

# Diseño e implementación de un dispositivo modular de arquitectura libre para el control de posicionamiento multi-axial.

**Propuesta de Grado Ingeniería Mecánica.**

**Autores: Javier Giovanni Rodríguez Q. 20122375077**

**Nicolas Gabriel Muñoz B. 20131375060**

## ÍNDICE DE TABLAS

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.1. ESTADO DEL ARTE .....	6
1.1.1. Research on multi-robot open architecture of an intelligent CNC system based on parameter-driven technology.....	6
1.1.2. Design and Implementation of a Motion Controller for XYZ Table based on Multiprocessor SoPC.....	7
1.1.3. A Study on Development of an Open Servo System for Intelligent Control of a CNC Machine Tool .....	7
1.1.4. Design and manufacture of a three-axis ultra-precision CNC grinding machine.....	8
1.1.5. G codes for the specification of Pythagorean-hodograph tool paths and associated feedrate functions on open-architecture CNC machines.....	8
1.1.6. Augmented reality applications in design and manufacturing.....	9
1.1.7. Open architecture of CNC system research based on CAD graph-driven technology.....	10
1.1.8. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs.....	10
1.1.9. The whole family of kinematic structures for planar 2- and 3-DOF fractionated kinematic chains.....	11
1.1.10. Structural synthesis and analysis of serial–parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains.....	11
1.1.11. Position analysis of a 3-DOF parallel manipulator.....	12
1.1.12. A 6-DOF adaptive parallel manipulator with large tilting capacity.....	13
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo general.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1. Cinemática y cinética .....	16
3.2. Tipos de movimientos .....	16

3.2.1. Rotación pura.....	16
3.2.2. Traslación pura.....	16
3.2.3. Movimiento complejo.....	16
3.3.Mecanismos y estructuras .....	16
3.4. Eslabones, juntas y cadenas cinemáticas .....	18
3.4.1. Eslabón.....	18
3.4.2. Junta o par cinemático.....	18
3.4.3. Tipos de pares Cinemáticos.....	19
3.4.4. Cadena cinemática .....	20
3.4.5. Elementos de una cadena cinemática.....	20
3.5. Grados de libertad.....	22
3.5.1. Determinación del grado de libertad.....	23
3.6. Cinemáticas en la robótica.....	24
3.6.1. Cinemática directa.....	25
3.6.2. Cinemática inversa .....	27
3.6.3. Análisis cinemático.....	28
3.7. Actuador lineal de bolas.....	30
4. METODOLOGÍA .....	32
5. CRONOGRAMA .....	34
6. PRESUPUESTO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN.....	36
6.1. Costo estimado.....	36
6.1.1. Recursos humanos .....	37
6.1.2. Recursos de hardware.....	37
6.1.3. Recursos de software.....	37
6.1.4. Insumos, fungibles y gastos.....	38
6.1.5. Resumen de costos .....	38
7. BIBLIOGRAFÍA.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuración de una cadena cinemática.....	17
Figura 2. Ensamble eslabón-junta.....	18
Figura 3. Ejemplo de una configuración cinemática robótica.....	24
Figura 4. Configuración cinemática directa robótica.....	25
Figura 5. Actuador lineal de bolas.....	30

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma de actividades.....	34
Tabla 2. Costo recursos humanos.....	36
Tabla 3. Costo recursos de hardware.....	37
Tabla 4. Costo recursos de software.....	37
Tabla 5. Costo insumos, fungibles y gastos.....	38
Tabla 6. Resumen del costo general del proyecto.....	38

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La automatización se ha convertido en una herramienta fundamental de la ingeniería moderna, de hecho en la actualidad muy pocas máquinas que se deseen fabricar carecen de ella. En el ámbito económico, automatizar ocasiona una mayor productividad, aunque inicialmente se vea opacada por su alto costo comercial. De igual manera generar tecnología e implementarla hoy en día en la industria colombiana no tiene mucha viabilidad ya que dicha tecnología es adquirida en el extranjero.

El plan de desarrollo tecnológico nacional desea que la industria genere innovación, que se apropie del conocimiento de los países desarrollados y que dichos conocimientos sean aplicados al interior, estas acciones originarán un crecimiento industrial y una competitividad colombiana frente a otros países.

En muchos casos, la ejecución de un proceso industrial que requiere de una alta precisión es un complejo desafío para la ingeniería y la economía de las empresas, es por esto, que al lograr simular, programar y controlar dicho proceso en un entorno virtual se aumentaría considerablemente la confiabilidad y se reduciría drásticamente el margen de error.

La automatización de procesos ataca los requerimientos del cliente ofreciendo una solución puntual ante la solicitud planteada. En muchas ocasiones se realizan cambios en los ciclos productivos y se perciben las limitaciones, razón por la cual se evidencia la necesidad en el ámbito industrial de un mecanismo o dispositivo de arquitectura abierta con el fin de generar múltiples desplazamientos para realizar varios procesos con alta precisión.

## 1.1. ESTADO DEL ARTE

La búsqueda y recolección de información para el desarrollo del proyecto se realizó a través de las bases de datos que la Universidad Distrital Francisco José de Caldas posee, algunas de ellas son Scopus, ScienceDirect, IEEE entre otras organizaciones. En dichas bases de datos se recopilan artículos especializados y son fuentes de ayuda para la investigación mundial; aprovechando esta centralización de información especializada se logró compilar una serie de artículos y manuales que se relacionan en la gran mayoría de sus contenidos con el enfoque principal del proyecto.

Los textos científicos y de ingeniería recolectados proporcionan buenas bases para la construcción y solución al problema planteado pues ayudan a contextualizar y ubicar la información relacionada. Algunos de estos temas son: mecanismos con desplazamientos cinemáticos, mesas de coordenadas tri-axiales, robots manipuladores de trayectorias, modelación y simulaciones en plataforma virtuales y prototipos de arquitectura libres entre otros que orientan y aportan a la investigación de este proyecto.

### 1.1.1. **Research on multi-robot open architecture of an intelligent CNC system based on parameter-driven technology.**

Año de publicación: 2011.

Autores: WeikeSongn, Gang Wang, JuliangXiao, Guodong Wang, Ying Hong.

Documento extraído de la revista académica del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad Tianjin Pr china.

Este artículo presenta un robot múltiple CNC de arquitectura abierta, basado en parámetros de control flexible e inteligente que generan variedad de operaciones, dicho sistema de control es orientado y dirigido bajo un software que personaliza las aplicaciones del robot modificando y controlando las variables de los servos que accionan los movimientos del robot.

### **1.1.2. Design and Implementation of a Motion Controller for XYZ Table based on Multiprocessor SoPC**

Año de publicación: 2009.

Autores: Ying Shieh Kung, Tai-Wei Tsui, Nan-Hui Shieh.

Artículo generado y desarrollado por el departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Taiwán.

Este estudio presenta un IC de control de movimiento para una mesa XYZ, bajo un entorno SOPC. Cada eje de la mesa de XYZ es impulsado por un motor sincrónico de imanes permanentes (PMSM). Esta aplicación, cuenta con dos módulos de control de movimiento propuesto IC; Un módulo es Nios - II multi-procesador, que realiza la función de planificación de trayectoria y el control de posición de mesa XYZ.

