UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA

DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES INDESEADAS EN UN ROBOT PARALELO Y DISEÑO DE SOLUCIÓN.

Presentado Por:

JORGE ANDRES MACIAS

Cód. 200522741

JUNIO 2011

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES INDESEADAS EN UN ROBOT PARALELO Y DISEÑO DE SOLUCIÓN.

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO COMO
INGENIERO MECÁNICO

Presentado Por:
JORGE ANDRES MACIAS
Cód. 200522741

ASESOR: NICOLÁS OCHOA

M.Sc. Ingeniería Mecánica

CO-ASESOR: LUIS ERNESTO MUÑOZ

PhD Ingeniería de Sistemas Mecánicos

BOGOTÁ, COLOMBIA
JUNIO del 2011

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 6

1.1. OBJETIVOS 8

1.1.1. Objetivo General 8

1.1.2. Objetivos Específicos 8

1.2. ESTADO DEL ARTE 9

1.2.1. Robótica 9

1.2.2. Robots Paralelos 12

1.2.3. Diseño Actual de la Plataforma Stewart UniAndes 13

1.3. DIAGNÓSTICOS 14

1.3.1. Método Propuesto 14

1.4. TIPO DE TOLERANCIAS 15

2. DIAGNÓSTICO Y CARACTERIZACIÓN DE LA PLATAFORMA UNIANDES 17

2.1. DISEÑO DEL PROTOCOLO DE DIAGNÓSTICO 17

2.1.1. Objetivos del Diagnóstico 17

2.1.2. Diseño de la Inspección Mecánica 18

2.1.3. Adquisición de Datos 21

2.1.4. Desarrollo del Plan de Prueba 25

2.1.5. Interpretación de Datos 29

2.1.6. Conclusión y Recomendaciones 31

2.1.7. Plan de Acción Correctiva 32

2.2. RESULTADOS DEL PROTOCOLO DE DIAGNÓSTICO 33

2.2.1. Resultados Inspección Mecánica 33

2.2.2. Resultados del Plan de Prueba 37

3. SELECCIÓN DE SOLUCIÓN 41

3.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA 41

3.2. RESTRICCIONES DE LA SOLUCIÓN 41

3.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN 42

3.4. PROPUESTA 1- Unión Compartida Superior (Diseño Previo) 43

3.4.1. Análisis de Grados de Libertad del Mecanismo 43

3.4.2. Modificaciones Propuestas 44
3.4.3. Viabilidad del Proyecto 45
3.5. PROPUESTA 2- Unión Individual Superior 46
3.5.1. Análisis de Grados de Libertad 46
3.5.2. Modificaciones Propuestas 47
3.5.3. Viabilidad del Proyecto 48
3.6. PROPUESTA 3- Unión Individual Superior con Reubicación de Elementos 49
3.6.1. Análisis de Grados de Libertad 49
3.6.2. Modificaciones Propuestas 50
3.6.3. Viabilidad del Proyecto 51
3.7. PROPUESTA SELECCIONADA 52
3.7.1. Simulación Propuesta seleccionada 53
4. DISEÑO DE SOLUCION 55
4.1. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS 57
4.2. SELECCIÓN DE EJE 60
4.3. ENSAMBLE 65
5. CONCLUSIONES 66
5.1. DIAGNÓSTICO 66
5.2. DISEÑO DE SOLUCION 67
6. TRABAJO FUTURO 68
6.1. APLICACIONES DEL PROTOCOLO 68
6.2. PLATAFORMA STEWART UNIANDES 69
7. BIBLIOGRAFIA 70
8. ANEXOS 72
8.1. ANEXO 1. Protocolo de Seguridad Plataforma Stewart 72
8.2. ANEXO 2. Planos de Ingeniería 74

Lista de Figuras

Figura 1. Plataforma Stewart Universidad de los Andes 7
Figura 2. Cronología de la Tecnología robótica 9
Figura 3. Robots de primera generación 10
Figura 4. Robot cuarta generación 11
Figura 5. Robot Móvil [Robotica] 12
Figura 6. Robot Zoomórfico [Robotica] 12
Figura 7. Robot Androide [Coleman] 12
Figura 8. Robot Hibrido [Robotica] 12
Figura 9. Robot Poli-articulado [Robotica] 12
Figura 10. Plataforma Móvil 14
Figura 11. Actuadores Lineales 14
Figura 13. Unión Inferior 14
Figura 12. Unión Conjunta Superior 14
Figura 14. Tolerancia lineal 15
Figura 15. Solución a tolerancia lineal 16
Figura 16. Tolerancia angular 16
Figura 17. Solución a tolerancia angular 16
Figura 18. Prueba de Conexión YTerm 19
Figura 19. Ejes usados por el OptiTrack 22
Figura 20. Unidad Inercial Barnecle 23
Figura 21. Dinamómetro Electrónico 23
Figura 22. Instrumentación sistema optitrack 24
Figura 23. Dirección fuerza aplicada 25
Figura 24. Disposición prueba estática 26
Figura 25. Prueba Dinámica 27
Figura 26. Volumen de tolerancias, prueba estática 29
Figura 27. Ejemplo del método de diagnóstico basado en vibraciones [Leonard] 31
Figura 28. Cruceta tolerancia entre ejes de la cruceta (Fotografías sobrepuestas para comparación). 33
Figura 29. Vista superior unión superior 34
Figura 30. Conteo de Uniones y de Cuerpos 34
Figura 31. Simulación Plataforma Stewart Actual 36
Figura 32. Simulación Plataforma Actual con Tolerancias de Ensamble 36
Figura 33. Modificación propuesta para uniones superiores. Izquierda: Diseño original, Derecha: Sistema propuesto con mayor robustez. 43
Figura 34. Propuesta unión individual superior 46
Figura 35.Propuesta unión individual con reubicación de elementos. 49
Figura 36. Simulación desplazamiento vertical 53
Figura 37. Simulación rotación en Z. 53
Figura 38. Simulación rotación en X. 54

Figura 39. Unión Universal Seleccionada 55
Figura 40. Diseño de unión rotacional 56
Figura 41. Rodamiento de rodillos cónicos. [Koyo] 57
Figura 42. Dirección de fuerza axial y fuerza radial [Koyo] 58
Figura 43. Disposición de los rodamientos 59
Figura 44. Diagrama del análisis axial. 61
Figura 45. Concentradores de Esfuerzos. [Gonzáles] 62
Figura 46. Diagrama de cargas 62
Figura 47. Diagrama de Momentos 63
Figura 48. Diagrama de esfuerzo cortante 63
Figura 49. Mantenimiento basado en condiciones 68

Lista de Tablas

Tabla 1. Conteo de Grados de Libertad Disponibles 35
Tabla 2. Conteo de Grados de Libertad Restringidos. 35
Tabla 3. Análisis de Restricciones Propuesta 1 44
Tabla 4. Análisis de Restricciones Propuesta 2 47
Tabla 5. Análisis de Restricciones Propuesta 3 50
Tabla 6. Viabilidad de Propuestas 52
Tabla 7. Lista de Piezas 57
Tabla 8. Resultado de análisis de esfuerzos 64
Tabla 9. Orden de ensamble 65

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Programación de prueba segmentada 28
Gráfico 2. Acople de pruebas dinamicas. 28
Gráfico 3. Interpretación de tolerancias 30
Gráfico 4. Resultado de tolerancias 37
Gráfico 5. (a) Espectrograma en posición angular en el barrido de frecuencia en el eje X. (b) Espectrograma en posición angular en el barrido de frecuencia en el eje Y. (c) Espectrograma en posición angular en el barrido de frecuencia en el eje Z. 38
Gráfico 6. (a) Espectrograma aceleración angular en el barrido de frecuencia en el eje X. (b) Espectrograma aceleración angular en el barrido de frecuencia en el eje Y. (c) Espectrograma aceleración angular en el barrido de frecuencia en el eje Z. 39
Gráfico 7. Comportamientos particulares en los espectrogramas 40
Gráfico 8. Esfuerzos axiales 61

1. INTRODUCCIÓN

Precisión en ingeniería se describe como la capacidad de un sistema de replicar un resultado en acciones realizadas bajo las mismas condiciones [U.N.P.]. El desarrollo de tecnologías de precisión se ha convertido en una prioridad en los estudios en ingeniería. En el área de la dinámica de maquinaria los avances en tecnología se han dirigido hacia sistemas controlados que produzcan resultados de precisión. Una aplicación específica de estos estudios es la robótica, donde diferentes necesidades de sistemas de precisión garantizan el comportamiento correcto del sistema.

La robótica, según la Real Academia Española de la Lengua, es el estudio de mecanismos que realizan operaciones en sustitución de personas [R.A.E]. Ésta es un área de interés estudiada por sus múltiples aplicaciones en la industria, específicamente en trabajos donde la mano de obra no cumple con la precisión exigida. Por esta razón se desea enfocar este estudio en el área para al mejoramiento de los diseños robóticos y su optimización en desempeño. 'Los robots son máquinas en las que se integran componentes mecánicos, electrónicos y de comunicaciones' [Ollero]. Debido a que la fabricación de un robot es una actividad multidisciplinaria, existen varios frentes desde los cuales se puede abordar la optimización de su diseño. Una categoría específica de estos sistemas son los robots paralelos, los cuales se caracterizan por tener, normalmente, entre tres o seis controladores que producen el movimiento.

El robot paralelo estudiado en este trabajo entra en la categoría Robot Plataforma Stewart, el cual cuenta con seis controladores que permiten movimiento de seis grados de libertad. Los robots paralelos son muy precisos en sus movimientos; además, la relación entre el peso de la estructura y la capacidad de carga es baja, lo que hace atractiva esta estructura para incorporarla a diferentes sistemas mecánicos. La precisión en el movimiento es importante en trabajos donde los rangos de incertidumbre son críticos y delicados. Por esta razón se deben evitar las vibraciones no deseadas en el sistema. Para lograr esto, la estructura del robot debe tener tolerancias estrictas en sus uniones, de esta forma no generando vibraciones u otros movimientos aparte de los controlados. Exigencias en estos

sistemas requieren minimizar las tolerancias, lo que lleva la tecnología a sistemas robustos en su estructura mecánica.

Se debe considerar que con el paso del tiempo los mecanismos presentan desgastes en sus componentes que dan como resultado problemas de vibración. Para detectar el estado del sistema se deben diseñar una serie de actividades que permitan diagnosticar el estado de los componentes. Se deben caracterizar los elementos en su ventana de operación, considerando tanto su comportamiento estático como su comportamiento dinámico. La evaluación del sistema debe realizarse de forma sistemática, lo que significa que se debe realizar de forma que sea cuantificable y repetible. Para esto se diseñará un protocolo que permita evaluar el estado de los componentes en un robot paralelo y se propondrán soluciones que permitan el correcto comportamiento del sistema.

