,5kW \quad (5.1)$$

Para la selección de tipo de motores se entra la figura 5.1 donde se concluye que el tipo de motor que ofrece las mejores prestaciones para el fresado es el motor eléctrico. El motor eléctrico posee las siguientes ventajas frente a los motores neumáticos e hidráulico como los es la precisión, silencioso, factibles y fáciles de controlar.

Después de hacer una búsqueda del motor que cumpla las necesidades de la operación de mecanizado. Se encuentra un Spindle servo motor modelo  $MK08 - 3 - 9,5 - 1,5/2,2 - 4 - 1500$ , Este motor trabaja con 3 fases alternas siendo estos motores asíncronos con excelentes características dinámicas. Según Shenzhen Guanhong Technology CO. (2017) este motor AC asíncrono es normalmente usado en robot, petróleo, metalurgia, equipos de control automático, etc. Las características de este motor se presentan en la tabla 5.1.

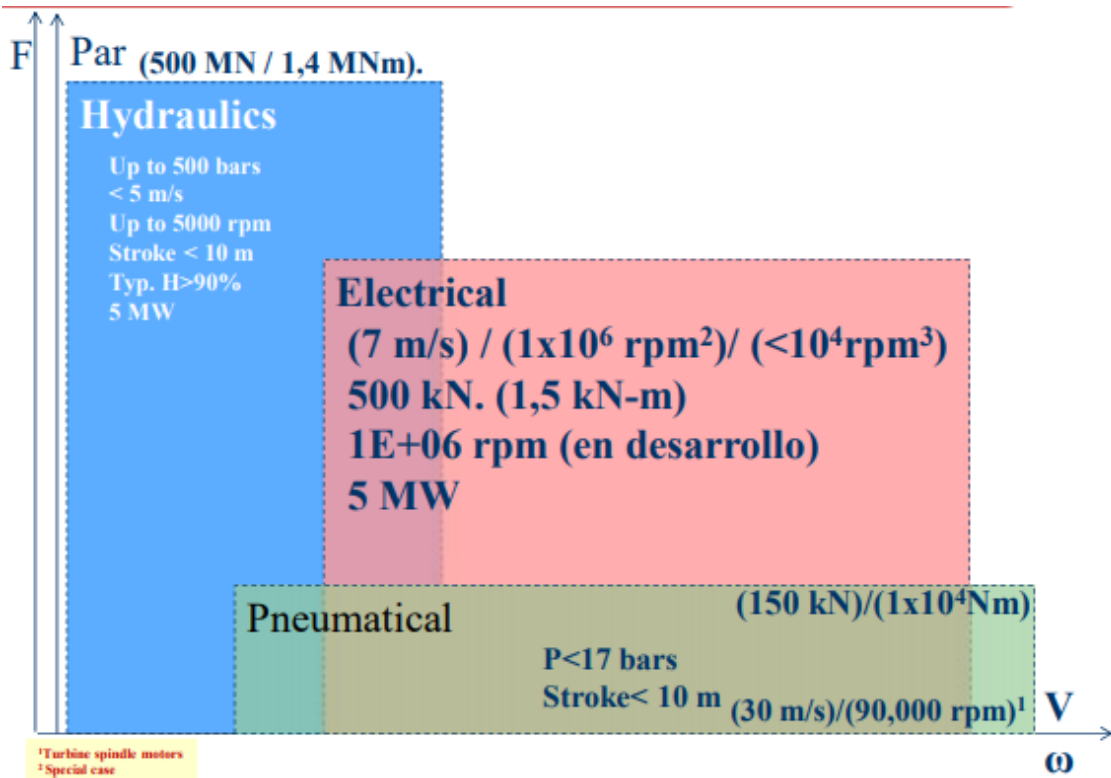


Figura 5.1: Rendimiento cualitativo de los motores

Fuente: Heriberto Maury

Moder motor :MK08-3-9.5-1.5/2.2-4-1500						
Rated power (kw)	Rated torque (Nm)	Rated current (A)	Rated speed (rpm)	Max speed (rpm)	Rotor inertia (kg.m <sup>2</sup> )	weight (kg)
1.5	9.5	3.7	1500	8000	0.0058	25

Tabla 5.1: Características del motor

Fuente:Shenzhen Guanhong Technology CO. (2017)

### 5.1.2. Diseño sistema de transmisión

La caja de transmisión la cual se requiere para la operación de la máquina debe ser de relación de transmisión variable, por lo cual debe constar con un selector de engranaje el cual permitirá dar diferentes velocidades de salida con un mismo motor.

Para el diseño de la caja de transmisión se trabajará con engranajes helicoidales, los cuales permiten un trabajo a altas velocidades, proveen una alta relación de contacto y además producen bajos niveles de ruido.

Se diseñarán los engranajes según las recomendaciones de la AGMA, se tomarán como base el número de dientes establecidos en el diseño básico y se iniciará un proceso iterativo el cual permita un diseño sin modos de falla, para iniciar el proceso se establecen los ángulos de hélice y de presión de 20° acorde las recomendaciones de diseño y se evalúan modos de fallas cinemáticos y cinéticos.

Para el diseño Cinemático se tuvieron en cuenta los siguientes modos de fallas:

- Intermitencia
- Interferencia
- Ruido

Mientras que el diseño cinético se tuvo en cuenta los siguientes modos de falla:

- Fatiga flexional
- Fatiga superficial

Para la demostración del diseño se procede a diseñar el engranaje  $N^{\circ}1$  el cual se encuentra en una relación transmisión de 1, se inicia el proceso de diseño con el diseño cinemático.

## Diseño cinemático

### Intermitencia

Para iniciar el análisis se procede a calcular valores geométricos que se necesitaran para la evaluación del engranaje.

$$\phi_t = \arctan \frac{\tan \phi_n}{\cos \psi} \quad (5.2)$$

Donde:

$\phi_t$  = Ángulo de presión transversal.

$\phi_n$  = Ángulo de presión normal.

$\psi$  = Ángulo de hélice.

$\phi_t = 21,1728$ ,  $m = 2,5$ , Ancho de cara,  $F = 12 \times m = 30 \text{ mm}$ , paso normal,  $P_n = \pi \times m$ , donde  $m$  es el modulo. Para la evaluación de intermitencia se calcula un ancho de cara mínimo para el



engranaje, este se calcula con la ecuación 5.3 de la AGMA Tomada del (Shigley, 2011).

$$F_{min} = b_{min} = \frac{1,15P_n}{\tan \psi} F_{min} = 24,8154mm \quad (5.3)$$

Con un ancho de cara mayor a un ancho de cara mínimo, se descarta el modo de falla de intermitencia.

## Interferencia

La interferencia en los engranajes helicoidales va relacionada con el numero de dientes, un numero de dientes muy pequeño, podría causar un problema de interferencia, por la cual se procede a calcular el número de dientes mínimo 5.4, para evitar este modo de falla.

$$N_{p,min} = \frac{2K \cos \psi (i + \sqrt{i^2 + (1 + 2i \sin \phi_t^2)})}{(1 + 2i) \sin \phi_t^2} \quad (5.4)$$

Donde:

K=factor relacionado con el diente = 1 para dientes completos.

$$N_p = 8.0225 \text{ dientes}$$

Finalmente, para el diseño cinemático se evaluo la falla por ruido, este se evaluará estimando la velocidad tangencial en la línea de paso, si esta es inferior a 200m/s se considera que el engranaje no fallará por ruido.

$$v_t = w_p \left( \frac{rad}{min} \right) \cdot \frac{2\pi rad}{60s} \cdot \frac{r_p(mm)}{1000mm} : \left( \frac{m}{s} \right) \quad (5.5)$$

$$V_t = 37,88m/s$$

Para el diseño de los demás engranajes, se procedió de la misma forma que con el engranaje N°1, el resultado de esto se encuentra en la table 5.2.

Engranaje N°	N° dientes	Modulo	$\Psi$	$\Phi$	F	Rpm	N° dientes minimo	Ancho de cara minimo(mm)	Velocidad tangencial (Critica)(m/s)
1	34	2,5	20°	20°	30	1500	9	25	36
2	34	2,5	20°	20°	30	1500	9	25	36
3	23	2,5	20°	20°	30	1500	8	25	24
4	45	2,5	20°	20°	30	750	8	25	24
5	17	2,5	20°	20°	30	4500	8	25	54
6	51	2,5	20°	20°	30	1500	8	25	54
7	34	2,5	20°	20°	30	1500	9	25	36
8	34	2,5	20°	20°	30	1500	9	25	36

## Diseño cinético

### Fatiga flexional

Para evaluar el modo de falla de fatiga flexional en el engranaje, se debe calcular la fuerza tangencial, esta se calcula teniendo en cuenta la potencia consumida y la velocidad tangencial en la línea de paso del engranaje ecuación 5.6. Nota: se escogieron las velocidades de operación mas bajas dado que con estas se obtienen los pares mas altos y por lo tanto las fuerzas más grandes.

$$F_t = \frac{\text{Potencia } 1100W}{\text{velocidad } 6,675m/s} = 165N \quad (5.6)$$

Una vez calculada la fuerza tangencial, se procede a calcular el esfuerzo flexionante según la norma AGMA Ecuación 5.7, adicionalmente a la fuerza tangencial se agregó un factor de seguridad de 2 para tener en cuenta casos en los cuales existan sobrecargas.

$$\sigma_{AGMA} = W_t[N]K_oK_vK_s \cdot \frac{1}{Fmm \cdot m[mm]} \cdot \frac{K_HK_B}{J} \cdot K_i \quad (5.7)$$

Donde:

F=30mm: Ancho de cara.

Ki=1: Factor de engranaje intermedio.

J:=0.4: Factor geométrico de forma del diente.

Ko=1.5: Factor de sobrecarga.

Kv=1.1:Factor dinámico.

Ks=1.5: Factor de tamaño: .

KH=1.6 : Factor de carga: .

KB=1: Factor de espesor del aro.

$$\sigma_{AGMA} = 24.2 \text{ MPa.}$$

Para verificar el diseño se calcula un factor de seguridad tomando como referencia un esfuerzo permisible de flexión, el cual se calcula con la ecuación 5.8

$$\sigma_{F,perm}[MPa] = \frac{S_t[MPa]}{FS_F} \frac{Y_n}{Y_\theta Y_z} \quad (5.8)$$

Donde St=170: Esfuerzo de flexión permisible.

YN=1: Factor de ciclos de esfuerzo para fatiga flexional:

Yz=1.5: Factor de confiabilidad:.

Y =1: Factor de temperatura:.

$$\sigma_{F,perm} = \frac{113,33MPa}{FS_F} \quad (5.9)$$

Una vez con un calculado el valor de referencia para el esfuerzo se procede a calcular el factor de seguridad, igualando el esfuerzo permisible con el esfuerzo calculado con la norma AGMA, ecuación 5.10

$$FS_F = \frac{\sigma_{F,perm}}{\sigma_{AGMA}} = \frac{113,33MPa}{24,2MPa} = 4,68 \quad (5.10)$$

Una vez comprobado que no falla por Fatiga flexional, se procede a calcular fatiga superficial.