El otro módulo lleva a cabo la función de control de bucle de corriente de tres PMSMs; cada uno de estos módulos incluye SVPWM generación, que transforma las coordenadas, regula el PI y la detección de impulsos del codificador de cuadratura.

### **1.1.3. A Study on Development of an Open Servo System for Intelligent Control of a CNC Machine Tool**

Año de publicación: 2010.

Autores: Masahiko Moril, Kazuo Yamazaki, Makoto Fujishima, Jiancheng Liu, Norio Furukawa.

Documento adjunto de los laboratorios de mecánica de la Universidad de California, Davis, California U.S.A.

El siguiente trabajo es una propuesta y el desarrollo de la misma, para un sistema de servo control de una máquina herramienta CNC inteligente. El sistema desarrollado está equipada con un software de acceso a tiempo real, a través del cual, el usuario personaliza la aplicación y puede controlar o modificar cualquiera de los parámetros y variables de sistema del servo en un tiempo real.

El sistema desarrollado se ha implementado en un centro de mecanizado vertical CNC para el estudio de factibilidad, integrando el software de control adaptativo como modelo de referencia de aplicaciones personalizadas. Los resultados experimentales tienen éxito demostrado la eficacia del sistema de servo abierto.

#### **1.1.4. Design and manufacture of a three-axis ultra-precision CNC grinding machine**

Año de publicación: 1996.

Autores: Hyun Surk Kim, KwangSeopJeong, Dai Gil Lee.

Documento elaborado en el departamento de ingeniería mecánica del instituto avanzado de Ciencia y Tecnología de Corea.

Este documento presenta un diseño de una máquina herramienta CNC de tres ejes de desbaste de ultra- precisión, la cual, ejecuta trabajos de eliminación de viruta hasta el punto de generar un acabado superficial a espejo, esto, para materiales avanzados, tales como, cerámicos aceros y otros materiales duros y frágiles.

La máquina de eliminación de viruta se compone del husillo de aire, una resina de alta amortiguación, lecho de hormigón, y un controlador de tres ejes CNC con servomotores AC de alta resolución, todos modelados y simulados por un diseño de elementos finitos de una mesa XYZ para dicha aplicación.

#### **1.1.5. G codes for the specification of Pythagorean-hodograph tool paths and associated feedrate functions on open-architecture CNC machines**

Año de publicación: 1997.

Autores: Rida T. Farouki, JairamManjunathaiah, Guo-Feng Yuan

Artículo propuesto por el Departamento de ingeniería y aplicaciones mecánicas de la Universidad de Michigan USA.



El propósito principal de este proyecto de investigación es la elaboración de una nueva clase de códigos de máquina (Fresadora CNC) para la especificación de trayectorias curvas PH, asociándolas con las funciones de avance,

Las curvas de PH son una familia especial de las curvas de forma libre, compatibles con las representaciones de Be'zier y B-spline de sistemas CAD, que son susceptibles a la interpolación en tiempo real en avance constante o variable, directamente de sus descripciones analíticas exactas.

Los códigos propuestos (Lineales y circulares) son compatibles con códigos G "ordinarias", y puede considerarse como una extensión de los mismos, generando así, un sistema más flexible de arquitectura abierta para la producción de trayectorias complejas con resultados eficientes y con mejoras de precisión.

#### **1.1.6. Augmented reality applications in design and manufacturing**

Año de publicación: 2012.

Autores: A.Y.C. Nee, S.K. Ong, G. Chryssolouris, D. Mourtzis.

Investigación realizada por en conjunto por los departamentos de ingeniería mecánica y los laboratorio de automatización aeronáutica de las universidades de Singapur y Patras Grecia respectivamente.

Este artículo de revisión investiga el desarrollo de las aplicaciones de realidad aumentada (AR) en el diseño y la fabricación.

Se compone de siete secciones principales. La primera sección presenta los antecedentes de fabricación de aplicaciones de simulación y desarrollos iniciales AR. La segunda sección describe los actuales hardwares y herramientas de software asociados con AR. La tercera sección se refiere a los diversos estudios de las actividades de diseño y fabricación, tales como AR en el diseño colaborativo, robot planeador de trayectorias, el diseño de la planta de mantenimiento, la simulación CNC y montaje con herramientas y técnicas de AR.

La cuarta sección describe los desafíos tecnológicos en la AR. La sección quinta analiza algunas de las aplicaciones industriales. La sexta aborda los factores humanos y de las interacciones de los sistemas de AR. Por último en la séptima se ven en algunas de las tendencias y desarrollos futuros, seguido de conclusión.

#### **1.1.7. Open architecture of CNC system research based on CAD graph-driven technology**

Año de publicación: 2010.

Autores: Peng fei Lin, Tao Gao, Jian ping Wang, Hong zhao Liu

Artículo adjunto de la Universidad de Xi'an China.

Este documento se basa en las tecnologías gráficas CAD, las cuales son un novedoso sistema de arquitectura abierta de CNC, Este software inteligente se fundamenta en un sistema de CNC que incluye varios módulos de función desarrollados bajo Visual C + entorno 6.0.

Es necesaria en dicho software la identificación de las estructuras Gráficas y la extracción de parámetros geométricos del CAD, para ello se modela en formato DXF y se realiza el control del movimiento de este a través de una simulación; en el caso particular del documento, se realizó la optimización de un proceso de mecanizado CNC.

#### **1.1.8. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs**

Año de publicación: 2012.

Autores: Feng Gao, Weimin Li, Xianchao Zhao, Zhenlin Jin, Hui Zhao.

Documento extraído del Centro de Investigación de Robótica de la Universidad de Tecnología de Hebei, China y el Instituto de Investigación de Robótica de la Universidad de Aeronáutica y Astronáutica Beijing, China.

En este artículo se presenta varios tipos estructuras cinemáticas compuestas de eslabones y juntas que forman nuevas y complejas sub cadenas de extremidades o piernas las cuales proponen diversos grados de libertad con alta complejidad, de esta manera pueden coordinarse y describir cualquier desplazamiento de la extremidad; además este documento aporta a los principios para el diseño estructural de mecanismos de robots paralelos de 2-3-4-5 y hasta 6 DOF.

#### **1.1.9. The whole family of kinematic structures for planar 2- and 3-DOF fractionated kinematic chains**

Año de publicación: 2013.

Autores: HuafengDing, BinZi, PengHuang, Andrés Kecskeméthy.

Este artículo fue desarrollado en la Facultad de Ingeniería Mecánica y de tecnología Electrónica Aplicada en la Universidad tecnológica de Beijing, China.

A través de este documento, enfocado en la automatización, se logra sintetizar varias, o la mayoría de las familias cinemáticas de 2 y 3 grados de libertad (DOF) de mecanismos planeares fraccionados, aparte de los no fraccionados, los cuales son ampliamente utilizados en maquinaria de ingeniería y varios robots, en este el artículo se representan los algoritmos libres iso-morficos que describen la cinemática de las cadenas de los mecanismos mencionados.