El protocolo se implementará al robot paralelo Plataforma Stewart UniAndes (Figura 1) que actualmente presenta vibraciones. Se tiene como antecedente el comportamiento estructural indeseable, documentado en proyectos anteriores, causado por un exceso en tolerancia y manifestándose en vibraciones cuando realiza tareas dinámico. El diseño del protocolo caracterizará estas tolerancias y las vibraciones que está produciendo. Gracias a esto, será posible detectar los componentes que deben ser modificados para garantizar el comportamiento estructural y el correcto cumplimiento de los requisitos de un sistema de precisión. Con esta información se diseñará una solución que permita minimizar o eliminar este comportamiento indeseado.

Figura 1. Plataforma Stewart Universidad de los Andes

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Caracterizar las vibraciones indeseadas causadas por las uniones en el robot paralelo Plataforma Stewart y diseñar una solución para mejorar la precisión de los movimientos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un protocolo para diagnosticar las magnitudes de las tolerancias permitidas en el movimiento controlado de la Plataforma Stewart, que incluya pruebas dinámicas y estáticas.

- Implementar el protocolo para diagnosticar las magnitudes de las tolerancias que está presentando la plataforma en el sus movimientos programados.

- Calcular y diseñar una modificación a la Plataforma Stewart para reducir las tolerancias en el movimiento controlado.

1.2. ESTADO DEL ARTE

Antes de empezar el análisis de vibraciones es importante revisar las tecnologías que se encuentran en la actualidad y tener un contexto de los temas a investigar. Se debe conocer el estado del arte en el área de la robótica y como han llegado a ser tan importantes los robots paralelos en la industria. Esto permite entender los funcionamientos esenciales de estos sistemas para luego diagnosticar cuando un comportamiento es adecuado o insatisfactorio. Para esto, se debe tener conocimiento sobre el estado del arte en métodos de diagnóstico.

1.2.1. Robótica

El estudio de la robótica ha sido un campo muy estudiado ya que ha permitido a las industrias realizar productos que no son posibles a través de mano de obra. Los robots han remplazado muchas operaciones del ser humano, especialmente los casos donde las capacidades físicas humanas son insuficientes. Los robots realizan trabajos donde una o varias de las siguientes son necesarias: uso de fuerza, acciones repetitivas o actividades de precisión. En la actualidad existen dos sistemas para categorizar los robots, según su cronología o según su arquitectura. A continuación se revisarán las categorías de estos dos sistemas.

El primer sistema de categorizar es según cronología; a continuación podemos ver en la figura 2 que muestra una línea de tiempo de la evolución del robot [Tachi,1984] y como fue la evolución de ser teórico a ser asequible a económicamente posible:

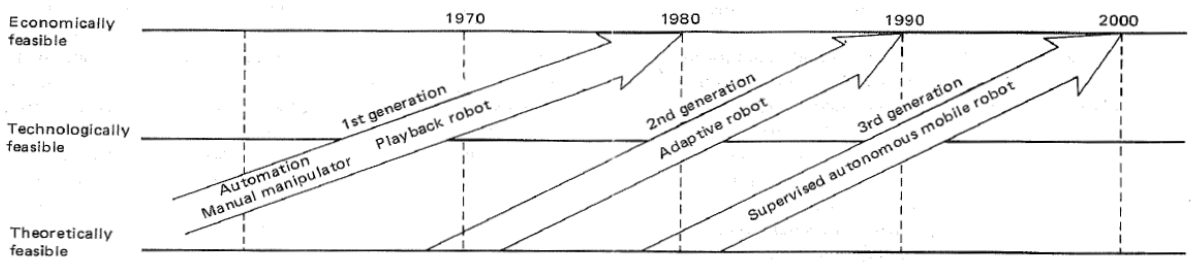


Figura 2. Cronología de la Tecnología robótica

Primera Generación- Son los robots conocidos como manipuladores, estos robots empezaron a ser desarrollados en la Segunda Guerra Mundial. Estos sistemas siguen una programación fija sin manejar información interna. Los usos de estos sistemas incluyen la manipulación de materia, pintura y soldadura de punto como el visto en la figura 3.

Figura 3. Robots de primera generación

Segunda Generación- Son los robots que se adaptan y reaccionan a variaciones de su alrededor. Por ende, estos sistemas tienen sensores que, mediante sistemas de control cerrado, permiten que reaccione a los estímulos de los sensores. Los usos de estos sistemas incluyen soldadura de arco o procesos de ensamble.

Tercera Generación- Son los robots que adquieren información y mediante procesamiento logran aprender, inferir y resolver problemas. En estos sistemas el controlador es una computadora que ejecuta los programas y se manda a un manipulador para que ejecute la acción.

Cuarta Generación- Son los robots de última generación o robots inteligentes los cuales se encuentran en proceso de investigación. Se pretende llevar esta tecnología hacia la implementación de inteligencia artificial (Figura 4). Estos robots serían capaces de racionalizar decisiones y realizar un proceso de control en tiempo real. Aplicaciones de

esta tecnología están dirigidas hacia la producción de robots humanoides que pueda replicar el comportamiento del ser humano.

Figura 4. Robot cuarta generación

El segundo sistema para caracterizar los robots es según su arquitectura. Este sistema toma las cualidades y configuraciones de elementos para asignarles una categoría; a continuación se explicarán las categorías.

Robots Móviles- Son robots basados en vehículos, se diferencian de los vehículos por portar sensores que permiten guiar su recorrido (Figura 5).

Robots Androides- Son robots basados en la cinemática del cuerpo humano. Se dedica a reproducir modelos bípedos que simule la anatomía y funcionamiento humano (Figura 7).

Robots Zoomórficos- Son robots basados en comportamientos de seres vivos, divididos en las sub-categorías de caminadores y no-caminadores. Las características como el nadado del pez o el escalado de las lagartijas son aprovechadas para cumplir con otras tareas (Figura 6).

Robots Poli-articulados- Son robots que se caracterizan por ser sistemas estacionarios que se limitan a un volumen de trabajo específico. Una segunda característica importante es que se compone por varios cuerpos articulados que permiten su movimiento. En este grupo encontramos los robots paralelos que son el tema principal del trabajo (Figura 9).

Robots Híbridos- Son robots que combinan cualidades de las otras categorías para aprovechar las ventajas que ofrece cada una de ellas (Figura 8)

.

Figura 5. Robot Móvil [Robotica]

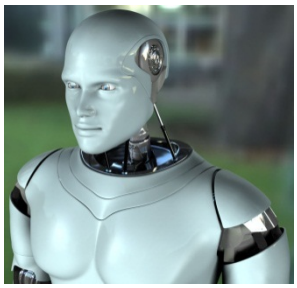


Figura 7. Robot Androide [Coleman]

Figura 6. Robot Zoomórfico [Robotica]

Figura 9. Robot Poli-articulado [Robotica]

Figura 8. Robot Hibrido [Robotica]

1.2.2. Robots Paralelos

En la categoría de los robots poli-articulados encontramos los robots paralelos. Estos sistemas son implementados en situaciones en las cuales se exigen una alta capacidad de carga y un comportamiento dinámico y cinemático bueno. Los robots paralelos se componen de dos o más brazos comunicados por un elemento intermedio. Estos robots pueden ser diseñados para operar con 2-, 3-, 4-, 5- y 6-GDL (Grados de libertad) [Gao, 2002]. Este caso específico de 6 GDL se le conoce como plataforma Stewart, un sistema

consiste de seis miembros conectados por una plataforma móvil. Este es el robot con el cual se realizará el proyecto y se pretende caracterizar su comportamiento específico.

1.2.3. Diseño Actual de la Plataforma Stewart UniAndes

La plataforma Stewart UniAndes fue diseñada, construida y programada por proyectos de grados de estudiantes desde el año de 2007. Desde su construcción se han realizado varios proyectos entorno a su funcionamiento, entre los cuales se incluyen; mediciones de propiedades de inercia en sólidos rígidos [Macías], implementación de simuladores conducción [Barreto] y medición de percepción de movimiento [Cardona] entre otros. En estos proyectos se identificaron vibraciones indeseadas en la plataforma que interferían con los resultados de los proyectos. Por esta razón se decidió realizar el estudio de diagnóstico a las uniones para cuantificar este comportamiento. Este proyecto prentende evaluar la plataforma como sistema y caracterizar su comportamiento. Para comprender su estructura se revisaron los cálculos y diseños realizados por David Isaza, en el diseño y construcción de la plataforma [Isaza]. En este documento se encuentran los cálculos estructurales y planos implementados para la fabricación de la plataforma.

Componentes estructurales

Para empezar el análisis se presentarán los componentes estructurales de la plataforma para crear un contexto de la misma. El sistema consiste de una plataforma base fija al piso. A la base se le conectan seis actuadores lineales (figura 10) cada uno mediante una unión universal (figura 13) que restringe cuatro grados de libertad cada una. En la parte superior se tienen tres uniones conjuntas (figura 12) que conectan de a pares los actuadores con el último elemento de la plataforma que es la plataforma móvil (figura 11).

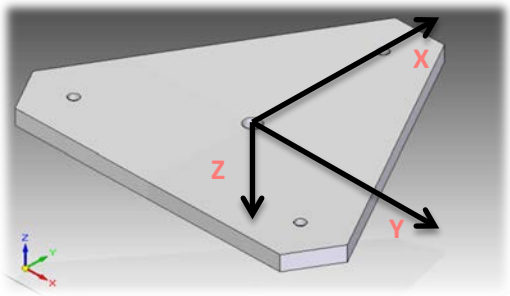


Figura 10. Plataforma Móvil

Figura 11. Actuadores Lineales

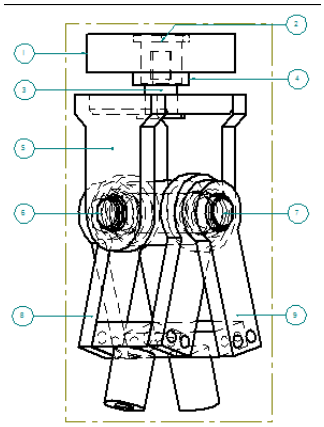


Figura 13. Unión Conjunta Superior

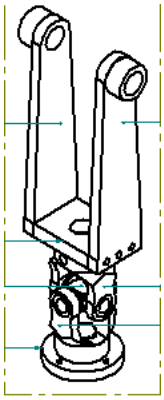


Figura 12. Unión Inferior

1.3. DIAGNÓSTICOS

Según la Real Academia Española diagnosticar es recoger y analizar datos para evaluar problemas de diversa naturaleza [R.A.E.]. El trabajo pretende diagnosticar el estado actual de la plataforma para lo que se investigaron métodos propuestos de diagnóstico.

1.3.1. Método Propuesto

La metodología que se decidió seguir fue la propuesta por el Dr. Eisenmann, donde propone un método basado en siete actividades que se deben realizar al sistema que se quiere diagnosticar [Eisenmann]. Esta metodología es propuesta para implementar en maquinaria y debe ser especificada para un sistema en particular.