### Fatiga superficial

$$\sigma_c = Z_e \cdot \sqrt{\frac{N}{mm^2}} \cdot \sqrt{W_t[N]K_oK_vK_s \cdot \frac{K_H Z_R}{d_p[mm]F[mm]I}} \quad (5.11)$$

Donde:

ZE= 191 MPa: Coeficiente elástico.

ZR=1: Factor de condición superficial.

I=0.138: Factor geométrico de resistencia superficial.

$$\sigma_c = 274.34 \text{ MPa.}$$

Igualmente, que en fatiga flexionaste se busca un factor de seguridad que garantice el diseño, para esto se toma como referencia al esfuerzo permisible ecuación 5.12.

$$\sigma_{c,perm} = S_c \cdot \frac{Z_n Z_w}{Y_\theta Y_z} \quad (5.12)$$

Donde:

Sc=1100 MPa: Esfuerzo superficial permisible.

ZW=1: Factor de relación de dureza.

ZN=1: Factor de vida de ciclos de esfuerzos.

$$\sigma_{c,permi} = 733.33 \text{ MPa}$$

Una vez calculado un valor de referencia se procede a calcular el factor de seguridad con la ecuación 5.13

$$FS_c = \left( \frac{\sigma_{c,perm}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (5.13)$$

Donde:

FSc: factor de seguridad AGMA.

$$FSc = 2.67$$

Los calculos se repitieron para cada engranaje, tanto fatiga flexiónate como superficial, con el fin de verificar que todos los engranajes resistieran a los modos de falla evaluados, los resultado se encuentra en las tablas 5.3, 5.4, 5.5, 5.6.

N° Engranje	Potencia (Kw)	Wt*Fs (N)	Ko	Kv	Ks	Kh	Kb	Ki	J	F	Esfuerzo AGMA (MPa)
1	1.1	220	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	1,0	0,4	30,0	24.2
2	1.1	220	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	1,0	0,4	30,0	24.2
3	0,3	140,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	1,0	0,4	30,0	16,2
4	0,3	140,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	1,0	0,4	30,0	15,4
5	1,1	220,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	1,0	0,3	30,0	30,3
6	1,1	228,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	1,0	0,4	30,0	23,9
7	0,2	50,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	1,0	0,4	30,0	5,5
8	0,2	50,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	1,0	0,4	30,0	5,5

Fuente:Elaboracion Propia

Tabla 5.3: Calculo de esfuerzo flexionante según AGMA

N°Engranje	St (Mpa)	Esfuerzo AGMA (MPa)	Yn	Ytheta	Yz	Esfuerzo permisible	FS
1	170,0	24.2	1,0	1,0	1,5	113,3	4.68
2	170,0	24.2	1,0	1,0	1,5	113,3	4.68
3	170,0	16,2	1,0	1,0	1,5	113,3	7,0
4	170,0	15,4	1,0	1,0	1,5	113,3	7,4
5	170,0	30,3	1,0	1,0	1,5	113,3	3,7
6	170,0	23,9	1,0	1,0	1,5	113,3	4,7
7	170,0	5,5	1,0	1,0	1,5	113,3	20,6
8	170,0	5,5	1,0	1,0	1,5	113,3	20,6

Tabla 5.4: Calculo de factor de seguridad para fatiga flexionanteFuente:Elaboracion Propia

N°Engranje	Wt*Fs (N)	Ko	Kv	Ks	Kh	Zr	Ze	F	I	dP	Esfuerzo AGMA fatiga superficial
1	220	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	191,0	30,0	0,1	85,0	274.34
2	220	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	191,0	30,0	0,1	85,0	274.34
3	140,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	191,0	30,0	0,2	127,5	156,5
4	140,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	191,0	30,0	0,2	42,5	271,0
5	220,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	191,0	30,0	0,2	112,5	198,1

6	228,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	191,0	30,0	0,2	57,5	282,1
7	50,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	191,0	30,0	0,1	85,0	130,8
8	50,0	1,5	1,1	1,3	1,6	1,0	191,0	30,0	0,1	85,0	130,8

Fuente:Elaboracion Propia

Tabla 5.5: Calculo de esfuerzos superficiales según AGMA

N°Engranje	Sc, del material	Zn	Zw	Ytheta	Yz	Esfuerzo permisible de fatiga superficial	Esfuerzo AGMA fatiga superficial	Fs
1	1100,0	1,0	1,0	1,0	1,5	733,3	274,34	2,67
2	1100,0	1,0	1,0	1,0	1,5	733,3	274,34	2,67
3	1100,0	1,0	1,0	1,0	1,5	733,3	156,5	4,7
4	1100,0	1,0	1,0	1,0	1,5	733,3	271,0	2,7
5	1100,0	1,0	1,0	1,0	1,5	733,3	198,1	3,7
6	1100,0	1,0	1,0	1,0	1,5	733,3	282,1	2,6
7	1100,0	1,0	1,0	1,0	1,5	733,3	130,8	5,6
8	1100,0	1,0	1,0	1,0	1,5	733,3	130,8	5,6

Fuente:Elaboracion Propia

Tabla 5.6: Calculo de factor de seguridad para fatiga superficial

Para la construcción de la caja de transmisión, se decidió implementar una caja de engranajes flotantes, esto quiere decir que todas las parejas de engranajes están en contacto pero sin transmisión de potencia, esto ocurre hasta que por medio de un sincronizador se selecciona la relación de transmisión a la que se desea trabajar, este sincronizador se desplaza y une por medio de un engranaje tipo corona interna, un engranaje rectos ubicado a un costado de los engranajes helicoidales con un engranaje que se encuentra fijo en el eje, logrando así la transmisión de par, con solamente 2 pares de engranajes, ver figura 5.2.

La representación final de el sistema de transmisión, se muestra en la figura 5.3.

En la figura 5.4 se muestra en mas detalle el eje secundario o intermedio, mientras que en la figura 5.5, se muestra el eje de salida con los engranajes flotantes.