#### **1.1.10. Structural synthesis and analysis of serial-parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains**

Año de publicación: 2011.

Autores: QiangZeng, YuefaFang.

Trabajo desarrollado en el Laboratorio de Investigación y robótica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de control eléctrico, Universidad Jiaotong de Beijing, China.

En este trabajo se presenta un nuevo método de síntesis y análisis estructural híbrido serie paralelo de mecanismos especiales con cadenas cinemáticas de multi-bucle basado en la teoría de grupos de desplazamiento.

Este análisis topológico se desarrolló para llevar a cabo la asignación de subconjuntos y el diseño de la estructura específica de sub-cadenas espaciales multi- bucle de desplazamiento.

Por último se demostró la aplicabilidad del método presentado en la presentación de tres nuevos mecanismos híbridos serie paralelo.

#### **1.1.11. Position analysis of a 3-DOF parallel manipulator**

Año de publicación: 1997

Autores: G. R. Dunlop, T. P. Jones.

Documento de Investigación desarrollado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda.

Este artículo presenta la cinemática inversa de un mecanismo paralelo con el objeto de transmitir de forma cerrado desplazamiento a diversas aplicaciones. El mecanismo tiene tres brazos accionados unidos a una base a través de juntas de revolución; Otros tres brazos están asociados a una plataforma superior a través de unas juntas de revolución o giro pasivo.

Cada uno de los tres brazos de base está conectado a su respectivo brazo pasivo opuesto a través de una junta esférica.

La plataforma tiene tres grados de libertad con respecto a la base, dos de rotación y un movimiento radial.

### **1.1.12. A 6-DOF adaptive parallel manipulator with large tilting capacity**

Año de publicación: 2011.

Artículo generado y desarrollado por Laboratorio Estatal de Sistemas Robóticos, Instituto de Tecnología Harbin y el Instituto de Shenzhen de Tecnología Avanzada de la Academia China de Ciencias, Shenzhen, República Popular de China.

Este trabajo presenta un novedoso manipulador paralelo de adaptación de 6 grados de libertad (DOF) el cual cuenta con capacidad de inclinación para desplazamientos y trayectorias de alta complejidad.

El manipulador consta de cuatro miembros periféricos idénticos y una extremidad central conectada a la base y la plataforma en movimiento.

Debido a la arquitectura especial, la extremidad central doblemente accionada del manipulador podría tener soluciones inversas infinitas.

En todas las configuraciones del efector final, el manipulador puede adaptar su extremidad central a la posición y orientarse con mejor destreza.

El análisis de la cinemática detallada del manipulador incluye las soluciones de forma cerrada de problemas inversos de posición, la singularidad, la destreza, espacio de trabajo y capacidad de inclinación.

El desarrollado y resultado de este trabajo muestra que el manipulador propuesto tiene gran capacidad de inclinación y por lo tanto es un candidato adecuado para mecanizado de cinco caras.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

En la actual perspectiva del país, y respecto a su Plan de Desarrollo tecnológico Nacional, el aportar en nuevas e innovadoras tecnologías es un ítem de alto interés académico e industrial pues es lo que se ha comprendido como una de las mayores soluciones para posicionar a Colombia como un país competitivo y en progresión.

Teniendo presente que el poder adquisitivo es una limitación para poseer una máquina automatizada, se evidenció la necesidad de diseñar e implementar un dispositivo de bajo valor comercial el cual fuese capaz de realizar labores autónomas.

Se percibe que las pequeñas y medianas empresas deben elevar sus niveles de producción y de economía, una de las razones por las cuales es necesario que en el mercado exista un producto que coopere con este fin.

En este orden de ideas, se requiere de un mecanismo o dispositivo de arquitectura abierta con el fin de optimizar cualquier proceso o gran parte de él, y en donde su aplicabilidad no sea limitada, ya que dependiendo de las necesidades del cliente se podrá obtener la solución modular más eficiente para dicho proceso

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar un dispositivo modular de arquitectura libre para el control de posicionamiento multi-axial.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Aplicar metodologías de diseño existentes en ingeniería mecánica para generar el dispositivo.
- Modelar las piezas seleccionadas utilizando tecnologías CAE.
- Fabricar las piezas, en la impresora 3D StratasysFortus 250mc, que comercialmente no estén disponibles.
- Ensamblar los componentes mecánicos acorde con las restricciones cinemáticas del diseño.
- Realizar pruebas de comunicación y control con los actuadores definidos en la etapa de diseño.
- Integrar los elementos electrónicos con los mecánicos para realizar la puesta a punto del dispositivo.
- Evaluar financieramente el desarrollo del proyecto.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. Cinemática y cinética**

- Cinemática: Estudio del movimiento sin consideración de las fuerzas.
- Cinética: Estudio de fuerzas en sistemas en movimiento.

Un propósito principal de la cinemática es crear (diseñar) los movimientos deseados de los elementos mecánicos considerados, y luego calcular matemáticamente las posiciones, velocidades y aceleraciones que tales movimientos generarán sobre dichos elementos.<sup>1</sup>

#### **3.2. Tipos de movimiento**

##### **3.2.1. Rotación pura**

El cuerpo posee un punto (centro de rotación) que no tiene movimiento con respecto al marco de referencia estacionario. Todos los demás puntos del cuerpo describen arcos respecto a ese centro. Una línea de referencia marcada en el cuerpo a través de su centro cambia únicamente en orientación angular.

##### **3.2.2. Traslación pura**

Todos los puntos en el cuerpo describen trayectorias paralelas (curvas o rectas). Una línea de referencia trazada en el cuerpo cambia su posición lineal pero no su orientación o posición angular.

##### **3.2.3. Movimiento complejo**

Es una combinación simultánea de rotación y traslación.

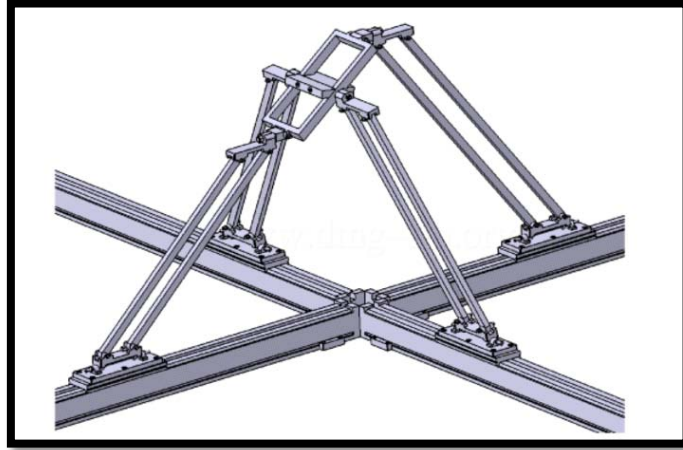
#### **3.3. Mecanismos y estructuras**

Se le llama mecanismo a los dispositivos que reciben una energía de entrada y, a través de un sistema de transmisión y transformación de movimientos, realizan un trabajo.

---

<sup>1</sup>ASIMOV, I., Enciclopedia Biográfica de Ciencia y Tecnología. Alianza, Madrid (1987) 4 vols.