El método a seguir es el siguiente.

1. Objetivos del Diagnóstico.
2. Inspección Mecánica.
3. Adquisición de datos.
4. Desarrollo del plan de prueba.
5. Interpretación de datos.
6. Conclusión y recomendaciones.
7. Plan de acción correctiva.

1.4. TIPO DE TOLERANCIAS

Es importante identificar lo que es una tolerancia y como en estado dinámico pueden ser las causantes de vibraciones. Se van a evaluar dos tipos de tolerancia, el primero la tolerancia lineal y el segundo es la tolerancia angular.

Tolerancias Lineales

Las tolerancias lineales serán entendidas como el desplazamiento lineal permitido entre elementos. En la figura 14 se puede identificar un espacio entre el eje y el orificio, el cual permite desplazamiento del eje hacia los costados.

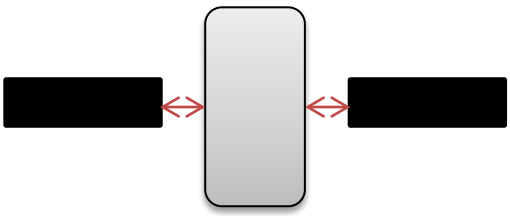


Figura 14. Tolerancia lineal

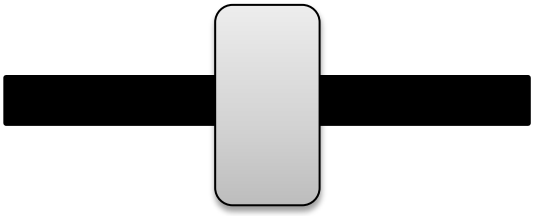


Figura 15. Solución a tolerancia lineal

Estas tolerancias son producto de deterioro del orificio o exceso en las tolerancias de manufactura. La solución a este desplazamiento indeseado es realizar las tolerancias estrictas de manufactura (figura 15) y de esta forma prevenir el desplazamiento.

Tolerancias Angulares

Las tolerancias angulares serán entendidas como el desplazamiento angular permitido entre elementos. En la figura 16 se puede identificar una rotación entre el eje y el orificio. La solución conocida para este tipo de tolerancia es aumentando el área de contacto del orificio, con lo cual se estaría previniendo el juego de vuelco.

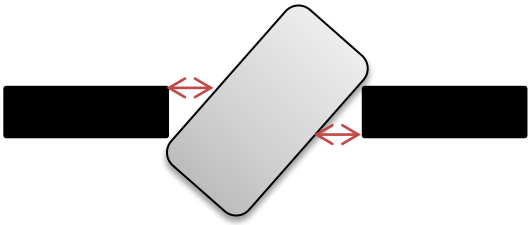


Figura 16. Tolerancia angular

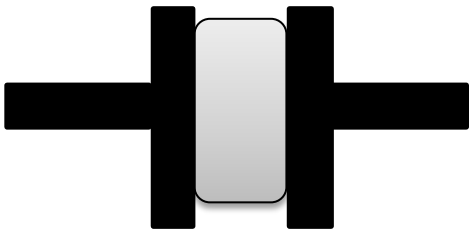


Figura 17. Solución a tolerancia angular

2. DIAGNÓSTICO Y CARACTERIZACIÓN DE LA PLATAFORMA UNIANDES

Para diagnosticar la plataforma se debe establecer un proceso estricto que permita la caracterización de su comportamiento. Con la información adquirida en este proceso se podrán realizar decisiones informadas e implementar modificaciones al sistema. El diseño un protocolo debe establecer un método estandarizado con el cual se diagnosticará el estado de la plataforma.

2.1. DISEÑO DEL PROTOCOLO DE DIAGNÓSTICO

2.1.1. Objetivos del Diagnóstico

Se debe exponer el objetivo del diagnóstico para poder mantener el rumbo hacia la solución deseada. Este debe ser expresado concretamente resumiendo lo que se desea obtener como resultado. Se debe establecer un objetivo que permita cuantificar las tolerancias permitidas por la plataforma Stewart. Para esto se definieron los siguientes objetivos;

Caracterizar vibraciones presentadas (Estado Dinámico)

Caracterizar tolerancias permitidas (Estado Estático)

2.1.2. Diseño de la Inspección Mecánica

Verificar Integridad Estructural de la plataforma.

Revisión estructural de los elementos

Se debe realizar una verificación visual del estado de elementos estructurales tales como rodamientos, ejes, pasadores, crucetas y tornillería. Se identificarán elementos que muestren deterioro.

Se buscará identificar cuáles son los elementos que presentan tolerancias lineales y angulares.

Torque de los Tornillos

Se debe realizar una calibración del torque de los tornillos de la plataforma y garantizar que todos fueron ajustados.

Se buscará identificar tornillos con torque insuficiente.

Revisión de conexiones

Se debe revisar la condición de las conexiones de cables de potencia y cables de intercambio de información.

Se buscará identificar pérdidas de continuidad de comunicación entre el computador de mando y la plataforma.

Revisión de obstrucciones

Se debe revisar que no existan objetos ajenos a la estructura que puedan obstruir el comportamiento de los elementos.

Se buscará identificar objetos que puedan intervenir o bloquear movimientos de elementos tales como los actuadores, la unión inferior y la unión superior.

Verificar Programación

Revisión del estado de las tarjetas

Se debe revisar que las tarjetas presenten estados en línea y funcionamiento correcto. Siendo así, se deber un correr diagnóstico de conexiones desde el programa de programación YTerm (Prueba de conexión). La figura 18 indica como correr la prueba de conexiones del programa.

Se buscará encontrar fallas en la comunicación entre las tarjetas de control y el computador, lo cual puede evitar el control adecuado de la Plataforma Stewart.

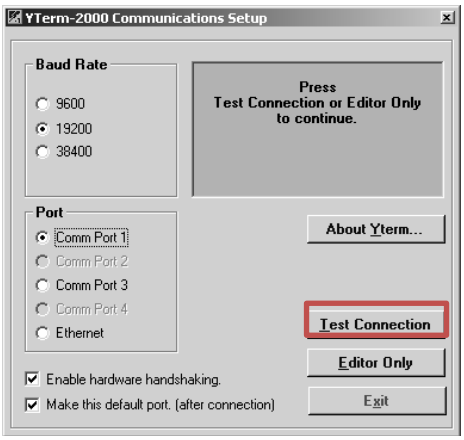


Figura 18. Prueba de Conexión YTerm

Revisión de la programación

Se deben correr los protocolos de seguridad de la plataforma para evitar que la programación pueda superar los límites de uso de la misma. La programación de estos protocolos de seguridad se puede encontrar en el ANEXO 1. Se busca proteger la plataforma y no causar movimientos que causen daños a la estructura.

Se debe revisar la programación del movimiento programado comparándolo contra el teórico. Se buscará encontrar problemas en la programación que afecten el comportamiento óptimo de la plataforma.

Conteo de Grados de Libertad

Se debe realizar un conteo de grados de libertad del sistema para conocer, según las restricciones aplicadas por las uniones, cuántos grados de libertad quedan libres para controlar. Para este análisis se realiza un conteo de grados de libertad aportados por los elementos y se compara con los grados de libertad restringidos por las uniones obteniendo los grados de libertad netos que se tienen para controlar, de acuerdo a la ecuación 1:

$$F_c = \sum_{i=1}^{b} f_i - \sum_{j=1}^{u} R_j \quad (1)$$

Donde,

F_c , Grados de libertad restantes para controlar.

f_i , Grados de libertad del elemento.

R_i , Número de grados de libertad restringidos por unión.

b , Número de elementos móviles.

u , Número de uniones.

2.1.3. Adquisición de Datos

Instrumentación

La instrumentación se debe realizar de forma estricta ya que será el elemento que permita garantizar que la prueba pueda ser cuantificable y repetible. Para las pruebas se necesitan medir tres magnitudes importantes que son la posición en el espacio, el comportamiento dinámico (representado por velocidades y aceleraciones) y las fuerzas aplicadas al sistema. Los instrumentos y respectivo funcionamiento para el desarrollo adecuado del protocolo se resumen a continuación.

Sistema de Captura de movimiento OptiTrack

El sistema OptiTrack consta de seis cámaras infrarrojas que captan la posición de marcadores que reflejan las ondas emitidas por las propias cámaras. Este sistema utiliza un algoritmo para expresar la posición del marcador en el espacio. Es necesario un espacio amplio que permita a las cámaras registrar todos los marcadores y no se pierdan en la trayectoria; este espacio debe además ser oscuro para evitar que las cámaras infrarrojas capten brillos indeseados.

Se deben definir los ejes del espacio para ubicar los marcadores en el mismo. Para esto se alinea el eje x con el de la plataforma y el resto de ejes los determina el programa por defecto. Los ejes con los que se trabajaron se ilustran en la figura 19. El sistema describe la posición de un cuerpo caracterizando su posición lineal en los tres ejes y su posición angular con respecto a los ejes ya descritos.

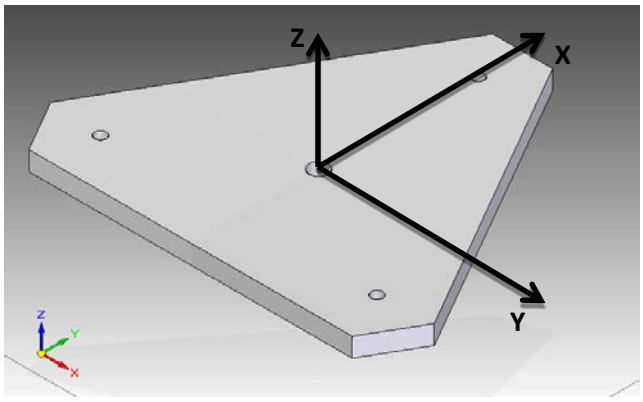


Figura 19. Ejes usados por el OptiTrack

El sistema requiere calibrar para cada sistema en particular, de esta calibración depende la precisión que ofrece, en pruebas anteriores de calibración ha arrojado una precisión de 0.1mm.

Sistema Inercial Barnacle

La Unidad Inercial Barnacle (IMU por sus siglas en inglés '*Inertial Measurement Unit'*) es un sensor diseñado para adquirir señales a bajas frecuencias en lugares donde potencialmente se tiene bastante ruido [Sparkfun]. Este sistema consta de tres giróscopos que medirán la velocidad angular en *pitch*, *roll* y *yaw*, movimientos que se pueden ver ilustrados en la figura 20. También consta con tres acelerómetros que caracterizan la aceleración en sus ejes X, Y, Z. Los ejes de la plataforma se alinean con los de la IMU para la adquisición de datos. Este componente tiene incorporado un filtro pasa- bajas lo que nos ayudara a eliminar ruido como el de los motores de los actuadores. Se decidió usar este sistema para captar comportamientos a una frecuencia más alta de la que puede percibir el sistema OptiTrack. Este sistema tiene una respuesta de frecuencia de 20Hz una frecuencia de adquisición de 1000Hz.