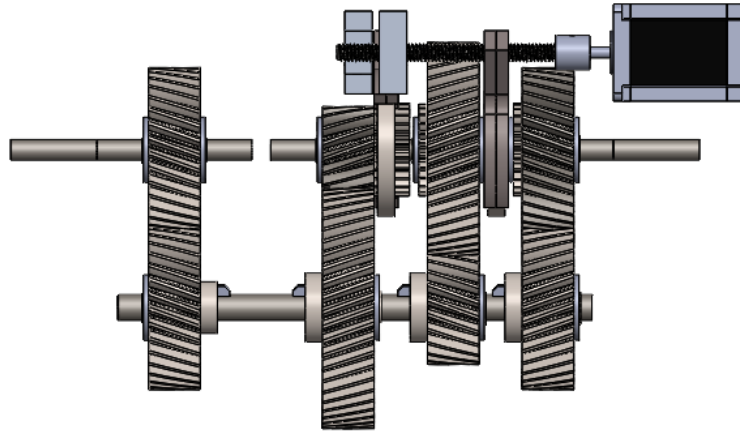


Figura 5.2: Esquema sistema de transmisión  
Fuente:Elaboración propia

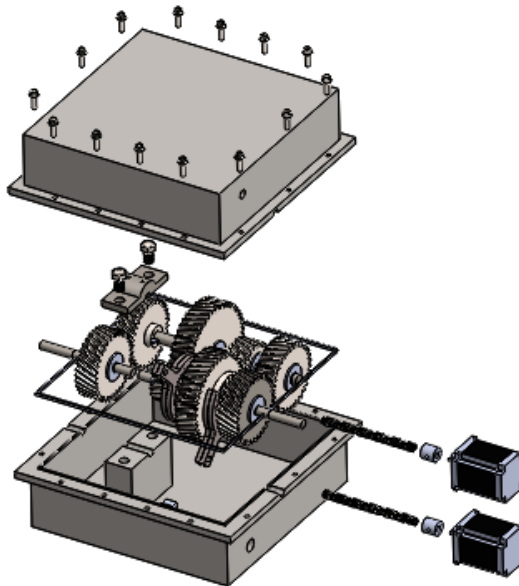


Figura 5.3: Vista explosionada sistema final  
Fuente:Elaboración propia

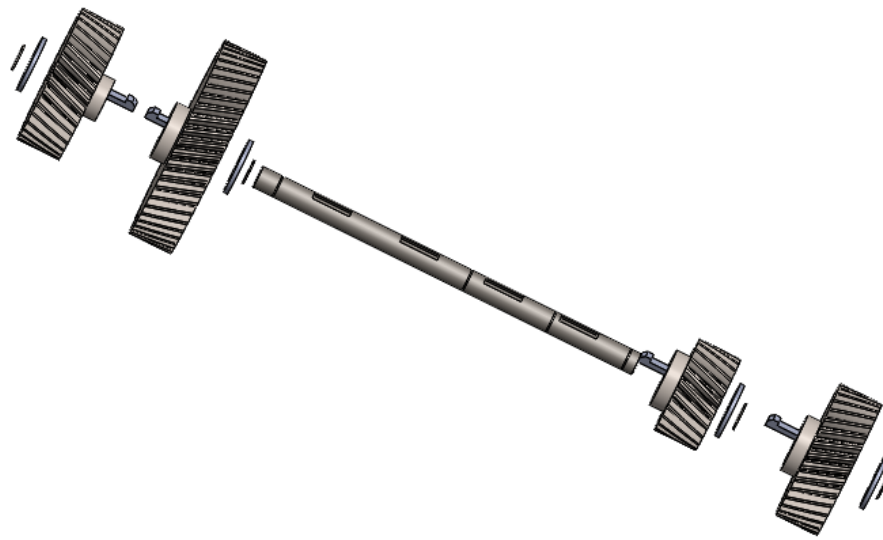


Figura 5.4: Exploxionado eje intermedio  
Fuente:Elaboración propia

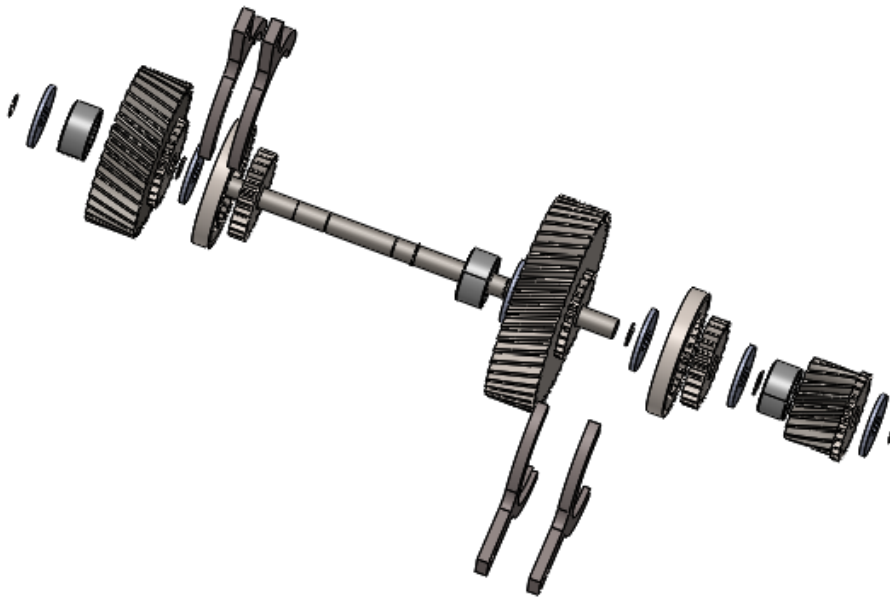


Figura 5.5: Exploxionado eje de salida  
Fuente:Elaboración propia

### 5.1.3. Planos

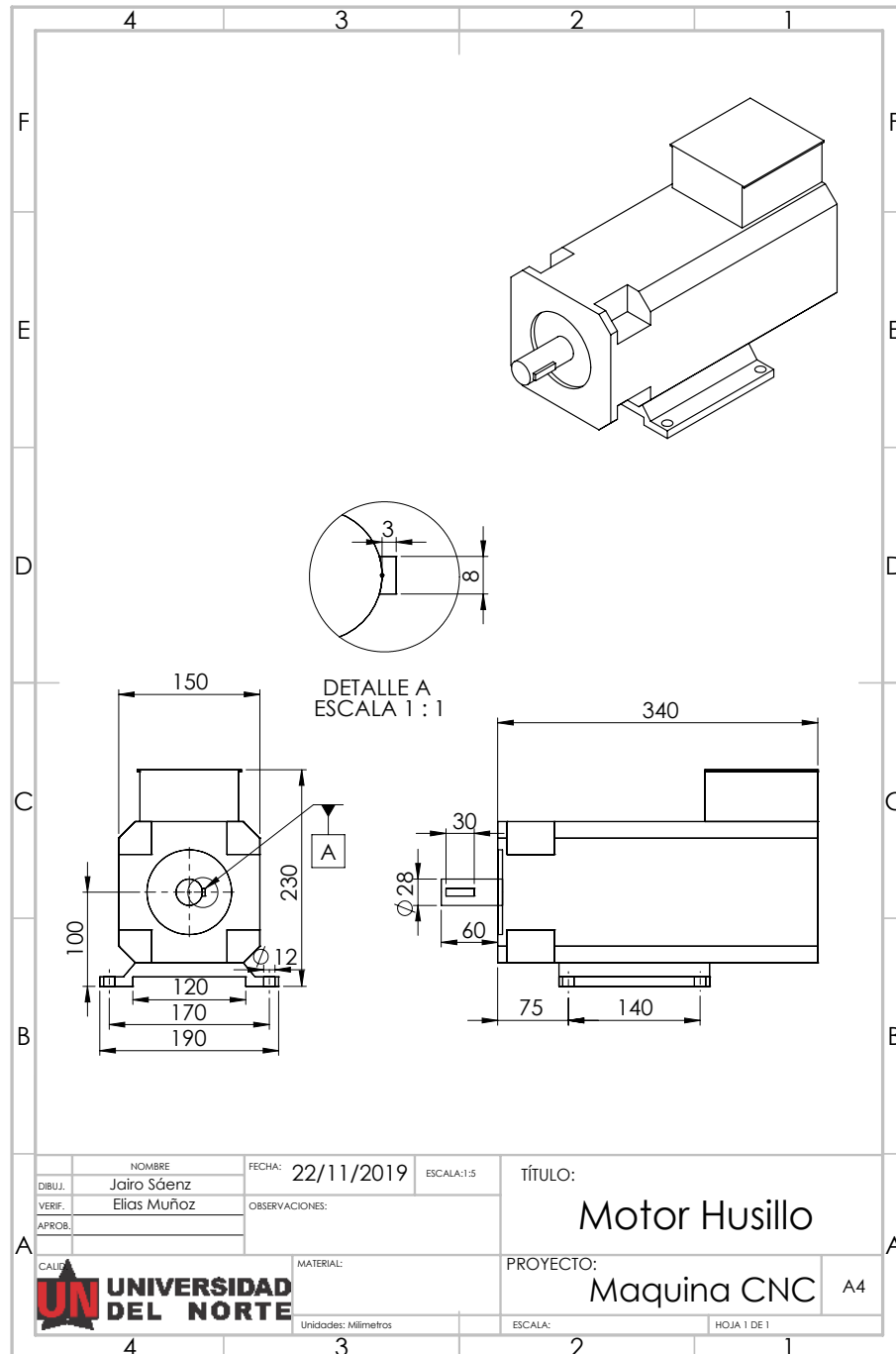


Figura 5.6: Plano del Servo motor

Fuente:Elaboración propia



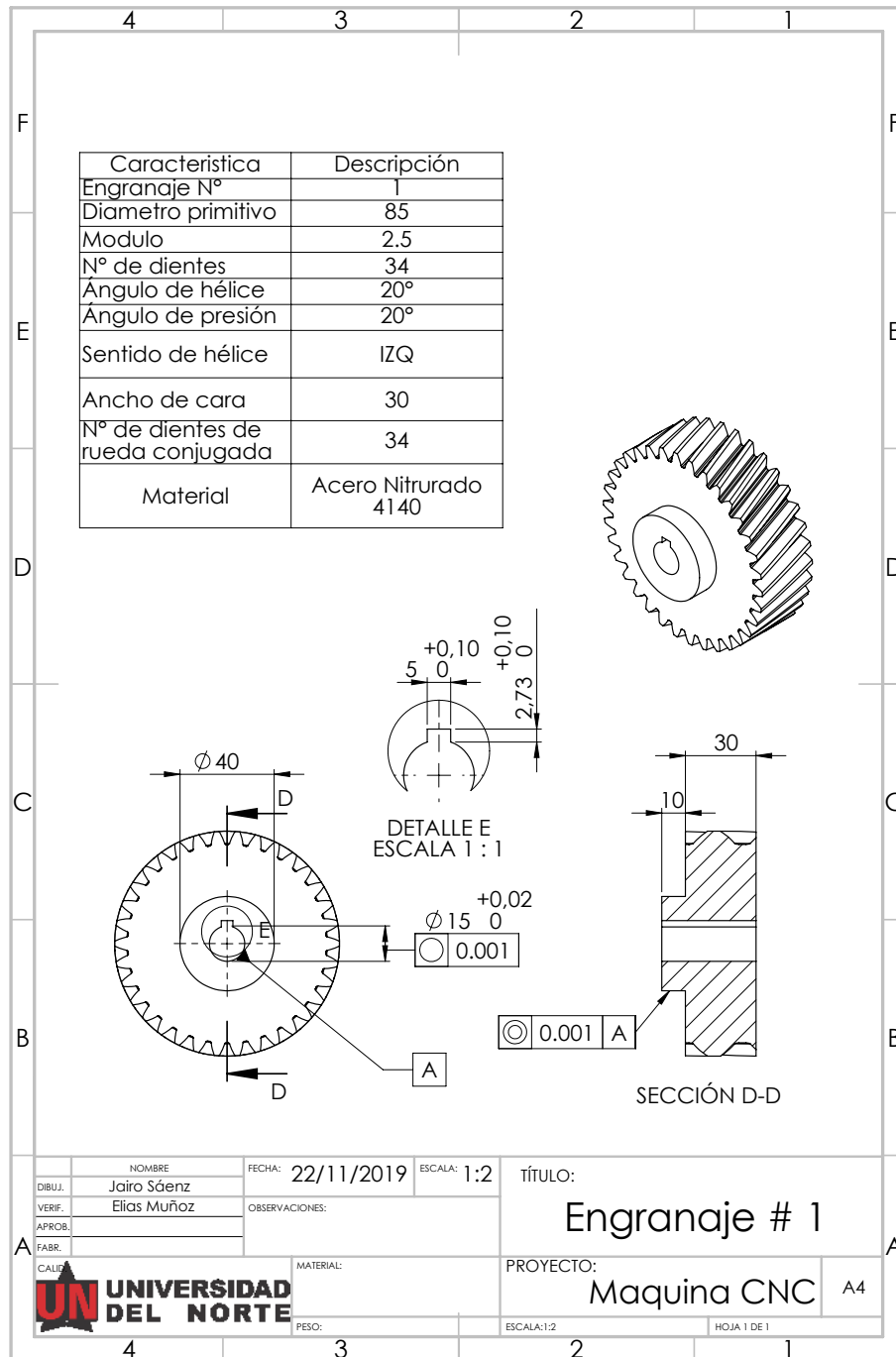


Figura 5.7: Plano del engranaje

Fuente:Elaboración propia

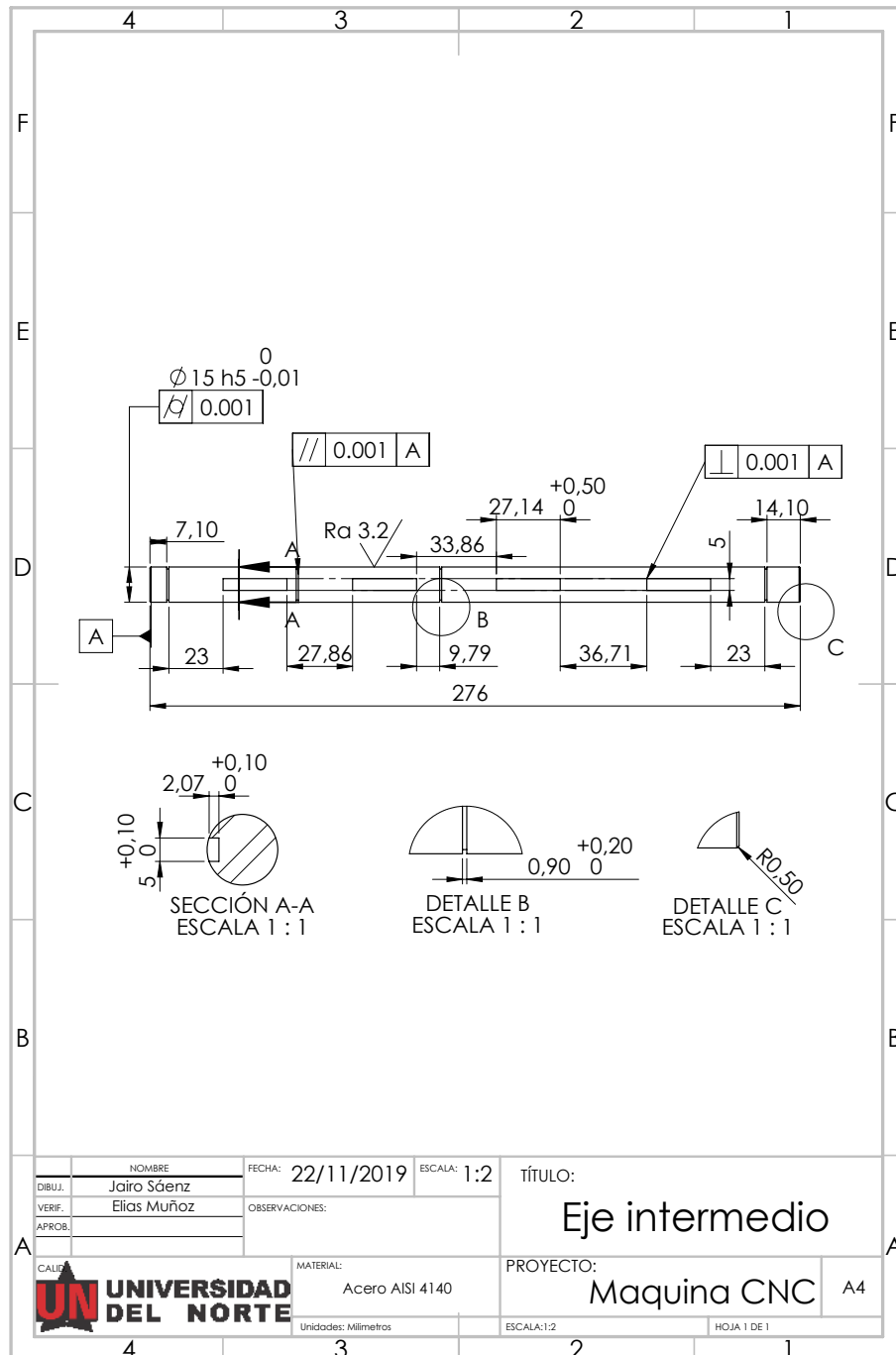


Figura 5.8: Plano del eje  
Fuente:Elaboración propia

### 5.1.4. Diseño del eje

Para el diseño del eje se consideraron las cargas que los engranajes y rodamientos producen sobre este, tales fuerzas se obtuvieron teniendo en cuenta el engranaje con mayor potencia de transmisión y su velocidad de operación.