*Figura 1. Configuración de una cadena cinemática*

Basándose en principios del álgebra lineal y física, se crean esqueletos vectoriales, con los cuales se forman sistemas de ecuaciones. A diferencia de un problema de cinemática o dinámica básico, un mecanismo no se considera como una masa puntual y, debido a que los elementos que conforman a un mecanismo presentan combinaciones de movimientos relativos de rotación y traslación, es necesario tomar en cuenta conceptos como centro de gravedad, momento de inercia, velocidad angular, entre otros.

La mayoría de veces un mecanismo puede ser analizado utilizando un enfoque bidimensional, lo que reduce el mecanismo a un plano.

En mecanismos más complejos y, por lo tanto, más realistas, es necesario utilizar un análisis espacial. Un ejemplo de esto es una rótula esférica, la cual puede realizar rotaciones tridimensionales.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>CALERO, R. y CARTA, J.A., Fundamentos de Mecanismos y Máquinas para Ingenieros. McGraw- Hill, Madrid (1999).

### 3.4. Eslabones, juntas y cadenas cinemáticas

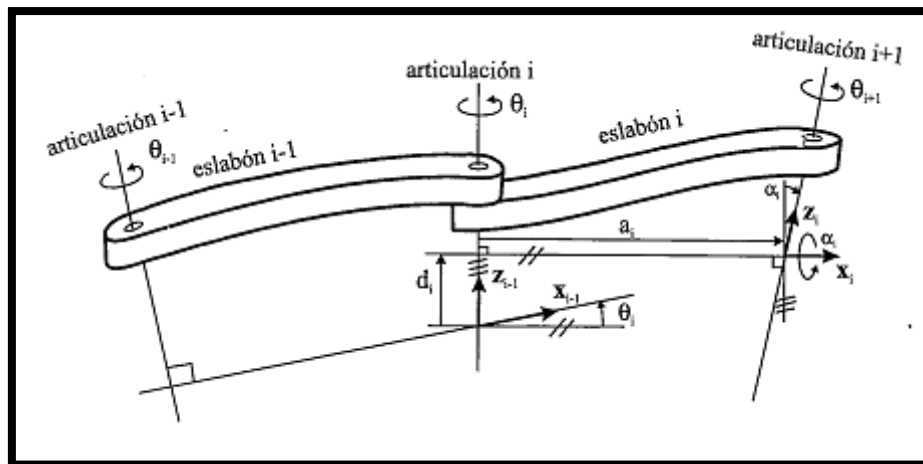


Figura 2. Ensamble eslabón-junta

#### 3.4.1. Eslabón

Cuerpo rígido que posee al menos dos nodos, que son los puntos de unión con otros eslabones. El número de nodos le da su nombre al eslabón: Binario = dos nodos, Terciario = tres nodos, etc.

#### 3.4.2. Junta o par cinemático

Conexión entre dos o más eslabones que permite algún movimiento o movimiento potencial entre los eslabones conectados. Pueden clasificarse en varios modos:

- 1) Por el número de grados de libertad.
  - Rotacional 1 GDL.
  - Prismática o Deslizante 1 GDL.
- 2) Por el tipo de contacto entre los elementos.
  - Unión completa o par cinemático inferior: contacto superficial.
  - Unión media o par cinemático superior: contacto sobre una línea o un punto.

A las juntas con dos GDL se les llama semijuntas.

1) Por el tipo de cierre de la junta.

- Forma: su forma permite la unión o el cierre
- Fuerza: requiere de una fuerza externa para mantenerse en contacto o cierre.

2) Por el número de eslabones conectados u orden de la junta.

Se define como el número de eslabones conectados menos uno.<sup>3</sup>

### 3.4.3. Tipos de pares Cinemáticos

**Bajo par:** Un par inferior es un conjunto de ideales que limita el contacto entre un punto, línea o un plano en el cuerpo en movimiento a una línea de punto correspondiente o en avión en el cuerpo fijo.

Tenemos los siguientes casos:

Un par de revolución, o conjunto articulado, requiere una línea en el cuerpo en movimiento a permanecer co-lineal con una línea en el cuerpo fijo, y un plano perpendicular a esta línea en el cuerpo en movimiento mantener contacto con un plano perpendicular similar en el fijo cuerpo. Esto impone limitaciones a cinco el movimiento relativo de los enlaces, que por lo tanto, tiene un grado de libertad.

Una articulación prismática, o deslizador, que requiere una línea en el cuerpo en movimiento permanecen co-lineal con una línea en el cuerpo fijo, y un plano paralelo a esta línea en el cuerpo en movimiento mantener contacto con un plan similar en paralelo en el cuerpo fijo. Ello impone cinco restricciones sobre el movimiento relativo de los enlaces, que por lo tanto tiene un grado de libertad.

Una articulación cilíndrica requiere que una línea en el cuerpo en movimiento permanece co-lineal con una línea en el cuerpo fijo. Es una combinación de

---

<sup>3</sup>Ibíd. 1

una articulación de giro y una junta deslizante. Esta articulación tiene dos grados de libertad.

Una junta esférica, o esférica, requiere que un punto en el cuerpo en movimiento mantener contacto con un punto fijo en el cuerpo. Esta articulación tiene tres grados de libertad.

Una junta plana requiere que un avión en el cuerpo en movimiento mantener contacto con un plano en el cuerpo fijo. Esta articulación tiene tres grados de libertad. Generalmente, un par más alto es una restricción que requiere una curva o superficie en el cuerpo en movimiento para mantener el contacto con una superficie curva o en el cuerpo fijo. Por ejemplo, el contacto entre una leva y su seguidor es un par más alto llamado leva conjunta. Del mismo modo, el contacto entre las curvas envolventes que forman el mallado diente de dos engranajes son articulaciones de leva.

#### **3.4.4. Cadena cinemática**

Es un ensamble de eslabones y juntas interconectados de modo que proporcionen un movimiento de salida controlado en respuesta a un movimiento de entrada proporcionado.

#### **3.4.5. Elementos de una cadena cinemática**

- Manivela: Eslabón que efectúa una vuelta completa o revolución, y está pivotado a un elemento fijo.
- Balancín u oscilador: Eslabón que tiene rotación oscilatoria y está pivotado a un elemento fijo.
- Biela o acoplador: Eslabón que tiene movimiento complejo y no está pivotado a un elemento fijo.
- Elemento fijo: Cualesquiera eslabones (o eslabón) que estén sujetos en el espacio, sin movimiento en relación con el marco de referencia.

Los GDL de un ensamble de eslabones predicen por completo su carácter. Hay sólo tres posibilidades:

1) GDL positivo: Se tendrá un mecanismo, y los eslabones tendrán movimiento relativo.

2) GDL = 0: Se tendrá una estructura, y ningún movimiento es posible.

3) GDL negativo: Se tendrá una estructura precargada, por lo que ningún movimiento es posible y algunos esfuerzos pueden también estar presentes en el momento del ensamble.

La condición de Grashof: Es una relación muy simple que pronostica el comportamiento de las inversiones de un eslabonamiento de cuatro barras con base sólo en las longitudes de eslabón.