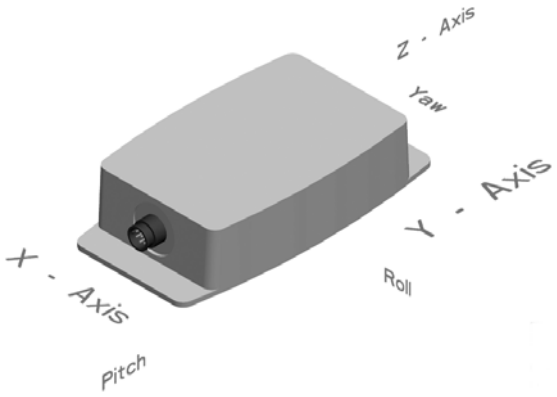


Figura 20. Unidad Inercial Barnecle

Dinamómetro

Para la medición de las fuerzas aplicadas se utiliza un dinamómetro digital comercial diseñado para pesar equipaje de viaje. Este dinamómetro marca Brookstone (Figura 21) permite cuantificar la fuerza aplicada al sistema. Este sistema no tiene muchas especificaciones técnicas dado que es un sistema de uso particular por esta razón su precisión se debe tomar como la resolución que permite que es de ±1g.

Figura 21. Dinamómetro Electrónico

Adquisición de datos

El sistema OptiTrack adquiere datos con una frecuencia de 100 Hz y serán adquiridos con el software Arena, el cual nos permitirá agrupar los marcadores para crear un cuerpo rígido como se ilustra en la Figura 22. El programa calcula el comportamiento de este cuerpo rígido registrando la posición y rotación en los ejes X, Y, Z.

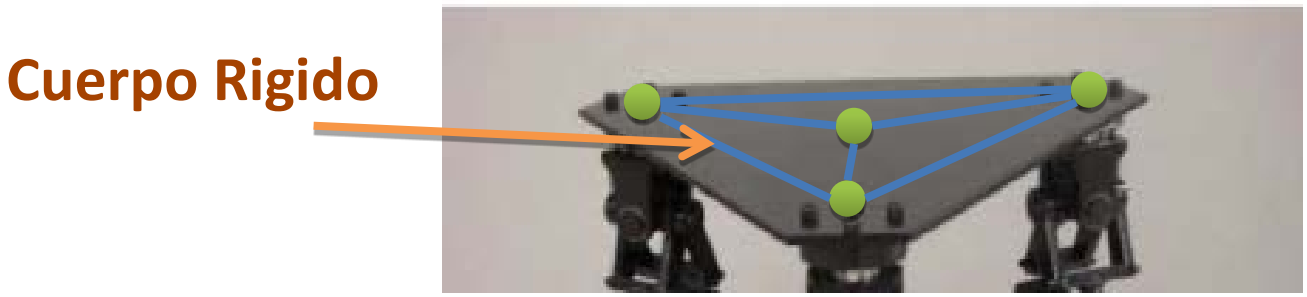


Figura 22. Instrumentación sistema optitrack

Luego, con el programa de Matlab se analiza cada componente por separado. En el caso de la prueba estática se pretende encontrar los desplazamientos máximos en las direcciones analizadas. En el caso de la prueba dinámica se analizan dos comportamientos, el primero es el comportamiento de la aceleración en el barrido en frecuencia y el segundo es su comportamiento en posición. El análisis es puramente cualitativo, específicamente para visualizar una comparación del sistema evaluando uno a uno los elementos que puedan estar presentando desgaste o las posibles modificaciones del sistema. El sistema tiene una incertidumbre de 0.1mm calculado por proyectos anteriores. Este sistema no debe presentar mayor incertidumbre ya que las lecturas que se esperan registrar se encuentran en la magnitud de los milímetros lo que significaría un error significativo en la toma de datos.

2.1.4. Desarrollo del Plan de Prueba

Prueba Estática

Se debe elevar la plataforma a una posición media, entendida como el promedio entre la máxima extensión de los actuadores y la extensión mínima de los actuadores. Una vez se encuentra en esta posición se aplica un esfuerzo de forma radial cada 30 ± 1° sobre el plano XY como muestra la figura 23. Adicionalmente se debe aplicar en dirección perpendicular a la plataforma en la dirección positiva y negativa del eje Z. Para las pruebas en el plano XY una fuerza de 150 ± 10N se aplica para que la plataforma llegue a una posición fija, en la cual se mantiene por 5 segundos con la ayuda de un soporte. Para las pruebas en el eje Z se aplicara una fuerza 300 ± 10N para poder contrarrestar el peso de la plataforma y lograr llegar a una posición fija que también se mantiene por 5 segundos.

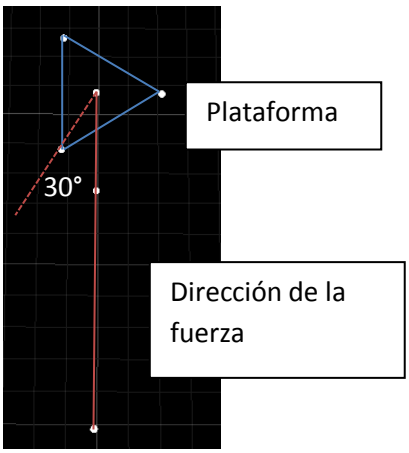


Figura 23. Dirección fuerza aplicada

Para garantizar la dirección de acción de la fuerza se utilizará el instrumento de posicionamiento espacial OptiTrack. El objetivo de este instrumento es garantizar en tiempo real que el esfuerzo sea constante y en la dirección deseada. Esto permitirá caracterizar un polígono de tolerancias el cual incluya la dirección en la cual las uniones presenten mayor desplazamiento. En la figura 24 se puede ver la disposición experimental diseñada para la prueba.

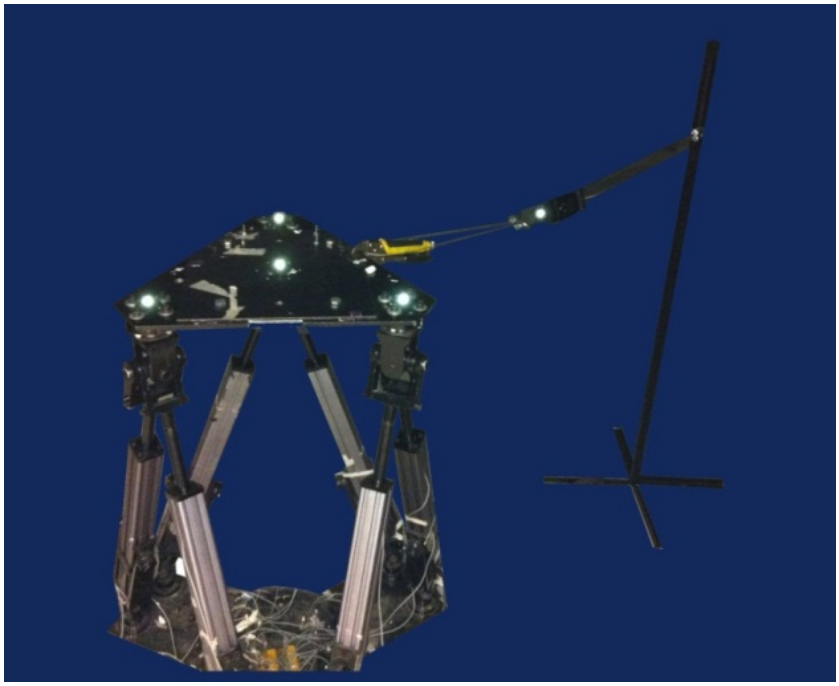


Figura 24. Disposición prueba estática

Al momento de implementar se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones y en caso de detectar inconvenientes se debe realizar una anotación en el reporte del protocolo:

- Revisar que los actuadores se encuentren encendidos.
- Revisar que los actuadores no permitan desplazamiento lineal y se encuentren fijos al desplazamiento deseado.
- Revisar que la plataforma base no se levante del piso.

Prueba Dinámica

Movimiento Sinusoidal

Se realiza un movimiento sinusoidal con un barrido en frecuencia de la ventana de operación de la plataforma comprendida entre 0Hz a los 2Hz. Debido a las aceleraciones que se alcanzarán la amplitud se establece en 3° para minimizar la fuerza dinámica de la plataforma. Esta prueba se realiza sobre de los tres ejes de movimiento que generalizan el espacio de acción de la plataforma (Figura 25). El objetivo es comparar la trayectoria programada con la trayectoria experimental de la plataforma para encontrar las tolerancias permitidas de la misma. Esta información es necesaria para realizar un análisis comparativo con el diseño final.

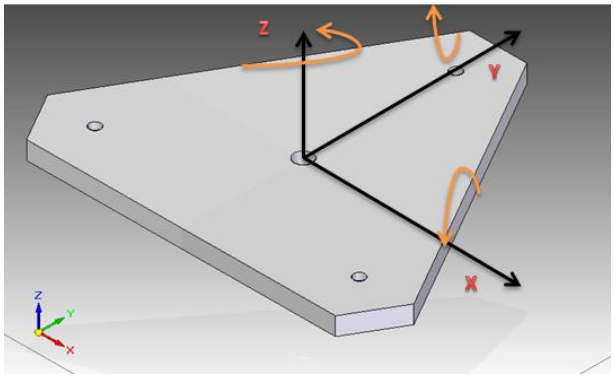


Figura 25. Prueba Dinámica

Debido a limitaciones en cantidad de código que las tarjetas pueden alimentar a la plataforma se debe seccionar la prueba dinámica en dos, la primera de 0 a 1Hz y la segunda de 1 a 2Hz (Gráfico 1). La segmentación de la prueba asegura no sobrepasar los límites de seguridad de la plataforma en lo que concierne al torque y desplazamiento máximo que soportan los actuadores.

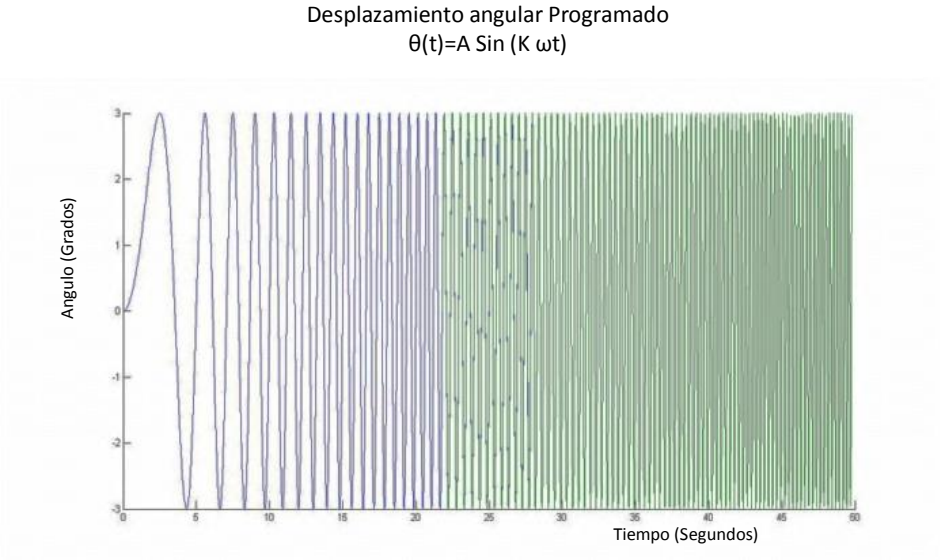


Gráfico 1. Programación de prueba segmentada

Para el acople de las pruebas se pueden usar los espectrogramas. Para esto se ubican las dos pruebas en un espectrograma y se eliminan los datos que se encuentran en el tiempo representado como una franja amarilla como se puede ver en el gráfico 2. En este ejemplo la franja amarilla dura 2 segundos por lo que se borrarían los últimos 1000 datos de la primera prueba y los primeros 1000 datos de la segunda.