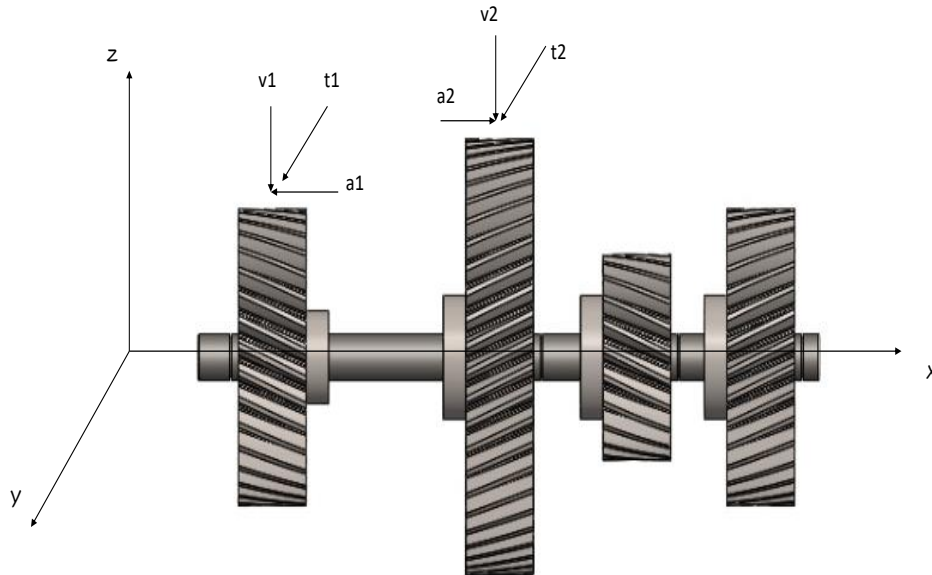


Figura 5.9: DCL eje

Etapa	x mm	r mm	t N	a N	v N	Fa Nmm	Tt Nmm
1	45	42.5	164.77	59.97	63.81	2548.7	7002.7
2	146	63.75	109.85	39.98	42.54	2548.9	7002.9