Sean:

- S = longitud del eslabón más corto
- L = longitud del eslabón más largo
- P = longitud de un eslabón restante
- Q = longitud de otro eslabón restante

Luego si:

$$S + L = P + Q$$

El eslabonamiento es Grashof, y por lo menos un eslabón será capaz de realizar una revolución completa con respecto al plano de fijación. Si esa desigualdad no es cierta, entonces el eslabonamiento es no-Grashof, y ningún eslabón será capaz de realizar una revolución completa relativa respecto al plano de fijación.

Se tienen los siguientes casos:

$$S + L (P + Q)$$

Si se fija uno u otro eslabón adyacente al más corto, se obtiene una manivela-balancín, en la cual el eslabón más corto girará completamente y oscilará el otro eslabón pivotado a tierra.

Si se fija el eslabón más corto se logrará una doble manivela, en la que los dos eslabones pivotados a tierra realizan revoluciones completas, como también lo hace el acoplador.

Si se fija el eslabón opuesto al más corto, se obtendrá un doble balancín, en el que oscilan los dos eslabones fijos pivotados a tierra y sólo el acoplador realiza una revolución completa<sup>5</sup>.

$$S + L (P + Q)$$

Todas las inversiones serán doble balancín.

$$S + L = P + Q$$

- a. Paralelogramo
- b. Antiparalelogramo
- c. Doble paralelogramo
- d. Deltoide<sup>4</sup>

### 3.5. Grados de libertad

El número de grados de libertad (GDL) de un sistema es el número de parámetros independientes que se necesitan para definir unívocamente su posición en el espacio en cualquier instante. En el plano se requiere de tres parámetros (GDL): dos coordenadas lineales (x,y) y una coordenada angular (q). En el espacio se requiere de seis GDL: tres distancias (x,y,z) y tres ángulos (q, f, r). Se define cuerpo rígido como aquel que no experimenta ninguna deformación.

---

<sup>4</sup>ERDMAN, A.G. y SANDOR, G.N. Diseño de Mecanismos. Análisis y Síntesis. Prentice Hall, México (1998) 3ª Ed.

### 3.5.1. Determinación del grado de libertad

Mecanismo cerrado: No tendrá nodos con apertura y puede tener uno o más grados de libertad.

Mecanismo abierto con más de un eslabón: Tendrá siempre más de un grado de libertad y con esto necesitará tantos actuadores (motores) como GDL tenga.

Díada: Cadena cinemática abierta de dos eslabones binarios y una junta.

Ecuación de Gruebler

- $GDL = 3L - 2J - 3G$

Donde:

- GDL: número de grados de libertad
- L: número de eslabones
- J: número de juntas
- G: número de eslabones fijados

Ecuación de Kutzbach

$$GDL = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2$$

Donde:

L: número de eslabones

- J1: número de juntas completas
- J2: número de semijuntas.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup>Ibíd. 4.

### 3.6. Cinemáticas en la robótica

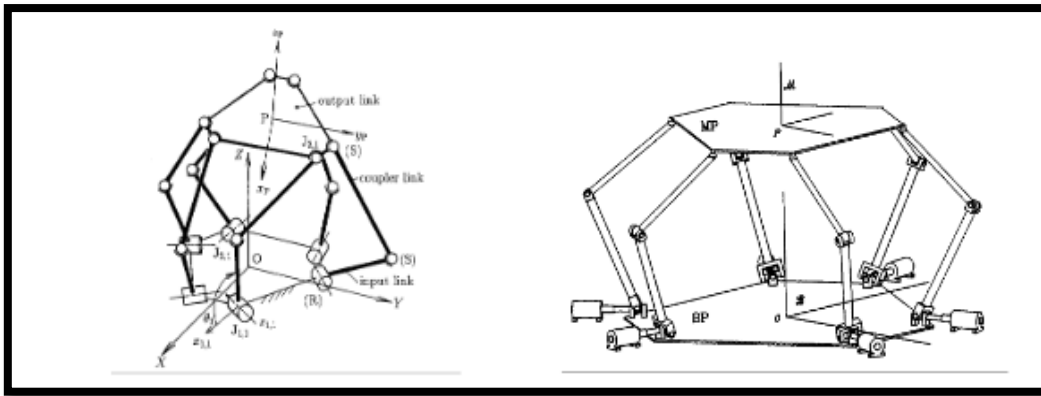


Figura 3. Ejemplo de una configuración cinemática robótica

La cinemática de un robot es el estudio de los movimientos de un robot. En un análisis cinemático la posición, velocidad y aceleración de cada uno de los elementos del robot son calculadas sin considerar las fuerzas que causan el movimiento. La relación entre el movimiento y las fuerzas asociadas son estudiadas en la dinámica de robots.

El estudio de la cinemática de manipuladores se refiere a todas las propiedades geométricas y basadas en el tiempo del movimiento. Las relaciones entre los movimientos y las fuerzas y movimientos de torsión que lo ocasionan constituyen el problema de la dinámica. Un problema muy básico en el estudio de la manipulación mecánica se conoce como cinemática directa, que es el problema geométrico estático de calcular la posición orientación del efector final del manipulador. <sup>6</sup>

<sup>6</sup> K.H. Hunt, (1983) "Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Desing.



### 3.6.1. Cinemática Directa

Esquema de un mecanismo o estructura articulada.

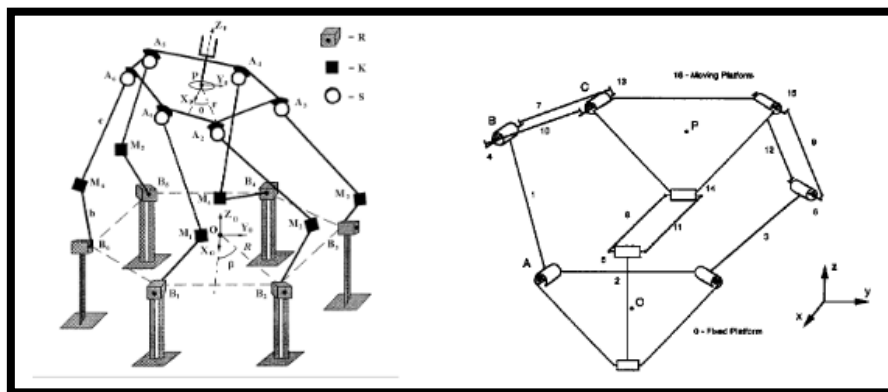


Figura 4. Configuración cinemática directa robótica

Se denomina cinemática directa a una técnica usada en gráficos 3D por computadora, para calcular la posición de partes de una estructura articulada a partir de sus componentes fijas y las transformaciones inducidas por las articulaciones de la estructura.

La cinemática directa se refiere al uso de ecuaciones cinemáticas para calcular la posición de su actuador final a partir de valores específicos denominado parámetros. Las ecuaciones cinemáticas de un robot son usadas en robots, juegos de computadoras y la animación. El proceso inverso que calcula el conjunto de parámetros a partir de una posición específica del actuador final es la cinemática inversa.

