



Diseño de una plataforma de movimiento con tres grados de libertad para los simuladores de la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa

Lady Johanna Gómez Herrera

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Villavicencio, Colombia
2020

Diseño de una plataforma de movimiento con tres grados de libertad para los simuladores de la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa

Lady Johanna Gómez Herrera

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

Ingeniero Electromecánico

Director:

Ingeniero Electrónico Alberto Villarraga Baquero

Codirector (a):

Ingeniero Mecánico Rodrigo Dueñas Bueno

Línea de Investigación:

Diseño mecánico

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2020

(Dedicatoria o lema)

A Dios primeramente por estar en mi camino en cada paso que doy, a mi madre Doris Herrera Ladino por ser mi soporte, aliento para continuar y mi apoyo incondicional en cada logro de mi vida, a mis hermanos Jhonattan Alexander Cruz Herrera y Karen Xiomara Valcero Herrera por infundir en mí la lucha y el deseo de superación, ya que con sus palabras me inspiraron a convertirme en su fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino y a Caterine Valencia Cordero por ser mi compañía y fortaleza en los momentos de dificultad.

Lady Johanna Gómez Herrera

Agradecimientos

A mis compañeros de carrera Yesid Gutiérrez Gómez, Jaiver Fajardo Herrera y Charlie Grueso Caicedo por apoyarnos mutuamente en nuestra formación profesional, ya que sin el equipo que formamos no hubiese alcanzado esta meta, a mi asesor y director empresarial en la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC), Ing. Jean Pierre Leyton e Ing. Carlos Arturo Gómez, quienes con sus conocimientos y experiencia me guiaron en todo el proceso investigativo de este proyecto y finalmente a mi director y codirector en la Universidad Antonio Nariño, Ing. Alberto Villarraga Baquero e Ing. Rodrigo Dueñas Bueno, quienes me apoyaron durante el desarrollo de este proyecto y marcaron de manera positiva cada etapa de mi camino universitario.

Cláusula de confidencialidad

Debido a lineamientos de protección de propiedad intelectual, la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC) se guarda el derecho de reservar los secretos corporativos detrás de este proyecto. Para garantizar la discreción de la información relevante a los proyectos de la Corporación se realizó un acuerdo de confidencialidad con las personas que participaron durante el desarrollo de este proyecto, Al final del documento se anexa una copia del formato en donde se explican todos los términos y condiciones de la cláusula.

Propiedad intelectual

El Plan Nacional de Desarrollo 2010 – 2014 en el artículo 31 establece: “Derechos de propiedad intelectual de proyectos de investigación financiados con recursos del presupuesto nacional. En el caso de proyectos de ciencia, tecnología e innovación adelantados con recursos del presupuesto nacional, el Estado, salvo motivos de seguridad y defensa nacional, cederá a las Partes del Proyecto los derechos de propiedad intelectual que le puedan corresponder, según se establezca en el contrato. Las Partes del Proyecto definirán entre ellas la titularidad de los derechos de propiedad intelectual derivados de los resultados de la ejecución de los recursos del presupuesto nacional.

En consecuencia, los derechos de propiedad intelectual objeto de las actividades de investigación y desarrollo, diseño y desarrollo tecnológico de la plataforma de movimiento con tres grados de libertad, serán de la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC), y ésta se abstendrá de ceder los derechos de propiedad intelectual por motivos de seguridad, defensa nacional y en los demás casos previstos por la ley.

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Villavicencio, 2020

Resumen

Título: Diseño de una plataforma de movimiento con tres grados de libertad para los simuladores de la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa.

Autor: Lady Johanna Gómez Herrera

El presente trabajo de investigación describe el desarrollo del proyecto de grado presentado en la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC), donde se realiza el diseño de una plataforma de movimiento con tres grados de libertad para los simuladores de la corporación, continuando así con la segunda etapa de su línea de investigación.

En la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto se plantean los requerimientos y fundamentos teóricos matemáticos necesarios para dar inicio a la etapa de modelado de cada uno de los componentes de la plataforma de movimiento utilizando herramientas computacionales para el desarrollo de cálculos matemáticos y diseño asistido por computadora CAD con el fin de obtener la información y documentación necesaria para su posterior proceso de fabricación y lograr el objetivo del diseño mecánico, dejando las bases a futuras investigaciones como un sistema de control, integración con motores de simulación, entre otras que puedan complementar este proyecto.

Palabras clave: Plataforma de movimiento, grados de libertad (DOF), cinemática inversa, cinemática directa, diseño mecánico, C++, Solidworks.

Abstract

Title: Design of a motion platform with three degrees of freedom for simulators of the la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa.

Author: Lady Johanna Gómez Herrera

This research paper describes the development of the degree project presented at the Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC), where the design of a motion platform with three degrees of the freedom for the simulators of the corporation is carried out, thus continuing with the second stage of it is line of investigation.

In the methodology used for development of this project, are stated the requirements and mathematical theoretical foundations necessary to star the modeling stage of each of the components of the motion platform using computational tools for the development of mathematical calculations and assisted design by computer CAD in order to obtain the necessary information and documentation for its subsequent manufacturing process and achieve the objective of mechanical design, leaving the basis for future research as a control system , integration with simulation engines, among others that can complement this project.

Keywords: Motion platform, degrees of freedom (DOF), inverse kinematics, direct kinematics, mechanical design, C++, Solidworks.

Contenido

	Pág.
1. Definición y requerimientos de la plataforma de movimiento.....	1
1.1 Definición de la plataforma de movimiento.....	1
1.2 Requerimientos de la plataforma de movimiento.....	3
2. Componentes de la plataforma de movimiento.....	5
2.1 Componentes de la plataforma de movimiento.....	5
2.2 Análisis y selección de los componentes de la plataforma de movimiento.....	6
2.2.1 Selección estructural plataforma móvil y base.....	6
2.2.2 Selección articulaciones.....	8
2.2.3 Selección actuadores.....	9
2.2.4 Selección sistema vibratorio.....	10
3. Parámetros matemáticos y geométricos de la plataforma móvil y base.....	13
3.1 Diseño geométrico de la plataforma móvil y base.....	13
3.1.1 Fundamentos geométricos de la plataforma móvil y base.....	13
3.1.2 Coordenadas de la plataforma móvil y base.....	17
3.1.3 Geometría de la plataforma móvil y base.....	19
3.2 Diseño cinemático de la plataforma de movimiento.....	20
3.2.1 Fundamentos cinemáticos de la plataforma de movimiento.....	20
3.2.2 Simulación fundamentos matemáticos y cinemáticos de la plataforma de movimiento.....	32
4. Parámetros matemáticos y geométricos de los componentes.....	37
4.1 Diseño geométrico del mecanismo biela - manivela.....	37
4.1.1 Fundamentos geométricos del mecanismo biela – manivela.....	37
4.1.2 Simulación de los fundamentos matemáticos del mecanismo biela – manivela.....	42
4.2 Diseño geométrico del cardan.....	45
4.3 Diseño geométrico del motorreductor.....	47
5. Diseño y simulación.....	51
5.1 Diseño de la plataforma de movimiento.....	51
5.1.1 Diseño de la plataforma móvil.....	51
5.1.2 Diseño de la plataforma base.....	53
5.1.3 Diseño del motorreductor.....	54
5.1.4 Diseño del cardan.....	55
5.1.5 Diseño de mecanismo biela – manivela.....	55
5.1.6 Ensamblaje de la plataforma de movimiento.....	57

5.2	Simulación de la plataforma de movimiento.....	58
6.	Planos y documentación.....	61
6.1	Planos de la plataforma de movimiento.	61
6.2	Documentación del proyecto.	66
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	69
7.1	Conclusiones.....	69
7.2	Recomendaciones.	70

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Componentes de una plataforma de movimiento.....	5
Figura 2-2: Plataforma con configuración triángulo.	7
Figura 2-3: Perfil estructural IPE.	7
Figura 2-4: Perfil estructural tubular rectangular.	8
Figura 2-5: Articulación universal.	9
Figura 2-6: Actuador eléctrico.....	10
Figura 2-7: Sistema anti vibratorio.....	11
Figura 3-1: Características geométricas de un triángulo.	13
Figura 3-2: Representación del baricentro de un triángulo.	14
Figura 3-3: Coordenadas de la plataforma móvil y base.	17
Figura 3-4: Coordenadas geométricas de la plataforma móvil y base.	19
Figura 3-5: Cinemática inversa y directa de la plataforma de movimiento.....	21
Figura 3-6: Localización espacial de la plataforma.	21
Figura 3-7: Matriz de rotación en el eje x de la plataforma.....	23
Figura 3-8: Ángulos de Euler de la plataforma.....	24
Figura 3-9: Cinemática directa de la plataforma de movimiento.	28
Figura 3-10: Código Matlab cálculo de la cinemática inversa de la plataforma.	33
Figura 3-11: Código Matlab cálculo cinemática directa de la plataforma.	33
Figura 3-12: Interfaz de cálculo cinemática de la plataforma ángulo pitch.	34
Figura 3-13: Interfaz de cálculo cinemática de la plataforma ángulo roll.	35
Figura 4-1: Características geométricas del sistema biela - manivela.	38
Figura 4-2: Ángulos de inclinación pitch y roll de la plataforma móvil.	41
Figura 4-3: Desplazamiento en el eje z de la plataforma móvil.	42
Figura 4-4: Código Matlab cálculo del desplazamiento mecanismo biela - manivela.	42
Figura 4-5: Interfaz de cálculo del desplazamiento mecanismo biela - manivela.	43
Figura 4-6: Grafica del desplazamiento mecanismo biela - manivela.	43
Figura 4-7: Interfaz cálculo de ángulo inclinación pitch y roll.	44
Figura 4-8: Parámetros geométricos cardan.....	46
Figura 4-9: Parámetros geométricos cruceta cardan.....	46
Figura 4-9: Parámetros de selección motorreductor.....	50
Figura 5-1: Diseño de la plataforma móvil.....	51
Figura 5-2: Parámetros geométricos perfil IPE 100.....	52
Figura 5-3: Diseño de la plataforma base.	53
Figura 5-4: Parámetros geométricos perfil Rectangular 60.40.....	53

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Requerimientos de movimiento.....	3
Tabla 1-2: Requerimientos de diseño.....	3
Tabla 1-3: Requerimientos de funcionalidad.....	3
Tabla 3-1: Coordenadas bidimensionales de la plataforma móvil.....	17
Tabla 3-2: Coordenadas bidimensionales de la plataforma base.....	18
Tabla 3-3: Coordenadas geométricas de la plataforma móvil.....	19
Tabla 3-4: Coordenadas geométricas de la plataforma base.....	20
Tabla 6-1: Dimensiones hojas Norma ISO 126 A.....	61
Tabla 6-2: Planos plataforma móvil.....	63
Tabla 6-3: Planos plataforma base.....	64
Tabla 6-4: Planos plataforma cardan.....	64
Tabla 6-5: Planos biela - manivela.....	65
Tabla 6-6: Planos motorreductor.....	65
Tabla 6-7: Planos soporte pie anti vibratorio.....	65
Tabla 6-8: Planos soporte rueda.....	66
Tabla 6-9: Planos plataforma de movimiento.....	66
Tabla 6-10: Anexos y documentación técnica plataforma de movimiento.....	67

Introducción

En la actualidad la industria regional y nacional depende de empresas internacionales para la adquisición de tecnología, la cual en muchas ocasiones tiene un costo muy elevado y/o no supe completamente las necesidades de los clientes.

Uno de los sectores que requiere mayor demanda tecnológica es el sector defensa, por esta razón el ministerio de defensa ha decidido mantener su crecimiento y mejorar su competitividad en el mercado mundial de la tecnología, adelantando proyectos de investigación mediante empresas propias como la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC). entidad sin ánimo de lucro que tiene como finalidad dar solución a las necesidades de las Fuerzas militares y Policía nacional.

En este momento la corporación cuenta con dos simuladores de aeronaves (SIMART y SIMAER) y un simulador de vehículo (MARKAB). Estos simuladores no cuentan con un sistema que simule los diferentes tipos de movimientos o sensaciones físicas como aceleración, velocidad y fuerzas G, que experimentaría una persona en un entorno real.

Para simular estas sensaciones físicas, la Corporación de Alta Tecnología para la defensa (CODALTEC) en cooperación con la Universidad Antonio Nariño, las cuales consideran la modalidad de proyecto de grado como la oportunidad para fortalecer la capacidad investigativa, desarrollo del conocimiento de los estudiantes y al mismo tiempo contribuir con el crecimiento de la industria regional y nacional, han decidido desarrollar el presente proyecto de investigación que tiene como finalidad realizar el diseño de una plataforma de movimiento con tres grados de libertad para sus simuladores.

Para satisfacer las necesidades de la problemática identificada, este proyecto inició realizando la especificación de los requerimientos que se contemplan para el diseño, identificando y priorizando los aspectos más relevantes como son los parámetros geométricos, los modelos cinemáticos y dinámicos de la plataforma, entre otros temas, que

se deben tener en cuenta para el proceso de selección y diseño de cada uno de los componentes de la plataforma.

Mediante el uso de una herramienta software de diseño asistido por computadora (CAD), se realiza el diseño de los componentes para posteriormente realizar un análisis de esfuerzos que permite validar los resultados obtenidos y ver fácilmente los defectos encontrados para así mismo ser solucionados, dando como consecuencia un diseño más óptimo. Finalmente se realiza la construcción de un manual técnico compuesto por los planos de cada componente con sus respectivas cotas de medidas y ensamblajes indicando los componentes que lo conforman, teniendo en cuenta las normas establecidas para la presentación de este tipo de documentos los cuales sirven como guía para su posterior proceso de fabricación.

Este proyecto, dentro del marco de la industria de TI, es tan solo un aporte para el avance en la solución de este tipo de necesidades, aporte que podría ser aplicado en diferentes campos de trabajo. En la actualidad se identifica que, en nuestra región, aunque son limitados y pocos conocidos los avances, surge un constante interés en la aplicación de estos conocimientos orientados al desarrollo de propuestas de plataformas de movimiento. En Villavicencio actualmente los pioneros son concretamente los centros de educación superior, entre ellos los más involucrados, la Universidad de los Llanos y la Universidad Antonio Nariño, cabe resaltar que uno de los diseños destacados en la región sobre este tipo de proyecto fue encabezado por la corporación a cargo de un estudiante de la Universidad de los Llanos, titulado Prototipo y modelo cinemático de una plataforma de movimiento móvil para simuladores de vehículo con tres grados de libertad; cabe resaltar que Villavicencio puede ser considerada como el principal centro tecnológico de la región, por lo que sus avances conforman el marco regional de este tipo de tecnologías.

A nivel nacional e internacional las plataformas de movimiento, están despertando gran interés por sus ventajas en cuanto a capacidad de manipular carga, precisión y velocidad de operación, permitiendo el desarrollo de diversas aplicaciones relacionadas a posicionadores, plataformas de gran capacidad, aplicaciones médicas, simuladores, dispositivos ópticos, robots, entre otros. En Colombia, La Universidad El Bosque cuenta con un destacado semillero de estudiantes de ingeniería electrónica que, a través de sus ideas e investigaciones, han logrado desarrollar hexápodos, prótesis y robots, dentro de

sus proyectos se encuentran plataformas y simuladores de movimiento, un trabajo que se viene realizando hace más de diez años. En la Universidad Javeriana, el grupo interdisciplinario de Investigación de Sistemas Inteligentes Robótica y Percepción (SIRP) desarrollan prototipos de este tipo. Así mismo, la Universidad Nacional, pionera en robótica, por medio del grupo de Plataformas Robóticas construye máquinas que apoyan sus funciones en plataformas de movimiento, recientemente en la RoboCup, el encuentro de robótica más importante del mundo hizo parte un equipo de maestros y alumnos de ingeniería electrónica de la Universidad Santo Tomás, demostrando los avances logrados en el país en este campo de la investigación (Mahecha, 2015).

Explorando el avance en otros países, está la creación del simulador Advanced Concept Flight Simulator (ACFS) de la NASA en compañía del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), en Estados Unidos, líder en el desarrollo de inteligencias artificiales. Con el inicio de la carrera espacial en los años sesenta se hizo imperativa la necesidad de simular condiciones reales para los pilotos de aviones y transbordadores espaciales, observando la interacción entre el hombre-vehículo y brindando entrenamiento adecuado, mediante la medición del desempeño en las maniobras con la ayuda de simuladores, práctica que hoy en día se sigue llevando a cabo, y para ello se hace necesario el uso de plataformas de movimiento con tecnología de punta (Francisco Javier Villate, 2015).

1. Definición y requerimientos de la plataforma de movimiento.

En el presente capítulo se realiza la definición general y descripción de los requerimientos o características más relevantes de una plataforma de movimiento con el fin de conocer y tener una base de inicio para el desarrollo del diseño.

1.1 Definición de la plataforma de movimiento.

Una plataforma de movimiento también se define como un robot paralelo, utilizado en diferentes tipos de aplicaciones, pero principalmente en la industria de la simulación, estas máquinas tienen como característica principal un gran desempeño en lo que respecta a movimiento en elevadas velocidades, exactitud, rigidez y habilidad para manipular grandes cargas, de acuerdo al movimiento que realicen pueden clasificarse en varios tipos y pueden poseer, dos, tres o seis grados de libertad, estos grados corresponden al movimiento de traslación o rotación en cada uno de sus planos o ejes.

La configuración principal de una plataforma de movimiento consiste básicamente en una plataforma móvil y una plataforma base, ubicadas de forma paralela y unidas mediante tres cadenas cinemáticas cerradas, en donde la plataforma móvil, es la encargada de soportar la cabina de simulación que estará en movimiento, por la acción de los actuadores o mecanismos, fijos a la plataforma base y que son los encargados de realizar la fuerza motriz a la cadena cinemática cerrada que genera el movimiento a la cabina. Por su forma y tamaño, permiten facilidad de montaje de los componentes y optimización del espacio de trabajo.

1.2 Requerimientos de la plataforma de movimiento.

Para llevar a cabo el diseño de la plataforma se debe tener en cuenta lo que desea el cliente del producto, es decir los requerimientos, las limitantes o restricciones, que pueden relacionarse a varios aspectos tanto de movimiento (Tabla 1-1), diseño (Tabla 1-2) y funcionalidad (Tabla 1-3), entre otros. Por esta razón se realiza una búsqueda inicial para dar con la descripción de los requerimientos técnicos generales que permitan dar inicio al diseño de la plataforma de movimiento y que tienen como finalidad que este desarrollo resulte atractivo para un amplio rango de usuarios.

Tabla 1-1: Requerimientos de movimiento.

Requerimientos de movimiento	
Grados de libertad	3 grados de libertad (pitch, roll y eje z)
Desplazamiento en el eje z	Mínimo \pm 100mm
Grados de inclinación pitch	Mínimo \pm 8 grados de inclinación
Grados de inclinación roll	Mínimo \pm 8 grados de inclinación

Tabla 1-2: Requerimientos de diseño.

Requerimientos de diseño	
Carga máxima	450kg carga
Altura de trabajo	1000mm a 1500mm
Tamaño (Ancho y largo)	1000mm a 1200mm

Tabla 1-3: Requerimientos de funcionalidad.

Requerimientos de funcionalidad	
El diseño debe contar con un sistema de fijación y desplazamiento.	
Los materiales a utilizar deben ser resistentes ante las cargas sometidas y los más ligeros posibles.	

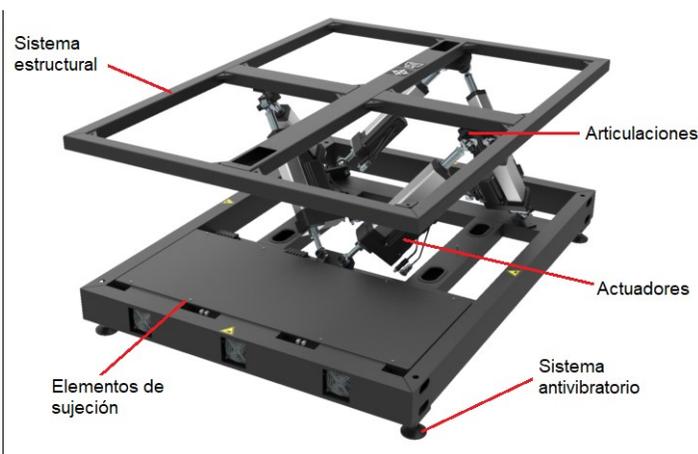
2. Componentes de la plataforma de movimiento.

En el presente capítulo se realiza una descripción de los componentes que conforman una plataforma de movimiento, con el fin de estudiar sus características y realizar la selección de los componentes más adecuados de la plataforma y que harán parte del desarrollo de este proyecto.

2.1 Componentes de la plataforma de movimiento.

La Figura 2-1 muestra un ejemplo de una plataforma de movimiento, donde se pueden observar de manera muy general los diferentes componentes que la conforman y que son necesarios para que cumpla con sus funciones, con el fin de determinar los componentes más importantes y seguidamente observar de manera independiente cada uno de ellos.

Figura 2-1: Componentes de una plataforma de movimiento.



Fuente: URL https://www.brunner-innovation.swiss/product/6dof_motion_1000/

El sistema estructural se conforma por la plataforma base, que es uno de los elementos principales de la estructura mecánica, su función es servir de soporte a los demás elementos por esta razón su configuración debe ser robusta, y la plataforma móvil, que es el elemento puesto en movimiento por el trabajo realizado de los actuadores y por ende donde se posa la cabina de simulación.