Tabla 5.7: Fuerzas y momentos sobre el Eje

Fuente:Elaboracion Propia

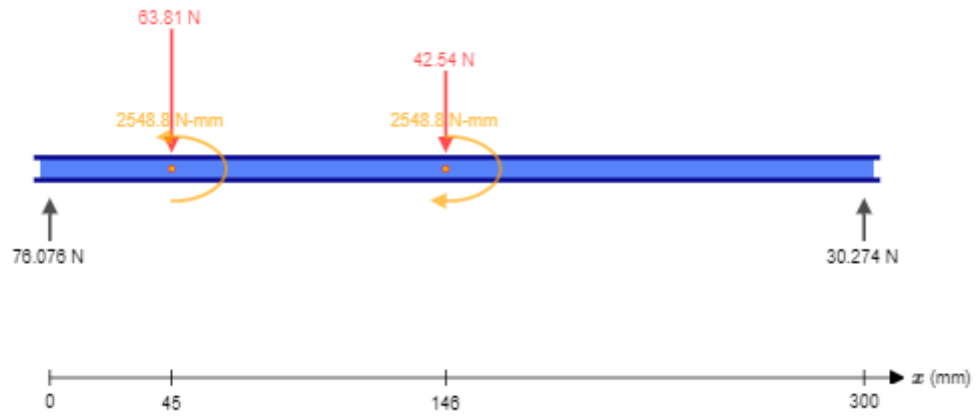


Figura 5.10: DCL plano xz

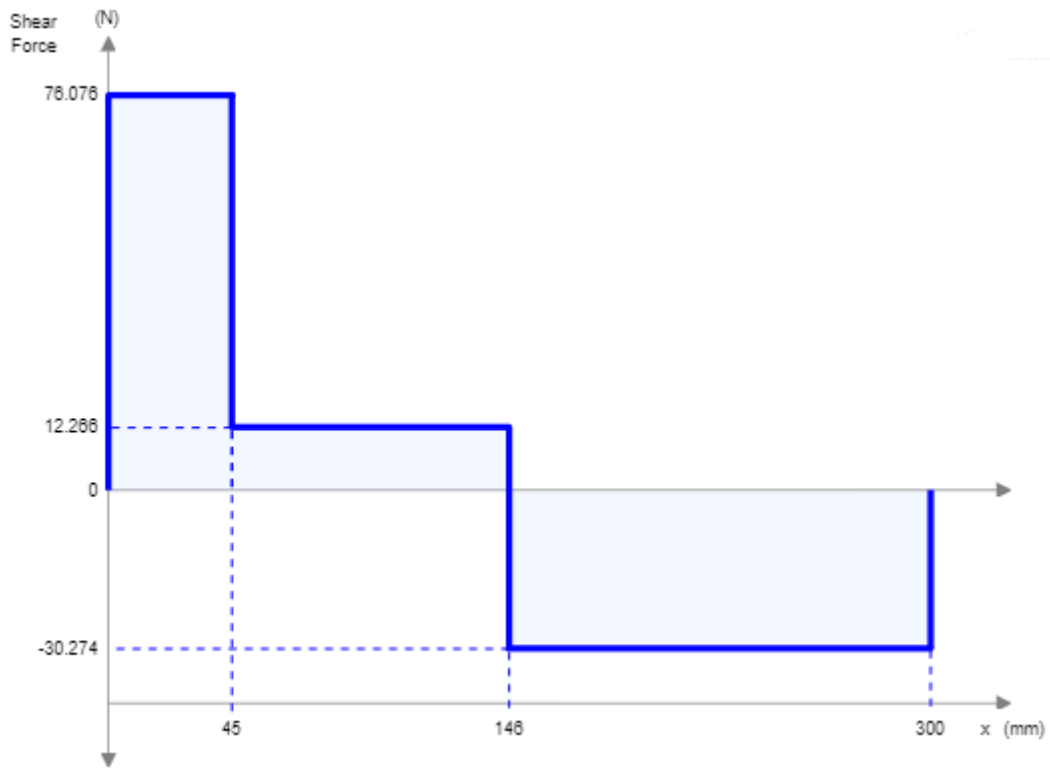


Figura 5.11: Cortante en plano xz

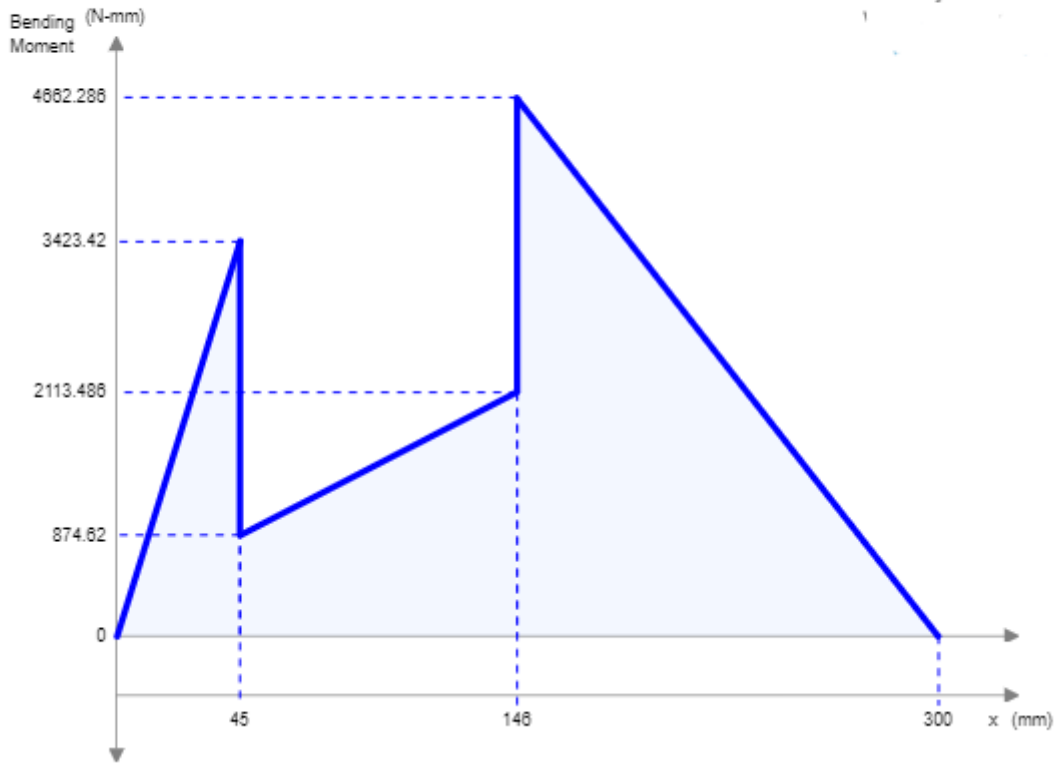


Figura 5.12: Momento en plano xz

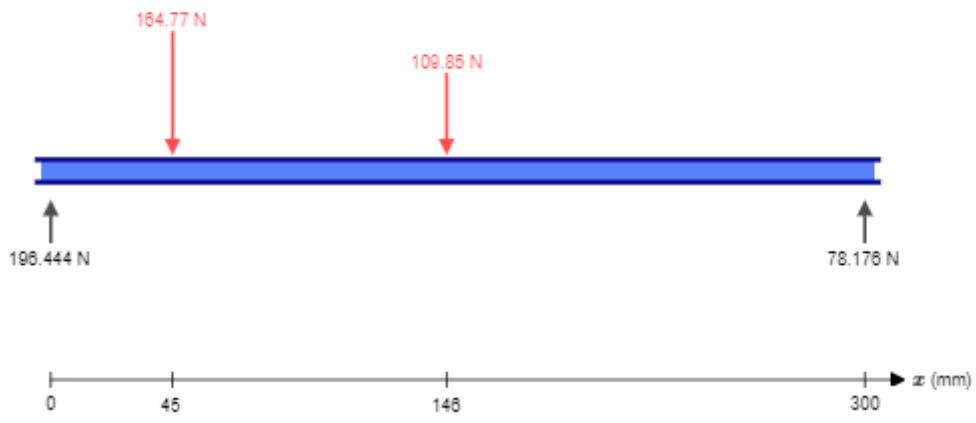


Figura 5.13: DCL plano xy

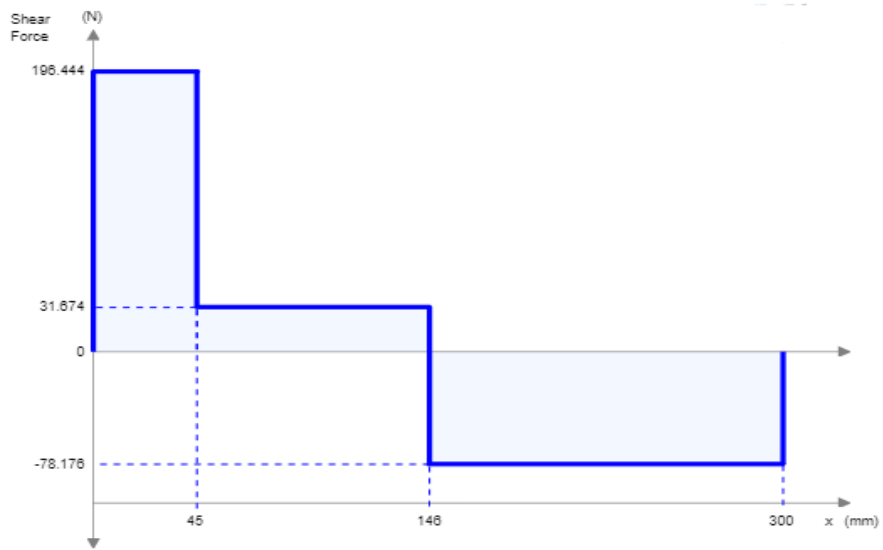


Figura 5.14: Cortante en plano xy

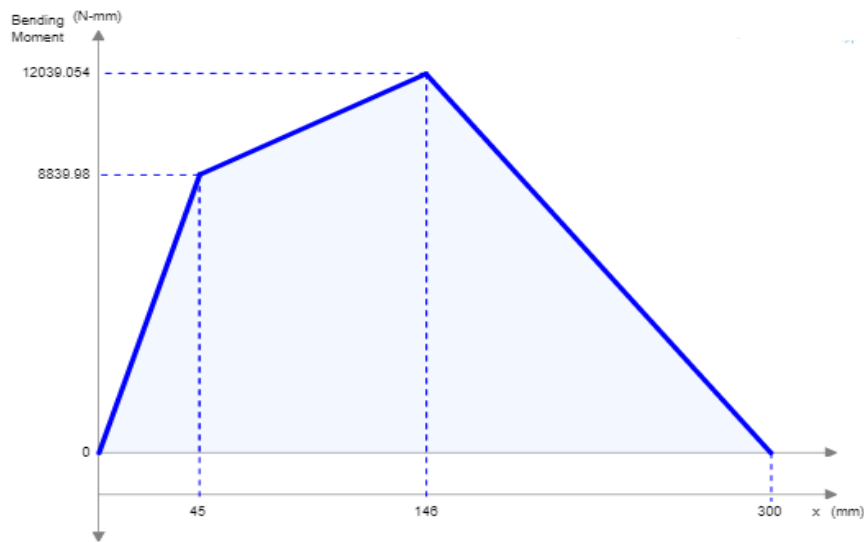


Figura 5.15: Momento en plano xy

Se va a evaluar el punto donde el momento flexionante es máximo, es decir  $x = 146$  mm, para lo cual se combinan los planos ortogonales como vectores y así obtener un momento total  $M_a = 12912 N.mm$  y torque medio  $T_m = 7002 N.mm$ . Teniendo en cuenta el momento alternante y torque medio obtenidos se puede evaluar la ecuación de Goodman Modificado reemplazando en ella los esfuerzos de Von Mises y despejando el diámetro del eje, resultando en la siguiente ecuación (Shigley, 2011):

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3} \quad (5.14)$$

Donde:

$S_{ut} = 900$  Mpa Acero AISI 4140

Factor acabado superficial  $K_a = \text{maquinado } 4,51 S_{ut}^{-0,265} = 0.7435$

Factor de tamaño  $K_b = 1,24 d^{-0,107} = 0.9281$

Factor de carga  $K_c = 1$

Factor de temperatura  $K_d = 1$

Factor de Confiabilidad  $K_e = 0.753$  para una confiabilidad de 99.9%

Factor de efectos varios  $K_c = 1$

Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria  $S'_e = 0,5 S_{ut}$  para  $S_{ut} < 1400$  Mpa

Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica  $S_e =$

Factor de Seguridad  $n = 2$

Teniendo en cuenta los valores de sensibilidad de la muesca  $q = 0,8$  ,  $q_c = 0,85$  y factores de concentración de esfuerzo  $K_t = 1,6$ ,  $K_{ts} = 1,4$  tomados de Shigley 2011 se obtuvieron los valores de  $K_f = 1,48$  y  $K_{fs} = 1,38$  con la siguiente ecuación:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (5.15)$$

$$K_{fs} = 1 + q_c(K_{ts} - 1) \quad (5.16)$$

Evaluando en la ecuación de diseño se encontró un diametro minimo de 12.5 mm, el cual se llevó a 15 mm por razones constructivas y con el cual se tiene un factor de seguridad de 3.5



# Capítulo 6

## Análisis Económico del Proyecto

	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
Diseño	Ingeniero de calculo	\$ 150.000,00	80,00	horas	\$ 12.000.000,00
	Memorias y plano	\$ 15.000,00	40,00	horas	\$ 600.000,00
	Software	\$ 750.000,00	1,00	-	\$ 750.000,00
	Interfaz	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	<b>Subtotal Diseño</b>				
	Motor Paso a Paso Nema 23 28.55 Kg.cm	\$ 225.676,00	3,00	-	\$ 677.028,00
	Spindle Servo motor Ac Mk08- 3-9.5-1.5/2.2-4-1500	\$ 1028.000,00	1,00	-	\$ 400.000,00
	Tornillo de potencia 12 mm x 1 m	\$ 45.000,00	3,00	-	\$ 135.000,00
	Acople Flexible D30L42 10 mm X 14 mm	\$ 35.890,00	3,00	-	\$ 107.670,00
	Rosca Brida T8 - D 12 mm	\$ 36.904,86	3,00	-	\$ 110.714,58
	Varilla de acero 16 mm x 0.5 m	\$ 68.300,00	6,00	-	\$ 409.800,00
	Apoyo para varilla lisa de 16 mm	\$ 8.400,00	12,00	-	\$ 100.800,00
	Lamina de aluminio de 4.5 pulg x 1/4 pulg x 1.5 m	\$ 25.000,00	3,00	-	\$ 75.000,00
	Perfil de aluminio 20 mm x 40 mm x 1m	\$ 72.900,00	6,00	-	\$ 437.400,00
	Perfil de aluminio 20 mm x 40 mm x 1.5m	\$ 90.200,00	6,00	-	\$ 541.200,00

	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Unidades	Valor
Lista de Componentes	Driver motor paso a paso Nema 23	\$ 65.000,00	3,00	-	\$ 195.000,00
	Caja Transmision	\$ 2000.000,00	1,00	-	\$ 2000.000,00
	Revoluta Horizontal tipo 1	\$ 15.000,00	1,00	kg	\$ 15.000,00
	Revoluta Horizontal tipo 2	\$ 15.000,00	6,24	kg	\$ 93.600,00
	Revoluta Horizontal tipo 3	\$ 15.000,00	3,47	kg	\$ 52.000,00
	Carro Brazos	\$ 15.000,00	2,63	kg	\$ 39.465,00
	Plataforma	\$ 50.000,00	16,98	kg	\$ 849.060,00
	Rodamiento Lineal LM16UU	\$ 14.875,00	14,00	-	\$ 208.250,00
	Chumacera K004 FL001	\$ 12.300,00	3,00	-	\$ 36.900,00
	Ordenador PC	\$ 3.600.000,00	1,00	-	\$ 3.600.000,00
	Accesorios electricos	\$ 400.000,00	1,00	-	\$ 400.000,00
	Tornilleria	\$ 200.000,00	1,00	-	\$ 200.000,00
	Sistema de limpieza	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	Sistema de refrigeración	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
	Sistema de sujeccion	\$ 500.000,00	1,00	-	\$ 500.000,00
<b>Subtotal Lista de Componentes</b>					<b>\$ 12.292.882,58</b>
Fabricación	Emsablador	\$ 10.000,00	40,00	horas	\$ 400.000,00
	Ayudante	\$ 6.000,00	40,00	horas	\$ 240.000,00
	Supervisor	\$ 100.000,00	20,00	horas	\$ 2.000.000,00
	<b>Subtotal Fabricación</b>				
Equipos	Pintura	\$ 20.000,00	4,00	m2	\$ 80.000,00
	Herramientas	\$ 350.000,00	1,00	-	\$ 350.000,00
	Centro de mecanizado	\$ 90.000,00	16,00	horas	\$ 1.440.000,00
	<b>Subtotal Sección</b>				
<b>Subtotal</b>					<b>\$ 30.652.838,58</b>
<b>Imprevistos (30%)</b>					<b>\$ 9.195.851,27</b>
<b>Total Maquina</b>					<b>\$ 39.848.690,85</b>
Otros Equipos	Computadores	\$ 1300.000,00	3,00	-	\$ 3900.000,00
	escritorios	\$ 400.000,00	5,00	-	\$ 2000.000,00
	implementos operativos	\$ 10000.000,00	1,0	-	\$ 10.000.000,00
	otros administrativos	\$ 8000.000,00	1,00	-	\$ 8.000.000,00
	<b>Subtotal Otros</b>				
<b>Total</b>					<b>\$ 63.748.690,15</b>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.1: capex

GASTOS GENERALES		cantidad	Valor	Factor prestacional	AÑO 1
PERSONAL ADMINISTRATIVO	Gerente administrativo	1	4.000.000	5.600.000	67.200.000
	Contabilidad	1	2.000.000	2.800.000	33.600.000
	Secretaria	1	900.000	1.260.000	15.120.000
	Servicios generales	1	900.000	1.260.000	15.120.000
PERSONAL OPERACIÓN	Ingeniero diseño	1	5.000.000	7.000.000	84.000.000
	Operarios	2	4.000.000	5.600.000	67.200.000
	Almacen-Despacho	1	1.200.000	1.680.000	20.160.000
OTROS GASTOS OPERACIÓN	Depreciacion maquinaria			310.406	3.724.869
	Insumos			1.260.000	15.120.000
OFICJNA	Arriendo	1	4.500.000	4.500.000	54.000.000
	Servicios publicos (Luz, agua,intenet , vigilancia)		1.500.000	1.500.000	18.000.000
	Mantenimiento general (Polizas, mant oficina, etc)		600.000	600.000	7.200.000
FINANCIEROS	GMF (4x1000)			161.280	1.935.360
	Gastos bancarios			44.352	532.224
Impuestos	Industria y comercio			387.072	4.644.864
Total				33.963.109,75	407.557.317,02