En una cadena serial, la solución siempre es única: dado un conjunto de vectores estos siempre corresponderán a una única posición del actuador

En una cadena paralela, la solución no es única: para esta un conjunto de coordenadas se tienen más de una posición final para el actuador.

Un ejemplo típico de estructura jerárquica sobre el que realizar éstos cálculos es un robot, formado por cuerpos rígidos enlazados por articulaciones. Se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot, y

describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia. Una pieza rígida A depende jerárquicamente de otra B si, para alcanzar la parte fija de la estructura (base del robot) desde A, se debe pasar por B. Para calcular la posición de una pieza rígida de la estructura se deben calcular las posiciones de todas las piezas de las que depende. Bibliotecas gráficas de uso generalizado, como OpenGL, están diseñadas para facilitar estos cálculos y llevarlos a cabo eficientemente mediante pilas de matrices.

La denominación de esta técnica se adopta en contraposición a otra técnica relacionada, la cinemática inversa, que consiste en calcular las transformaciones necesarias en las articulaciones de una estructura, de modo que su extremo se coloque en una posición determinada.

El problema cinemático directo consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.

En general, un robot de  $n$  grados de libertad está formado por  $n$  eslabones unidos por  $n$  articulaciones, de forma que cada par articulación - eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia solidario a él y, utilizando las transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot. La matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre los distintos sistemas asociados a dos eslabones consecutivos del robot se denomina  $A_{i,i+1}$ . Del mismo modo, la matriz  $A_{0,k}$ , resultante del producto de las matrices  $A_{i,i+1}$  con  $i$  desde 1 hasta  $k$ , es la que representa de forma total o parcial la cadena cinemática que forma el robot con respecto al sistema de referencia inercial asociado a la base. Cuando se consideran todos los grados de libertad, a la matriz  $A_{0,n}$  se le denomina  $T$ , matriz de transformación que relaciona la posición y orientación del extremo final del robot respecto del sistema fijo situado en la base del mismo. Así, dado un robot de 6gdl, se tiene que la posición y orientación del eslabón final vendrá dado por la matriz  $T$ .

Para describir la relación que existe entre dos sistemas de referencia asociados a eslabones, se utiliza la representación Denavit - Hartenberg (D-H). Denavit y Hartenberg propusieron en 1955 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas  $\{S_i\}$  ligado a cada eslabón  $i$  de una cadena articulada. Además, la representación D-H permite pasar de un sistema de coordenadas a otro mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

- Sistemas Homogéneos de transformación

Las transformaciones homogéneas son usadas para calcular los valores de la coordenadas de un determinado elemento del robot. Se hace uso de matrices cuadradas. Esta transformación especifica la locación del actuador en el espacio con respecto a la base del robot, pero no nos dice que configuración se requiere de todos sus elementos para alcanzar esa determinada posición.

- Sistema de coordenadas de la mano derecha

En este sistema de coordenadas, si se conoce la dirección de dos de los tres ejes, se puede determinar la dirección del tercer eje. La regla de la mano derecha determina la dirección de ángulos positivos.<sup>7</sup>

### **3.6.2. Cinemática Inversa**

En Robótica, la Cinemática inversa (IK) es la técnica que permite determinar el movimiento de una cadena de articulaciones para lograr que un actuador final se ubique en una posición concreta. El cálculo de la cinemática inversa es un problema complejo que consiste en la resolución de una serie de ecuaciones cuya solución normalmente no es única.

El objetivo de la cinemática inversa es encontrar los valores que deben tomar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. Depende de la configuración del robot(existen soluciones múltiples).

---

<sup>7</sup>*Fundamentos de Robótica*, Barrientos Antonio, Aracil Rafael, Universidad Politécnica de Madrid, McGraw-Hill, Año 1997, 1ra. Edición en español, pag. 93.

Siempre que se especifica una posición de destino y una orientación en términos cartesianos, debe calcularse la cinemática inversa del dispositivo para poder despejar los ángulos de articulación requeridos. Los sistemas que permiten describir destinos términos cartesianos son capaces de mover el manipulador a puntos que nunca fueron capaces de mover el espacio de trabajo a los cuales tal vez nunca haya ido antes. A estos puntos los llamaremos puntos calculados.

El movimiento de una cadena cinemática ya sea si es un robot o un personaje animado es modelado por ecuaciones cinemáticas propias de la misma cadena. Estas ecuaciones definen la configuración de la cadena en términos de sus parámetros.

Por ejemplo las fórmulas de la cinemática inversa permiten el cálculo de los parámetros de unión del brazo de un robot para levantar un objeto. Ya que una de las Fórmulas similares es determinar las posiciones del esqueleto de un personaje animado que se va a mover de una manera en particular.<sup>8</sup>

### **3.6.3. Análisis Cinemático**

El análisis cinemático se refiere a la utilización de las ecuaciones cinemáticas de un robot para determinar los parámetros comunes que proporcionan una posición deseada del efector final. Especificación del movimiento de un robot de manera que su extremo efector logra una tarea deseada es conocido como planificación de movimientos. La cinemática inversa transforma el plan de movimiento en trayectorias del actuador en conjuntos para el robot. El movimiento de una cadena cinemática si se trata de un robot o un personaje animado estos es modelados por las ecuaciones cinemáticas de la cadena. Estas ecuaciones definen la configuración de la cadena en términos de sus parámetros conjuntos. Delantero cinemática utiliza los parámetros comunes para calcular la configuración de la cadena, y la cinemática inversa invierte este cálculo para determinar los parámetros de conjuntos que logra una configuración deseada.

Una figura articulada consta de un conjunto de segmentos rígidos conectados mediante articulaciones.

---

<sup>8</sup>Ibíd. 7.

Los múltiples ángulos que pueden adoptar estas articulaciones permiten un número indefinido de configuraciones o posiciones de la figura. La solución al problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot  $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$  para que su extremo se posicione y oriente según una determinada configuración deseada. En general no existe una solución única para este problema, incluso puede no existir. La búsqueda de la solución suele realizarse mediante el uso de técnicas numéricas iterativas como por ejemplo Método de Newton. Esto puede resultar en cálculos lentos, por lo que habitualmente en una implementación real se acota el tiempo máximo (o iteraciones) que debe realizar el algoritmo de búsqueda.

En otros casos, para robots con pocos grados de libertad, existen soluciones analíticas mediante el uso de métodos geométricos, que consisten en la utilización de las relaciones trigonométricas y la resolución de los triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot.

También puede ser el proceso de cálculo de la posición en el espacio del extremo de una estructura ligada, dados los ángulos de todas las articulaciones. Es fácil, y sólo hay una solución. Cinemática inversa hace lo contrario. Teniendo en cuenta el punto final de la estructura, lo que los ángulos de las articulaciones qué necesidad de estar en el punto final que alcanzar. Puede ser difícil, y por lo general hay muchos o infinito de soluciones. Este proceso puede ser extremadamente útil en la robótica. Es posible que tenga un brazo robótico que tiene que agarrar un objeto. Si el software sabe dónde está el objeto en relación con el hombro, simplemente se necesita el cálculo de los ángulos de las articulaciones para llegar a él.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup>Síntesis, Análisis y Diseño de Manipuladores Paralelos de Baja Movilidad Autor: Salgado Picón, Oscar Publicado: Universidad del País Vasco, Bilbao, 2008

### 3.7. Actuador lineal de bolas

Un husillo de bola es un actuador lineal mecánico que convierte el movimiento de rotación en movimiento lineal con pocas pérdidas por fricción.