Las articulaciones permiten la unión entre la plataforma móvil y base que conforman el sistema estructural, las cuales transmiten el movimiento de los actuadores situados en la plataforma base, hacia la plataforma móvil, compartiendo una superficie en común.

Los actuadores suministran la fuerza motriz a las articulaciones y a su vez generan el movimiento de la plataforma móvil, pueden ser modificados y adaptados de acuerdo a la configuración de la plataforma.

El sistema anti-vibratorio está basado en un material flexible diseñado para absorber los choques y las vibraciones generadas por la plataforma, eliminando la fricción, entre los componentes mecánicos y la estructura con la superficie en la que se apoya.

Los elementos de sujeción son los elementos utilizados para conectar o unir las piezas que conforman el sistema estructural, están expuestos a cargas determinadas y son adaptables a cualquier necesidad.

2.2 Análisis y selección de los componentes de la plataforma de movimiento.

Se realiza la selección de los componentes que harán parte del diseño, analizando y teniendo en cuenta las características de las diferentes alternativas de los componentes que pueden conformar una plataforma de movimiento, gracias a una investigación previa.

2.2.1 Selección estructural plataforma móvil y base.

El diseño estructural de la plataforma móvil y base depende de la carga que deben soportar y los grados de libertad en los que se desea mover. La plataforma tendrá tres grados de libertad y su configuración estructural se selecciona con base en un triángulo como se observa en la Figura 2-2, ya que su geometría permite el movimiento en estos grados, además su cálculo del centro de gravedad le brinda estabilidad y sus tres vértices permitirán fijar los tres actuadores de forma simétrica.

Figura 2-2: Plataforma con configuración triángulo.



Fuente: URL <http://motionforsimulators.com/products/motion-systems/3-dof>

El sistema estructural de la plataforma móvil y base, está compuesto por perfiles de distintas formas, que deben ser elegidos de acuerdo a su función y los esfuerzos a los que estarán expuestos.

Se seleccionan dos tipos de perfiles, el primero es el perfil estructural IPE que se observa en la Figura 2-3, para la plataforma móvil cuya sección permite conexiones simples, posee gran eficiencia a la compresión axial y flexión, además su disponibilidad es amplia en una gran gama de tamaños.

Figura 2-3: Perfil estructural IPE.



Fuente: URL <http://www.fpetricio.cl/vigas/226-i.html>

El segundo es el perfil estructural tubular de sección cerrada rectangular que se observa en la Figura 2-4, para la plataforma base gracias a su forma es resistente a altos esfuerzos de torsión, pandeo, flexión, compresión y facilidad de montaje.

Figura 2-4: Perfil estructural tubular rectangular.



Fuente: URL <https://www.metalpanel.com/productos-hierros-y-transformados/tubos-2/tubo-rectangular/>

2.2.2 Selección articulaciones.

Las articulaciones son los elementos que permiten la unión de los eslabones de las cadenas cinemáticas, las cuales transmiten el movimiento de los actuadores hacia la plataforma móvil, su selección depende de su operatividad y los grados de inclinación en los que se desee mover.

Se selecciona la articulación universal que se observa en la Figura 2-5, con un par cinemático de dos grados de libertad ubicada en los puntos de unión de la plataforma móvil, gracias a sus características puede operar expuesta al empuje o fuerza axial generada por el desplazamiento de los actuadores, puede transmitir los movimientos de inclinación con ángulos elevados y puede soportar las cargas variables de trabajo a las que estará expuesta la plataforma.

Figura 2-5: Articulación universal.



Fuente: URL <http://www.factoryparts.com.ar/kit-de-transmision/5302-enganche-de-transmision-mercedes-benz-oh-1313-oh-1314-oh-1419-oh-1420-oh-1517-oh-1518-oh-1520-oem-3442687089.html>

2.2.3 Selección actuadores.

Los actuadores son los elementos capaces de generar el movimiento de la plataforma móvil según las órdenes dadas por una unidad de control, utilizando una fuerza creada a partir de fluidos o energía eléctrica, su selección debe estar en función de su aplicación, por esto se deben tener en cuenta factores como, el movimiento de trabajo, ya sea lineal o de rotación, potencia, peso y velocidad.

Se selecciona el actuador eléctrico que se observa en la Figura 2-6 **Figura 2-5**, ya que ofrece seguridad, confiabilidad, movimiento silencioso y limpio, control preciso, eficiente y larga vida útil, compacto y sin ningún tipo de pérdidas. La instalación de este actuador es fácil y económico en comparación con los sistemas hidráulicos o neumáticos y el espacio

requerido es menor, ya que no tiene bombas, compresores o mangueras, trabajan en compresión o tensión, a altas velocidades y mantienen carga en forma indefinida sin necesidad de estar funcionando.

Figura 2-6: Actuador eléctrico.



Fuente: <https://adajusa.es/motorreductor-trifasico-037kw-05cv-230400vac/motorreductor-trifasico-037kw-05cv-230400vac-rel-10-140rpm.html>

2.2.4 Selección sistema vibratorio.

El montaje anti vibratorio se caracteriza por poseer dos funciones principales, la función aislante la cual consiste en oponer resistencia a la propagación de un movimiento oscilatorio producido por fuerzas axiales y la función amortiguadora la cual considera la transformación de la energía vibratoria en calor, su selección debe estar en función de su aplicación y carga de trabajo ya sea compresión, cizalladura o en combinación de ambas para la protección de vibraciones severas.

Se selecciona el aislador de caucho constituido por materiales elásticos como el polietileno, poliuretano y estireno como se observa en la Figura 2-7, ya que evitan tanto la transmisión de vibraciones ambientales que llegan a la plataforma como las que genera ella misma al suelo o superficie donde se posa, reduciendo el ruido y un aumentando la vida útil de sus partes.

Figura 2-7: Sistema anti vibratorio.



Fuente: <https://www.solostocks.com/venta-productos/soportes/otros-soportes/soporte-antivibratorio-de-caucho-6805359>

3. Parámetros matemáticos y geométricos de la plataforma móvil y base.

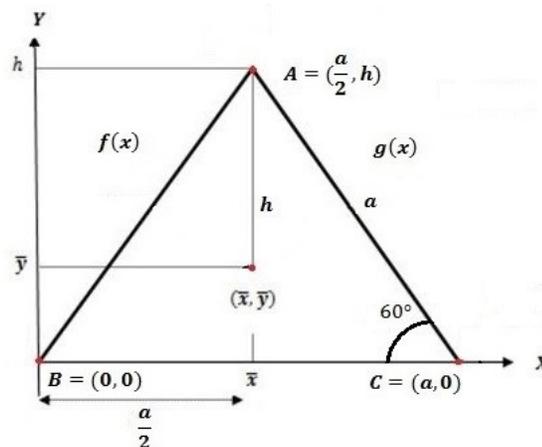
En este capítulo se describen los parámetros matemáticos utilizados en diferentes aspectos durante el diseño estructural de la plataforma móvil y base, con el fin de dar una explicación detallada de los cálculos realizados y su posterior implementación.

3.1 Diseño geométrico de la plataforma móvil y base.

3.1.1 Fundamentos geométricos de la plataforma móvil y base.

Los fundamentos geométricos de la plataforma están basados en una configuración triángulo definido por las distancias entre los puntos de apoyo de las articulaciones. Para realizar los cálculos de un triángulo se deben plantear sus características geométricas y trigonométricas elementales, como se muestra en la Figura 3-1.

Figura 3-1: Características geométricas de un triángulo.



Fuente: El autor

Para encontrar el valor de la altura $[h]$ se puede partir de que todos los lados de un triángulo equilátero son iguales y sus ángulos internos son iguales a 60° .

Utilizando el teorema de Pitágoras (ver Ecuación $(\text{sen}\theta = \frac{\text{cateto op}}{\text{hipotenusa}}$ (3.1)):

$$\text{sen}\theta = \frac{\text{cateto op}}{\text{hipotenusa}} \quad (3.1)$$

$$\text{sen}60^\circ = \frac{h}{a} \quad (3.2)$$

Despejando la altura $[h]$ (ver Ecuación $h = a * \text{sen}60^\circ$ (3.3) $h = \frac{\sqrt{3}}{2} * a$ (3.4)):

$$h = a * \text{sen}60^\circ \quad (3.3)$$

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} * a \quad (3.4)$$

Se calcula el área $[A]$ del triángulo donde (ver Ecuación $h = a * \text{sen}60^\circ$ (3.3) $A = \frac{a*h}{2}$ (3.6)):

$$A = \frac{\text{base} * \text{altura}}{2} \quad (3.5)$$

$$A = \frac{a * h}{2} \quad (3.6)$$

Reemplazando el valor de la altura $[h]$ (ver Ecuación $(h = \frac{\sqrt{3}}{2} * a$ (3.4)) en el área $[A]$ ver Ecuación $A = \frac{\sqrt{3}}{4} * a^2$ (3.7)):

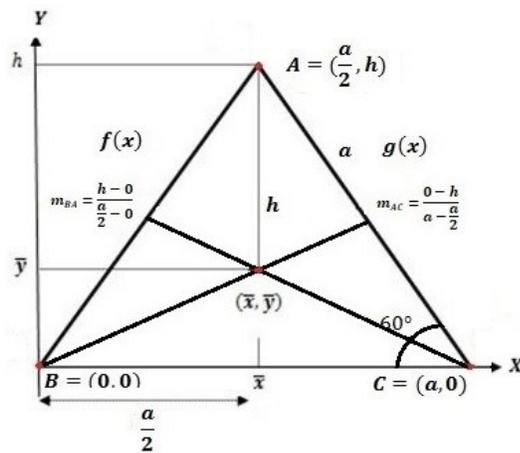
$$A = \frac{\sqrt{3}}{4} * a^2 \quad (3.7)$$

El centro de gravedad o baricentro de un triángulo está ubicado en un punto sobre la línea de la altura $[h]$ (ver Ecuación $h = a * \text{sen}60^\circ$

$$(3.3h = \frac{\sqrt{3}}{2} * a \tag{3.4})$$

y en la intersección de dos líneas rectas una perpendicular desde el vértice C al lado BA y otra perpendicular desde el vértice B al lado CA donde se ubicará el centro de la plataforma, como se muestra en la Figura 3-2.

Figura



Fuente: El autor

L

a

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{3.8}$$

p

e

Reemplazando según las coordenadas de la Figura 3-2, se obtiene:

n

d

$$m_{BA} = \frac{h-0}{\frac{a}{2}-0} \tag{3.9}$$

$$m_{BA} = \frac{2*h}{a} \tag{3.10}$$

u

t

e

d

e

l

Se utiliza la ecuación punto-pendiente (ver Ecuación $m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ (3.8)) para determinar la ecuación de la recta (ver Ecuación $y = f(x)$ (3.11)) que contiene al segmento BA:

$$y = f(x) \quad (3.11)$$

$$y - y_1 = m(x - x_1) \quad (3.12)$$

Se obtiene:

$$y = \frac{2 \cdot h \cdot x}{a} \quad (3.13)$$

$$f(x) = \frac{2 \cdot h \cdot x}{a} \quad (3.14)$$

Para calcular la pendiente del segmento rectilíneo AC se utiliza el mismo procedimiento:

$$m_{AC} = \frac{0 - h}{a - \frac{a}{2}} \quad (3.15)$$

$$m_{AC} = \frac{-2 \cdot h}{a} \quad (3.16)$$

$$y = g(x) \quad (3.17)$$

$$y = \frac{-2 \cdot h \cdot x}{a} + 2 \cdot h \quad (3.18)$$

$$g(x) = 2 \cdot h - \frac{2 \cdot h \cdot x}{a} \quad (3.19)$$

El cálculo integral de las coordenadas del centroide están dadas por las siguientes formulas (ver Ecuación (3.1)) y (ver Ecuación (3.1)):

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{\frac{a}{2}} x f(x) dx + \int_{\frac{a}{2}}^a x g(x) dx}{A} \quad (3.20)$$

$$\bar{y} = \frac{\int_0^{\frac{a}{2}} \frac{1}{2} [f(x)]^2 dx + \int_{\frac{a}{2}}^a \frac{1}{2} [g(x)]^2 dx}{A} \quad (3.21)$$

Donde $[\bar{x}]$ (ver Ecuación (3.1)) corresponde a la distancia del baricentro desde el punto de referencia $[B = (0,0)]$ en el eje x y $[\bar{y}]$ (ver Ecuación (3.1)) corresponde a la altura del

baricentro desde el eje x en la línea que representa altura [h] (ver Ecuación $(h = \frac{\sqrt{3}}{2} * a$ (3.4)).

Se reemplaza el área [A] (ver Ecuación $A = \frac{\sqrt{3}}{4} * a^2$

(
3
.
7

REF_Ref268794435 \h * MERGEFORMAT (3.1))), la ecuación de la recta $[y = f(x)]$

(
v

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{\frac{a}{2}} x \frac{2 * h * x}{a} dx + \int_{\frac{a}{2}}^a x 2 * h - \frac{2 * h * x}{a} dx}{\frac{\sqrt{3}}{4} * a^2} \tag{3.22}$$

$$\bar{y} = \frac{\int_0^{\frac{a}{2}} \frac{1}{2} \left[\frac{2 * h * x}{a} \right]^2 dx + \int_{\frac{a}{2}}^a \frac{1}{2} \left[2 * h - \frac{2 * h * x}{a} \right]^2 dx}{\frac{\sqrt{3}}{4} * a^2} \tag{3.23}$$

(
Los resultados de estas integrales son:

$$\bar{x} = \frac{a}{2} \tag{3.24}$$

$$\bar{y} = \frac{\sqrt{3}}{6} * a \tag{3.25}$$

R
Obteniendo así coordenadas de distancia y altura del baricentro (ver Ecuación $\bar{x}, \bar{y} =$

$$\left(\frac{a}{2}, \frac{\sqrt{3}}{6} * a \right) \tag{3.26)}$$

desde el punto de referencia, las cuales serán usadas en la etapa de diseño en función del valor [a] del lado con que se desee construir.

R

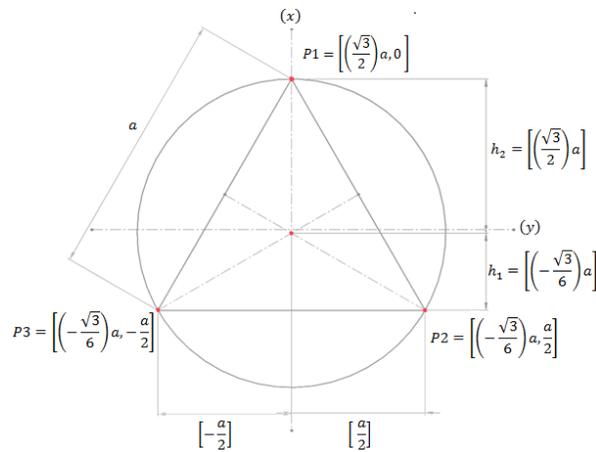
$$\bar{x}, \bar{y} = \left(\frac{a}{2}, \frac{\sqrt{3}}{6} * a \right) \tag{3.26)}$$

4
1
2
3
4
7

3.1.2 Coordenadas de la plataforma móvil y base.

Para determinar las coordenadas desde la vista superior de la plataforma móvil y base, se utilizan las ecuaciones encontradas anteriormente (ver Ecuación $x, \bar{y} = \left(\frac{a}{2}, \frac{\sqrt{3}}{6} * a\right)$ (3.26)(3.1)), como se muestra en la Figura 3-3, tomando $P = [0,0]$ como baricentro de la plataforma y $[a]$ como la medida de uno de sus lado.

Figura 3-3: Coordenadas de la plataforma móvil y base.



Fuente: El autor

Se definen sus coordenadas bidimensionales de posición en la (Tabla 3-1) y (Tabla 3-2).

Tabla 3-1: Coordenadas bidimensionales de la plataforma móvil.

Coordenadas bidimensionales de la plataforma móvil	
Coordenadas	Valor
x_{m1}	$\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) a$
y_{m1}	0
z_{m1}	0
x_{m2}	$-\left(\frac{\sqrt{3}}{6}\right) a$
y_{m2}	$\frac{a}{2}$

z_{m2}	0
x_{m3}	$-\left(\frac{\sqrt{3}}{6}\right)a$
y_{m3}	$-\frac{a}{2}$
z_{m3}	0

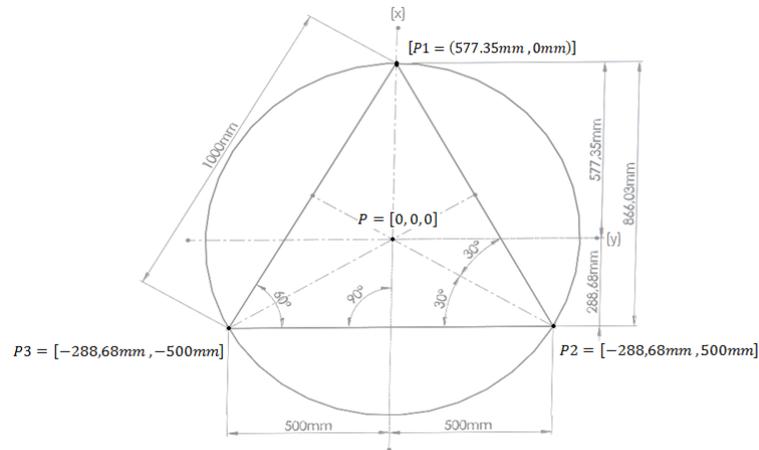
Tabla 3-2: Coordenadas bidimensionales de la plataforma base.

Coordenadas bidimensionales de la plataforma base	
Coordenadas	Valor
x_{b1}	$\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)a$
y_{b1}	0
z_{b1}	0
x_{b2}	$-\left(\frac{\sqrt{3}}{6}\right)a$
y_{b2}	$\frac{a}{2}$
z_{b2}	0
x_{b3}	$-\left(\frac{\sqrt{3}}{6}\right)a$
y_{b3}	$-\frac{a}{2}$
z_{b3}	0

3.1.3 Geometría de la plataforma móvil y base.

La geometría de la plataforma móvil y base se basan en un triángulo cuyo lado es de $[a = 1000mm]$ y un punto $[P = (0, 0, 0)]$ el cual representa su centro de masa de la plataforma.

En la Figura 3-4, se representan los puntos en los que las articulaciones se unen a la plataforma móvil y base $[P1 = (577.35mm, 0mm)]$, $[P2 = (-288,68mm, 500mm)]$ y $[P3 = (-288,68mm, -500mm)]$ planteados en términos de distancia desde el centro de masa.

Figura 3-4: Coordenadas geométricas de la plataforma móvil y base.

Fuente: El autor

Se enumeran los vértices de la plataforma móvil y base considerando el origen del sistema de referencia y se definen sus coordenadas geométricas en el espacio tridimensional en la (Tabla 3-3) y (Tabla 3-4):

Tabla 3-3: Coordenadas geométricas de la plataforma móvil.

Coordenadas geométricas de la plataforma móvil	
Coordenadas	Valor
x_{m1}	577.35mm

Tabla 3-3: (Continuación)

Coordenadas geométricas de la plataforma móvil	
Coordenadas	Valor
y_{m1}	0mm
z_{m1}	0
x_{m2}	-288.68mm
y_{m2}	500mm
z_{m2}	0

x_{m3}	$-288,68mm$
y_{m3}	$-500mm$
z_{m3}	0

Tabla 3-4: Coordenadas geométricas de la plataforma base.

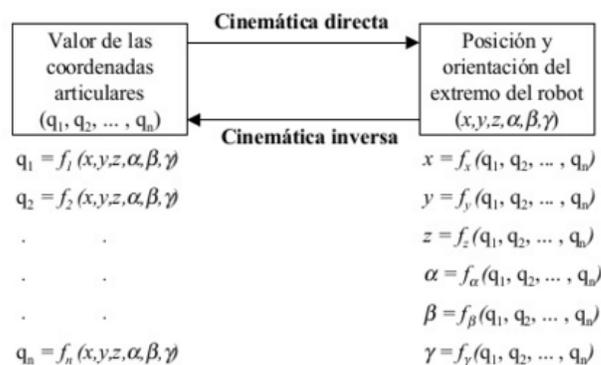
Coordenadas geométricas de la plataforma base	
Coordenadas	Valor
x_{b1}	$577.35mm$
y_{b1}	$0mm$
z_{b1}	0
x_{b2}	$-288,68mm$
y_{b2}	$500mm$
z_{b2}	0
x_{b3}	$-288,68mm$
y_{b3}	$-500mm$
z_{b3}	0

3.2 Diseño cinemático de la plataforma de movimiento.

3.2.1 Fundamentos cinemáticos de la plataforma de movimiento.

La cinemática definida en la Figura 3-5, de una plataforma, es la que permite analizar su movimiento con respecto a un sistema de coordenadas, teniendo en cuenta las relaciones entre la posición y orientación de la plataforma móvil con los valores que toman sus coordenadas articulares.

Figura 3-5: Cinemática inversa y directa de la plataforma de movimiento.