Fuente:Elaboracion Propia

Tabla 6.2: Opex

PROYECCION		Panorama A - 1 Maquina Mes	Panorama B - 2 Maquinas Mes	Año 1
Ingresos		40.320.000	80.640.000	967.680.000
Fresado	\$90.000 Hora/16 horas/28 dias * 1Maq	40.320.000	80.640.000	967.680.000
Diseño		-	-	-
Venta Materiales		-	-	-
Gastos (Opex)		33.963.110	50.226.220	602.714.634
GANANCIA/PERDIDA		6.356.890	30.413.780	364.965.366
Capex		61.148.690	84.547.380	84.547.380
Roi				3,3

Fuente:Elaboracion Propia

Tabla 6.3: Resumen financiero

# Bibliografía

- Alibaba (2019). Suba cnc de 5 ejes. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/SUBA-CNC-Five-Axis-CNC-Machining-60478001506.html>. Accessed: 2019-08-13.
- Andres, J., Gracia, L., & Tornero, J. (2011). Calibration and control of a redundant robotic workcell for milling tasks. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(6):561–573.
- Briot, S. & Bonev, I. (2009). Pantopteron: a new fully decoupled 3dof translational parallel robot for pick-and-place applications. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 1(2):021001.
- Camargo Acuña, G. Y., Diaz Alonso, R. C., Velandia Pacheco, G. J., & Navarro Manotas, E. D. J. (2017). Capacidad dinámica de innovación en las pyme exportadoras metalmecánicas en colombia. *Espacios*.
- Cardou, P., Laurendeau, D., Beaulieu, L., Bélanger, L., & Carette, A. (2010). The dimensional synthesis of the linear delta robot for a force-feedback device. In *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages 829–838. American Society of Mechanical Engineers.
- Cazalilla, J., Vallés, M., Valera, Á., Mata, V., & Díaz-Rodríguez, M. (2016). Hybrid force/position control for a 3-dof 1t2r parallel robot: Implementation, simulations and experiments. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 44(1-2):16–31.
- Celesa (2017). Blue master fresas. [http://www.bluemaster.es/ContentNoHTML/Descargas/Catalogo\\_Bluemaster/ES/09\\_FRESAS\\_BM\\_2017.pdf](http://www.bluemaster.es/ContentNoHTML/Descargas/Catalogo_Bluemaster/ES/09_FRESAS_BM_2017.pdf). Accessed: 2019-10-11.
- Chang, S., Fine, H., Goldman, R., Simaan, N., & Wei, W. (2013). Systems, devices, and methods for surgery on a hollow anatomically suspended organ. <https://patents.google.com/patent/AU2007297702B2>.
- Chen, Y. & Dong, F. (2013). Robot machining: recent development and future research issues. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9-12):1489–1497.

- Choset, H., Wolf, A., & Zenati, M. A. (2013). Dispositivo guiador dirigible. <https://patents.google.com/patent/ES2433664T3>.
- DANE (2015). Encuesta anual manufacturera.
- Denkena, B., Bergmann, B., & Lepper, T. (2017). Design and optimization of a machining robot. *Procedia Manufacturing*, 14:89–96.
- Di Gregorio, R. & Parenti-Castelli, V. (1998). A translational 3-dof parallel manipulator. In *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control*, pages 49–58. Springer.
- Dieter, G. & Schmidt, L. (2012). *Engineering design (5th edition)*. McGraw-Hill.
- Fenoll, J., Borja, J. C., & Herrera, J. (2009). *Mecanizado básico*. Macmillan Iberia, S.A.
- Gallardo-Alvarado, J., Balmaceda-Santamaría, A. L., & Castillo-Castaneda, E. (2014). An application of screw theory to the kinematic analysis of a delta-type robot. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(9):3785–3792.
- Gao, D. & Ihrke, C. A. (2014). Robot industrial. <https://patents.google.com/patent/US8776632B2>.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- Guo, Y., Dong, H., & Ke, Y. (2015). Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 35:69–76.
- Höppner, H., Grebenstein, M., & van der Smagt, P. (2015). Two-dimensional orthoglide mechanism for revealing areflexive human arm mechanical properties. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1178–1185. IEEE.
- Interempresas.Net (2018). Catálogo general c005s. [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/9723/c005s\\_i.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/9723/c005s_i.pdf). Accessed: 2019-09-9.
- Karouia, M. & Hervé, J. (2000). A three-dof tripod for generating spherical rotation. In *Advances in robot kinematics*, pages 395–402. Springer.
- Kattan, P. I. (2010). *MATLAB guide to finite elements: an interactive approach*. Springer Science & Business Media.
- Kelaiaia, R., Company, O., & Zaatri, A. (2012). Multiobjective optimization of a linear delta parallel robot. *Mechanism and Machine Theory*, 50:159–178.

- Lechuga Cardozo, J. I., Antúnez, C., María, A., Meñaca Guerrero, I., Martínez Caraballo, H. R., Olivero Vega, E., & García Guiliany, J. E. (2018). Análisis del comportamiento de las exportaciones del departamento del atlántico (colombia) entre 2012–2016. *Asociacion de Profesionales y Tecnicos del CONICIT*.
- Li, W. & Angeles, J. (2018). The design of a 3-cps parallel robot for maximum dexterity. *Mechanism and Machine Theory*, 122:279–291.
- Lin, J., Luo, C.-H., & Lin, K.-H. (2015). Design and implementation of a new delta parallel robot in robotics competitions. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(10):153.
- Lora, J. C. T. & Pinedo, W. I. (2012). Determinantes del crecimiento de las micro, pequeñas y medianas empresas colombianas: el caso del sector metalmeccánico. *Semestre económico*, 15(32):41–76.
- Martini, A., Troncossi, M., Carricato, M., & Rivola, A. (2015). Static balancing of a parallel kinematics machine with linear-delta architecture: Theory, design and numerical investigation. *Mechanism and Machine Theory*, 90:128–141.
- Mejri, S., Gagnol, V., Le, T.-P., Sabourin, L., Ray, P., & Paultre, P. (2016). Dynamic characterization of machining robot and stability analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(1-4):351–359.
- Mitsubishi (2014). Catálogo general herramientas de corte. [https://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c\\_n\\_other/c006s.pdf](https://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c_n_other/c006s.pdf). Accessed: 2019-10-11.
- Petko, M. & Karpziel, G. (2005). Mechatronic design of a parallel manipulator for milling. In *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.*, pages 759–764. IEEE.
- Pierrot, F., Reynaud, C., & Fournier, A. (1990). Delta: a simple and efficient parallel robot. *Robotica*, 8(2):105–109.
- Pu Zhang, Zhengiang Yao, Z. D. (2014). Global performance index system for kinematic optimization of robotic mechanism. *Journal of Mechanical Design*, 136.
- Riba, C. (2002). *Diseño Concurrente*. Ediciones UPC.
- Saltaren Pazmiño, R. J., Aracil Santonja, R., PUGLISI, L. J., POLETTI, G. A., REY PORTOLES, G., & CABRERA PARRA, W. (2013). Robot de estructura cinemática híbrida para el guiado de la inserción de agujas, catéteres y elementos quirúrgicos para procedimientos de cirugía mínimamente invasiva. <https://patents.google.com/patent/ES2392059B2>.

- Sarabandi, S., Grosch, P., Porta, J. M., & Thomas, F. (2018). A reconfigurable asymmetric 3-upu parallel robot. In *2018 International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR)*, pages 1–8. IEEE.
- Serje, D. & Pacheco, J. (2017). Parallel kinematics machine tools: Research, development and future trends. *Dyna*, 51:5–7.
- Shenzhen Guanhong Technology CO., L. (2017). User manual ac servo spindle system v0004. <https://masso.com.au/wp-content/uploads/asgarosforum/3437/AC-Servo-Spindle-System-V0004-01.pdf>. Accessed: 2019-10-11.
- Shigley, J. E. (2011). *Shigley's mechanical engineering design*. Tata McGraw-Hill Education.
- Stipančić, T., Jerbić, B., Bučević, A., & Ćurković, P. (2012). Programming an industrial robot by demonstration. In *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*, pages 15–18. DAAAM International.
- Subrin, K., Sabourin, L., Cousturier, R., Gogu, G., & Mezouar, Y. (2013). New redundant architectures in machining: serial and parallel robots. *Procedia Engineering*, 63:158–166.
- Švaco, M., Šekoranja, B., Šuligoj, F., & Jerbić, B. (2014). Calibration of an industrial robot using a stereo vision system. *Procedia Engineering*, 69:459–463.
- Szipka, K., Laspas, T., & Archenti, A. (2018). Measurement and analysis of machine tool errors under quasi-static and loaded conditions. *Precision Engineering*, 51:59–67.
- Taghirad, H. D. (2013). *Parallel robots: mechanics and control*. CRC press.
- Toyama, T., Yamakawa, Y., & Suzuki, H. (1995). Machine tool having parallel structure. <https://patents.google.com/patent/US5715729A>.
- Ur-Rehman, R., Caro, S., Chablat, D., & Wenger, P. (2009). Kinematic and dynamic analysis of the 2-dof spherical wrist of orthoglide 5-axis. *arXiv preprint arXiv:0904.0145*.
- Waldron, K. J. & Schmiedeler, J. (2016). Kinematics. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 11–36. Springer.
- Xu, P., Li, B., & Chueng, C.-F. (2017). Dynamic analysis of a linear delta robot in hybrid polishing machine based on the principle of virtual work. In *2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 379–384. IEEE.



- Yuan, L., Pan, Z., Ding, D., Sun, S., & Li, W. (2018). A review on chatter in robotic machining process regarding both regenerative and mode coupling mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(5):2240–2251.
- Zargarbashi, S., Khan, W., & Angeles, J. (2012). The jacobian condition number as a dexterity index in 6r machining robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(6):694–699.
- Zeng, Q., Ehmman, K. F., & Cao, J. (2014). Tri-pyramid robot: Design and kinematic analysis of a 3-dof translational parallel manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(6):648 – 657.
- Zhang, D. (2010). *Parallel robotic machine tools*. Springer Science & Business Media.
- Zhu, W., Qu, W., Cao, L., Yang, D., & Ke, Y. (2013). An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(9-12):2535–2545.
- 周昕, 蔡静, & 周立恒 (2019). A kind of replanting system and its implementation based on parallel robot. <https://patents.google.com/patent/CN109348795A>.
- 张建政, 彭斌彬, 董易, & 孙冠群 (2019). A kind of four-degree-of-freedom high speed parallel robot. <https://patents.google.com/patent/CN109676587A>.
- 赵保亮, 胡颖, & 付义 (2018). Puncturing operation robot based on series and parallel structure. <https://patents.google.com/patent/CN109091233A>.
- 赵永生, 孟光, 张东胜, 许允斗, 郭立杰, 岳义, 周玉林, 姚建涛, 刘明芳, & 杨帆 (2019). Few-joint over-constrained five-freedom-degree hybrid connection robot. <https://patents.google.com/patent/WO2019091425A1>.