*Figura 5. Actuador lineal de bolas*

El cual está constituido por un eje roscado que proporciona un camino de rodadura helicoidal a unos rodamientos de bolas que actúan como un tornillo de precisión. Como el movimiento se realiza por rotación, no por deslizamiento, el rozamiento es menor, la fricción del conjunto es baja. Y como el esfuerzo se reparte entre varias bolas, es capaz de aplicar o resistir altas cargas de empuje. Se pueden fabricar con unas tolerancias estrechas y por tanto son adecuados para su empleo donde se necesita una alta precisión. El conjunto de bolas actúa como la tuerca mientras el eje roscado es el tornillo. En contraste con los husillos convencionales, los husillos a bolas tienden a ser bastante voluminoso, debido a la necesidad de disponer un espacio en el mecanismo para recircular las bolas.<sup>10</sup>

Los husillos a bolas se utilizan en aviones y misiles para mover las superficies de control, especialmente en sistemas eléctrico flybywire. En los automóviles se emplea en la dirección asistida para convertir el movimiento rotativo de un motor eléctrico en el movimiento axial de la cremallera de dirección. También se utilizan en máquinas herramientas, robots y equipos de montaje de

<sup>10</sup>ARTOBOLEVSKI, I.I., Mecanismos en la Técnica Moderna. Mir, Moscú(1979).

precisión. Se utilizan husillos de bolas de gran precisión en motores paso a paso para la fabricación de semiconductores.

Los ejes de husillos de bola se puede fabricar mediante laminado, obteniéndose un producto menos preciso, pero de bajo costo y mecánicamente eficaces. Los husillos de bolas laminados tienen una precisión de posición de varias milésimas de pulgada por pie.

Este actuador lineal habitualmente tiene una precisión de 830 nanómetros por centímetro (1/1000 de una pulgada por pie) o mejor. Históricamente se han mecanizado a la forma bruta, posteriormente sometido a un proceso de cementación y luego rectificado. El proceso de tres pasos es necesario porque el mecanizado a alta temperatura distorsiona la pieza trabajada. Una técnica de mecanizado de precisión reciente hardwhirling (2008) que minimiza el calentamiento de la pieza, y puede producir tornillos de precisión en una barra cementada.

Los ejes de los husillos de instrumento de calidad suelen tener una precisión de 250 nanómetros por centímetro. Se fabrican en máquinas de fresado de precisión con equipo de medición óptica de distancia y herramientas especiales. Se utilizan máquinas similares para producir lentes ópticas y espejos. Los ejes del husillo de instrumento se hacen generalmente en Invar, para evitar demasiados cambios de tolerancias con la temperatura.<sup>11</sup>

---

1. <sup>11</sup>CARDONA, S. y CLOS, D., Teoría de Máquinas. Ediciones UPC, Barcelona (2001).

#### 4. METODOLOGÍA

Para obtener la consecución de este proyecto, se debe planear un debido proceso de actividades. A continuación se presentan dichos pasos.

- Recopilación
  - A) Realizar búsquedas en la red para encontrar documentación e información sobre dispositivos de arquitectura libre y/o multilabor.
  - B) Realizar lecturas detalladas, clasificar y analizar dicha información obtenida en la red.
  - C) Utilizar técnicas de comparación del mercado para obtener información útil en productos similares y aplicarla a nuestro dispositivo.
  
- Diseño
  - A) Aplicar metodologías de diseño existentes en ingeniería mecánica para generar el dispositivo.
  - B) Evaluar cuál de las metodologías de diseño es la más aplicable y cual entrega mejores resultados.
  - C) Basados en la documentación obtenida y en los dispositivos similares que se comercializan, realizar matrices de alternativas de diseño.
  - D) Evaluar los requerimientos de cliente del dispositivo.
  - E) Evaluar los requerimientos de diseño del dispositivo.
  - F) Elección final del diseño del dispositivo.
  
- Modelación
  - A) Reconocer el número de piezas (ejes, eslabones, juntas) que integran el dispositivo de arquitectura libre.
  - B) Modelar las piezas con las geometrías dispuestas previamente utilizando tecnologías CAE.
  - C) Integrar las piezas modeladas y generar algunos ensambles para obtener las configuraciones posibles del dispositivo de forma virtual.



- Fabricación de piezas y ensamble del dispositivo
  - A) Exportar las piezas modeladas que comercialmente no estén disponibles a la impresora 3D StratasysFortus 250mc.
  - B) Impresión de piezas según las condiciones previas.
  - C) Lavado de piezas impresas para eliminar material soporte innecesario.
  - D) Ensamblar los componentes mecánicos acorde con las restricciones cinemáticas del diseño.
  
- Integración de componentes electrónicos y mecánicos. Control de posicionamiento y programación
  - A) Seleccionar las diferentes configuraciones de movimiento del dispositivo modular identificando grados de libertad y restricciones de movimiento.
  - B) Búsqueda y estudio de fichas técnicas de dispositivos de control.
  - C) Evaluación de los dispositivos de control (drivers, servomotores).
  - D) Elección final de los drivers y servomotores.
  - E) Integrar los elementos electrónicos con los mecánicos para realizar la puesta a punto del dispositivo.
  - F) Configuración de los parámetros de entrada para realizar el control del posicionamiento de los actuadores.
  - G) Realizar pruebas de comunicación y control con los actuadores definidos en la etapa de diseño.
  - H) Obtención de los resultados del control de desplazamiento.
  - I) Verificación y evaluación de los resultados obtenidos.
  - J) Aplicación de los resultados para realizar el control con otras configuraciones cinemáticas del dispositivo.
  - K) Evaluación del método para distintas aplicaciones en el dispositivo.
  
- Análisis financiero
  - A) Realizar tablas de horas empleadas por persona relacionándolas con un índice de costos.
  - B) Realizar tablas con los materiales insumos, programas herramientas y demás utilizados, relacionándolos con un índice de costos.
  - C) Análisis de tablas, obtención de resultados y evaluación financiera para proponer el costo comercial del dispositivo en el mercado.

## 5. CRONOGRAMA

A continuación se presenta una tabla con la duración estimada de las actividades que se van a llevar a cabo para la consecución de este proyecto.