Fuente: URL <http://wiki.robotica.webs.upv.es/wiki-de-robotica/cinematica/>

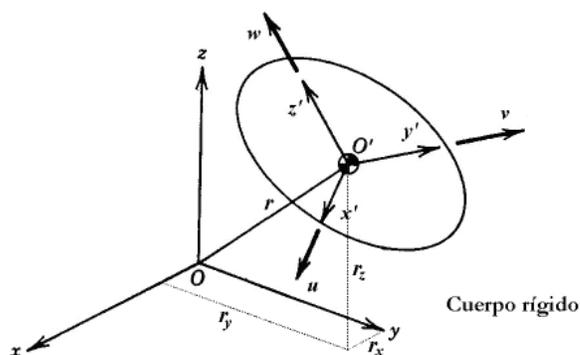
- Cinemática inversa de la plataforma de movimiento

La cinemática inversa de una plataforma, consiste en determinar cuáles son los valores de longitud de las articulaciones para satisfacer una posición y orientación deseada, es decir permite conocer la posición de cada articulación conociendo la orientación de la plataforma móvil.

Localización espacial de la plataforma

El movimiento de un cuerpo en el espacio se define describiendo la localización de un punto del mismo en cada instante de tiempo, mediante un sistema de coordenadas de referencia. Una vez definido se localiza cualquier punto respecto a éste por medio de un vector de posición en tres dimensiones como se muestra en la Figura 3-6.

Figura 3-6: Localización espacial de la plataforma.



Fuente: URL

http://www.wag.caltech.edu/home/ajaramil/libro_robotica/transformaciones_espaciales.pdf

Descripción de posición espacial de la plataforma

La posición y orientación de un cuerpo en el espacio se representa por las coordenadas de un punto arbitrario fijado al cuerpo $[Ouvw]$, asumiendo un sistema de coordenadas de referencia $[Oxyz]$ dado por sus coordenadas cartesianas como se muestra en la Figura 3-6:

$$r = r_x \vec{x} + r_y \vec{y} + r_z \vec{z} \quad (3.27)$$

Representado de forma vectorial (ver Ecuación :

$$r = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (3.28):$$

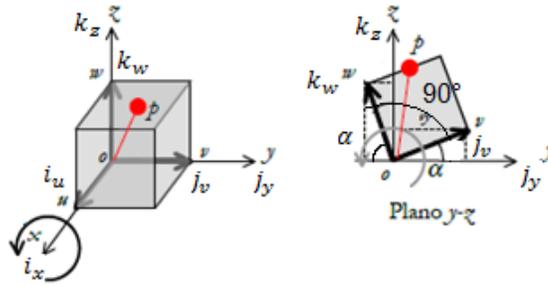
$$r = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Para esta descripción se deben tener en cuenta las coordenadas $[x, y, z]$ encontradas anteriormente, donde están situadas las uniones de los extremos superiores e inferiores de las articulaciones de la plataforma en la (Tabla 3-3) y (Tabla 3-4).

Matriz de rotación de la plataforma

Una matriz de rotación define algebraicamente la rotación de un cuerpo en un espacio de tres dimensiones considerando el ángulo en el que está girando o rotando. Sus ejes son vectores ortogonales que forman un ángulo de $[90^\circ]$ entre ellos. Si se saca la normal de cualquier vector perteneciente a la matriz el resultado es 1 por lo que es una matriz unitaria. Al ser una matriz ortogonal su transpuesta es igual a su inversa como se muestra en la Figura 3-7.

Figura 3-7: Matriz de rotación en el eje x de la plataforma.



Fuente: El autor

La matriz de rotación se denota de la siguiente manera (ver Ecuación (α, β, γ) (3.31)(3.1)):

$$\mathbf{R}_{x(\alpha)} = \begin{bmatrix} i_x \\ j_y \\ k_z \end{bmatrix} [i_u \quad j_v \quad k_w] \quad (3.29)$$

$$\mathbf{R}_{x(\alpha)} = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Ángulos de Euler de la plataforma

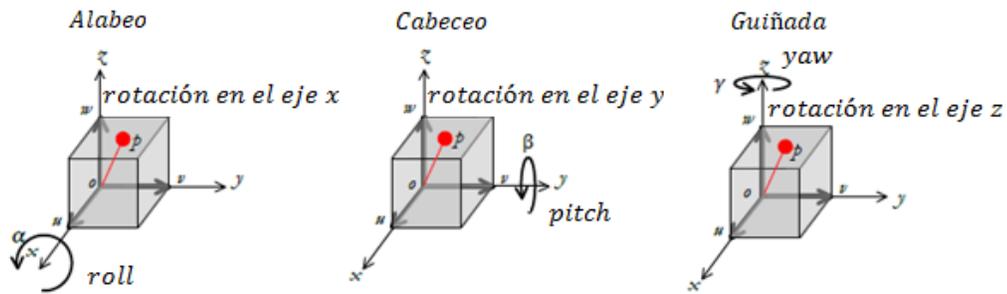
Para especificar la orientación angular de un sistema se utilizan los ángulos de Euler, son tres ángulos que, mediante una sucesión ordenada de giros, definen el cambio de un sistema de coordenadas a otro.

Se especifican los ángulos de Euler (ver Ecuación (α, β, γ) (3.31))

$$(\alpha, \beta, \gamma) \quad (3.31)$$

Los cuales representan los ángulos de rotación de la plataforma móvil de como se muestra en la Figura 3-8,. Estos rotan sobre el eje $[x(\alpha)]$, sobre el eje $[y(\beta)]$ y sobre el eje $[z(\gamma)]$ a unos grados determinados.

Figura 3-8: Ángulos de Euler de la plataforma.



Fuente: El autor

Matriz de rotación sucesiva

Algunos movimientos efectuados por la plataforma, son el resultado de la aplicación continua de varias rotaciones, es decir rotaciones sucesivas a lo largo de varios ejes. Para esto basta con volver a multiplicar el nuevo sistema de referencia por cada una de las rotaciones necesarias.

Se definen las rotaciones sucesivas de la plataforma (ver Ecuación $R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)$ (3.32)(α, β, γ))

y se calcula la matriz de rotación sucesiva (ver Ecuación $R_{xyz} =$ (3.31)(3.1)):

$$\begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \quad (3.32)$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Matriz de transformación homogénea de la plataforma

Con el resultado obtenido de la matriz de rotación se calcula la matriz de transformación homogénea (ver Ecuación $R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)$)

$$(3.32) \quad T = \begin{bmatrix} R_{xyz} & P_{xyz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix}$$

$$(3.35)(\alpha, \beta, \gamma) \quad (3.31)(3.1):$$

$$T = \begin{bmatrix} R_{xyz} & P_{xyz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Esta matriz está dada en función de la traslación y rotación de la plataforma móvil.

$T =$

$$(3.36) \quad \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta & P_x \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta & P_y \\ -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La anterior ecuación también se puede simplificar de la siguiente forma (ver Ecuación $T =$

$$(3.37) \quad R_{xyz} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & P_x \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & P_y \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \quad (3.32)(\alpha, \beta, \gamma)$$

$$(3.31)(3.1):$$

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & P_x \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & P_y \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Dónde:

$$a_{11} = \cos \beta \cos \gamma \tag{3.38}$$

$$a_{12} = -\cos \beta \sin \gamma \tag{3.39}$$

$$a_{13} = \sin \beta \tag{3.40}$$

$$a_{21} = \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \tag{3.41}$$

$$a_{22} = \cos \beta \cos \gamma \tag{3.42}$$

$$a_{23} = -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \tag{3.43}$$

$$a_{31} = -\sin \alpha \cos \beta \tag{3.44}$$

$$a_{32} = -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \tag{3.45}$$

$$a_{33} = \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \tag{3.46}$$

$$a_{33} = \cos \alpha \cos \beta \tag{3.47}$$

Para aplicar la matriz de traslación homogénea se realiza un producto cruz con las

coordenadas de la plataforma móvil (ver Ecuación
$$\begin{matrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \\ 1 \end{matrix} = T(P_x, P_y, P_z, \alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} x_{sn} \\ y_{sn} \\ z_{sn} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$(3.48) T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & P_x \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & P_y \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.37} R_{xyz} =$$

$$R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \tag{3.32}(\alpha, \beta, \gamma)$$

(3.31)(3.1))):

$$\begin{matrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \\ 1 \end{matrix} = T(P_x, P_y, P_z, \alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} x_{sn} \\ y_{sn} \\ z_{sn} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

Dónde:

$$n = 1, 2, 3 \tag{3.49}$$

Este producto cruz da como resultado la nueva posición de cada uno de los puntos con coordenadas $[x, y, z]$ de la plataforma móvil.

$$X_1 = P_x + a_{11}x_{s1} + a_{12}y_{s1} + a_{13}z_{s1} \quad (3.50)$$

$$Y_1 = P_y + a_{21}x_{s1} + a_{22}y_{s1} + a_{23}z_{s1} \quad (3.51)$$

$$Z_1 = P_z + a_{31}x_{s1} + a_{32}y_{s1} + a_{33}z_{s1} \quad (3.52)$$

$$X_2 = P_x + a_{11}x_{s2} + a_{12}y_{s2} + a_{13}z_{s2} \quad (3.53)$$

$$Y_2 = P_y + a_{21}x_{s2} + a_{22}y_{s2} + a_{23}z_{s2} \quad (3.54)$$

$$Z_2 = P_z + a_{31}x_{s2} + a_{32}y_{s2} + a_{33}z_{s2} \quad (3.55)$$

$$X_3 = P_x + a_{11}x_{s3} + a_{12}y_{s3} + a_{13}z_{s3} \quad (3.56)$$

$$Y_3 = P_y + a_{21}x_{s3} + a_{22}y_{s3} + a_{23}z_{s3} \quad (3.57)$$

$$Z_3 = P_z + a_{31}x_{s3} + a_{32}y_{s3} + a_{33}z_{s3} \quad (3.58)$$

Distancia Euclideana de la plataforma

Dada la nueva posición de los puntos de la plataforma móvil, se pueden obtener las medidas de las articulaciones conociendo las coordenadas de los vértices de ambas plataformas:

$$L_1 = \sqrt{(X_1 - x_{i1})^2 + (Y_1 - y_{i1})^2 + (Z_1 - z_{i1})^2} \quad (3.59)$$

$$L_2 = \sqrt{(X_2 - x_{i2})^2 + (Y_2 - y_{i2})^2 + (Z_2 - z_{i2})^2} \quad (3.60)$$

$$L_3 = \sqrt{(X_3 - x_{i3})^2 + (Y_3 - y_{i3})^2 + (Z_3 - z_{i3})^2} \quad (3.61)$$

- Cinemática directa de la plataforma de movimiento

La cinemática directa de una plataforma de movimiento consiste en determinar las coordenadas espaciales de posición y orientación de la plataforma móvil en función de las variables articulares de la plataforma.

En cada articulación se establece un sistema de referencia que, junto con las matrices de transformación homogénea, representan de una manera sencilla, las rotaciones y translaciones entre eslabones para ubicar el elemento con la posición y orientación deseada.

Serie de Taylor de la plataforma

Se hace uso de la Serie de Taylor en la cual se puede aplicar el método Newton Raphson

(ver Ecuación $L = L(f_0) + J^{-1}(\Delta)$)

$$(3.62) T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & P_x \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & P_y \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37) R_{xyz} =$$

$$R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \quad (3.32(\alpha, \beta, \gamma))$$

(3.31)(3.1))):

$$L = L(f_0) + J^{-1}(\Delta) \quad (3.62)$$

$$\Delta = \frac{L-L_0}{J^{-1}} \quad (3.63)$$

Donde $[L]$ es la longitud de las articulaciones, $[L(f_0)]$ es el cálculo de la cinemática inversa con una estimación inicial de grados de libertad $[x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0]$, $[J^{-1}]$ es la matriz Jacobiana inversa y $[\Delta]$ es valor para hacer la ecuación igual a 0.

Se obtienen los grados de libertad:

$$x_0 = x_0 + \Delta \quad (3.64)$$

$$y_0 = y_0 + \Delta \quad (3.65)$$

$$z_0 = z_0 + \Delta \quad (3.66)$$

$$\alpha_0 = \alpha_0 + \Delta \quad (3.67)$$

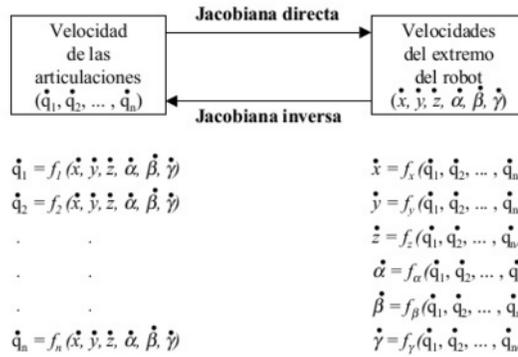
$$\beta_0 = \beta_0 + \Delta \quad (3.68)$$

$$\gamma_0 = \gamma_0 + \Delta \quad (3.69)$$

- Jacobiana directa de la plataforma de movimiento

La matriz jacobiana definida en Figura 3-9, permite conocer la velocidad de la plataforma móvil a partir de las velocidades de cada articulación conociendo las ecuaciones que solucionan el problema cinemático directo de una plataforma de movimiento de tres grados de libertad.

Figura 3-9: Cinemática directa de la plataforma de movimiento.



Fuente: URL [http://icaro.eii.us.es/descargas/Tema%20 4 %20parte 4 y ultima.pdf](http://icaro.eii.us.es/descargas/Tema%204%20parte%204%20y%20ultima.pdf)

La jacobiana directa es la relación, mediante la cual se facilita el cálculo de las velocidades de la plataforma móvil a partir de las velocidades de las articulaciones.

$$x = f_x(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3.70)$$

$$y = f_y(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3.71)$$

$$z = f_z(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3.72)$$

$$\alpha = f_\alpha(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3.73)$$

$$\beta = f_\beta(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3.74)$$

$$\gamma = f_\gamma(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3.75)$$

Estas expresiones se derivan con respecto a los grados de libertad, así tiene la velocidad de la plataforma móvil:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_x}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (3.76)$$

$$\dot{y} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_y}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (3.77)$$

$$\dot{z} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_z}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (3.78)$$

$$\dot{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_\alpha}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (3.79)$$

$$\dot{\beta} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_{\beta}}{\partial q_i} \dot{q}_i \tag{3.80}$$

$$\dot{\gamma} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_{\gamma}}{\partial q_i} \dot{q}_i \tag{3.81}$$

Estas expresiones se pueden representar de manera matricial (ver Ecuación $R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)$) (3.32)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = J * \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \tag{3.82T =}$$

$$\begin{bmatrix} R_{xyz} & P_{xyz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \tag{3.35}(\alpha, \beta, \gamma) \tag{3.31}(3.1)):$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = J * \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \tag{3.82}$$

La matriz $[J]$ es conocida como la matriz Jacobiana (ver Ecuación $R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)$) (3.32J =

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_i} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_y}{\partial q_i} & \dots & \frac{\partial f_y}{\partial q_n} \end{bmatrix} \tag{3.83}(\alpha, \beta, \gamma)$$

(3.31)(3.1)):

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_i} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_y}{\partial q_i} & \dots & \frac{\partial f_y}{\partial q_n} \end{bmatrix} \tag{3.83}$$

▪ Jacobiana inversa de la plataforma de movimiento

La jacobiana inversa es la relación por medio de la cual se puede calcular las velocidades de las articulaciones partiendo de las velocidades de la plataforma móvil (ver Ecuación

$$R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)$$

$$(3.32) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = J^{-1} * \begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \tag{3.84):}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = J^{-1} * \begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \tag{3.84}$$

D
o
n
d
e

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{3.85}$$

es la inversa de la matriz Jacobiana (ver Ecuación $R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)$)

3 Para calcular la matriz Jacobiana inversa se debe calcular las derivadas parciales de una matriz 6x6 cuyos términos son funciones trigonométricas.

3

2 La matriz Jacobiana inversa será (ver Ecuación $R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)$)

$$(3.32) (\alpha, \beta, \gamma) \tag{3.31}(3.1)J^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_1}{\partial \beta} & \frac{\partial f_1}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_2}{\partial \beta} & \frac{\partial f_2}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} & \frac{\partial f_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_3}{\partial \beta} & \frac{\partial f_3}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \tag{3.86):}$$

–
R
e
f
4
2

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_1}{\partial \beta} & \frac{\partial f_1}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_2}{\partial \beta} & \frac{\partial f_2}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} & \frac{\partial f_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_3}{\partial \beta} & \frac{\partial f_3}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

El cálculo de las derivadas parciales de las funciones trigonométricas será:

$$\frac{\partial f_1}{\partial x} = \frac{X_1 - x_{b1}}{L_1} \quad (3.87)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial y} = \frac{Y_1 - y_{b1}}{L_1} \quad (3.88)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial z} = \frac{Z_1 - z_{b1}}{L_1} \quad (3.89)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \alpha} = \frac{(X_1 - x_{b1}) \frac{\partial(a_{11}x_{m1} + a_{12}y_{m1} + a_{13}z_{m1})}{\partial \alpha} + (Y_1 - y_{b1}) \frac{\partial(a_{21}x_{m1} + a_{22}y_{m1} + a_{23}z_{m1})}{\partial \alpha} + (Z_1 - z_{b1}) \frac{\partial(a_{31}x_{m1} + a_{32}y_{m1} + a_{33}z_{m1})}{\partial \alpha}}{L_1}$$

(3.90))

$$\frac{\partial f_1}{\partial \beta} = \frac{(X_1 - x_{b1}) \frac{\partial(a_{11}x_{m1} + a_{12}y_{m1} + a_{13}z_{m1})}{\partial \beta} + (Y_1 - y_{b1}) \frac{\partial(a_{21}x_{m1} + a_{22}y_{m1} + a_{23}z_{m1})}{\partial \beta} + (Z_1 - z_{b1}) \frac{\partial(a_{31}x_{m1} + a_{32}y_{m1} + a_{33}z_{m1})}{\partial \beta}}{L_1}$$

(3.91))

$$\frac{\partial f_1}{\partial \gamma} = \frac{(X_1 - x_{b1}) \frac{\partial(a_{11}x_{m1} + a_{12}y_{m1} + a_{13}z_{m1})}{\partial \gamma} + (Y_1 - y_{b1}) \frac{\partial(a_{21}x_{m1} + a_{22}y_{m1} + a_{23}z_{m1})}{\partial \gamma} + (Z_1 - z_{b1}) \frac{\partial(a_{31}x_{m1} + a_{32}y_{m1} + a_{33}z_{m1})}{\partial \gamma}}{L_1}$$

(3.92))

$$\frac{\partial f_2}{\partial x} = \frac{X_2 - x_{b2}}{L_2} \quad (3.93)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial y} = \frac{Y_2 - y_{b2}}{L_2} \quad (3.94)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial z} = \frac{Z_2 - z_{b2}}{L_2} \quad (3.95)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \alpha} = \frac{(X_2 - x_{b2}) \frac{\partial(a_{11}x_{m2} + a_{12}y_{m2} + a_{13}z_{m2})}{\partial \alpha} + (Y_2 - y_{b2}) \frac{\partial(a_{21}x_{m2} + a_{22}y_{m2} + a_{23}z_{m2})}{\partial \alpha} + (Z_2 - z_{b2}) \frac{\partial(a_{31}x_{m2} + a_{32}y_{m2} + a_{33}z_{m2})}{\partial \alpha}}{L_2}$$

(3.96)

$$\frac{\partial f_2}{\partial \beta} = \frac{(X_2 - x_{b2}) \frac{\partial(a_{11}x_{m2} + a_{12}y_{m2} + a_{13}z_{m2})}{\partial \beta} + (Y_2 - y_{b2}) \frac{\partial(a_{21}x_{m2} + a_{22}y_{m2} + a_{23}z_{m2})}{\partial \beta} + (Z_2 - z_{b2}) \frac{\partial(a_{31}x_{m2} + a_{32}y_{m2} + a_{33}z_{m2})}{\partial \beta}}{L_2}$$

(3.97)

$$\frac{\partial f_2}{\partial \gamma} = \frac{(X_2 - x_{b2}) \frac{\partial(a_{11}x_{m2} + a_{12}y_{m2} + a_{13}z_{m2})}{\partial \gamma} + (Y_2 - y_{b2}) \frac{\partial(a_{21}x_{m2} + a_{22}y_{m2} + a_{23}z_{m2})}{\partial \gamma} + (Z_2 - z_{b2}) \frac{\partial(a_{31}x_{m2} + a_{32}y_{m2} + a_{33}z_{m2})}{\partial \gamma}}{L_2}$$

(3.98)

$$\frac{\partial f_3}{\partial x} = \frac{X_3 - x_{b3}}{L_3} \quad (3.99)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial y} = \frac{Y_3 - y_{b3}}{L_3} \quad (3.100)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial z} = \frac{Z_3 - z_{b3}}{L_3} \quad (3.101)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \alpha} =$$

$$\frac{(X_3 - x_{b3}) \frac{\partial(a_{11}x_{m3} + a_{12}y_{m3} + a_{13}z_{m3})}{\partial \alpha} + (Y_3 - y_{b3}) \frac{\partial(a_{21}x_{m3} + a_{22}y_{m3} + a_{23}z_{m3})}{\partial \alpha} + (Z_3 - z_{b3}) \frac{\partial(a_{31}x_{m3} + a_{32}y_{m3} + a_{33}z_{m3})}{\partial \alpha}}{L_3}$$

(3.102)

$$\frac{\partial f_3}{\partial \beta} =$$

$$\frac{(X_3 - x_{b3}) \frac{\partial(a_{11}x_{m3} + a_{12}y_{m3} + a_{13}z_{m3})}{\partial \beta} + (Y_3 - y_{b3}) \frac{\partial(a_{21}x_{m3} + a_{22}y_{m3} + a_{23}z_{m3})}{\partial \beta} + (Z_3 - z_{b3}) \frac{\partial(a_{31}x_{m3} + a_{32}y_{m3} + a_{33}z_{m3})}{\partial \beta}}{L_3}$$

(3.103)

$$\frac{\partial f_3}{\partial \gamma} =$$

$$\frac{(X_3 - x_{b3}) \frac{\partial(a_{11}x_{m3} + a_{12}y_{m3} + a_{13}z_{m3})}{\partial \gamma} + (Y_3 - y_{b3}) \frac{\partial(a_{21}x_{m3} + a_{22}y_{m3} + a_{23}z_{m3})}{\partial \gamma} + (Z_3 - z_{b3}) \frac{\partial(a_{31}x_{m3} + a_{32}y_{m3} + a_{33}z_{m3})}{\partial \gamma}}{L_3}$$

(3.104)

Se realizan las iteraciones hasta que el error entre $[L]$ y $[L(f_0)]$ sea aproximado a cero. Al final el resultado de la posición y la orientación será:

$$x = x_0 \quad (3.105)$$

$$y = y_0 \quad (3.106)$$

$$z = z_0 \quad (3.107)$$

$$\alpha = \alpha_0 \quad (3.108)$$

$$\beta = \beta_0 \quad (3.109)$$

$$\gamma = \gamma_0 \quad (3.110)$$

3.2.2 Simulación fundamentos matemáticos y cinemáticos de la plataforma de movimiento.

Como verificación de los resultados de los modelos matemáticos de la cinemática inversa y directa de la plataforma, se elaboró una simulación del modelo en la herramienta software para cálculo matemático Matlab.