# Capítulo 7

## Anexos

### 7.1. Cronograma

Nombre de la Tarea	Duración	Inicio
<b>Formulacion del proyecto</b>	10 días	Lunes 29/07/19
Planteamiento del problema	5 días	Lunes 29/07/19
Justificacion	3 días	Lunes 05/08/19
Objetivos	2 días	Jueves 08/08/19
<b>Revision del estado del arte y de la tecnica</b>	5 días	Lunes 12/08/19
Revision del estado del arte	5 days	Lunes 12/08/19
Revision de la tecnica	5 days	Lunes 12/08/19
Revision de patentes	5 day	Lunes 12/08/19
Revision de normas	5 days	Lunes 12/08/19
<b>Definición de especificaciones</b>	5 días	Lunes 19/08/19
QFD	5 days	Lunes 19/08/19
Listado de referencias	5 days	Lunes 19/08/19
<b>Presentación del primer entregable</b>	5 días	Lunes 26/08/19
Redaccion del documento	5 días	Lunes 26/08/19
Presentacion	5 días	Lunes 26/08/19
<b>Diseño conceptual</b>	10 días	Lunes 02/09/19
Analisis funcional	2 days	Lunes 02/09/19
Generacion de alternativas	3 days	Miercoles 04/09/19
Seleccion de alternativas	2 days	Lunes 09/09/19
Redaccion del documento	9 days	Lunes 02/09/19
Presentacion	1 days	Viernes 13/09/19

Nombre de la Tarea	Duración	Inicio
<b>Diseño básico</b>	22 días	Lunes 16/09/19
Definicion de parametros de diseño	2 days	Lunes 16/09/19
Diseño cinematico	10 days	Miercoles 18/09/19
Diseño dinamico	10 days	Miercoles 2/10/19
<b>Diseño de detalle</b>	16 días	Miercoles 16/10/19
Seleccion de actuadores	5 días	Miercoles 16/10/19
Diseño de eslabones	5 días	Miercoles 23/10/19
Diseño de juntas	5 días	Miercoles 30/10/19
Analisis de elementos finitos	5 días	Miercoles 23/10/19
Realizacion de planos	5 días	Miercoles 30/10/19
Defensa de proyecto	1 días	Miercoles 6/11/19

Tabla 7.1: Cronograma Completo

## 7.2. Análisis Cinemático

### 7.2.1. Análisis de Posiciones

```

syms R_b alpha_i L_A e L_D P_x P_y P_z
syms theta_i beta_i q_i

ii = [1;0;0];

OOi = R_b*Rz(alpha_i)*ii;
OiAi= L_A*Rz(alpha_i+theta_i)*ii;
AiBi= e*Rz(alpha_i+theta_i+pi)*Ry(beta_i-pi/2)*ii;
BiCi= q_i*Rz(alpha_i+theta_i+pi)*Ry(beta_i)*ii;
OP = [P_x P_y P_z].';
PCi = L_D*Rz(alpha_i+theta_i)*ii;

eqn1 = OOi + OiAi + AiBi + BiCi == OP + PCi;

syms v phi
OiP = v*Rz(alpha_i+theta_i)*Ry(phi)*ii;

```

```

eqn2 = OiP == OP - OOi;
eqn2 = children(eqn2);
eqn2 = theta_i == atan(eqn2{2}(2)/eqn2{1}(2)) - alpha_i;
disp(eqn2);

syms M %xi
% AiCi = M*Rz(alpha_i+theta_i)*Ry(xi)*ii;
eqn3 = OOi + OiAi - (OP + PCi);
eqn3 = M == simplify(eqn3.'*eqn3);
disp(eqn3);

eqn4 = q_i == sqrt(M - e^2);
disp(eqn4);

eqn5 = expand(eqn1(3));
disp(eqn5);
syms u
eqn5 = subs(eqn5, [cos(beta_i) sin(beta_i)], [2*u 1-u^2]/(1+u^2));
eqn5 = simplify(expand(eqn5)*(1+u^2));
eqn5 = children(eqn5);
eqn5 = eqn5(1);
disp(eqn5);
eqn5 = children(eqn5);
eqn5 = coeffs(eqn5(1) - eqn5(2), u);
disp(eqn5);

```

```

function R = Rz(angle)
    R = [ cos(angle) -sin(angle) 0
          sin(angle)  cos(angle) 0
          0           0          1];
end

```

```

function R = Ry(angle)
    R = [ cos(angle) 0 sin(angle)
          0          1 0
          -sin(angle) 0 cos(angle)];
end

```

## 7.2.2. Análisis de Velocidades

```

syms R_b alpha_i L_A e L_D P_x P_y P_z
syms theta_i beta_i q_i
ii = [1;0;0];

OOi = R_b*Rz(alpha_i)*ii;
OiAi= L_A*Rz(alpha_i+theta_i)*ii;
AiBi= e*Rz(alpha_i+theta_i+pi)*Ry(beta_i-pi/2)*ii;
BiCi= q_i*Rz(alpha_i+theta_i+pi)*Ry(beta_i)*ii;
OP = [P_x P_y P_z].';
PCi = L_D*Rz(alpha_i+theta_i)*ii;

syms dtheta_i dbeta_i dq_i
syms dP_x dP_y dP_z

vOiAi= dtheta_i*diff(OiAi,theta_i);
vAiBi= dtheta_i*diff(AiBi,theta_i) + dbeta_i*diff(AiBi,beta_i);
vBiCi= dq_i*diff(BiCi,q_i) + dtheta_i*diff(BiCi,theta_i) ...
        + dbeta_i*diff(BiCi,beta_i);
vOP = [dP_x dP_y dP_z].';
vPCi = dtheta_i*diff(PCi,theta_i);

eqn1 = vOiAi + vAiBi + vBiCi == vOP + vPCi;
disp(eqn1);

%% Calculo de dtheta_i
Sti = -[-sin(alpha_i + theta_i); cos(alpha_i + theta_i); 0]...
        /(L_D - L_A + q_i*cos(beta_i) + e*sin(beta_i));
disp(Sti);
Dtheta_i = simplify(Sti.*(vOiAi + vAiBi + vBiCi - vPCi)) == ...
        simplify(Sti.*vOP);
disp(Dtheta_i);

%% Calculo de dbeta_i
Sbi = diff(BiCi,beta_i)/q_i^2;
disp(Sbi);

```

```

Dbeta_i = simplify(Sbi.'*(vOiAi + vAiBi + vBiCi - vPCi)) == ...
    simplify(Sbi.'*vOP);
disp(Dbeta_i);

%% Calculo de dq_i
Si = diff(BiCi, q_i);
Sbi = diff(BiCi, beta_i)/q_i^2;
Si = Si - e*Sbi;
disp(Si);
Dq_i = simplify(Si.'*(vOiAi + vAiBi + vBiCi - vPCi)) == ...
    simplify(Si.'*vOP);
disp(Dq_i);

```

### 7.2.3. Análisis de Aceleraciones

```

syms R_b alpha_i L_A e L_D P_x P_y P_z
syms theta_i beta_i q_i

ii = [1;0;0];

OOi = R_b*Rz(alpha_i)*ii;
OiAi= L_A*Rz(alpha_i+theta_i)*ii;
AiBi= e*Rz(alpha_i+theta_i+pi)*Ry(beta_i-pi/2)*ii;
BiCi= q_i*Rz(alpha_i+theta_i+pi)*Ry(beta_i)*ii;
OP = [P_x P_y P_z].';
PCi = L_D*Rz(alpha_i+theta_i)*ii;

syms dtheta_i dbeta_i dq_i
syms dP_x dP_y dP_z

vOiAi= dtheta_i*diff(OiAi, theta_i);
vAiBi= dtheta_i*diff(AiBi, theta_i) + dbeta_i*diff(AiBi, beta_i);
vBiCi= dq_i*diff(BiCi, q_i) + dtheta_i*diff(BiCi, theta_i)...
    + dbeta_i*diff(BiCi, beta_i);
vOP = [dP_x dP_y dP_z].';
vPCi = dtheta_i*diff(PCi, theta_i);

```

```

syms ddtheta_i ddbeta_i ddq_i
syms ddP_x ddP_y ddP_z

aOiAit= ddtheta_i*diff(vOiAi,dtheta_i);
aOiAin= dtheta_i*diff(vOiAi,theta_i);
aOiAi = aOiAit + aOiAin;

aAiBit= ddtheta_i*diff(vAiBi,dtheta_i) + ddbeta_i*diff(vAiBi,dbeta_i);
aAiBin= dtheta_i*diff(vAiBi,theta_i) + dbeta_i*diff(vAiBi,beta_i);
aAiBi = (aAiBit + aAiBin);

aBiCit= ddtheta_i*diff(vBiCi,dtheta_i) ...
      + ddbeta_i*diff(vBiCi,dbeta_i) + ddq_i*diff(vBiCi,dq_i);
aBiCin= dtheta_i*diff(vBiCi,theta_i) + dbeta_i*diff(vBiCi,beta_i) ...
      + dq_i*diff(vBiCi,q_i);
aBiCi = simplify(aBiCit + aBiCin);

aOP = [ddP_x ddP_y ddP_z].';

aPCit = ddtheta_i*diff(vPCi,dtheta_i);
aPCin = dtheta_i*diff(vPCi,theta_i);
aPCi = aPCit + aPCin;

eqn1 = simplify(aOiAi + aAiBi + aBiCi) == aOP + aPCi;

Sti = -vOiAi/dtheta_i/L_A/(L_D - L_A + q_i*cos(beta_i))...
      + e*sin(beta_i));
DDtheta_i = simplify(Sti.*(aOiAit + aAiBit + aBiCit - aPCit)) == ...
      simplify(Sti.*aOP) - simplify(Sti.*(aOiAin + aAiBin + aBiCin ...
      - aPCin));

Sbi = diff(BiCi,beta_i)/q_i^2;
DDbeta_i = simplify(Sbi.*(aOiAit + aAiBit + aBiCit - aPCit)) == ...
      simplify(Sbi.*aOP) - simplify(Sbi.*(aOiAin + aAiBin + aBiCin ...
      - aPCin));

```

```

Si = diff(BiCi,q_i);
Si = Si - e*Sbi;
DDq_i = simplify(Si.'*(aOiAit + aAiBit + aBiCit - aPCit)) == ...
simplify(Si.'*aOP) - simplify(Si.'*(aOiAin + aAiBin + aBiCin - aPCin));

```

### 7.3. Análisis de Rigidez

```

clear; clc;

load('DiscreteWorkspace.mat','P');

Lr = [70,40,5,...           %Steel, ProfileBase]
      80,45,...           %Aluminium, ProfileRevoluteAB1]
      20,80,...           %Aluminium, ProfileRevoluteAB2]
      45,45,...           %Aluminium, ProfileRevoluteBC]
      16,...             %Steel, ProfileShaft]
      45,45,...           %Aluminium, ProfileShaftSupport]
      150,100,10,...      %Steel, ProfileTeeBeam]
      60,60,...           %Aluminium, ProfileRevoluteD]
      60,60 ...          %Aluminium, ProfileRevoluteDP]
];

[Up_int, Up1] = StiffnessMechanismMilling( P, Lr );

disp(Up_int);

Lr = [50,150,10,...        %Steel, ProfileBase]
      80,45,...           %Aluminium, ProfileRevoluteAB1]
      20,80,...           %Aluminium, ProfileRevoluteAB2]
      30,45,...           %Aluminium, ProfileRevoluteBC]
      25.4,...           %Steel, ProfileShaft]
      45,45,...           %Aluminium, ProfileShaftSupport]
      150,100,15,...      %Steel, ProfileTeeBeam]
      70,70,...           %Aluminium, ProfileRevoluteD]