FASE	ACTIVIDAD	DURACIÓN ESTIMADA EN SEMANAS																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
RECOPIACIÓN	Búsquedas de información y documentación en la red	X																							
	Lectura, clasificación y análisis de la información obtenida	X	X																						
	Técnicas de comparación de productos similares	X	X																						
DISEÑO	Aplicación de metodologías de diseño en ingeniería mecánica			X	X																				
	Evaluación de resultados según las metodologías				X																				
	Elaboración de matrices de alternativas de diseño				X	X																			
	Evaluación de los requerimientos del cliente					X	X																		
	Evaluación de los requerimientos de diseño					X	X																		
	Elección final del diseño del dispositivo						X																		
MODELACIÓN	Reconocimiento de piezas que integrarán el dispositivo					X																			
	Modelación de piezas utilizando tecnologías CAE						X	X	X																
	Integración de piezas modeladas y generación de ensambles									X	X														
FABRICACIÓN DE PIEZAS	Exportación de piezas modeladas a la prototipadora rápida								X	X	X														
	Impresión de piezas según las condiciones previas								X	X	X	X													
	Lavado de piezas impresas para eliminar material innecesario								X	X	X	X	X												
	Ensamble de componentes mecánicos acorde las restricciones																							X	X

<b>INTEGRACIÓN DE COMPONENTES</b>	Selección de configuraciones de movimiento del dispositivo														X	X	X	X																					
	Búsqueda y estudio de fichas técnicas de dispositivos de control	X	X															X	X																				
	Evaluación de los dispositivos de control (drivers, servomotores)																	X	X	X																			
	Elección final de los drivers y servomotores																			X																			
	Integración de elementos electrónicos con los mecánicos																			X	X	X																	
	Configuración de parámetros de entrada para realizar el control																				X	X	X																
	Pruebas de comunicación y control con los actuadores definidos																				X	X	X																
	Obtención de los resultados del control de desplazamiento																					X	X	X															
	Verificación y evaluación de los resultados obtenidos																							X															
	Aplicación de los resultados para el control de las configuraciones																								X	X	X												
	Evaluación del método para las aplicaciones en el dispositivo																							X	X	X													
<b>ANÁLISIS FINANCIERO</b>	Elaboración de tablas de horas empleadas con relación al costo																																	X	X				
	Elaboración de tablas de materiales e insumos con relación al costo																																		X	X			
	Evaluación financiera para proponer costo comercial																																		X	X			

Tabla 1. Cronograma de actividades

## 6. PRESUPUESTO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN

### 6.1. Costo Estimado

#### 6.1.1. Recursos humanos

- Tutor: Profesor de planta de la Universidad Distrital encargado de seguir el desarrollo del proyecto, realizar correcciones pertinentes y de guiar al ejecutor.
- Ejecutor: Encargado de desarrollar el proyecto, siguiendo las pautas del tutor.

Se estima un promedio de 15 horas por semana para el ejecutor y dos horas por semana para el tutor.

Recurso	Fuente de Financiación	Costo por hora	Horas Dedicadas	Costos
Tutor	Universidad Distrital F.J.C.	\$ 40.000	48	\$1'920.000
Ejecutor	Ejecutor	\$ 15.000	480	\$5'400.000
			Total Horas Dedicadas:	Total Costos:
			528	\$7'320.000

*Tabla 2. Costo recursos humanos*

### 6.1.2. Recursos de hardware

Corresponde a los ordenadores y otros elementos físicos que se usarán durante el proyecto, se estima su costo según la duración estimada del proyecto.

Recurso	Fuente de Financiación	Tiempo de uso (meses)	Costos
Computador Portátil	Ejecutor	6	\$ 150.000
Computador de Escritorio	Universidad Distrital F.J.C.	6	\$ 100.000
Actuadores	Ejecutor	6	\$ 800.000
Drivers o Controladores	Ejecutor	6	\$ 1.000.000
Mecanismos	Ejecutor	6	\$ 200.000
			Costos Totales: \$ 2.250.000

Tabla 3. Costo recursos de hardware

### 6.1.3. Recursos de software

Corresponde a los programas que se utilizaran durante el desarrollo del proyecto, se estima su costo según la duración estimada del proyecto.

Recurso	Fuente de Financiación	Tiempo de uso (meses)	Costo Recurso	Costos Estimado de Uso
Windows 7	Ejecutor	6	\$ 160.000	\$ 40.000
Microsoft Office Word	Ejecutor	6	\$ 96.000	\$ 48.000
NX Siemens	Universidad Distrital F.J.C.	6	\$ 28.000.000	\$ 5.000.000
			Costo Recursos: \$ 28.256.000	Costo Total de Uso: \$ 5.088.000

Tabla 4. Costo recursos de software

#### 6.1.4. Insumos, fungibles y gastos

Corresponden a los elementos requeridos para el uso y/o consumo para la ejecución del proyecto.

Recurso	Fuente de Financiación	Costo Recurso
Asesorías Externas	Ejecutor	\$ 400.000
Material Impresora 3D	Universidad Distrital F.J.C.	\$ 600.000
Papelería	Ejecutor	\$ 30.000
Impresiones	Ejecutor	\$ 40.000
Fotocopias	Ejecutor	\$ 30.000
Libros	Ejecutor	\$ 60.000
Internet	Ejecutor/ Universidad Distrital F.J.C.	\$ 150.000
Servicios Públicos	Ejecutor/ Universidad Distrital F.J.C.	\$ 100.000
		Costo Total Recursos: \$ 1.410.000

*Tabla 5. Costo insumos, fungibles y gastos*

#### 6.1.5. Resumen de costos

A continuación se relacionan los costos totales para la ejecución de este proyecto.

Recurso	Financiación Ejecutor	Financiación Universidad Distrital F.J.C.	Costo Total Recurso
Humano	\$ 5.400.000	\$ 1.920.000	\$ 7.320.000
Hardware	\$ 2.150.000	\$ 100.000	\$ 2.250.000
Software	\$ 88.000	\$ 5.000.000	\$ 5.088.000
Insumos, fungibles y gastos	\$ 630.000	\$ 850.000	\$ 1.410.000
	Costo Total Ejecutor \$ 8.268.000	Costo Total Universidad Distrital F.J.C. \$ 7.870.000	Costo Total Recursos \$ 16.138.000

*Tabla 6. Resumen del costo general del proyecto*

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Fundamentos de Robótica, Barrientos Antonio, Aracil Rafael, Universidad Politécnica de Madrid, McGraw-Hill, Año 1997, 1ra. Edición en español, pag. 93.
2. <http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/r166/r81/r81.htm>
3. K.H. Hunt, (1983) "Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design
4. Síntesis, Análisis y Diseño de Manipuladores Paralelos de Baja Movilidad Autor: Salgado Picón, Oscar Publicado: Universidad del País Vasco, Bilbao, 2008
5. <http://www.dmglib.org/dmglib/main/portal.jsp?mainNaviState=browsen.docum.viewer&phyPageNo=491&id=13368009&fromSearch=1>
6. ARTOBOLEVSKI, I.I., Mecanismos en la Técnica Moderna. Mir, Moscú(1979).
7. ASIMOV, I., Enciclopedia Biográfica de Ciencia y Tecnología. Alianza, Madrid (1987) 4 vols.
8. CALERO, R. y CARTA, J.A., Fundamentos de Mecanismos y Máquinas para Ingenieros. McGraw- Hill, Madrid (1999).
9. CARDONA, S. y CLOS, D., Teoría de Máquinas. Ediciones UPC, Barcelona (2001).
10. ERDMAN, A.G. y SANDOR, G.N. Diseño de Mecanismos. Análisis y Síntesis. Prentice Hall, México (1998) 3ª Ed.