Código Matlab cinemática de la plataforma de movimiento

Para realizar el cálculo de la cinemática inversa se declaran las variables externas que se deben proporcionar a la función [*ik (Inverse kinematic)*] como argumentos de entrada.

Las variables [*Movil y Base*] dadas en la (Tabla 3-3) y (Tabla 3-4), sirven para aportar información física de la plataforma a la función, ya que sus valores corresponden a las coordenadas [*x, y, z*] de la plataforma móvil y la plataforma base, la variable [*DOF*] incluye los valores de posición y ángulo que tomaría la plataforma móvil como se muestra en Figura 3-10.

Figura 3-10: Código Matlab cálculo de la cinemática inversa de la plataforma.



```

Editor - C:\Users\Misheru\Documents\MATLAB\ik.m
fk.m x ik.m x modelo.m x MP3DOF.m x rotation.m x +
1 function [L] = ik(Movil,Base,DOF) %Cinemática inversa
2     %DOF
3     x = DOF(1,1);
4     y = DOF(2,1);
5     z = DOF(3,1);
6     roll=DOF(4,1);
7     pitch=DOF(5,1);
8     yaw=DOF(6,1);

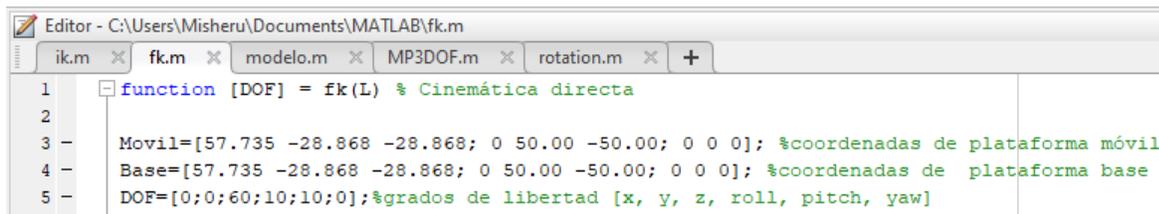
```

Fuente: El autor

Para realizar el cálculo de la cinemática directa se declaran las variables externas que se deben proporcionar a la función $[fk (Forward\ kinematic)]$ como argumentos de entrada.

Donde la variable $[DOF]$ son los grados de libertad que dan la posición y orientación a la plataforma móvil a partir de la longitud $[L]$ de las articulaciones y se utilizan las variables $[Movil\ y\ Base]$ dadas en la (Tabla 3-3) y (Tabla 3-4), correspondientes a las coordenadas reales de la plataforma móvil y la plataforma base como se muestra en la Figura 3-11.

Figura 3-11: Código Matlab cálculo cinemática directa de la plataforma.



```

Editor - C:\Users\Misheru\Documents\MATLAB\fk.m
ik.m x fk.m x modelo.m x MP3DOF.m x rotation.m x +
1 function [DOF] = fk(L) % Cinemática directa
2
3 Movil=[57.735 -28.868 -28.868; 0 50.00 -50.00; 0 0 0]; %coordenadas de plataforma móvil
4 Base=[57.735 -28.868 -28.868; 0 50.00 -50.00; 0 0 0]; %coordenadas de plataforma base
5 DOF=[0;0;60;10;10;0];%grados de libertad [x, y, z, roll, pitch, yaw]

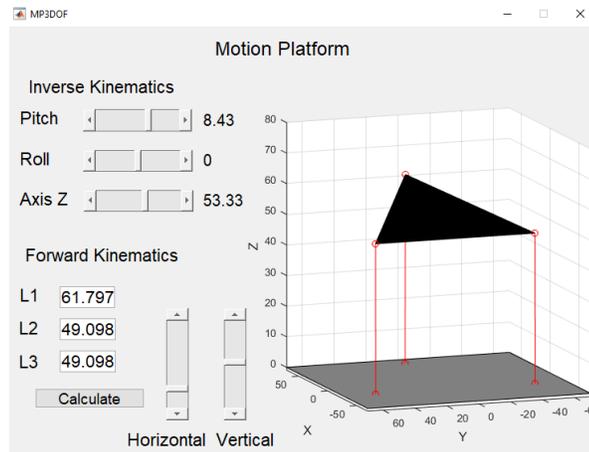
```

Fuente: El autor

Se crea una interfaz gráfica para el control de la plataforma de movimiento donde se integra todo el modelo matemático de la cinemática y los códigos de programación creados, llamada $[Motion\ Platform\ 3\ Dof\ (MP3DOF)]$ como se muestra en la Figura 3-12.

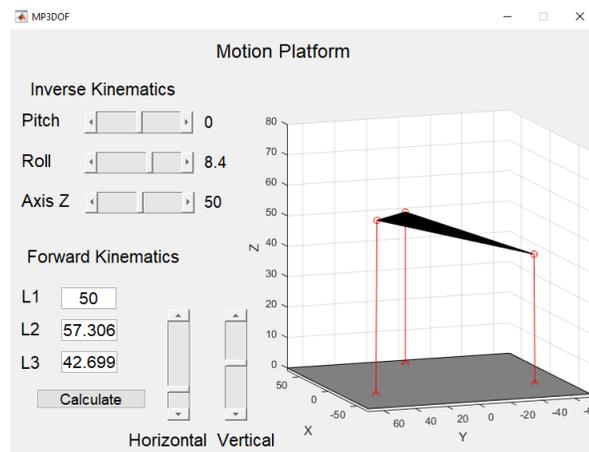
Esta interfaz cuenta con tres $[labels]$ o casillas de texto editable donde se pueden modificar las longitudes de las articulaciones $[L1, L2, L3]$ las cuales contienen la cinemática directa anteriormente mencionada y cuenta con tres $[Sliders]$ o barras deslizables para modificar los grados de libertad de la plataforma móvil pitch, roll y eje z los cuales contienen el cálculo de la cinemática inversa de cada articulación, cada vez que se modifican los grados de inclinación con los sliders se crea una actualización de la visualización de la plataforma de movimiento.

Figura 3-12: Interfaz de cálculo cinemática de la plataforma ángulo pitch.



Fuente: El autor

Figura 3-13: Interfaz de cálculo cinemática de la plataforma ángulo roll.



Fuente: El autor

En la Figura 3-12 de la interfaz se puede observar que para un ángulo pitch de $[y(\beta) = 8^\circ]$ las articulaciones deben tener un desplazamiento mayor a $[126mm]$ aproximadamente dada por la diferencia entre las articulaciones $[L1 - L2]$ y en la Figura 3-13, para un ángulo de inclinación de roll $[x(\alpha) = 8^\circ]$ deben tener un desplazamiento mayor a $[146mm]$ aproximadamente dada por la diferencia entre las articulaciones $[L2 - L3]$.

4. Parámetros matemáticos y geométricos de los componentes.

En este capítulo se describen los parámetros matemáticos que se deben tener en cuenta durante el diseño de los diferentes componentes que hacen parte de la plataforma de movimiento, buscando determinar la geometría más óptima del mecanismo biela – manivela para su posterior implementación, además los parámetros matemáticos y de selección del actuado y cardan.

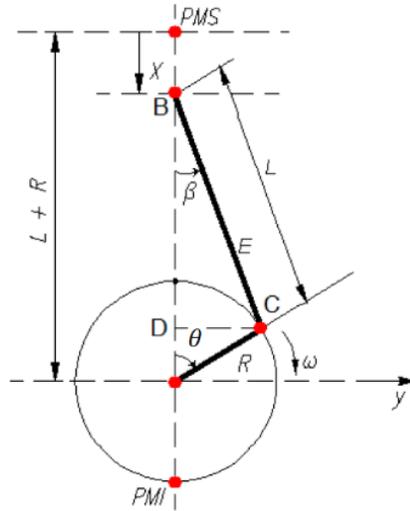
4.1 Diseño geométrico del mecanismo biela - manivela.

4.1.1 Fundamentos geométricos del mecanismo biela – manivela.

Existen ciertos parámetros geométricos que se deben tener en cuenta al momento de realizar el diseño del mecanismo biela – manivela determinados por el comportamiento de su desplazamiento.

- Desplazamiento mecanismo biela – manivela

Se define como $[X]$ al recorrido o desplazamiento en el eje z de la plataforma, que va desde el punto máximo superior $[PMS]$ hasta el punto máximo inferior $[PMI]$, depende de $[R]$ la longitud de la manivela, el cual es el elemento que permite convertir el movimiento rotacional del actuador en el movimiento lineal de la plataforma, $[L]$ la longitud de la biela, $[\theta]$ el ángulo de rotación que forma el eje de la manivela con el eje del actuador y $[\beta]$ el ángulo que forma el eje de la biela con el eje del actuador como se muestra en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Características geométricas del sistema biela - manivela.

Fuente: URL <http://wiki.robotica.webs.upv.es/wiki-de-robotica/cinematica/>

De acuerdo a la Figura 4-1 y por relaciones trigonométricas se puede obtener la ecuación que describe el desplazamiento lineal de la plataforma $[X]$ (ver Ecuación $X=R + L - R \cos \theta - L \cos \beta$ (4.1)):

$$X = R + L - R \cos \theta - L \cos \beta \quad (4.1)$$

La ecuación del desplazamiento $[X]$ (ver Ecuación $X=R + L - R \cos \theta - L \cos \beta$ (4.1)), esta expresada en función de $[\theta]$ y $[\beta]$, pero se necesita calcular en función del ángulo $[\theta]$ de la manivela.

$$X = R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \beta) \quad (4.2)$$

S

e

g

$$\cos u = \sqrt{1 - \sin^2 u} \quad (4.3)$$

n

l

a

i

Reemplazando en [X] (ver Ecuación (4.2)) $X=R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \beta)$

$$X = R(1 - \cos \theta) + L(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \beta}) \tag{4.4}$$

De la Figura 4-1 se obtiene:

$$R \sin \theta = L \sin \beta = \overline{DC} \tag{4.5}$$

Des

$$\sin \beta = \frac{R}{L} \sin \theta \tag{4.6}$$

Reemplazando en [X] (ver Ecuación (4.4)):

$$X = R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R}{L} \sin \theta \right)^2} \right) \tag{4.7}$$

(4.5):

Se define $[\lambda]$ (ver Ecuación (4.8)) como la relación entre la longitud de la biela y la manivela:

$$\lambda = \frac{L}{R} \tag{4.8}$$

d

$$\lambda = \frac{L}{R} \tag{4.8}$$

Reemplazando en [X] (ver Ecuación (4.4)) $X=R(1 - \cos \theta) + L(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \beta})$

(4.4):

$$\sin \beta = \frac{1}{\lambda} \sin \theta \tag{4.9}$$

e n

R
e
e
m
p
l
a

$$X = R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta} \right) \tag{4.10}$$

a
[
d
a
o

$$\sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - x} = (1 - x)^{\frac{1}{2}} \tag{4.11}$$

sin β (ver Ecuación sin $\beta = RL \sin \theta$

En [X] (ver Ecuación $X = R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R}{L} \sin \theta\right)^2} \right)$

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) + \left(\frac{1}{2!}\right) f''(a)(x - a)^2 + \dots + \left(\frac{1}{n!}\right) f^{(n)}(a)(x - a)^n \tag{4.12}$$

o

n Dando como resultado y tomando los dos primeros términos de la serie de Taylor:

E

$$(1 - x)^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{x}{2} \tag{4.13}$$

a
R
e
e
a

$$\sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta} = 1 - \frac{1}{2\lambda^2} \sin^2 \theta \tag{4.14}$$

p

Reemplazando en [X] (ver Ecuación $X = R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta} \right)$

(4.10):

M
e
e
e

$$X = R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2\lambda^2} \sin^2 \theta \right) \right) \quad (4.15)$$

Según la identidad trigonométrica la expresión $[\sin^2 u]$ equivale a (ver Ecuación $\sin^2 u = \frac{1 - \cos 2u}{2}$)

$$R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta} \right) \quad (4.10):$$

$$\sin^2 u = \frac{1 - \cos 2u}{2} \quad (4.16)$$

Reemplazando en $[X]$ (ver Ecuación $X = R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2\lambda^2} \sin^2 \theta \right) \right)$ (4.15) $X = R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \beta)$ (4.2)):

$$X = R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2\lambda^2} \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \right) \right) \quad (4.17)$$

$$X = R(1 - \cos \theta) + \frac{L}{4\lambda^2} (1 - \cos 2\theta) \quad (4.18)$$

Despejando $[L]$ de la ecuación $[\lambda]$ (ver Ecuación $(\lambda = \frac{L}{R})$ (4.8)):

$$L = \lambda R \quad (4.19)$$

Reemplazando $[L]$ (ver Ecuación $L = \lambda R$

$$(4.19) X = R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \beta)$$

(4.2)) en $[X]$ (ver Ecuación $X = R(1 - \cos \theta) + \frac{L}{4\lambda^2} (1 - \cos 2\theta)$

$$(4.18) X = R(1 - \cos \theta) + L \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2\lambda^2} \sin^2 \theta \right) \right)$$

$$(4.15) X = R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \beta)$$

(4.2)):

$$X = R(1 - \cos \theta) + \frac{R}{4\lambda}(1 - \cos 2\theta) \quad (4.20)$$

Factorizando se obtiene la ecuación que describe el desplazamiento de la plataforma en función del ángulo $[\theta]$ de giro de la manivela:

$$X = R \left[(1 - \cos \theta) + \frac{1}{4\lambda} (1 - \cos 2\theta) \right] \quad (4.21)$$

Ángulos de inclinación pitch y roll de la plataforma móvil

La plataforma de movimiento debe contar con tres grados de libertad pitch (cabeceo) y roll (alabeo) dados por el grado de inclinación de la plataforma móvil y desplazamiento (ascenso – descenso) en el eje z, dado por mecanismo biela manivela de los actuadores que se encuentran en cada extremo de la plataforma.

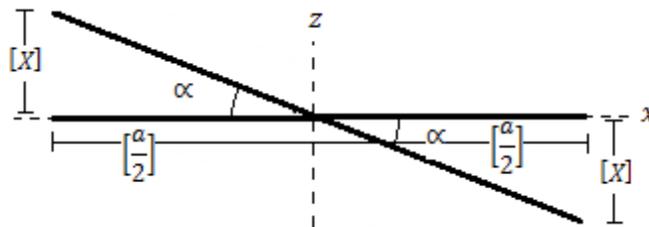
Teniendo en cuenta a $[X]$ (ver Ecuación $X=R \left[(1 - \cos \theta) + \frac{1}{4\lambda} (1 - \cos 2\theta) \right]$)

$$(4.21L = \lambda R) \quad (4.19X =$$

$$R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \beta) \quad (4.2))$$

la ecuación encontrada anteriormente del: desplazamiento del mecanismo biela – manivela se determina los ángulos de inclinación de la plataforma como se muestra en la Figura 4-2:

Figura 4-2: Ángulos de inclinación pitch y roll de la plataforma móvil.



Fuente: El autor

Por relaciones trigonométricas se obtiene la expresión que representa los ángulos de inclinación (ver Ecuación $\alpha = \sin^{-1}(\frac{X}{a/2})$)

(4.23):

$$\sin \alpha = \frac{X}{a/2} \tag{4.22}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{X}{a/2}\right) \tag{4.23}$$

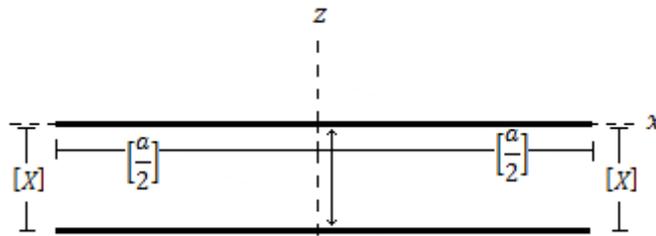
Donde $[a]$ es la medida de uno de los lados de la plataforma móvil determinada anteriormente en la Figura 3-3, y $[X]$ (ver Ecuación $X=R \left[(1 - \cos \theta) + \frac{1}{4\lambda} (1 - \cos 2\theta) \right]$)

$$(4.21)L = \lambda R \tag{4.19X =}$$

$$R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \beta) \tag{4.2)}$$

el desplazamiento de la plataforma en el eje z. como se muestra en la Figura 4-3.

Figura 4-3: Desplazamiento en el eje z de la plataforma móvil.



Fuente: El autor

4.1.2 Simulación de los fundamentos matemáticos del mecanismo biela – manivela.

Como verificación de los fundamentos matemáticos del mecanismo biela –manivela se realiza el análisis del comportamiento del desplazamiento en diferentes puntos del mecanismo y el cálculo de los ángulos de inclinación roll y pitch de la plataforma, utilizando la herramienta software para cálculo matemático Matlab.

Código Matlab mecanismo biela - manivela

Para realizar el cálculo del desplazamiento del mecanismo biela – manivela se determinan los valores de $[R]$ longitud de la manivela, $[L]$ longitud de la biela dadas en milímetros y $[w]$ una velocidad angular de la manivela para dar inicio a los cálculos del desplazamiento

$$X = R \left[(1 - \cos \theta) + \frac{1}{4\lambda} (1 - \cos 2\theta) \right] \quad (4.19)$$

$$L = \lambda R \quad (4.2)$$

$$R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \beta)$$

como se muestra en la Figura 4-4.

Figura 4-4: Código Matlab cálculo del desplazamiento mecanismo biela - manivela.

```

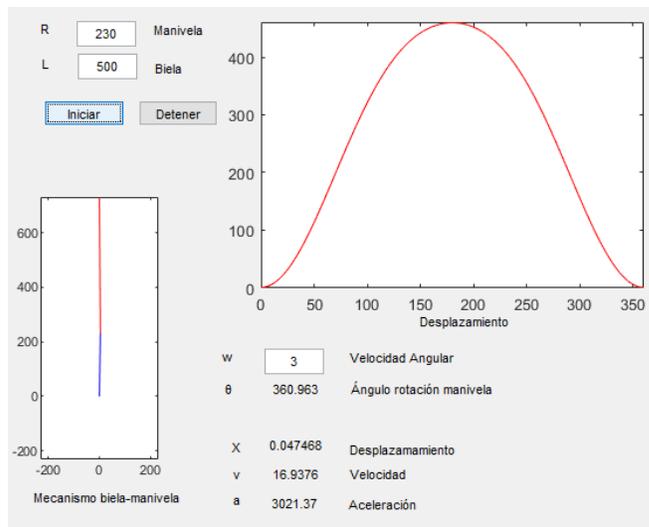
154 %Casillas de texto editable para manivela, biela y velocidad angular
155 - R = str2double(get(handles.manivela, 'String'));
156 - L = str2double(get(handles.biela, 'String'));
157 - w = str2double(get(handles.omega, 'String'));
180 %Desplazamiento
181 - x = (R*((1-cos(tetha)))+(R/(4*L))*(1-cos(2*tetha))))/2;

```

Fuente: El autor

Se crea una interfaz para visualizar el comportamiento grafico de las ecuaciones que describen el comportamiento del desplazamiento como se muestra en la Figura 4-5.

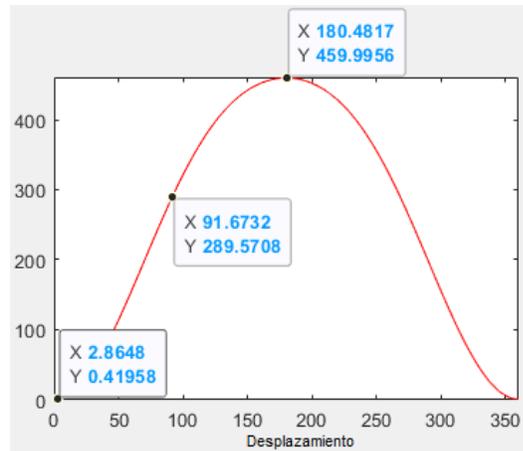
Figura 4-5: Interfaz de cálculo del desplazamiento mecanismo biela - manivela.