```



```

50,70 ...           %Aluminium, ProfileRevoluteDP]
];

figure (1);
[Up_int, Up2] = StiffnessMechanismMilling( P, Lr, true );

disp(Up_int);

figure (2);
histogram(Up1); hold on;
histogram(Up2); hold off;
legend( 'Initial_Parameters', 'Try_Parameters' );
figure (3);
histogram(Up2);

function [Up_int, Up] = StiffnessMechanismMilling( P, Lr, plotit )
n = length(P(1,:));

% Dimension static
Rb = 675; LA = 50; LD = 249; e = 0;
L = [Rb,LA,LD,e];
Lc = 40; Le = 27; Ql = 50; Lab = 40; Qmax = 1047.6;
Alpha = deg2rad([0 120 240]);

% configuration matlab
[Theta, Q, Beta] = CinematicaInversaRRPRR(L,...
[1 0 0;0 1 0;0 0 -1]*P(:,1));
Nodes = zeros(3,38);
% fixed nodes
Ai = Rb*[cos(Alpha); sin(Alpha);0*Alpha];
Nodes(:,2:7) = [Ai(:,1), (Ai(:,1)+Ai(:,2))/2, ...
Ai(:,2), (Ai(:,2)+Ai(:,3))/2, Ai(:,3), (Ai(:,3)+Ai(:,1))/2,];
% moving nodes
St = [cos(Alpha+Theta); sin(Alpha+Theta);0*Alpha];
Stb1 = [cos(Alpha+Theta).*cos(Beta-pi/2)
sin(Alpha+Theta).*cos(Beta-pi/2)
sin(Beta-pi/2)];

```

```

Stb2 = [cos(Alpha+Theta).*cos(Beta)
        sin(Alpha+Theta).*cos(Beta)
        sin(Beta)];
Nodes(:, 8:10) = Ai + LA*St;
Nodes(:,11:13) = Nodes(:, 8:10) + [0 0 -Lab]'*[1 1 1];
Nodes(:,14:16) = Nodes(:,11:13) - Lc*Stb1;
Nodes(:,17:19) = Nodes(:,14:16) + ([1 1 1]'.*(Q-Q1)).*Stb2;
Nodes(:,20:22) = Nodes(:,17:19) - Le*Stb1;
Nodes(:,23:25) = Nodes(:,20:22) + Q1*Stb2;
Nodes(:,26:28) = Nodes(:,20:22) - ([1 1 1]'.*(Q-Q1)).*Stb2;
Nodes(:,29:31) = Nodes(:,23:25) + (Lc+Le)*Stb1;
Nodes(:,32) = P(:,1) - [0 0 Lab]';
Nodes(:,33:35) = Nodes(:,26:28) - (Qmax-Q).*Stb2;
Nodes(:,36:38) = Nodes(:,33:35) + Le*Stb1;
Nodes = Nodes/1000;

% Frames = [i, j]
Frames = [ 1 2;1 3;1 4;1 5;1 6;1 7;2 3;3 4;4 5;...
          5 6;6 7;7 2;...           %Steel, ProfileBase], 1:12
          2 8;4 9;6 10;...         %Aluminium, ProfileRevoluteAB1], 13:15
          8 11;9 12;10 13;...      %Aluminium, ProfileRevoluteAB2], 16:18
          11 14;12 15;13 16;...    %Aluminium, ProfileRevoluteBC], 19:21
          14 17;15 18;16 19;...    %Steel, ProfileShaft], 22:24
          17 20;18 21;19 22;...    %Aluminium, ProfileShaftSupport], 25:27
          20 23;21 24;22 25;20 26;21 27;22 28;... %Steel, ProfileTeeBeam], 28:33
          23 29;24 30;25 31;...    %Aluminium, ProfileRevoluteD], 34:36
          29 32;30 32;31 32;...    %Aluminium, ProfileRevoluteDP], 37:39
          26 33;27 34;28 35;...    %Steel, ProfileTeeBeam], 40:42
          33 36;34 37;35 38;...    %Aluminium, ProfileShaftSupport], 43:45
          14 36;15 37;16 38;...    %Steel, ProfileShaft], 46:48
];

% Material = [rho, E, G];
Aluminum = [2700, 69.0E9, 27.0E9];
Steel = [7850, 200.0E9, 79.3E9];
% Profiles = [A, Ix, Iy, Iz, J]
ProfileBase = PropertiesTubularRectangle(Lr(1),Lr(2),Lr(3)); % (70, 40, 5);
ProfileRevoluteAB1 = PropertiesRectangle(Lr(4),Lr(5)); % (80, 45);

```

```

ProfileRevoluteAB2 = PropertiesRectangle(Lr(6),Lr(7)); %A(20,80);
ProfileRevoluteBC  = PropertiesRectangle(Lr(8),Lr(9)); %A(45,45);
ProfileShaft       = PropertiesCircle(Lr(10)); %A(16);
ProfileShaftSupport= PropertiesRectangle(Lr(11),Lr(12)); %A(45,45);
ProfileTeeBeam     = PropertiesTeeBeam(Lr(13),Lr(14),Lr(15)); %A(150,100,10);
ProfileRevoluteD   = PropertiesRectangle(Lr(16),Lr(17)); %A(60,60);
ProfileRevoluteDP  = PropertiesRectangle(Lr(18),Lr(19)); %A(60,60);
%Frames Specifications = [rho, E, G, A, Ix, Iy, Iz, J]
FramesSpecification = zeros(length(Frames(:,1)),8);
FramesSpecification( 1:12,:) = ones(12,1)*[Steel,ProfileBase];
FramesSpecification(13:15,:) = ones( 3,1)*[Steel,ProfileRevoluteAB1];
FramesSpecification(16:18,:) = ones( 3,1)*[Steel,ProfileRevoluteAB2];
FramesSpecification(19:21,:) = ones( 3,1)*[Steel,ProfileRevoluteBC];
FramesSpecification(22:24,:) = ones( 3,1)*[Steel,ProfileShaft];
FramesSpecification(25:27,:) = ones( 3,1)*[Aluminum,ProfileShaftSupport];
FramesSpecification(28:33,:) = ones( 6,1)*[Steel,ProfileTeeBeam];
FramesSpecification(34:36,:) = ones( 3,1)*[Steel,ProfileRevoluteD];
FramesSpecification(37:39,:) = ones( 3,1)*[Steel,ProfileRevoluteDP];
FramesSpecification(40:42,:) = ones( 3,1)*[Steel,ProfileTeeBeam];
FramesSpecification(43:45,:) = ones( 3,1)*[Aluminum,ProfileShaftSupport];
FramesSpecification(46:48,:) = ones( 3,1)*[Steel,ProfileShaft];

W = zeros(3,length(Frames(:,1)));
for ii = 1:length(Frames(:,1))
    W(:,ii) = SpaceFrameElementWeight(FramesSpecification(ii,:),...
        Nodes(:,Frames(ii,1)),Nodes(:,Frames(ii,2)));
end

Up = zeros(n,1);
for ii = 1:n
    [Theta, Q, Beta] = CinematicaInversaRRPRR(L,...
        [1 0 0;0 1 0;0 0 -1]*P(:,ii));
    %fixed nodes
    Ai = Rb*[cos(Alpha);sin(Alpha);0*Alpha];
    Nodes(:,2:7) = [Ai(:,1),(Ai(:,1)+Ai(:,2))/2,...
        Ai(:,2),(Ai(:,2)+Ai(:,3))/2,Ai(:,3),(Ai(:,3)+Ai(:,1))/2,];
    %moving nodes

```

```

St = [cos(Alpha+Theta); sin(Alpha+Theta); 0*Alpha];
Stb1 = [cos(Alpha+Theta).*cos(Beta-pi/2)
        sin(Alpha+Theta).*cos(Beta-pi/2)
        sin(Beta-pi/2)];
Stb2 = [cos(Alpha+Theta).*cos(Beta)
        sin(Alpha+Theta).*cos(Beta)
        sin(Beta)];
Nodes(:, 8:10) = Ai + LA*St;
Nodes(:, 11:13) = Nodes(:, 8:10) + [0 0 -Lab]'*[1 1 1];
Nodes(:, 14:16) = Nodes(:, 11:13) - Lc*Stb1;
Nodes(:, 17:19) = Nodes(:, 14:16) + ([1 1 1]'.*(Q-Q1)).*Stb2;
Nodes(:, 20:22) = Nodes(:, 17:19) - Le*Stb1;
Nodes(:, 23:25) = Nodes(:, 20:22) + Q1*Stb2;
Nodes(:, 26:28) = Nodes(:, 20:22) - ([1 1 1]'.*(Q-Q1)).*Stb2;
Nodes(:, 29:31) = Nodes(:, 23:25) + (Lc+Le)*Stb1;
Nodes(:, 32) = P(:, ii) - [0 0 Lab]';
Nodes(:, 33:35) = Nodes(:, 26:28) - (Qmax-Q).*Stb2;
Nodes(:, 36:38) = Nodes(:, 33:35) + Le*Stb1;
Nodes = Nodes/1000;

K = zeros(6*length(Nodes(1, :)));
Fe = zeros(6*length(Nodes(1, :)), 1);
for jj = 1:length(Frames(:, 1))
    kp = SpaceFrameElementStiffness(FramesSpecification(jj, :), ...
        Nodes(:, Frames(jj, 1)), Nodes(:, Frames(jj, 2)));
    K = SpaceFrameAssemble(K, kp, Frames(jj, 1), Frames(jj, 2));
    Fe = SpaceFrameElementAppliedForceinCG(Fe, W(:, jj), ...
        Nodes(:, Frames(jj, 1)), Nodes(:, Frames(jj, 2)), ...
        Frames(jj, 1), Frames(jj, 2));
end
Fe(6*32-5:6*32) = Fe(6*32-5:6*32) + ...
    2*[783 0 0 783*100/1000 0 783*18/1000]';
fe = Fe([1:6*2, 6*4-5:6*4, 6*6-5:6*6, 6*8-5:end]);
k = K([1:6*2, 6*4-5:6*4, 6*6-5:6*6, 6*8-5:end], ...
    [1:6*2, 6*4-5:6*4, 6*6-5:6*6, 6*8-5:end]);
u = pinv(k)*fe;
U = zeros(size(Fe));

```

```

U([1:6*2,6*4-5:6*4,6*6-5:6*6,6*8-5:end]) = u;
Up(ii) = norm(U(6*32-5:6*32-3)*1000);
if(exist('plotit','var'))
    if(plotit)
        SpaceFrameSystemPlot(Nodes,Frames,U);
        pause(0.01);
    end
end
end
end
Up_mean = mean(Up);
Up_vol = std(Up)/Up_mean;
Up_skw = moment(Up,3)/std(Up)^3;
Up_kurt = moment(Up,4)/std(Up)^4 - 3;
Up_int = 1/([1 -Up_mean -0.1*Up_mean -0.1*Up_mean]*[Up_mean Up_vol...
    Up_skw Up_kurt]');
end

```