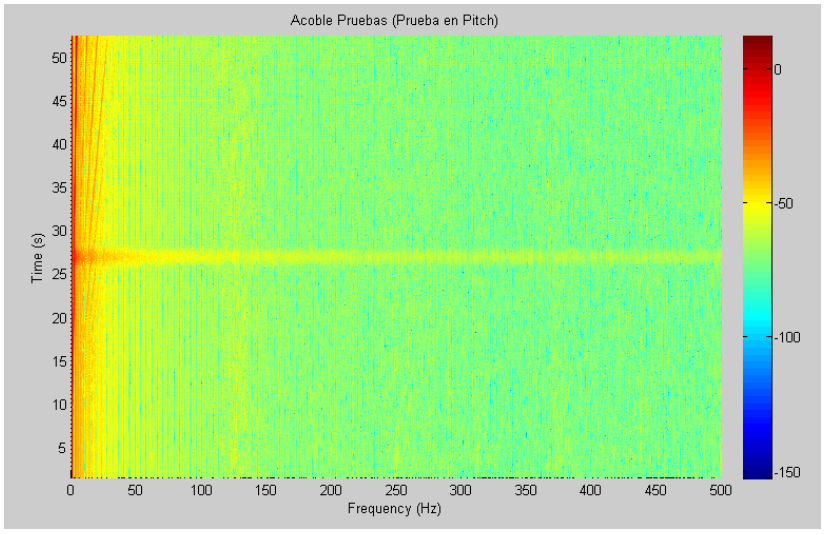


Gráfico 2. Acople de pruebas dinamicas.

Al momento de implementar se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones y en caso de detectar inconvenientes se debe realizar una anotación en el reporte del protocolo:

- Revisar que todas las cámaras estén registrando los marcadores.
- Revisar que la plataforma no esté generando brillos que el sistema registre como marcadores.
- Revisar que la plataforma base no se levante del piso.

2.1.5. Interpretación de Datos

Prueba Estática

Se obtiene el valor máximo de desplazamiento en cada dirección representando un espacio característico en el cual las tolerancias están permitiendo movimiento. Se grafican estos valores en un gráfico radial para representar los datos obtenidos en el plano XY como se representa en el gráfico 3. También se obtienen los valores máximos de la prueba sobre el eje Z y de esta forma generar un volumen como el presentado en la figuras 26.

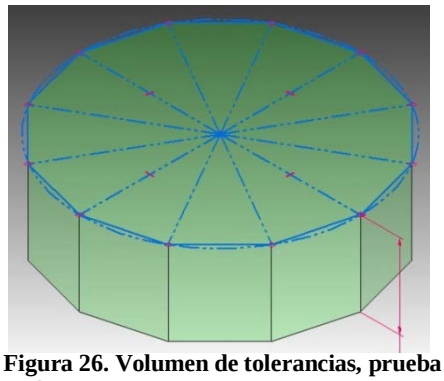


Figura 26. Volumen de tolerancias, prueba estática

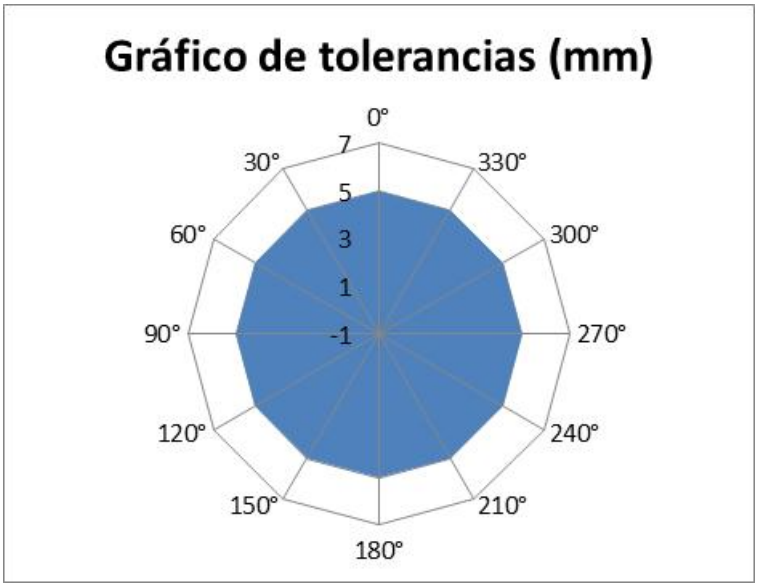


Gráfico 3. Interpretación de tolerancias

Prueba dinámica

Este método sirve para caracterizar el estado de la plataforma, en otras palabras toma la marca del comportamiento actual. Este método propuesto, basado en vibraciones mecánicas, pretende detectar vibraciones mediante los valores de las amplitudes en una Transformada de Fourier de tiempo reducido (STFT) [Leonard]. Es posible obtener espectrogramas del comportamiento de la aceleración y de la posición angular en el barrido de frecuencia. Se pretende relacionar los comportamientos representativos a elementos de la plataforma como método de diagnóstico. Se busca relacionar la frecuencia de entrada con las variables del tiempo, la frecuencia de salida y la amplitud generando un gráfico característico de la plataforma. Analizando esta relación es posible identificar comportamientos característicos con los que se puedan identificar elementos deteriorados.

Comportamientos característicos

Comportamiento Lineal - Se espera encontrar uno de varios comportamientos característicos, el primero siendo un comportamiento lineal constante. Se presenta como un conjunto de picos en la amplitud de la señal. Este comportamiento puede caracterizar un elemento que responde a la entrada del sistema amplificándose por una constante. Este comportamiento se puede encontrar en elementos rotativos y comparando la frecuencia a la que se encuentra con la frecuencia a la que trabaja se puede detectar el elemento específico.

Comportamiento Puntual - Se espera encontrar un pico representativo a ciertas frecuencias. Este comportamiento puede ser resultado de golpes o sacudidas súbitas. Los comportamientos se pueden ver ilustrados en la figura 27.

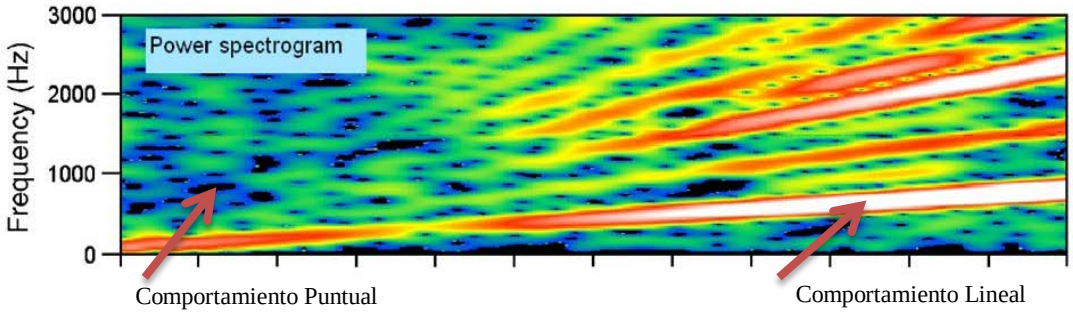


Figura 27. Ejemplo del método de diagnóstico basado en vibraciones [Leonard]

2.1.6. Conclusión y Recomendaciones

Se presentan los resultados del diagnóstico haciendo énfasis en los comportamientos que no son característicos de la plataforma. Los resultados aportan la información necesaria para evaluar el estado de la plataforma e identificar que elementos se encuentran deteriorados. Se evalúa el estado de la plataforma para llegar a

recomendaciones que permitan corregir estos comportamientos. El estado de la plataforma será catalogado en una de las siguientes tres categorías:

- Funcionamiento Óptimo
- Funcionamiento Satisfactorio.
- Funcionamiento Insatisfactorio.

Para obtener los valores umbral permitido se propone un estudio en la sección de trabajo futuro.

2.1.7. Plan de Acción Correctiva

A partir de los resultados obtenidos, es posible recomendar un plan de acción específica que se le deba realizar a la plataforma para corregir los comportamientos no deseados.

2.2. RESULTADOS DEL PROTOCOLO DE DIAGNÓSTICO

El protocolo fue implementado según el método estándar propuesto. Las pruebas arrojaron información que nos permitió caracterizar y diagnosticar el estado de la plataforma. Con esta información se tomaran decisiones sobre las posibles soluciones para implementar en el sistema.

2.2.1. Resultados Inspección Mecánica

Integridad Estructural

En la inspección realizada a la plataforma se determinó un volumen de tolerancia excesivo y se encontraron componentes deteriorados. El primer elemento analizado es la cruceta manufacturada en los laboratorios de la universidad. En la figura 28 se puede ver como manteniendo la parte inferior del sistema en una posición fija se puede desplazar la parte superior de la cruceta en un juego lineal de aproximadamente 2 mm.

Figura 28. Cruceta tolerancia entre ejes de la cruceta (Fotografías sobrepuestas para comparación).

El segundo elemento que presenta algún tipo de tolerancia es el eje vertical de la unión conjunta superior, elemento ilustrado en la figura 29. Es encontró que la unión superior está permitiendo tolerancias angulares que causan desviaciones entre 2° y 3°. Se le

atribuye este daño a posibles deformaciones de las bolas de los rodamientos causadas por esfuerzos que exceden las capacidades de los rodamientos seleccionados.

Figura 29. Vista superior unión superior

Conteo de Grados de Libertad

El conteo de grados de libertad, considerando la numeración y simplificación de elementos de acuerdo a la figura 30, arrojó graves inconsistencias. El conteo en las tablas 1 y 2 muestra como el sistema se encuentra sobre restringido, lo que llevaría al sistema a estar trabado. El sistema implementado ha solucionado esta inconsistencia alineando las uniones universales de debajo de tal forma que dos uniones restringen el mismo GDL, liberando 6-GDL, la cantidad de grados de libertad controlados que tiene el sistema actual.