Fuente: El autor

Ingresando los valores de $[R = 230mm]$ y $[L = 500mm]$ se crea la representación gráfica que se muestra en la Figura 4-6, de la ecuación que describe el desplazamiento $[X]$, en función del ángulo $[\theta]$ de rotación que forma el eje de la manivela con el eje del actuador.

Figura 4-6: Grafica del desplazamiento mecanismo biela - manivela.

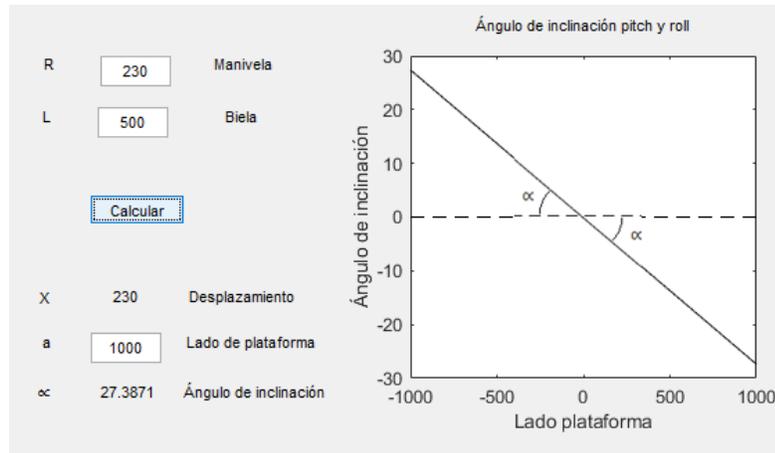


Fuente: El autor

En la gráfica de la Figura 4-6, se observa el desplazamiento total del mecanismo, desde el ángulo $[\theta = 0^\circ]$ hasta $[\theta = 180^\circ]$, de $[460mm]$ es decir el doble del valor del desplazamiento, que siendo así es de $[X = 230mm]$, desde el punto el punto donde $[\theta = 90^\circ]$ hasta el punto donde $[\theta = 180^\circ]$. Sin embargo durante el desplazamiento angular de la manivela desde $[\theta = 0^\circ]$ hasta $[\theta = 90^\circ]$ la biela recorre un desplazamiento mayor, es decir que si la velocidad de giro del eje del actuador es constante, en este espacio de trabajo emplea un tiempo menor que para recorrer la segunda mitad

Se crea una interfaz para visualizar el comportamiento grafico del ángulo de inclinación de pitch y roll. como se muestra en la Figura 4-5, ingresando los valores $[R]$ longitud de la manivela, $[L]$ longitud de la biela y $[a]$ longitud de uno de los lados de la plataforma móvil,

Figura 4-7: Interfaz cálculo de ángulo inclinación pitch y roll.



Fuente: El autor

Se obtiene el valor [$X = 230mm$] el cual da a la plataforma una operación de trabajo de [$\pm 115mm$] cumpliendo con el requerimiento donde el desplazamiento en el eje z y la plataforma móvil debe ser mínimo de [$\pm 100mm$], además se obtiene el valor del ángulo de inclinación de la plataforma [$\alpha = 27^\circ$], cumpliendo con el requerimiento donde el ángulo de inclinación de la plataforma móvil debe ser mínimo de [$\alpha \geq \pm 8^\circ$] definidos en la Tabla 1-1.

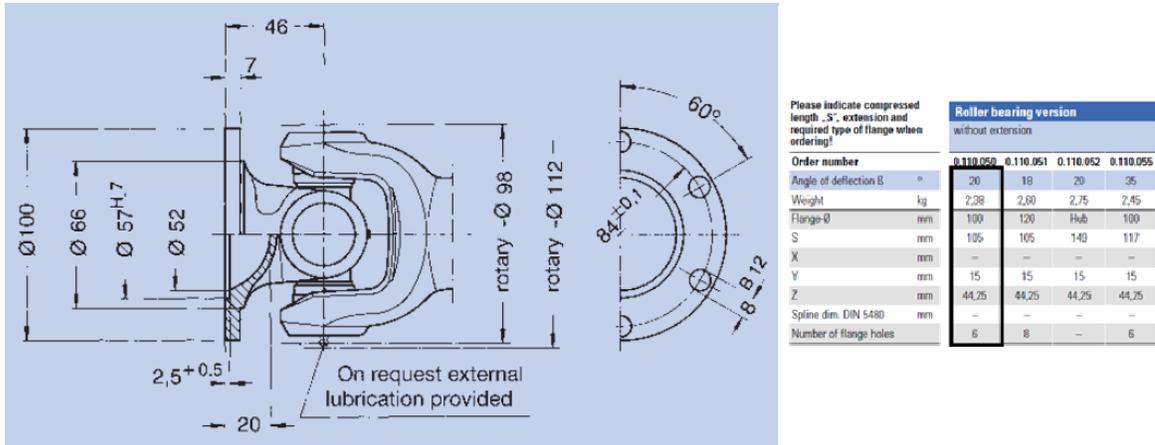
4.2 Diseño geométrico del cardan.

Para la selección del cardan se realizó la búsqueda de diferentes tipos de catálogos de fabricantes, teniendo en cuenta que el funcionamiento del cardan no tendrá un movimiento rotacional de transmisión, los criterios expuestos comúnmente para la selección como velocidad angular de entrada y salida de cada eje, fuerza de torque y grados de uniformidad no se tendrán en cuenta, para su selección la cual estará en función del ángulo de trabajo al que estará expuesto, es decir su selección dependerá de los grados de inclinación pitch [$y(\beta)$] y roll [$x(\alpha)$] de la plataforma móvil, los cuales deben ser mayor a [8°] de acuerdo a los requerimientos planteados en la Tabla 1-1.

El cardan seleccionado como referencia para el diseño utilizado en la plataforma de movimiento pertenece al catálogo de la compañía Elbe original gelenke Since 1919, Serie

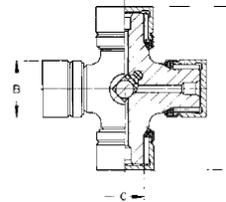
S 0.110.050 ya que cuenta con un ángulo de trabajo de $[20^\circ]$ acercándose al ángulo de inclinación generado por el mecanismo biela – manivela determinado en la Figura 4-7. Los parámetros geométricos del cardan y su cruceta se muestran en la Figura 4-8 y Figura 4-9 respectivamente.

Figura 4-8: Parámetros geométricos cardan.



Fuente: Catalogo Elbe original gelenke Since 1919.

Figura 4-9: Parámetros geométricos cruceta cardan.



		Standard version Roller bearing
Order number		0.110.015
A	mm	83
B	mm	30
C	mm	20,02
Snap rings included	mm	J 30 x 1,2
Weight	kg	0,66

Fuente: Catalogo Elbe original gelenke Since 1919.

4.3 Diseño geométrico del motorreductor.

Para realizar la selección del motorreductor inicialmente se deben tener en cuenta las condiciones a las que estará expuesto, es decir se realiza el cálculo estático sencillo donde se define la carga axial a la que estará expuesto y su selección estará en función del valor de la fuerza obtenido.

Criterios a priori para la selección del motorreductor

Expresando las distintas fórmulas que establecen el equilibrio de un cuerpo y a su vez analizando su aplicación a la plataforma de movimiento. Se concluye que cuando hay fuerzas actuando sobre un cuerpo rígido es necesario considerar el equilibrio en relación tanto de la traslación como de la rotación.

Por ello se requiere cumplir las siguientes condiciones:

La condición equilibrio de traslación: la fuerza resultante de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo debe ser cero (ver Ecuación $h = a * \text{sen}60^\circ$)

$$\sum F = 0 \quad (4.24)$$

Es decir, se tiene que cumplir que la suma de todas las fuerzas que estén actuando en la dirección positiva de un eje sea igual a las fuerzas que estén actuando en la dirección negativa del mismo.

$$+\sum F_x = -\sum F_x = \sum F_x = 0 \quad (4.25)$$

$$\pm \sum F_y = -\sum F_y = \sum F_y = 0 \quad (4.26)$$

R

La condición equilibrio rotacional o momento: la suma de todas las fuerzas que se ejercen

f
4
1
3
3
8

$$\sum M = 0 \tag{4.27}$$

Es decir, se tiene que cumplir que la suma de los momentos o fuerzas de rotación en dirección anti horaria sea igual a la suma de momentos o fuerzas de rotación en dirección horaria (ver Ecuación $h = a * \text{sen}60^\circ$)

$$\sum M_O^{\oplus} = \sum M_O^{\ominus} \tag{4.28}$$

Estas condiciones de equilibrio se convierten, gracias al álgebra vectorial, en un sistema de ecuaciones. A partir de las coordenadas de la plataforma de movimiento definidas en la Figura 3-4, se realiza el siguiente cálculo:

$$h = \frac{\text{cat op}}{\text{sen}\theta} \tag{4.29}$$

$$h = \frac{288,68\text{mm}}{\text{sen}(30)} \tag{4.30}$$

$$h = 577,35\text{mm} \tag{4.31}$$

Seguindo la condición donde la fuerza resultante de todas las fuerzas debe ser igual a 0:

$$\sum F = 0 \tag{4.32}$$

$$M_{P1} = P1(577,35)i = 0 \tag{4.33}$$

$$M_{P2} = -P2(577,35N) \text{sen}(30)i + P2(577,35N) \text{cos}(30)j = 0 \tag{4.34}$$

$$M_{P3} = -P3(577,35N) \text{sen}(30)i - P3(577,35N) \text{cos}(30)j = 0 \tag{4.35}$$

Agrupando en j:

$$P2(577,35N) \text{cos}(30)j - P3(577,35N) \text{cos}(30)j = 0 \tag{4.36}$$

$$P2(577,35N) \text{cos}(30)j = P3(577,35N) \text{cos}(30)j \tag{4.37}$$

$$\frac{P2(577,35) \text{cos}(30)j}{577,35 \text{cos}(30)j} = P3 \tag{4.38}$$

M

E

$$P2 = P3 \quad (4.39)$$

Agrupando en i :

$$P1(577,35N)i - P2(577,35N) \operatorname{sen}(30)i - P3(577,35N)\operatorname{sen}(30)i = 0 \quad (4.40)$$

$$P1(577,35N)i = 2P3(577,35N) \operatorname{sen}(30)i \quad (4.41)$$

$$P1 = \frac{2P3(577,35N) \operatorname{sen}(30)i}{(577,35N)i} \quad (4.42)$$

$$P1 = 2P3\operatorname{sen}(30) \quad (4.43)$$

$$P = P1 + P2 + P3 \quad (4.44)$$

Se reemplaza $[P1]$ (ver Ecuación $P1=2P3\operatorname{sen}(30)$)
 $(4.43h = a * \operatorname{sen}60^\circ$ $(3.3\sum M = 0$
 $(4.27))$ en la ecuación $[P]:\operatorname{ver}$ (Ecuación $P=P1 + P2 + P3$
 $(4.44h = a * \operatorname{sen}60^\circ$ $(3.3\sum M = 0$
 $(4.27):$

$$P = 2P3\operatorname{sen}(30) + P2 + P3 \quad (4.45)$$

$$P = 2P3\operatorname{sen}(30) + 2P3 \quad (4.46)$$

Simplificando:

$$P = 2P3(\operatorname{sen}(30) + 1) \quad (4.47)$$

Se debe tener en cuenta la atracción que la tierra ejerce sobre una partícula definida como peso $[W]$. Introduciendo la constante $[g]$ como la gravedad y $[m]$ como la masa de la partícula. La plataforma de movimiento en los requerimientos de finidos en la Tabla 1-2, **Tabla 1-3:** Requerimientos de funcionalidad. sin embargo se calcula una holgura dada por el peso propio de la estructura de la plataforma móvil.

$$W = P = mg \quad (4.48)$$

$$P = 650kg * 9,8 \frac{m}{s^2} \quad (4.49)$$

$$P = 6370N \quad (4.50)$$

Se reemplaza en la ecuación:

$$6370N = 2P3(\text{sen}(30) + 1) \quad (4.51)$$

$$\frac{6370N}{2(\text{sen}(30)+1)} = P3 \quad (4.52)$$

$$2123,3N = P3 \quad (4.53)$$

De acuerdo a la fuerza axial obtenida anteriormente El motorreductor seleccionado como referencia para el diseño de la plataforma base pertenece al catalogo de la compañía Norton G1000_IE2_ES_0713, Nomenclatura SK9012.1 80LH4.

Figura 4-10: Parámetros de selección motorreductor.



1:5
0,55 kW
0,75 kW

P ₁ [kW]	n ₂ [min ⁻¹]	M _{2b} [Nm]	f _B	l _{ges}	F _R	F _A	Type	mm [mm]
0,55	14-68	76,9	1,1	20,80	5,0	9,0	SK 92072.1 - 80 SH/4 - SK 200E-550-340-A (-C)	18 E50-51
	18-89	59,2	1,1	16,00	5,0	9,0	SK 92072.1 - 80 SP/4 - SK 200E-550-340-A (-C)	
	22-111	47,3	1,2	12,78	5,0	9,0		
	26-128	41,1	1,6	11,11	5,0	9,0	SK 92072.1 - 80 SH/4 - SK 180E-550-340-B (-C)	
	29-144	36,4	2,1	9,85	5,0	9,0	SK 92072.1 - 80 SP/4 - SK 180E-550-340-B (-C)	
	33-164	32,1	2,3	8,67	5,0	9,0		
	37-187	28,0	2,6	7,58	5,0	9,0		
	43-213	24,7	2,8	6,67	4,9	9,0		
	49-244	21,6	3,3	5,83	4,7	8,8		
	55-275	19,1	3,5	5,17	4,5	8,5		
	61-305	17,2	3,8	4,65	4,4	8,2		
	71-357	14,7	4,6	3,97	4,2	7,8		
	79-397	13,2	5,0	3,58	4,1	7,6		
0,75	1,0-5,1	1412	2,0	279,60	25,6	40,0	SK 9043.1 - 80 LH/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	133 E78-79
	1,4-6,9	1033	2,7	204,38	26,4	40,0	SK 9043.1 - 80 LP/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	
	1,6-8,2	871	3,2	172,08	26,6	40,0	SK 9043.1 - 80 LH/4 - SK 180E-750-340-B (-C)	
							SK 9043.1 - 80 LP/4 - SK 180E-750-340-B (-C)	
	1,1-5,3	1355	1,1	267,65	9,3	14,5	SK 9033.1 - 80 LH/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	79 E74-75
	1,3-6,6	1089	1,4	214,83	11,6	14,5	SK 9033.1 - 80 LP/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	
	1,7-8,4	848	1,8	167,45	12,9	14,5	SK 9033.1 - 80 LH/4 - SK 180E-750-340-B (-C)	
							SK 9033.1 - 80 LP/4 - SK 180E-750-340-B (-C)	
	1,1-5,7	1265	1,2	249,72	10,2	14,5	SK 9032.1 - 80 LH/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	71 E72-73
	1,2-6,0	1185	1,3	233,92	10,9	14,5	SK 9032.1 - 80 LP/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	
	1,4-7,2	1001	1,5	197,45	12,1	14,5		
	2,6-13	562	2,8	110,77	14,0	14,5	SK 9032.1 - 80 LH/4 - SK 180E-750-340-B (-C)	
	3,0-15	474	3,3	93,50	14,2	14,5	SK 9032.1 - 80 LP/4 - SK 180E-750-340-B (-C)	
1,3-6,5	1110	0,8	219,25	0	12,0	SK 9022.1 - 80 LH/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	51 E68-69	
1,5-7,7	934	0,9	184,46	0	12,0	SK 9022.1 - 80 LP/4 - SK 200E-750-340-A (-C)		
1,7-8,3	860	1,0	169,81	0	12,0			
2,1-10	697	1,2	137,57	5,0	12,0	SK 9022.1 - 80 LH/4 - SK 180E-750-340-B (-C)		
2,4-12	586	1,5	115,74	6,5	12,0	SK 9022.1 - 80 LP/4 - SK 180E-750-340-B (-C)		
2,9-14	501	1,7	98,88	7,3	12,0			
3,3-17	431	2,0	85,11	7,8	12,0			
3,6-18	399	2,2	78,89	8,0	12,0			
4,3-21	336	2,6	66,42	8,4	12,0			
4,9-24	295	2,9	58,25	8,5	12,0			
4,2-21	339	1,4	66,96	10,0	25,0	SK 92772.1 - 80 LH/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	48 E58-59	
4,7-24	302	1,4	59,68	10,1	25,0	SK 92772.1 - 80 LP/4 - SK 200E-750-340-A (-C)		
						SK 92772.1 - 80 LH/4 - SK 180E-750-340-B (-C)		
						SK 92772.1 - 80 LP/4 - SK 180E-750-340-B (-C)		
1,9-9,4	758	0,8	149,81	5,3	20,0	SK 9016.1 - 80 LH/4 - SK 200E-750-340-A (-C)	44 E64-65	
2,0-9,9	721	0,8	142,41	5,9	20,0	SK 9016.1 - 80 LP/4 - SK 200E-750-340-A (-C)		
2,4-12	590	1,0	116,52	7,5	20,0			
3,1-15	465	1,1	91,77	8,5	20,0	SK 9016.1 - 80 LH/4 - SK 180E-750-340-B (-C)		
3,5-17	412	1,5	81,38	8,8	20,0	SK 9016.1 - 80 LP/4 - SK 180E-750-340-B (-C)		
3,9-20	364	1,6	71,88	9,0	20,0			
4,4-22	324	1,9	63,97	9,0	20,0			
5,4-27	265	2,3	52,44	9,0	20,0			
6,1-31	234	2,6	46,11	9,0	20,0			
6,9-35	207	2,9	40,92	9,0	20,0			
2,9-15	493	0,8	97,36	2,9	20,0	SK 9012.1 - 80 LH/4 - SK 200E-750-340-A (-C)		43 E60-61
3,3-16	436	0,9	86,00	4,2	20,0	SK 9012.1 - 80 LP/4 - SK 200E-750-340-A (-C)		
4,5-23	318	1,3	62,74	5,7	20,0	SK 9012.1 - 80 LH/4 - SK 180E-750-340-B (-C)		
5,1-26	280	1,4	55,17	6,0	20,0	SK 9012.1 - 80 LP/4 - SK 180E-750-340-B (-C)		
5,8-29	248	1,6	48,95	6,2	20,0			
6,8-34	211	1,9	41,65	6,5	20,0			
8,1-41	176	2,3	34,81	6,6	20,0			

Fuente: catalogo de la compañía Norton G1000_IE2_ES_0713, Nomenclatura SK9012.1 80LH4.

5. Diseño y simulación.

En el presente capítulo se realiza el diseño de cada uno de los componentes que hacen parte de la plataforma de movimiento utilizando el software de diseño asistido por computadora CAD Solidworks partiendo principalmente de los planteamientos geométricos - matemáticos encontrados y se realizan los análisis de esfuerzos y desplazamientos de los ensamblajes que componen la plataforma de movimiento y que dieron lugar en la investigación, para localizar los fallos y brindar un mayor factor de seguridad al diseño.

5.1 Diseño de la plataforma de movimiento.

A continuación, se realiza una breve explicación de los pasos seguidos y cómo se aplicaron dichos planteamientos en el diseño de los modelos.

5.1.1 Diseño de la plataforma móvil.

La plataforma móvil se diseñó de acuerdo a los fundamentos matemáticos y geométricos definidos en la Figura 3-4, donde se plantea [$a = 1000mm$] como la distancia de posición entre los vértices para cada cardan.

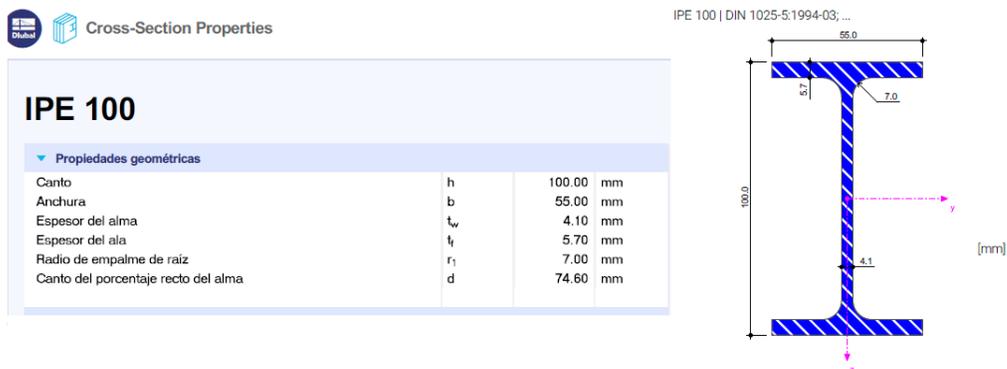
Figura 5-1: Diseño de la plataforma móvil.