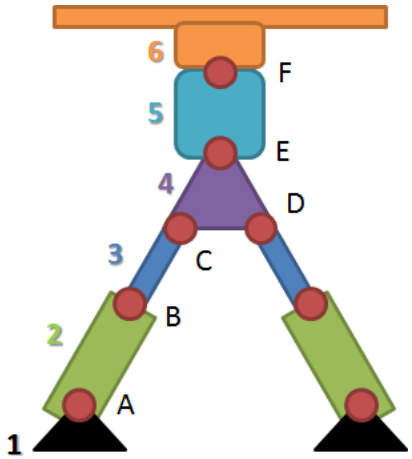


Figura 30. Conteo de Uniones y de Cuerpos

Tabla 1. Conteo de Grados de Libertad Disponibles

Número de Cuerpos	DOF	TOTAL
20 – Tierra = 19	6	**114**

Tabla 2. Conteo de Grados de Libertad Restringidos.

Descripción	Cantidad	Restricción	GDL	Tipo	Total
A. 1-2	6	4	2	R,R	24
B- 3-4	3	5	1	R	15
C- 3-4	3	5	1	R	15
D- 4-5	3	5	1	R	15
E- 5-6	3	5	1	R	15
F- 2-3	6	5	1	T	30
		TOTAL RESTRICCIONES			**114**

$$F_c = 114 - 114 = 0\ GDL$$

Dada esta situación se decidió realizar una simulación en el programa Solid Edge para investigar los efectos que tiene esta particularidad en el ensamble del sistema (figura 31). Se ensamblo el sistema manteniendo alineación perfecta del sistema como se puede ver en la figura esto mostro un ensamble satisfactorio permitiendo el control en seis grados de libertad.

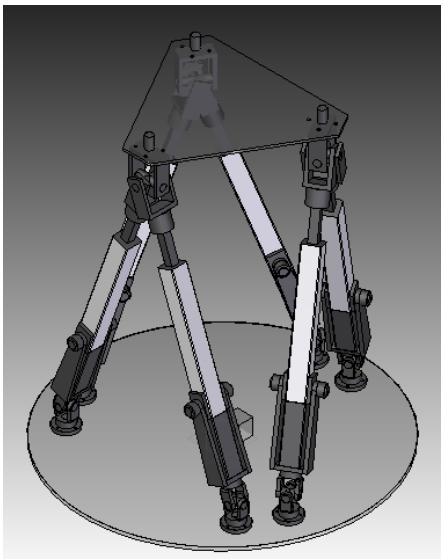


Figura 31. Simulación Plataforma Stewart Actual

A continuación se le agregaron desfases de 0.1° - 0.5° en la posición de los actuadores inferiores. Lo que se quiere representar son tolerancias de manufactura y de montaje de la plataforma. Lo que encontramos fue que el sistema se vuelve inestable y el programa intenta encontrar una posición donde este ensamble sea posible. En la figura podemos ver el resultado de la simulación donde el sistema es inestable y se desarma (figura 32).

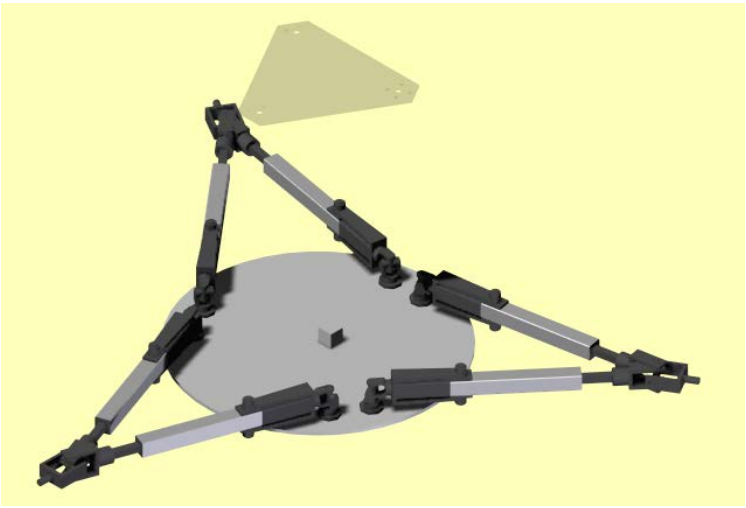


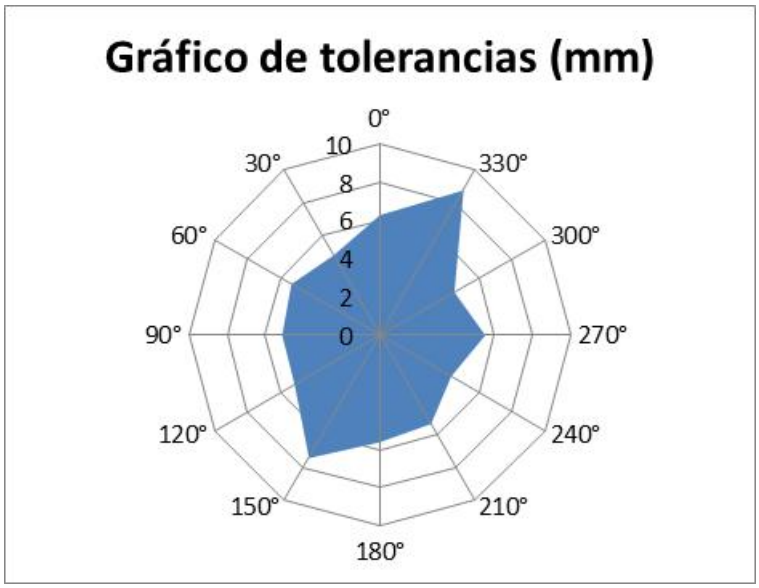
Figura 32. Simulación Plataforma Actual con Tolerancias de Ensamble

Esta característica del sistema causaría que al no realizar una alineación precisa del sistema, éste entrará en problemas de esfuerzos innecesarios y produciendo esfuerzos internos que dañan diferentes componentes. Los elementos afectados se identificaron como la cruceta y el rodamiento de la unión conjunta.

2.2.2. Resultados del Plan de Prueba

Prueba Estática

Con el polígono de tolerancias se identificaron diferencias en las magnitudes del desplazamiento cuando se aplicó carga en las direcciones de acción. El polígono de tolerancias y su desplazamiento en el eje Z se ilustra a continuación en el gráfico 4.



Tolerancia en Z (cm)
0.28

Gráfico 4. Resultado de tolerancias

Se identificó que la dirección que permite el mayor desplazamiento es a los 330° donde la magnitud de desplazamiento alcanzó los 0.87 cm. Esto significa que no todos los elementos

se encuentran en las mismas condiciones y la sumatorias de todas las tolerancias son lo que hacen que estas magnitudes del desplazamiento varíen.

Prueba Dinámica

El análisis en posición proporcionó los siguientes resultados en las pruebas de barrido de frecuencia en los ejes X, Y, Z. Cada gráfico representa una prueba diferente (Gráfico 5):

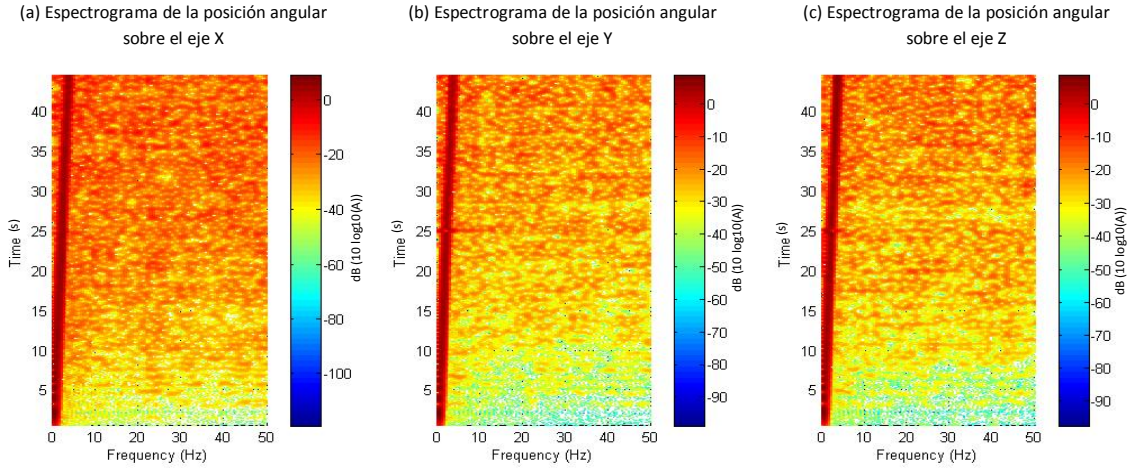


Gráfico 5. (a) Espectrograma en posición angular en el barrido de frecuencia en el eje X. (b) Espectrograma en posición angular en el barrido de frecuencia en el eje Y. (c) Espectrograma en posición angular en el barrido de frecuencia en el eje Z.

Se puede identificar un comportamiento lineal en los tres gráficos, ilustrado como la tendencia agrupada de los colores de rojo más oscuro. De estos gráficos se puede extraer el comportamiento característico de la plataforma Stewart, su marca, la cual muestra un comportamiento lineal en las pruebas realizadas sobre los tres ejes. Esta marca se podrá comparar con la marca que presente la plataforma después de ser modificada.

El análisis en aceleración proporcionó los siguientes resultados en las pruebas de barrido de frecuencia en los ejes X, Y, Z:

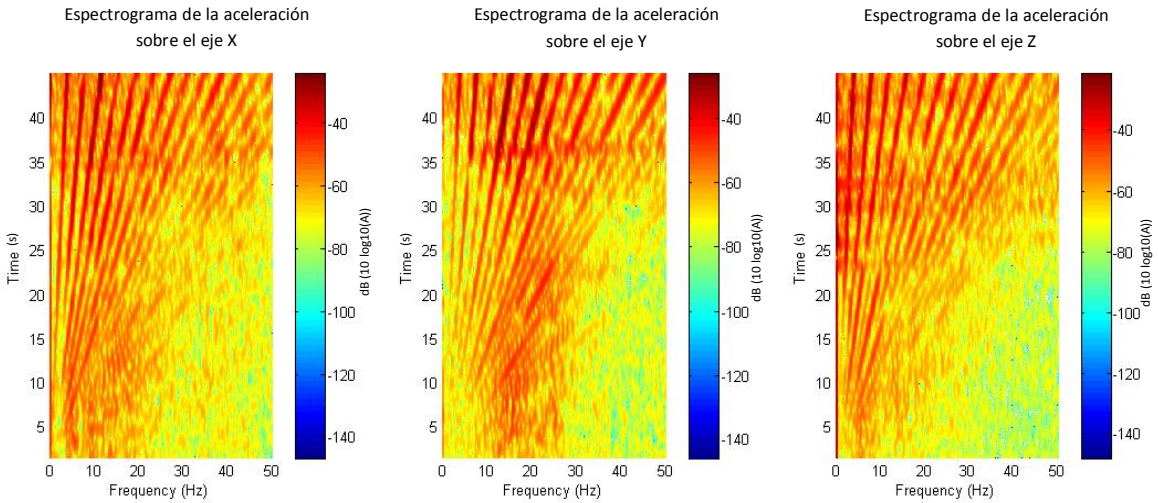


Gráfico 6. (a) Espectrograma aceleración angular en el barrido de frecuencia en el eje X. (b) Espectrograma aceleración angular en el barrido de frecuencia en el eje Y. (c) Espectrograma aceleración angular en el barrido de frecuencia en el eje Z.

En el análisis en aceleración se registran una mayor variedad de vibraciones que no se detectaban en el análisis de posición (Gráfico 6). Esta segunda marca caracteriza más elementos que están vibrando. Esta marca se considera más confiable dado que la instrumentación es más precisa y registra un mayor espectro de frecuencias. Con este diagrama más preciso si será posible cuantificar que tanto se mejoraron las vibraciones de la plataforma una vez se comparen con las marcas de la plataforma modificada.

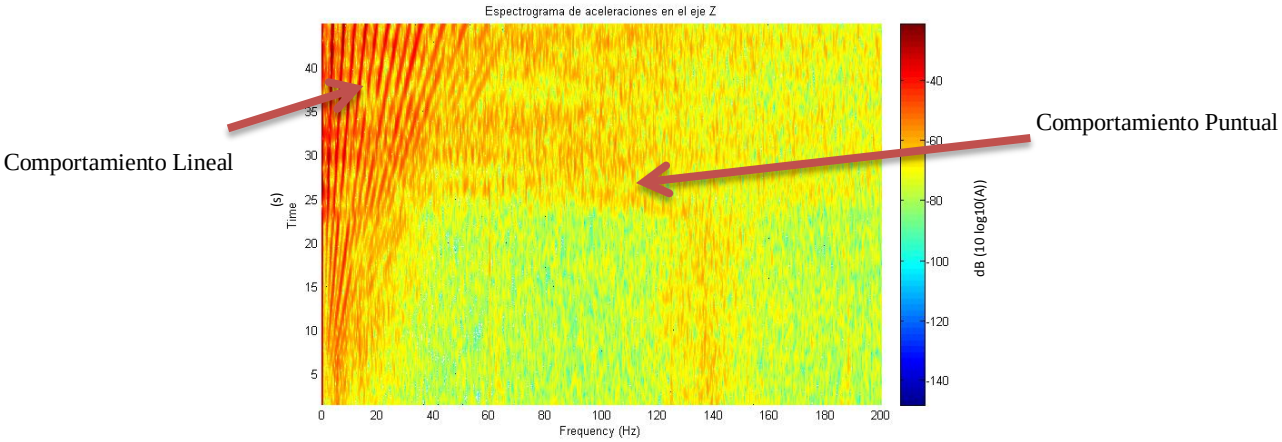


Gráfico 7. Comportamientos particulares en los espectrogramas

En los diagramas de aceleración se detectaron unos comportamientos puntuales que representarían golpes tal como se puede observar en la gráfica 7. Este comportamiento se encuentra en menor escala pero en mayor cantidad. Para poder diferenciar comportamientos no deseados con comportamientos naturales de los componentes se propone un trabajo futuro del comportamiento de la plataforma.

Diagnóstico

Se identificaron elementos de las uniones en mal estado. Se identificó un volumen excesivo de tolerancia y su efecto en la precisión de los movimientos realizados. Es posible concluir que se ha realizado una caracterización la plataforma y ésta presenta un estado de funcionamiento indeseado, lo cual resulta en un requerimiento de mantenimiento obligatorio.

Plan de Acción Correctiva

Se decidió realizar un diseño de nuevas uniones con tolerancias estrictas que reduzcan el volumen de tolerancia permitido por la plataforma.

3. SELECCIÓN DE SOLUCIÓN

La plataforma Stewart UniAndes presenta deterioro en las uniones superiores manifestándose en tolerancias y vibraciones excesivas. Se realizó un diagnóstico para cuantificarlas y caracterizar su comportamiento, tras lo cual se decidió realizar una intervención de modificación inminente de la plataforma. Se presentaron tres propuestas que se analizarán a más adelante. Para la evaluación de las soluciones se plantearán restricciones y criterios. Las restricciones presentan limitaciones que presenta el proyecto y los cuales se deben cumplir. Los criterios se implementarán para la evaluación de las soluciones con el fin de realizar una selección informada.

3.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

El diseño debe lograr contribuir solo tres grados de libertad al sistema por unión, mantener robustez, y no permitir tolerancias ni vibraciones excesivas, teniendo en cuenta las restricciones de manufactura, restricciones económicas, restricciones estructurales y restricciones móviles. El diseño debe ser viable a los criterios de mecánica, manufactura, economía, potencial de investigación y de compatibilidad.

3.2. RESTRICCIONES DE LA SOLUCIÓN

Restricción de manufactura - Se debe tener en cuenta que la manufactura se pueda realizar por talleres disponibles en Bogotá. Se debe restringir a procesos de manufactura disponibles comercialmente.

Restricción económica - La solución debe estar dentro del presupuesto de 750.000 pesos.

Restricción estructural – Debe soportar las cargas estáticas y dinámicas del funcionamiento de la plataforma con carga máxima de 300Kg.

Restricción móvil - Debe cumplir con la teoría de maquinaria para garantizar su movimiento funcionamiento.

3.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Viabilidad mecánica - Este criterio considera que el diseño cumpla con criterios de resistencia de materiales, dinámica de maquinaria y viabilidad estructural.

Viabilidad de manufactura - Este criterio considera los requerimientos que tiene la propuesta para la implementación. Incluye métodos de manufactura, acabados y tolerancias.

Viabilidad económica - Este criterio considera los costos necesarios para implementación de la solución. Incluye materiales y manufactura.

Potencial de Investigación - Este criterio considera si la solución permite el desarrollo del sistema y su contribución a innovación en el campo ingenieril.

Viabilidad de compatibilidad - Este criterio considera si los elementos en la solución pueden acoplarse a los elementos ya existente de la plataforma. Se permiten modificaciones pero se debe considerar la viabilidad de implementar elementos extras a la solución.

3.4. PROPUESTA 1- Unión Compartida Superior (Diseño Previo)

Esta propuesta pretende mantener la misma configuración de uniones y brazos realizando modificaciones a las uniones superiores para corregir el exceso de tolerancias. Se pretende realizar cambios en las uniones que permitan un movimiento más robusto. Se aplicaron las soluciones de tolerancias ya discutidas para solucionar la robustez como se puede ver en la figura 33.

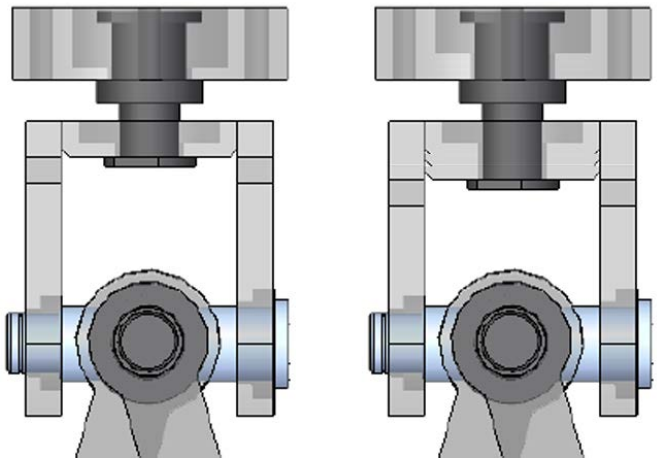


Figura 33. Modificación propuesta para uniones superiores. Izquierda: Diseño original, Derecha: Sistema propuesto con mayor robustez.

3.4.1. Análisis de Grados de Libertad del Mecanismo

Se realizará un análisis de Grados de libertad para garantizar comportamiento mecánico de la plataforma.

Análisis de Cuerpos

19 cuerpos x 6 GDL = 114

Análisis de Uniones

Tabla 3. Análisis de Restricciones Propuesta 1

Descripción	Cantidad	Restricción	GDL	Tipo	Total
GDL Disponibles	-	-	-	-	114
Unión Universal Base	6	4	2	R,R	24
Actuadores1- Cruceta	3	5	1	R	15
Actuadores2- Cruceta	3	5	1	R	15
Cruceta- Horquilla Superior	3	5	1	R	15
Horquilla Superior- Plataforma	3	5	1	R	15
Actuador	6	5	1	T	30
			TOTAL RESTRICCIONES		**114**
			TOTAL GDL		**0**

Se tiene 114 grados de libertad restringidos con 114 grados de libertad permitidos lo que significa que no existen GDL restantes para controlar (Tabla 1). Esta inconsistencia se soluciona con elementos en paralelo teniendo GDL redundantes y de esta forma liberando 6 GDL.

3.4.2. Modificaciones Propuestas

Los cambios se realizarán exclusivamente en la unión superior, para lo cual se pretende cambiar los ejes de cruceta, eje vertical y rodamientos garantizando mejores tolerancias. A continuación se describe cada modificación:

Ejes de cruceta- El juego encontrado parece ser relacionando al juego creado por el prisionero. Para solucionar esto se proponen dos soluciones, la primera es la modificación

de los prisioneros para evitar juegos lineales evitando su desplazamiento. La segunda es manufacturar la cruceta vía fundición con un posterior maquinado para disminuir la posibilidad de este juego.

Eje vertical y rodamientos- Realizar una selección de rodamientos que aguante mejor el esfuerzo axial y de esta forma evitar la deformación del rodamiento.

3.4.3. Viabilidad del Proyecto

Viabilidad mecánica - Se realizó un conteo de grados de libertad para garantizar el movimiento permitido en este caso. Presenta una inconsistencia debido a sobre restricción de 6 GDL lo que puede representar esfuerzos internos y consecuente desgaste en los elementos.

La ventaja de este arreglo es que el montaje se encuentra implementado y diseñado lo que facilita su manipulación y sería viable mantener la programación de la plataforma con cambios en ciertos parámetros.

Viabilidad de manufactura - Las piezas tienen geometrías sencillas lo que permite maquinado en torno y fresa con buenas tolerancias de manufactura.

Viabilidad económica - Si se realiza el cambio de las uniones los componentes de mayor costo serían los rodamientos, que a su vez son los componentes que muestran mayor deterioro. Esto permitiría mantener el presupuesto destinado al proyecto.

Potencial de Investigación - Es un diseño generado por la universidad, pero no tiene muchas oportunidades de generar nuevos estudios con este arreglo o aportar conocimiento radical al respecto.

Viabilidad de compatibilidad - Se usarían la mayoría de los elementos de la plataforma actual ya que se mantiene la misma configuración de elementos.