Fuente: El autor

Para el diseño de esta plataforma se utilizó el perfil estructural de sección IPE 100 con características geométricas de acuerdo al estándar DIN 1025-5:1994-03; Euronorm 19-57 de perfiles estructurales que se ilustra en la Figura 5-2 y la lámina de espesor 10mm para los soportes del eje central y articulaciones, diseñados con el material Acero estructural al carbono ASTM A36 de acuerdo a la Norma NTC 1920. Se realizó el sub - ensamblaje de la viga lateral y la viga central que están unidas mediante elementos de sujeción de 8mm con paso de rosca 1.25mm al soporte del eje central y los soportes de las articulaciones.

Figura 5-2: Parámetros geométricos perfil IPE 100.

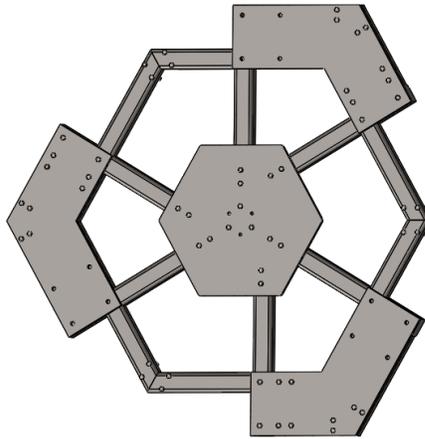


Fuente: <https://www.dlubal.com/es/propiedades-de-la-seccion-transversal/series-ipe-din-1025-5-1994-03-euronorm-19-57.html>

5.1.2 Diseño de la plataforma base.

La plataforma base también se diseñó de acuerdo a los fundamentos matemáticos y geométricos definidos en la Figura 3-4, con la diferencia que se plantea [$a = 1000mm$] como la distancia de posición entre los vértices de unión de las articulaciones a los ejes de cada actuador

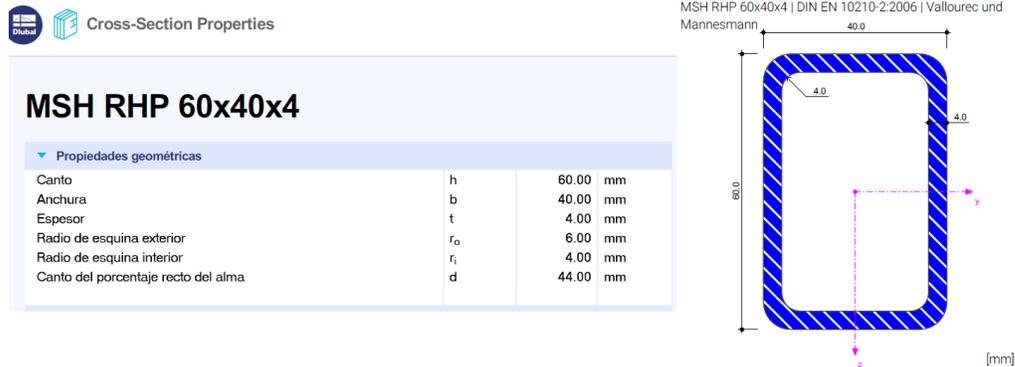
Figura 5-3: Diseño de la plataforma base.



Fuente: El autor

Para el diseño de esta plataforma se utilizó el perfil estructural de sección tubular rectangular con características geométricas de acuerdo al estándar DIN EN 10210-2:2006 - MSH RHP 60x40x4 de perfiles estructurales que se ilustra en la Figura 5-4 y la lámina de espesor 10mm para los soportes del eje central y motorreductores, diseñados con el material de Acero estructural al carbono ASTM A36 de acuerdo a la Norma NTC 1920. Este diseño fue planteado de manera simétrica para que los centros de origen o centros de gravedad de las dos plataformas y los vértices de posición de los ejes de los actuadores y los cardan coincidan. Se realizó el ensamblaje de la estructura principal de la plataforma base con los soportes para el eje central y motorreductores unidos mediante elementos de sujeción de 8mm con paso de rosca 1.25mm.

Figura 5-4: Parámetros geométricos perfil Rectangular 60.40.

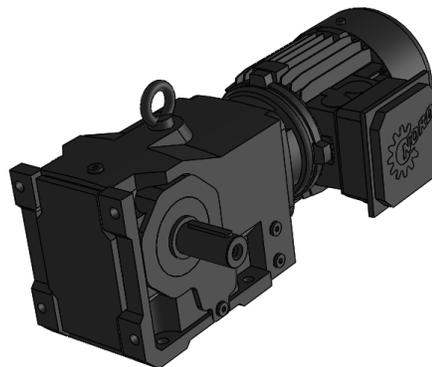


Fuente: <https://www.dlubal.com/es/propiedades-de-la-seccion-transversal/series-ipe-din-1025-5-1994-03-euronorm-19-57.html>

5.1.3 Diseño del motorreductor.

El motorreductor seleccionado para la plataforma, se diseñó respecto al motorreductor seleccionado en la Figura 4-10 y de acuerdo a la información técnica definida por el fabricante, sus dimensiones son necesaria con el fin de ubicar los motorreductores en la plataforma base y determinar tanto la dimensión del mecanismo biela manivela como la dimensión del sistema estructural como se muestra en la Figura 5-5.

Figura 5-5: Diseño del motorreductor.



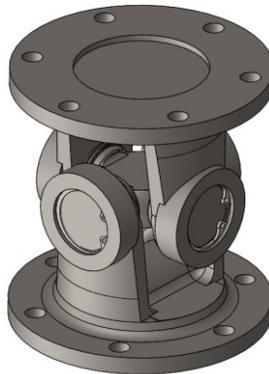
Fuente: El autor

5.1.4 Diseño del cardan.

El cardan se diseñó de acuerdo a los parámetros definidos en la Figura 4-8:

Parámetros geométricos cardan. donde se plantea el diámetro de la brida de 100mm, su función es darle libertad de movimiento a la plataforma móvil para generar los movimientos de pitch y roll de forma que permitan la mayor amplitud de movimiento posible sin perder rigidez. Los rodamientos presentes entre las bridas y la cruceta del cardan fueron modelados como elementos rígidos y la unión entre los rodamientos y la cruceta, fue modelada sin tener en cuenta el roscado de los elementos como se muestra en la Figura 5-6.

Figura 5-6: Diseño del cardan.

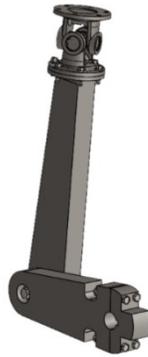


Fuente: El autor

5.1.5 Diseño de mecanismo biela – manivela.

El mecanismo biela manivela se diseñó de acuerdo a los parámetros, definidos en la Figura 4-5, donde se plantea como $[L = 500mm]$ a la distancia entre los centros de rotación de la biela y $[R = 230mm]$ como la distancia entre los centros de rotación de la manivela.

Figura 5-7: Diseño mecanismo biela manivela.

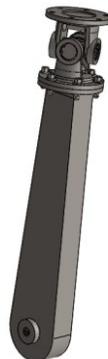


Fuente: El autor

- Diseño de la biela

La biela es el elemento que realiza el movimiento lineal para levantar la plataforma móvil, su longitud se mide desde el eje donde se une a la manivela hasta el centro del cardan, diseñada en su parte superior de manera circular en forma de brida para ser conectada al cardan y este a su vez conectado a la plataforma móvil con los elementos de sujeción de 8mm con paso de rosca 1.25mm y en la parte inferior conectada al eje rotacional de la manivela con un elemento sujeción de 14mm con paso de rosca 1.25mm, diseñada con lamina de espesor 50mm con material Acero estructural al carbono ASTM A36 de acuerdo a la Norma NTC 1920 como se muestra en la Figura 5-8.

Figura 5-8: Diseño de la biela.



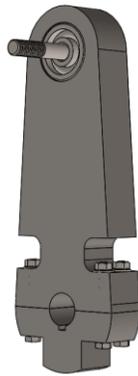
Fuente: El autor

- Diseño de la manivela

La manivela es el elemento más corto del mecanismo, diseñada en dos secciones las cuales se unen por medio de elementos de sujeción de 8mm con paso de rosca 1.25mm en su parte inferior sujetando al eje del motorreductor y convirtiendo su movimiento rotativo en el movimiento lineal de la biela, gracias a su eje rotacional en la parte superior dado por un rodamiento de tamaño 24-15 de referencia AFBMA 20.1 - 24-15 - 6,SI,NC,6_68, diseñada con lamina de espesor 30mm con material Acero estructural al carbono ASTM A36 de acuerdo a la Norma NTC 1920 como se muestra en la Figura 5-9.

Diseño de la manivela.

Figura 5-9: Diseño de la manivela

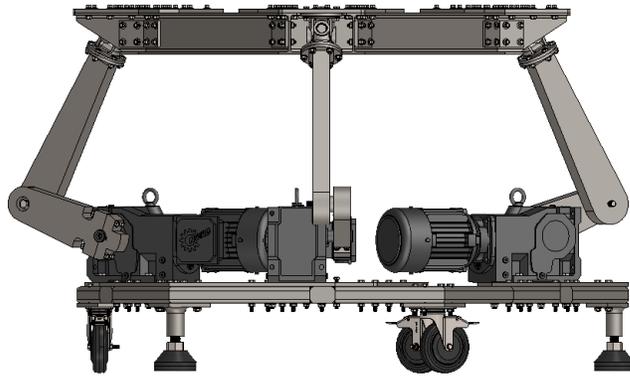


Fuente: El autor

5.1.6 Ensamblaje de la plataforma de movimiento.

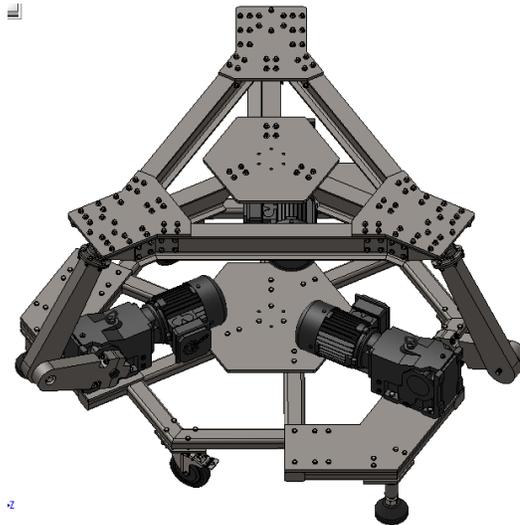
Una vez terminado el diseño de los componentes que hacen parte de la plataforma, se realizó el proceso de ensamblaje general, con los diferentes sub ensamble generados anteriormente como se muestra en la Figura 5-10 y Figura 5-11.

Figura 5-10: Diseño plataforma de movimiento.



Fuente: El autor

Figura 5-11: Diseño plataforma de movimiento.

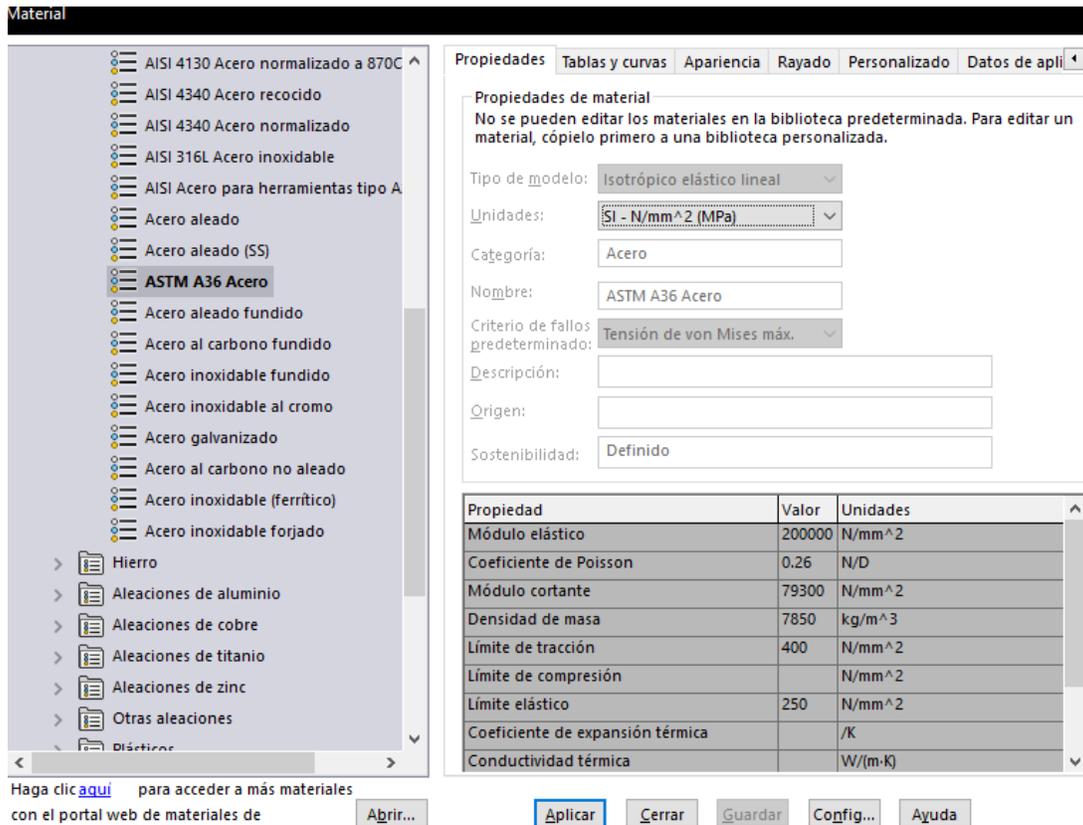


Fuente: El autor

5.2 Simulación de la plataforma de movimiento.

Inicialmente para la simulación se realiza la asignación del material a los diferentes elementos estructurales diseñados que conforman la plataforma, para asignar este material se recurre a la biblioteca de materiales con la que cuenta Solidworks en el Editor de Materiales y se asigna el material elegido anteriormente Acero estructural al carbono ASTM A36 de acuerdo a la Norma NTC 1920 del menú.

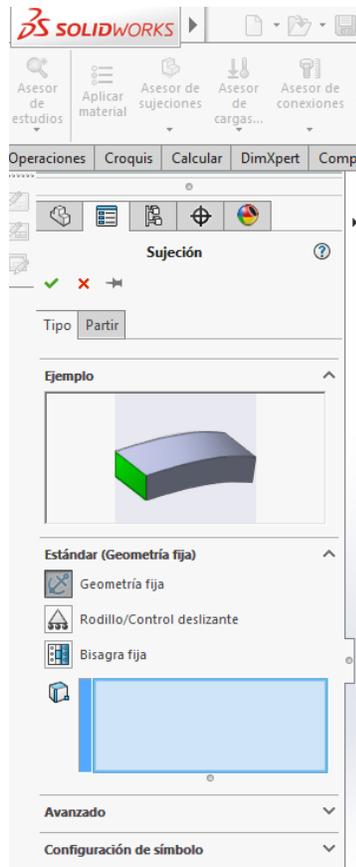
Figura 5-12: Asignación de material Acero al carbono ASTM A36



Fuente: El autor

Para realizar un análisis correcto, se deben aplicar restricciones para estabilizar cada modelo. En la ventana de PropertyManager se selecciona la restricción de acuerdo al funcionamiento que se desee simular (geometría, rodillo, bisagras, etc.) y se seleccionan las caras del elemento que se debe fijar.

Figura 5-13: Asignación tipo de restricción



Fuente: El autor

Seguidamente en la ventana de PropertyManager seleccionamos el tipo de fuerza que se desea simular (fuerza, torsión, gravedad, centrífuga o carga de apoyo), de acuerdo a cada elemento se seleccionan las caras donde se va a aplicar la fuerza y se le asigna la magnitud de acuerdo a la fuerza.

Nota: los resultados de los análisis generados en todos los componentes estructurales de la plataforma se entregarán como anexos dada la complejidad y extenso de sus resultados.

6. Planos y documentación.

En el presente capítulo se presentan los diferentes recursos y documentación técnica creada durante el desarrollo del proyecto compuesta por: Documentos, archivos fuente, anexos, planos de la plataforma de movimiento, necesarios para su posterior fabricación.

6.1 Planos de la plataforma de movimiento.

Una vez finalizada la actividad de diseño y modelado de cada uno de los componentes, ensamblajes y explosionados 3D se realiza la documentación necesaria para el proceso de fabricación. El software de diseño asistido por computadora CAD Solidworks cuenta con una herramienta para crear plantillas, rótulos, y planos 2D donde se pueden observar las vistas de sección, cotas, anotaciones, listas de elementos y materiales en los modelos utilizados en el diseño de la plataforma. Todas las cotas de las dimensiones de los componentes, generadas en los planos están dadas en la unidad de milímetros.

Para esta documentación se crean las plantillas de dibujo siguiendo la norma ISO 126 Serie A para el desarrollo y presentación de información técnica (**Tabla 6-1**).

Tabla 6-1: Dimensiones hojas Norma ISO 126 A.

Norma ISO 126 Serie A		
Formato de hoja de la hoja	Tamaño de hoja en mm	
	Ancho	Alto
A0	1189	841
A1	841	594
A2	594	420
A3	420	297
A4	297	210

Para estas plantillas se crea un rotulo personalizado como se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que contiene la información importante de cada modelo como:

Nombre del dibujante, nombre de quien verifica y aprueba, nombre de quien realiza la fabricación y certifica la calidad del elemento, con sus respectivas firmas y fechas, número de parte y material asignado al elemento, nombre del proyecto al que pertenece y nombre de la empresa a cargo de la ejecución del proyecto con sus respectivos logos, nombre de la parte o elemento y sistema al que pertenece, escala en la que se encuentra el plano, cantidad de partes que se repite el elemento dentro del sistema completo, espacio para revisión y unidades en las que se presentan las cotas del plano (mm, cm, m o in).

Figura 6-1: Rotulo planos plataforma de movimiento

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO:		PARTE: xx
DIBUJ.	Lady Gómez		xx/xx/2020	PLATAFORMA DE MOVIMIENTO 3DOF		SISTEMA: xx
VERIF.						
APROB.	Carlos Gómez					
FABR.						
CALID.				EJECUCION PROYECTO:		REVISION A
No DE PARTE:		MATERIAL:		CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA PARA LA DEFENSA		ESC x:x
xxx	xx					CANT: 1

Fuente: El autor

Es importante mencionar que para el uso de este rotulo se realizó la selección del nombre y diseño del logo representativo del proyecto que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con el fin de distinguir éste de los demás productos creados por la corporación, el nombre elegido para el proyecto de diseño de una plataforma de movimiento con tres grados de libertad ha sido PHOENIX nombre de un ave legendaria que según la mitología griega era de plumaje rojo naranja y tenía la capacidad de quemarse por completo y resurgir de sus propias cenizas, poseía varios dones como la virtud de que sus lágrimas fueran curativas y su increíble fuerza ya que podía cargar hasta cinco veces su peso siendo esta última, la razón por la cual se eligió este nombre.

Figura 6-2: Logo de la plataforma de movimiento



Fuente: El autor

Adicionalmente se crea las listas de los planos generados como la base de la información técnica de la plataforma, agrupados por la abreviación del sistema al que pertenece, con el número de parte, nombre asignado al diseño del componente y formato de hoja en que fue creado, (Tabla 6-2), (

Tabla 6-3), (Tabla 6-4), (Tabla 6-5), (Tabla 6-6), (Tabla 6-7), (Tabla 6-8) y (Tabla 6-9).

Tabla 6-2: Planos plataforma móvil.

10				
Ítem	Abreviación sistema	Número de parte	Nombre de parte	Formato de hoja
1	PM.1	101	Perfil IPE 100 Central	A3
2	PM.1	102	Perfil IPE 100 Central	A3
3	PM.2	201	Perfil IPE 100 lateral a	A3
4	PM.2	202	Perfil IPE 100 lateral a	A3
5	PM.3	301	Perfil IPE 100 lateral b	A3
6	PM.3	302	Perfil IPE 100 lateral b	A3
7	PM.4	401	Perfil IPE 100 medio lateral	A3
8	PM.4	402	Perfil IPE 100 medio lateral	A3
9	PM.5	501	Soporte central IPE 100	A3
10	PM.5	502	Soporte central IPE 100	A3
11	PM.6	601	Soporte articulaciones IPE 100	A3
12	PM.6	602	Soporte articulaciones IPE 100	A3
13	PM.7	701	Unión lateral IPE 100	A3
14	PM.7	702	Unión lateral IPE 100	A3
15	PM.8	801	Ensamblaje viga lateral IPE 100	A2
16	PM.8	802	Ensamblaje viga lateral IPE 100	A2
17	PM.8	803	Ensamblaje viga lateral IPE 100	A2
18	PM.8	804	Ensamblaje viga lateral IPE 100	A2
19	PM.9	901	Explosionado viga lateral IPE 100	A2
20	PM.10	1001	Ensamblaje viga central IPE 100	A2
21	PM.10	1002	Ensamblaje viga central IPE 100	A2
22	PM.11	1101	Explosionado viga central IPE 100	A2
23	PM.12	1201	Ensamblaje plataforma móvil	A1
24	PM.13	1301	Explosionado plataforma móvil	A1

Tabla 6-3: Planos plataforma base.

PB. Plataforma base				
Ítem	Abreviación sistema	Número de parte	Nombre de parte	Formato de hoja
1	PB.1	101	Perfil rectangular 60 4 cent1	A3
2	PB.1	102	Perfil rectangular 60 4 cent1	A3
3	PB.2	201	Perfil rectangular 60 4 cent2	A3
4	PB.2	202	Perfil rectangular 60 4 cent2	A3
5	PB.3	301	Perfil rectangular 60 4 centv	A3
6	PB.3	302	Perfil rectangular 60 4 centv	A3
7	PB.4	401	Perfil rectangular 60 4 med1	A3
8	PB.4	402	Perfil rectangular 60 4 med1	A3
9	PB.5	501	Perfil rectangular 60 4 med2	A3
10	PB.5	502	Perfil rectangular 60 4 med2	A3
11	PB.6	601	Perfil rectangular 60 4 med3	A3
12	PB.6	602	Perfil rectangular 60 4 med3	A3
13	PB.7	701	Perfil rectangular 60 4 med4	A3
14	PB.7	702	Perfil rectangular 60 4 med4	A3
15	PB.8	801	Perfil rectangular 60 4 sup1	A3
16	PB.8	802	Perfil rectangular 60 4 sup1	A3
17	PB.9	901	Perfil rectangular 60 4 sup2	A3
18	PB.9	902	Perfil rectangular 60 4 sup2	A3
19	PB.10	1001	Soporte central 60 4	A3
20	PB.10	1002	Soporte central 60 4	A3
21	PB.11	1101	Soporte motor 60 4	A3
22	PB.11	1102	Soporte motor 60 4	A3
23	PB.12	1201	Ensamblaje plataforma base	A1
24	PB.13	1301	Explosionado plataforma base	A1

Tabla 6-4: Planos plataforma cardan.

C. Cardan				
Ítem	Abreviación sistema	Número de parte	Nombre de parte	Formato de hoja
1	C.1	101	Brida 100	A4
2	C.1	102	Brida 100	A4
3	C.2	201	Cruceta 27	A4
4	C.3	301	Rodillos cruceta 27	A4
5	C.4	401	Tapa cruceta 27	A4
6	C.5	501	Ensamblaje cruceta	A4
7	C.6	601	Ensamblaje cardan	A4
8	C.7	701	Explosionado cardan	A4

Tabla 6-5: Planos biela - manivela.

BM. Biela manivela				
Ítem	Abreviación sistema	Número de parte	Nombre de parte	Formato de hoja
1	BM.1	101	Biela base	A3
2	BM.1	101	Biela base	A3
3	BM.2	101	Biela superior	A3
4	BM.3	301	Manivela	A3
5	BM.4	401	Ensamblaje biela	A3
6	BM.5	501	Explosionado biela	A3
7	BM.6	601	Ensamblaje biela manivela	A3
8	BM.7	701	Explosionado biela manivela	A3

Tabla 6-6: Planos motorreductor.

M. Motorreductor				
Ítem	Abreviación sistema	Número de parte	Nombre de parte	Formato de hoja
1	M.1	101	Eje Motorreductor SK9012.1 80LH4	A4
2	M.2	201	Motorreductor SK9012.1 80LH4	A2
3	M.3	301	Ensamblaje motorreductor biela manivela	A2
4	M.4	301	Explosionado motorreductor biela manivela	A2

Tabla 6-7: Planos soporte pie anti vibratorio.

SP. Soporte pie anti vibratorio				
Ítem	Abreviación sistema	Número de parte	Nombre de parte	Formato de hoja
1	SP.1	101	Base soporte	A4
2	SP.2	201	Goma	A4
3	SP.3	301	Soporte pie	A4
4	SP.4	401	Tornillo pie	A4
5	SP.5	501	Ensamblaje pie soporte	A4
6	SP.6	601	Explosionado pie soporte	A4

Tabla 6-8: Planos soporte rueda.

SR. Soporte rueda				
Ítem	Abreviación sistema	Número de parte	Nombre de parte	Formato de hoja
1	SR.1	601	Soporte rueda	A4
2	SR.2	1001	Ensamblaje rueda	A4
3	SR.3	1101	Ensamblaje soporte rueda	A4

Tabla 6-9: Planos plataforma de movimiento.

PDM. Plataforma de movimiento				
Ítem	Abreviación sistema	Número de parte	Nombre de parte	Formato de hoja
1	PDM.1	101	Ensamblaje plataforma móvil completa	A1
2	PDM.2	101	Explosionado plataforma móvil completa	A1
3	PDM.3	301	Ensamblaje plataforma base completa	A1
4	PDM.4	301	Explosionado plataforma base completa	A1
5	PDM.5	501	Ensamblaje plataforma completa	A0
6	PDM.6	601	Explosionado plataforma completa	A0

6.2 Documentación del proyecto.

La Corporación de Alta Tecnología para la Defensa (CODALTEC) conoce la importancia de documentar cada uno de los pasos del proceso investigativo y los resultados obtenidos de todos los procesos realizados en el diseño y desarrollo de sus proyectos, con el fin de garantizar la reproducibilidad de cada actividad.

Para cumplir con este objetivo cada actividad y sub actividad relacionada a la investigación, modelos, diseños y pruebas realizadas en el desarrollo de este proyecto se redactaron, con el fin de obtener documentos técnicos donde se explique en detalle los puntos más relevantes.

Terminado este proyecto se le entrega a CODALTEC las carpetas correspondientes que contienen los documentos, paquetes de archivos fuente de los modelos y planos de la plataforma de movimiento, además los códigos desarrollados en el lenguaje de programación C++, (Tabla 6-10).

Tabla 6-10: Anexos y documentación técnica plataforma de movimiento.

Ítem	Nombre de carpeta	Número del documento	Formato del documento
1	Análisis y selección de componentes	Componentes plataforma movimiento	.doc
2	Diseño geométrico de la plataforma de movimiento	Diseño geométrico de la plataforma de movimiento.doc	.doc
		Modelo geométrico de la plataforma	.sldprt
3	Diseño cinemático de la plataforma de movimiento	Diseño cinemático de la plataforma de movimiento	.doc
		Modelo matemático cinemática de la plataforma	.m - .fig
4	Diseño geométrico del mecanismo biela-manivela	Diseño geométrico del mecanismo biela-manivela	.doc
		Modelo matemático cinemática mecanismo biela-manivela	.m - .fig
5	Diseño de la plataforma	Diseño de la plataforma de movimiento	.doc
		Diseño estructural plataforma móvil	.sldprt - .sldasm
		Diseño estructural plataforma base	.sldprt - .sldasm
		Diseño cardan	.sldprt - .sldasm
		Diseño biela y manivela	.sldprt - .sldasm
		Diseño motorreductor	.sldprt - .sldasm
		Diseño rueda y soporte	.sldprt - .sldasm
		Ensamblaje plataforma completa	.sldasm
6	Simulación	Simulación plataforma	.doc
7	Diseño de planos	Planos de la plataforma de movimiento	.doc
		Plantillas de dibujo Serie A	.slddrw - .pdf
		Planos de la plataforma de movimiento	.slddrw - .pdf
		Anexo planos plataforma de movimiento	.xlsx
		Logo	.ai - .pdf - .png

7. Conclusiones y recomendaciones.

7.1 Conclusiones.

Se logró el objetivo general del presente proyecto el cual es el diseño de una plataforma de movimiento con tres grados de libertad para los simuladores de la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa.

Se analizaron los fundamentos matemáticos y se diseñó una interfaz utilizando la herramienta software de cálculo matemático Matlab para la implementación de la cinemática inversa y directa con el fin de determinar y visualizar los movimientos de la plataforma en función de las coordenadas de la plataforma móvil y base, las longitudes de las articulaciones, los ángulos pitch y yaw y el desplazamiento en el eje z.

Se realizó el diseño estructural de la plataforma de movimiento teniendo en cuenta las normas de perfiles y selección del material más adecuado para cada componente, ya que el material debe ser comercial en el mercado, ser liviano y resistente a la carga que será sometido sin presentar ninguna de deformación.

Se implementó el uso de la herramienta software de diseño asistido por computadora CAD Solidworks para evaluar las fuerzas y esfuerzos estáticos generados en los componentes estructurales de la plataforma, optimizando el proceso de diseño. La simulación de esfuerzos realizada demuestra que el dimensionamiento del diseño es adecuado y suficientemente robusto para soportar las cargas a las que se verá sometido.

Se elaboró la respectiva documentación técnica (planos de los componentes, ensamblajes y explosionados) con la herramienta software de diseño asistido por computadora CAD Solidworks, siguiendo la norma ISO 126A para su posterior fabricación. El uso de esta

herramienta proporciona facilidades de diseño y permite visualizar el ensamblaje general de los componentes con mayor exactitud.

Se concluyó durante el desarrollo del proyecto, que las plataformas de movimiento, tienen una amplia aplicación en diferentes campos de investigación como lo son: la medicina, biomecánica, mecatrónica, electrónica y que su aplicación no está limitada solo a simuladores.

7.2 Recomendaciones.

Este proyecto solo centra en el diseño de la plataforma de movimiento con tres grados de libertad, sin embargo, la experiencia obtenida durante el desarrollo del proyecto dio como resultado que a partir de esta investigación se pueden proponer distintas investigaciones o proyectos que se podrían realizar en un futuro para fortalecer la investigación realizada.

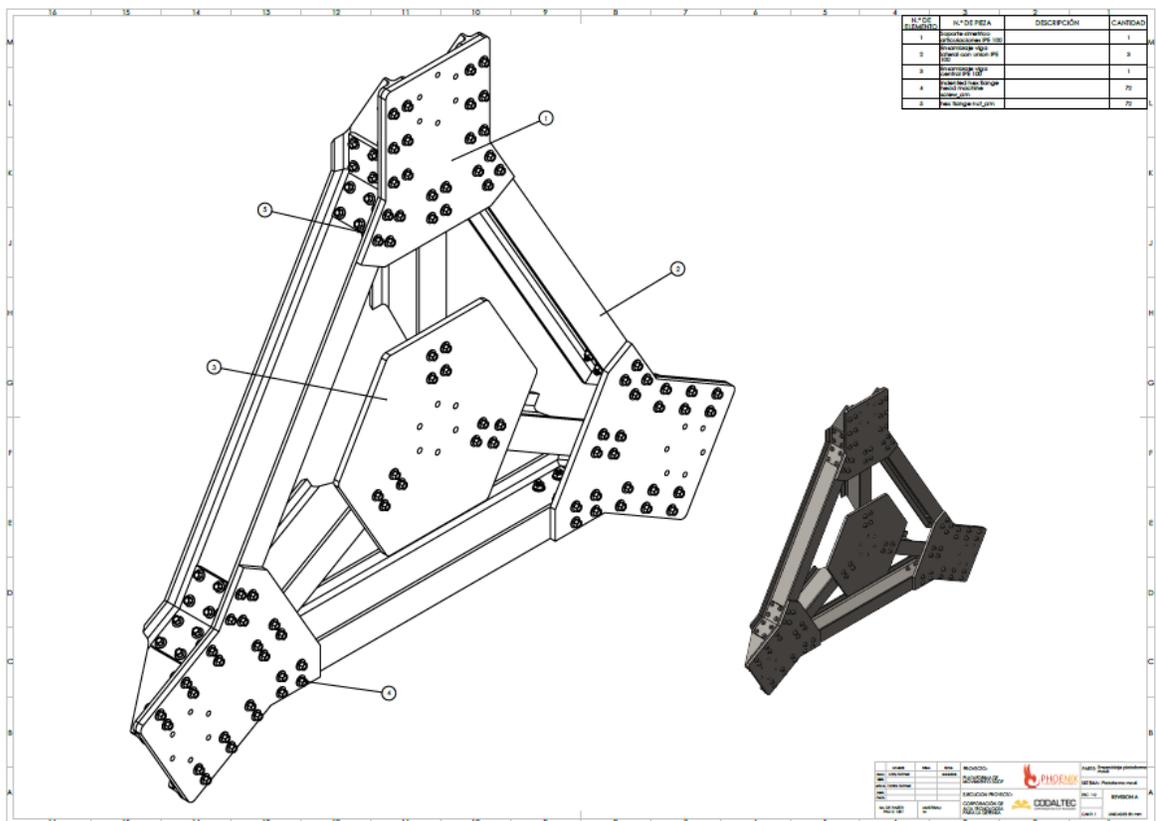
El diseño del sistema de control puede complementar este proyecto, agregando una etapa de potencia para automatizar el movimiento, control de la velocidad y aceleración de los motorreductores, con base en los fundamentos cinemáticos encontrados.

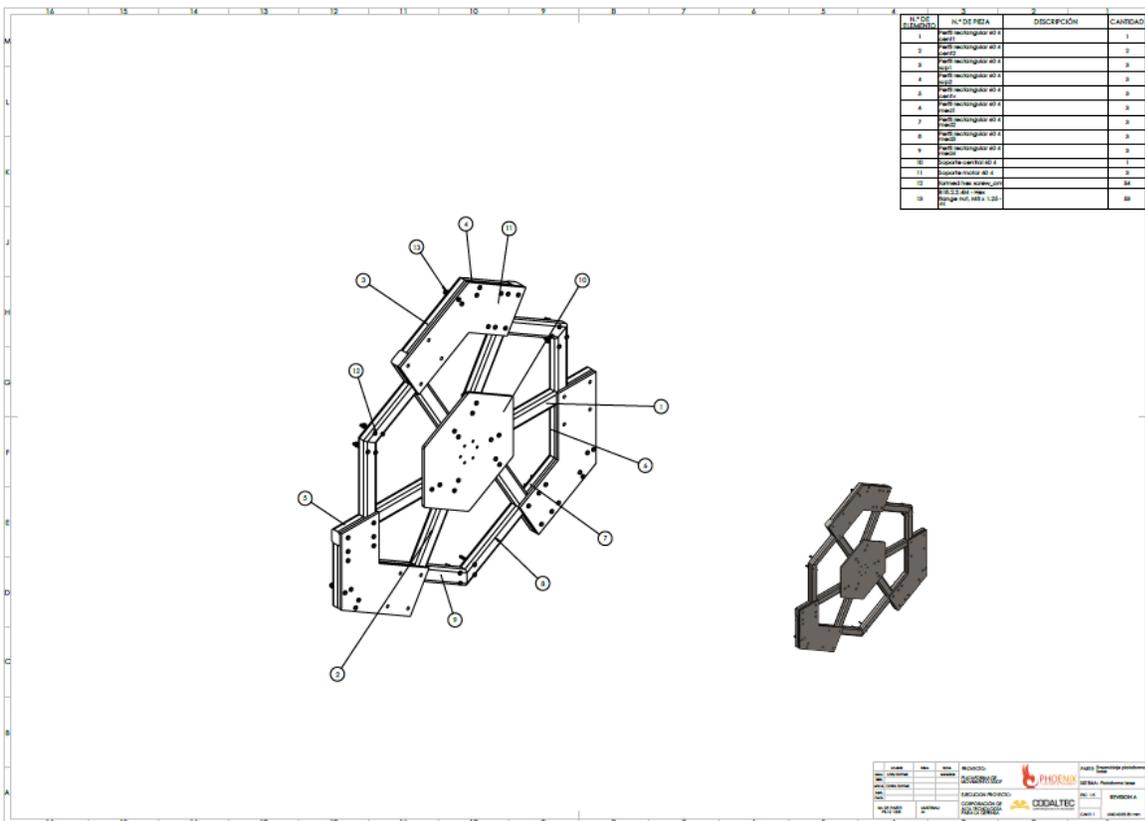
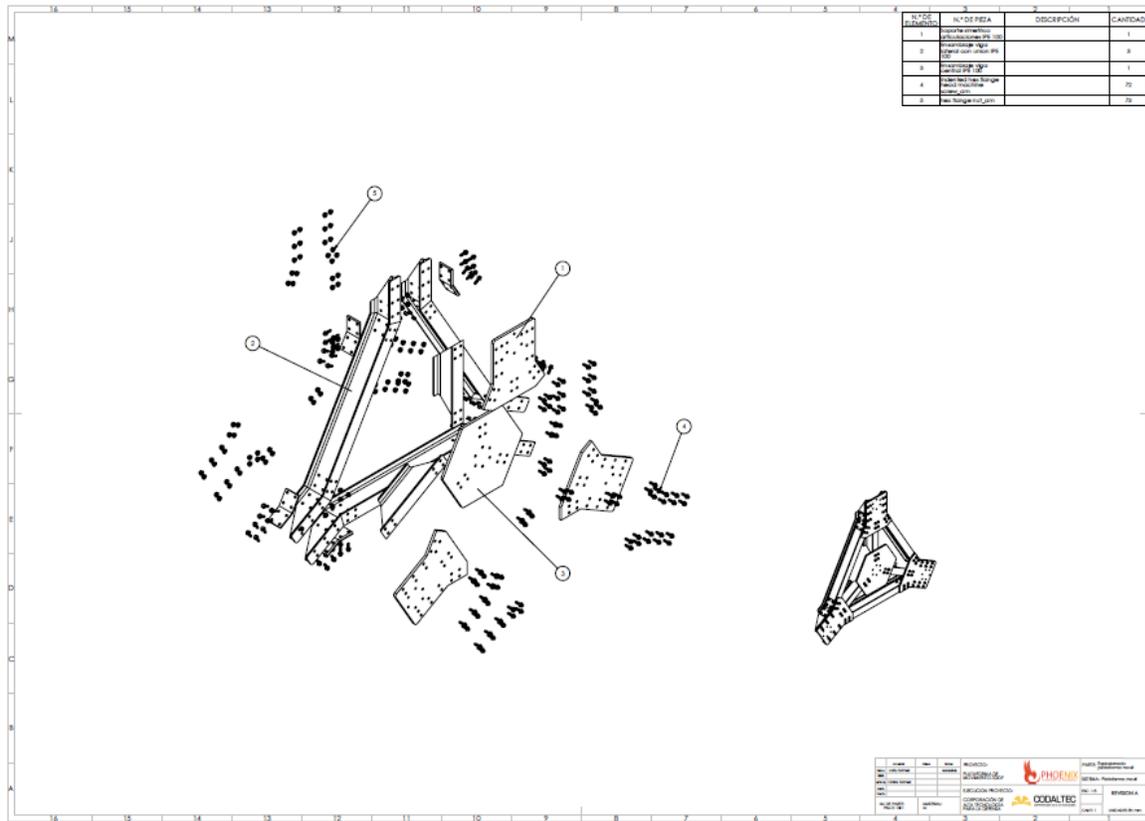
El análisis del espacio de trabajo de la plataforma, puede servir como mejora para determinar las restricciones de movimiento dadas por el diseño de la plataforma y dimensión de cada componente, obteniendo como resultado las trayectorias concretas en las que trabajará la plataforma y evitará posibles interferencias entre los componentes.

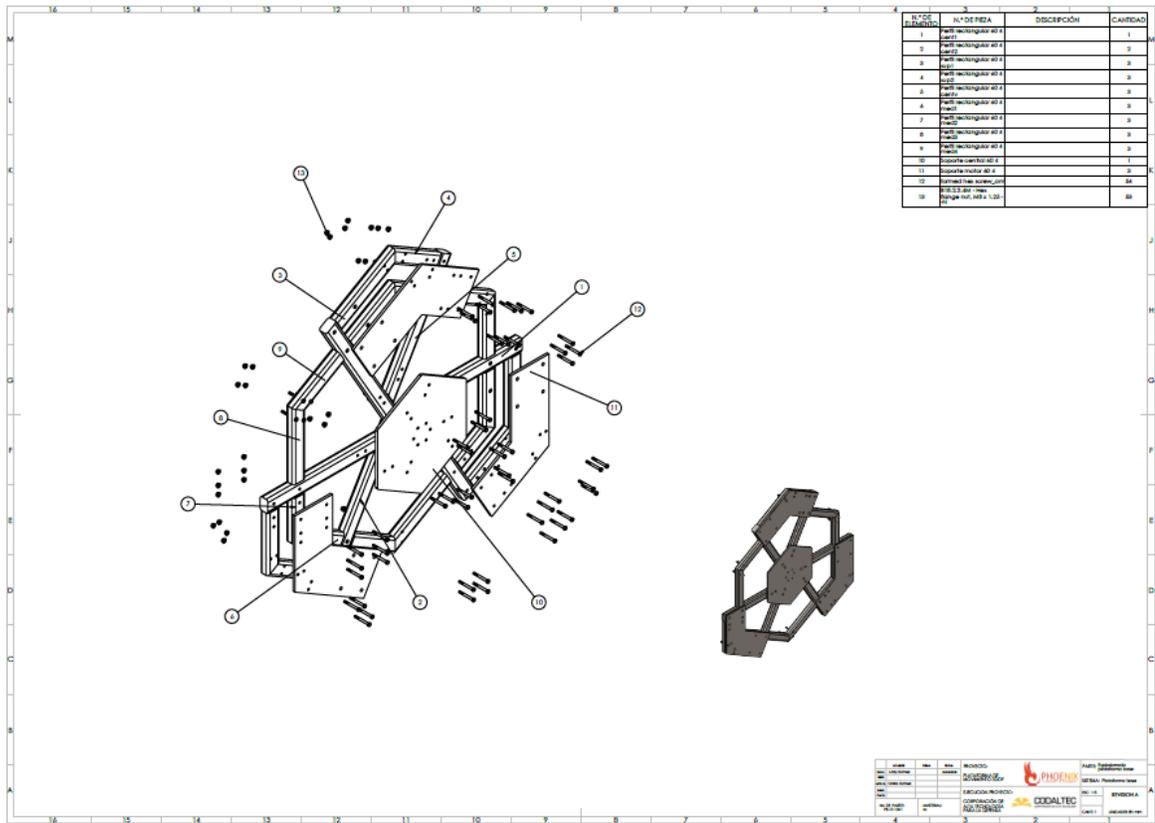
El análisis dinámico se puede extender, determinando los esfuerzos a los que están sometidos los componentes de la plataforma en diferentes posiciones y durante el movimiento, obteniendo como resultado una optimización más profunda del diseño.

El análisis e implementación de un sistema hidráulico como eje central, puede brindar una mayor estabilidad, un movimiento más controlado y suave de la plataforma, teniendo en cuenta el diseño de válvulas de estrangulamiento internas y otros elementos necesarios para sistemas hidráulicos.

A. Anexo: Planos de ensamblaje y explosionado de la plataforma de movimiento.







	4	3	2	1
	N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
F	1	Brida 100		2
F	2	basic internal retaining ring_am		4
F	3	Ensamblaje cruceta		1

F

E

D

C

B

A

A

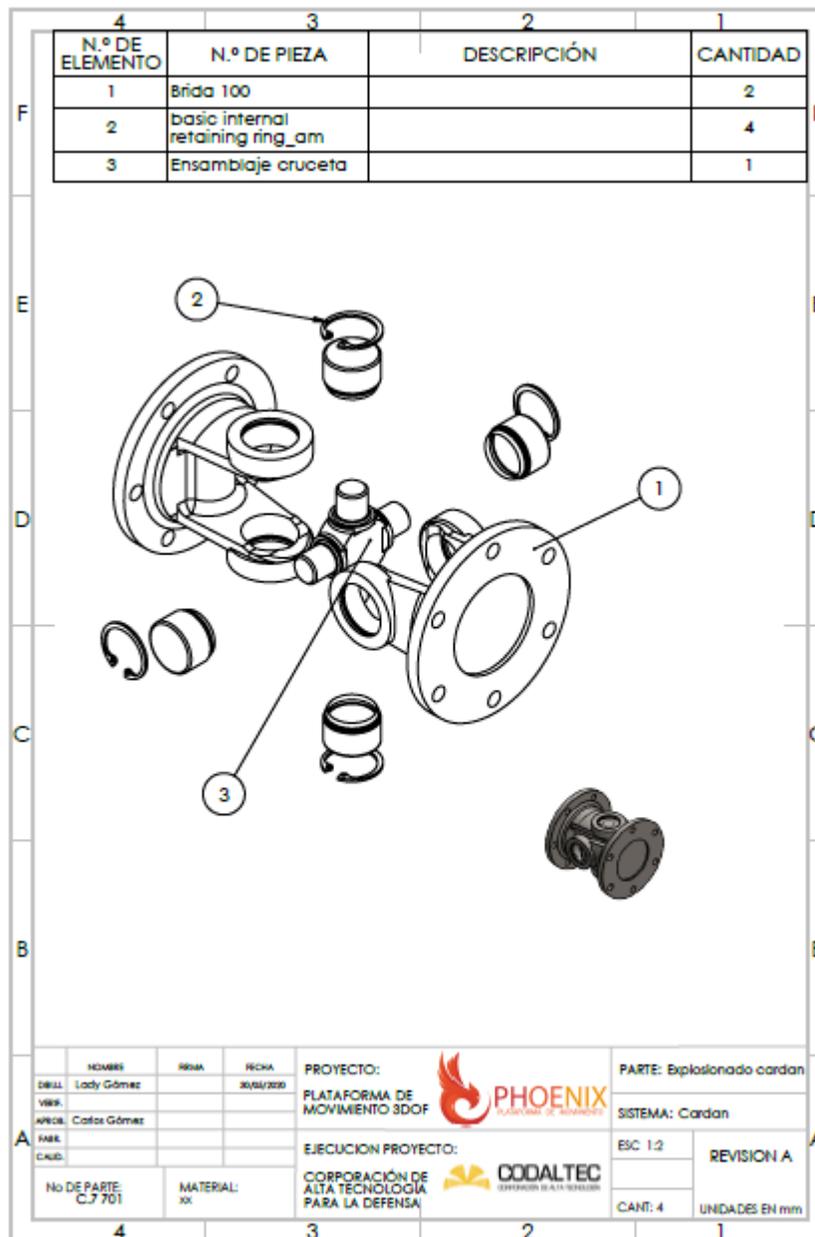
	NOMBRE	REVISIÓN	FECHA	PROYECTO:	PARTE: Ensamblaje cardan
	DESIGN: Lady Gómez		30/05/2020	PLATAFORMA DE MOVIMIENTO 3DOF	SISTEMA: Cardan
	VERIF:			 PHOENIX <small>PLATAFORMAS DE MOVIMIENTO</small>	ESC: 1:1 REVISION A
	APROB: Carlos Gómez				
	FABR:			EJECUCION PROYECTO:	CANT: 4 UNDADES EN mm
	CAUD:			 CODALTEC <small>CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA PARA LA DEFENSA</small>	
	No DE PARTE: C.6 601	MATERIAL: 304			

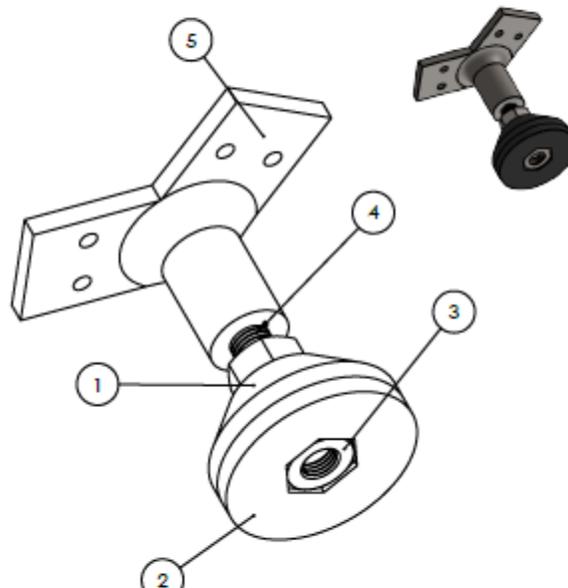
4

3

2

1



	4	3	2	1																	
	N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD																	
F	1	Base soporte		1																	
	2	Goma soporte		1																	
	3	B18.2.4.6M - Heavy hex nut, M20 x 2.5 -- W-5		2																	
	4	Tornillo pie		1																	
	5	Soporte pie		1																	
E																					
D																					
C																					
B																					
A																					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">NOMBRE</td> <td style="width: 15%;">FIRMA</td> <td style="width: 15%;">FECHA</td> </tr> <tr> <td>DRILL: Lady Gómez</td> <td></td> <td>30/04/2020</td> </tr> <tr> <td>VWR:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB: Carlos Gómez</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>HARE:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CAUD:</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	NOMBRE	FIRMA	FECHA	DRILL: Lady Gómez		30/04/2020	VWR:			APROB: Carlos Gómez			HARE:			CAUD:			PROYECTO: PLATAFORMA DE MOVIMIENTO 3DOF PHOENIX EJECUCION PROYECTO: CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA PARA LA DEFENSA CODALTEC	PARTE: Ensamblaje soporte pie SISTEMA: Soporte pie ESC: 1:1 REVISION A CANT: 3 UNDADES EN mm
NOMBRE	FIRMA	FECHA																			
DRILL: Lady Gómez		30/04/2020																			
VWR:																					
APROB: Carlos Gómez																					
HARE:																					
CAUD:																					
	4	3	2	1																	

	4	3	2	1	
	N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	
F	1	Base soporte		1	F
	2	Goma soporte		1	
	3	B18.2.4.6M - Heavy hex nut, M20 x 2.5 -- W-5		2	
	4	Tornillo pie		1	
	5	Soporte pie		1	

	NOMBRE	REVISIÓN	FECHA	PROYECTO:	PARTE: Explosionado soporte pie
	DESIGN: Lady Gómez		30/04/2020	PLATAFORMA DE MOVIMIENTO 3DOF	PHOENIX
	VERIF:				SISTEMA: Soporte pie
	APROB: Carlos Gómez				
A	FABR:			EJECUCIÓN PROYECTO:	ESC: 1:2
	CALIB:			CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA PARA LA DEFENSA	REVISION A
	No DE PARTE: SP.6 601	MATERIAL: XX		CODALTEC	CANT: 3
					UNIDADES EN mm

	4	3	2	1
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN		CANTIDAD
1	Soporte rueda			1
2	Ensamblaje rueda			1

	NOMBRE	Firma	FECHA	PROYECTO:	PARTE: Ensamblaje soporte rueda
	DIJL: Lady Gómez		30/01/2020	PLATAFORMA DE MOVIMIENTO 3DOF	SISTEMA: Soporte pie
	VMS:				
	AVIC: Carlos Gómez			EJECUCION PROYECTO:	ESC: 1:2
	PAIS:			CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA PARA LA DEFENSA	REVISION A
	CAID:				
	No DE PARTE: SR.3 301	MATERIAL: XX			CANT: 3 UNIDADES EN mm

	4	3	2	1
--	---	---	---	---

**B. Anexo: Compromiso de
confidencialidad.**

 CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA	COMPROMISO DE CONFIDENCIALIDAD CODALTEC	Fecha: 2014.02.25
		Cód: AP.GAD-DDI-CO.02
		Versión: 1.0
		Página 1 de 4

(Lugar y Fecha)

AUTORIZACIÓN PARA EL ACCESO A INFORMACIÓN CLASIFICADA N° _____/

YO _____ identificado con documento No. _____ de _____ quien en adelante se denominará "La Parte Receptora", manifiesto que me encuentro debidamente facultado para celebrar el presente ACUERDO y me COMPROMETO A GUARDAR CONFIDENCIALIDAD de todos los procesos, procedimientos, actividades, proyectos que se adelanten de investigación, desarrollo e innovación de la Corporación de Alta Tecnología para la Defensa. Ello incluye datos, diseños, fotografías, dibujos, especificaciones de software, programas de software y muestras entre otros que deba conocer con ocasión de mis funciones.

Para efectos de este compromiso la Corporación de Alta Tecnología Para la Defensa será "La parte Reveladora".

Por el término _____ desde la suscripción de este COMPROMISO mantendré confidencialidad de toda la información que adquiera de cualquier manera y que su uso será exclusivo para la tarea u objetivo asignado conforme las funciones de la Dirección del Proyecto y no será para mi beneficio o propósito personal o de un tercero. Me comprometo a revelar información únicamente a los empleados y terceros que autoricen mis superiores e informaré a quien le revele información de la CONFIDENCIALIDAD sobre la misma.

También me comprometo a mantener a salvo cualquier dibujo, documento, muestra, proceso, datos y a no reproducir ni modificar dichos elementos que pongan en riesgo el proyecto o investigación en curso y las creaciones amparadas por la propiedad intelectual.

Cualquier vulneración de confidencialidad la comunicaré en forma inmediata a mi superior que tenga bajo su cargo la Dirección del Proyecto _____.

Declaro conocer la Política Ministerial establecida en la Directiva Permanente No.19 de 2008 o norma que la modifique, que establece: "...el titular de los derechos de propiedad intelectual y demás derechos sobre las Creaciones y los Activos Intangibles creados o desarrollados por sus funcionarios en ejercicio de sus funciones o con informaciones conocidas o utilizadas para ello,...." serán de propiedad del Ministerio de Defensa-CODALTEC

Igualmente me comprometo a cumplir con las siguientes Clausulas:

CLÁUSULA PRIMERA - OBLIGACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD: En cumplimiento de la obligación de confidencialidad, la Parte Receptora deberá:

 CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA	COMPROMISO DE CONFIDENCIALIDAD CODALTEC	Fecha: 2014.02.25
		Cód: AP.GAD-DDI-CO.02
		Versión: 1.0
		Página 2 de 4

- a) Garantizar la más estricta reserva respecto de la información financiera, técnica, bases de datos, proveedores, *know how*, entre otros, entregada por la Parte Reveladora en el marco mencionado, y advertir de dicho deber de confidencialidad y secreto a cualquier persona que por su relación con él, deba tener acceso a dicha información para el correcto cumplimiento de sus obligaciones.
- b) Abstenerse de reproducir, modificar, hacer pública o divulgar a terceros la información objeto del presente acuerdo, sin previa autorización escrita y expresa de la parte Reveladora.
- c) Adoptar, respecto de la información objeto de este acuerdo, las medidas de seguridad que garanticen la confidencialidad y no divulgación de la información entregada por parte de la parte Reveladora.

CLÁUSULA SEGUNDA - CONSECUENCIAS DE INCUMPLIMIENTO: Quién firma el presente acuerdo de confidencialidad, se sujetará a través de la suscripción del presente compromiso, a las acciones legales que la parte Reveladora pueda ejercer frente al incumplimiento del mismo, de esta manera si la parte Reveladora demuestra que con su actuación se vulneran los derechos, podrá ejercer las acciones civiles, penales y administrativas que le permitan restablecer su situación y la indemnización del daño causado según lo determinen las autoridades competentes que conozcan de las acciones legales que se adelanten.

CLÁUSULA TERCERA – DURACIÓN: La Parte Receptora de la información se compromete a mantener el compromiso de confidencialidad respecto a la información y material entregado por la Parte Reveladora durante el periodo de 5 años o hasta tanto se acuerde que se hará pública total o parcialmente.

CLAUSULA CUARTA - INFORMACION SOBRE LA QUE NO RESULTA APLICABLE LA CONFIDENCIALIDAD

La obligación de confidencialidad que asume la Parte Receptora no alcanza a aquella información que:

- 4.1 *Sea de dominio público;*
- 4.2 *Se encuentre en posesión de La Parte Receptora o de terceros con anterioridad a la celebración del presente acuerdo de confidencialidad, que sea de conocimiento público y siempre que la misma se haya obtenido de manera lícita;*
- 4.3 *Aquella que por mandato judicial o administrativo deba ser divulgada;*
- 4.4 *Aquella que fuera de conocimiento de las autoridades competentes y entidades supervisoras y que tengan carácter de información pública; y,*
- 4.4 *Toda aquella información que por intermedio de analistas económicos o instituciones financieras se pueda obtener.*

 CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA	COMPROMISO DE CONFIDENCIALIDAD CODALTEC	Fecha: 2014.02.25
		Cód: AP.GAD-DDI-CO.02
		Versión: 1.0
		Página 3 de 4

CLÁUSULA QUINTA - SOLUCIÓN DE CONFLICTOS: En caso de cualquier conflicto o discrepancia que pueda surgir en relación con la interpretación y/o cumplimiento del presente acuerdo, las partes se someten expresamente a lo dispuesto por la ley colombiana vigente.

Suscribo el presente COMPROMISO en mi calidad de empleado CODALTEC, en dos (2) ejemplares en la ciudad de _____ a los ___ días del mes de _____ de 201_

Certifico haber sido notificado sobre las implicaciones jurídicas que tipifica la divulgación no autorizada de información clasificada, de acuerdo a la legislación vigente y su sanción penal y/o disciplinaria. Como rezan al respaldo de la hoja.

Post-firma

Firma (GRADO, NOMBRE Y APELLIDOS COMPLETOS)
Documento de Identificación (cédula, pasaporte)

Fotografía

Huella

PROMESA DE RESERVA

 CORPORACIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA	COMPROMISO DE CONFIDENCIALIDAD CODALTEC	Fecha: 2014.02.25
		Cód: AP.GAD-DDI-CO.02
		Versión: 1.0
		Página 4 de 4

Fundamento Jurídico –

Código Penal (Ley 599 de 2000) Artículos 194, 196, 308 y 463.

CÓDIGO PENAL (Ley 599 de 2000). TITULO X, DELITOS CONTRA EL ORDEN ECONOMICO SOCIAL

CAPITULO PRIMERO, Del acaparamiento, la especulación y otras infracciones; Artículo 308. Violación de reserva industrial o comercial. El que emplee, revele o divulgue descubrimiento, invención científica, proceso o aplicación industrial o comercial, llegados a su conocimiento por razón de su cargo, oficio o profesión y que deban permanecer en reserva, incurrirá en prisión de dos (2) a cinco (5) años y multa de veinte a dos mil (2.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes.

En la misma pena incurrirá el que indebidamente conozca, copie u obtenga secreto relacionado con descubrimiento, invención científica, proceso o aplicación industrial o comercial.

La pena será de tres (3) a siete (7) años de prisión y multa de cien (100) a tres mil (3.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes, si se obtiene provecho propio o de tercero.

CAPITULO SEGUNDO, De los delitos contra la seguridad del Estado

Artículo 463. Espionaje. El que indebidamente obtenga, emplee o revele secreto político, económico o militar relacionado con la seguridad del Estado, incurrirá en prisión de cuatro (4) a doce (12) años.

CÓDIGO PENAL (Ley 599 de 2000) Título III Capítulo VII Artículo 194. DIVULGACION Y EMPLEO DE DOCUMENTOS RESERVADOS.

El que en provecho propio o ajeno o con perjuicio de otro divulgue o emplee el contenido de un documento que deba permanecer en reserva, incurrirá en multa, siempre que la conducta no constituya delito sancionado con pena mayor.

Artículo 196. VIOLACION ILICITA DE COMUNICACIONES O CORRESPONDENCIA DE CARACTER OFICIAL. El que ilícitamente sustraiga, oculte, extravíe, destruya, intercepte, controle o impida comunicación o correspondencia de carácter oficial, incurrirá en prisión de tres (3) a seis (6) años. La pena descrita en el inciso anterior se aumentará hasta en una tercera parte cuando la comunicación o la correspondencia esté destinada o remitida a la Rama Judicial o a los organismos de control o de seguridad del Estado.

CÓDIGO DE PROCEDIMIENTO PENAL. (Ley 906 de 2003) Artículo 383 – OBLIGACIÓN A RENDIR TESTIMONIO. Toda persona está obligada a rendir, bajo juramento, el testimonio que se le solicite en el juicio oral y público o como prueba anticipada, salvo las excepciones constitucionales y legales.

Artículo 385. EXCEPCIONES CONSTITUCIONALES. Nadie podrá ser obligado a declarar contra sí mismo o contra su cónyuge, compañera o compañero permanente o parientes dentro del cuarto grado de consanguinidad o civil, o segundo de afinidad

MANUAL DE CONTRAINTELIGENCIA FF.MM. 2-6 Reservado Segunda Edición de 2002. Segunda Parte. Seguridad Militar. Capítulo I sección C. establece los grados para la clasificación de Seguridad de los documentos e información militar: Ultrasecreto – Secreto – Reservado – Confidencial y Restringido

Bibliografía.

Antonio Benito Del Buono González. (Julio de 2016). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de

<http://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/2936/Simulador%20de%20conduccion%20con%20actuadores%20neumaticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cristian Leonardo Peña Chávarro, C. J. (2019). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/11676/5/T08821.pdf>

Cromwell Steven Anchante Guimaraes. (Noviembre de 2009). Obtenido de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/1061/ANCHANTE_GUIMARAES_CROMWELL_PLATAFORMA_STEWART_GOUGH.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Daniel Andres Ramirez Rodríguez. (2010). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/3185/1/danielandresramirezrodriguez.2010.pdf>

Diego Alberto Martínez Castellanos. (2012). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/16728/1/145391.pdf>

Francisco Javier Villate. (25 de Junio de 2015). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/50951/1/74371282.2015..pdf>

Ignacio Plasencia Jara. (Septiembre de 2017). Obtenido de <https://gredos.usal.es/handle/10366/135348>

Jesús J. Villarroel Graterol. (2011). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12755/Proyecto_Final_de_Carrera_Jesus_Javier_Villarroel_Graterol.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Jhonattan Didier Rueda Florez. (2008). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/198/digital_16405.pdf?sequence=1&isAllowed=y

John Andrés Gómez Portilla, J. V. (s.f.). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/3311/2/GomezPinillaJohnAndres2011.pdf>

- José Luis Burrueco Jiménez. (2016). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <http://calderon.cud.uvigo.es/bitstream/handle/123456789/141/BurruecoJimenez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kevin Mínguez Olivero. (Septiembre de 2014). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/349?show=full>
- Mahecha, J. (08 de Mayo de 2015). (El espectador) Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <https://www.elespectador.com/tecnologia/era-de-los-robots-universidades-colombianas-articulo-559529>
- Marcelo Miguel Orihuela Rojas. (Octubre de 2014). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5993/ORIHUELA_MARCELO_DISE%c3%91O_MECANISMO_PARALELO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Natalia Ximena Alvarez Gonzales, E. P. (2011). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1921/14/UPS-CT002354.pdf>
- Nisbett, R. G. (s.f.). *Diseño en ingeniería mecánica de shigley* (9na ed.). Mc Graw Hill.
- P.E, R. L. (s.f.). *Diseño de elementos de maquinas* (4ta ed.). Pearson educacion.
- Rafael Cisneros Limón. (2006). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/37613187_Modelo_Matematico_de_un_Robot_Paralelo_de_Seis_Grados_de_Libertad
- Roberto Patricio Arias Guzmán. (2013). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5896/1/CD-4728.pdf>
- Uriel Osiris Arévalo López, J. A. (2013). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/79454.pdf>
- William Zamir Jr. Muñoz Camelo, J. D. (2014). Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/718/Diseno%20mecanico%20de%20un%20robot%20de%20arquitectura%20paralela%20tipo%20delta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>