3.5. PROPUESTA 2- Unión Individual Superior

Esta propuesta pretende cambiar la configuración de uniones por una configuración donde cada actuador tiene unión directa a la plataforma (figura 34). Estas uniones permitirán una auto alineación de los componentes paralelos de esta forma se permitirán los seis grados de libertad faltantes. Estas uniones tienen que cumplir el comportamiento de una unión esférica restringiendo tres grados de libertad y permitiendo otros tres.

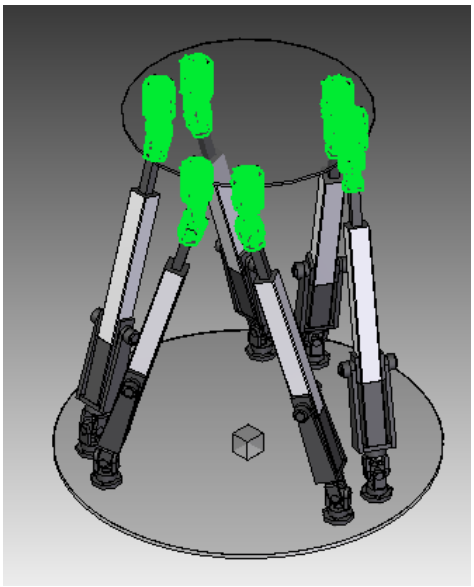


Figura 34. Propuesta unión individual superior

3.5.1. Análisis de Grados de Libertad

Se realizará un análisis de Grados de libertad para garantizar su comportamiento mecánico.

Análisis de Cuerpos

13 cuerpos x 6 GDL = 78

Análisis de Uniones

Tabla 4. Análisis de Restricciones Propuesta 2

Descripción	Cantidad	Restricción	GDL	Tipo	Total
GDL Disponibles	-	-	-	-	78
Unión Universal Base	6	4	2	R,R	-24
Unión 3 GDL	6	3	3	R,R,R	-18
Actuador	6	5	1	T	-30
			TOTAL RESTRICCIONES		**-72**
			TOTAL GDL		**6**

Se tiene 72 grados de libertad restringidos con 78 grados de libertad permitiendo el control de 6 grados de libertad (Tabla 4).

3.5.2. Modificaciones Propuestas

Modificar las uniones para que los actuadores estén conectados directamente a la plataforma. Para esto se debe realizar la compra de las uniones universales y manufacturar el elemento que libere un grado de libertad adicional.

Uniones Universales - Se pueden encontrar en Cardan y Repuestos con el nombre de Unión Tipo Cardan. Con un valor de 70.000 pesos unidad.

Elemento de 1 GDL - Este elemento es muy parecido al de la solución 1 permitiendo la rotación sobre el eje vertical de la unión.

3.5.3. Viabilidad del Proyecto

Viabilidad mecánica - El tener uniones comerciales se puede tener más robustez del sistema pero se debe realizar un cambio en el análisis de la cinemática.

Viabilidad de manufactura - Dado que se consigue la unión de forma comercial se tiene mayor robustez, aunque es necesaria la manufactura de piezas adicionales para permitir un grado de libertad adicional.

Viabilidad económica - El costo de la unión universal y su segundo componente no sobrepasan el presupuesto establecido.

Potencial de Investigación - Es diseño que permitirá realizar cambios en la posición de las uniones para realizar estudios de la geometría.

Viabilidad de compatibilidad - Las uniones requieren un elemento para poderse acoplarse a los actuadores. Esta solución no es compatible con plataforma móvil y se debe manufacturar una nueva.

3.6. PROPUESTA 3- Unión Individual Superior con Reubicación de Elementos

Esta propuesta pretende cambiar la configuración de las uniones con una configuración de forma similar a la solución 2. La modificación consta de trasladar los elementos de mayor peso a la plataforma base y de esta forma no limitar la capacidad de la plataforma. La distribución de elementos propuesta se ilustra en la figura 34.

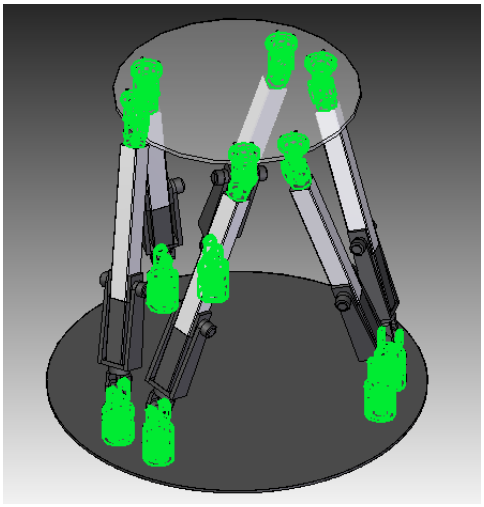


Figura 35.Propuesta unión individual con reubicación de elementos.

3.6.1. Análisis de Grados de Libertad

Se realizará un análisis de Grados de libertad para garantizar su comportamiento mecánico.

Análisis de Cuerpos

13 cuerpos x 6 GDL = 78

Análisis de Uniones

Tabla 5. Análisis de Restricciones Propuesta 3

Descripción	Cantidad	Restricción	GDL	Tipo	Total
GDL Disponibles	-	-	-	-	78
Unión Universal Base	6	4	2	R,R	-24
Unión 3 GDL	6	3	3	R,R,R	-18
Actuador	6	5	1	T	-30
			TOTAL RESTRICCIONES		**-72**
			TOTAL GDL		**6**

Se tiene 72 grados de libertad restringidos con 78 grados de libertad permitiendo el control de 6 grados de libertad (Tabla 5).

3.6.2. Modificaciones Propuestas

Hacer que los actuadores tengan una unión que conecte directamente a la plataforma. Para esto se debe realizar la compra de las uniones universales y manufacturar el elemento que libere un grado de libertad adicional.

Uniones Universales - Se pueden encontrar en Cardan y Repuestos con el nombre de Unión Tipo Cardan con flanche. El sistema con flanche nos permite al acoplamiento directo a la plataforma móvil sin la necesidad de adicionar elementos adicionales. Con un valor de 100.000 pesos unidad.

Elemento de 1 GDL - Este elemento es el mismo diseñado para la solución 2 permitiendo la rotación sobre el eje vertical de la unión.

3.6.3. Viabilidad del Proyecto

Viabilidad mecánica - El tener uniones comerciales se puede tener más robustez del sistema pero se debe realizar un cambio en el análisis de la cinemática. No limita la capacidad de carga de la plataforma manteniendo liviana la plataforma móvil.

Viabilidad de manufactura - Dado que se consigue la unión de forma comercial se tiene mayor robustez, aunque es necesaria la manufactura de piezas adicionales para permitir un grado de libertad adicional.

Viabilidad económica - El costo de la unión universal y su segundo componente no sobrepasan el presupuesto establecido.

Potencial de Investigación - Es diseño que permitirá realizar cambios en la posición de las uniones para realizar estudios de la geometría. Con mayor capacidad de carga debido a que debe mover menos peso.

Viabilidad de compatibilidad - Las uniones requieren un elemento para poderse acoplarse a los actuadores pero son compatibles a la instalación de la plataforma móvil. Esta solución no es compatible con la geometría de la plataforma móvil actual por lo que se debe manufacturar una nueva.

3.7. PROPUESTA SELECCIONADA

Se presenta una tabla comparativa de las tres propuestas, utilizada para resumir los criterios y su viabilidad con el fin de obtener una solución óptima.

Tabla 6. Viabilidad de Propuestas

	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Viabilidad Mecánica	No cumple con conteo GDL. Con inconsistencia	Cumple con conteo GDL, peso excesivo en la plataforma movil.	Cumple con conteo GDL.
Viabilidad Manufactura	Debido al desgaste se debe manufacturar varios elementos.	Elementos disponibles en Bogotá	Elementos disponibles en Bogotá
Viabilidad Económica	Alto costo para la manufactura	Bajo costo para la manufactura	Bajo costo para la manufactura
Viabilidad de Innovación	Diseño original de la Universidad	Permite cambios en la geometría	Permite cambios en la geometría
Viabilidad de Compatibilidad	Se usan la mayoría de elementos anteriores	Se debe realizar un sistema para acoplar al nuevo sistema	Se debe realizar un sistema para acoplar al nuevo sistema

Según los criterios propuestos la mejor opción a implementar es la solución 3, solución que cumple con las restricciones y resulta viable a ser implementada (Tabla 6).

3.7.1. Simulación Propuesta seleccionada

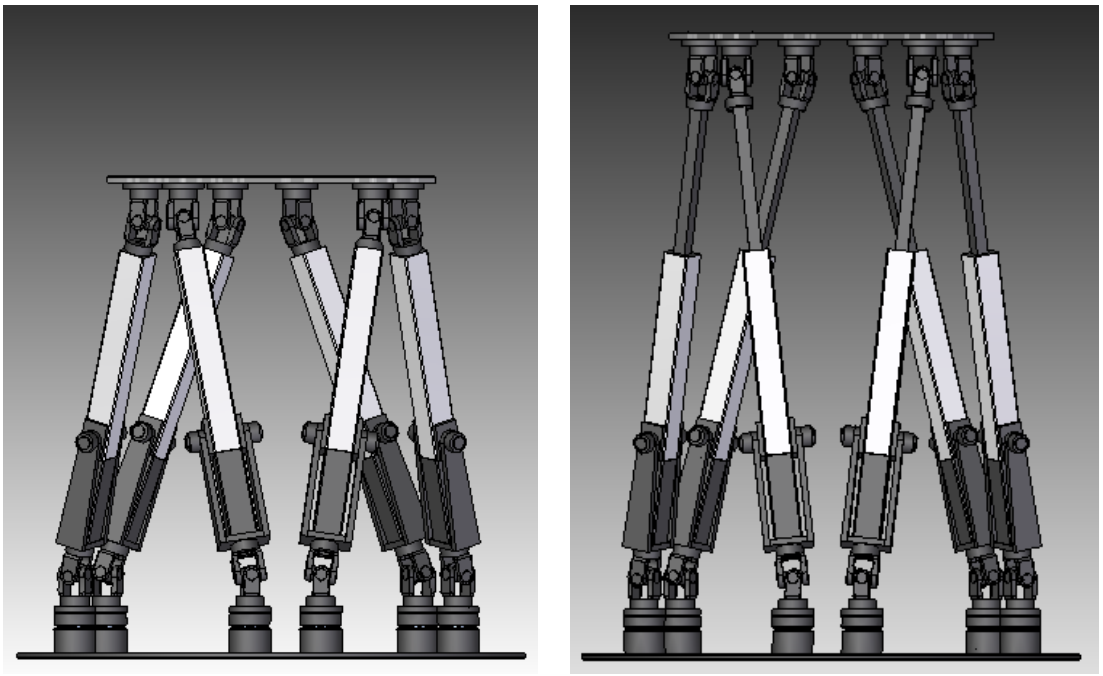


Figura 36. Simulación desplazamiento vertical

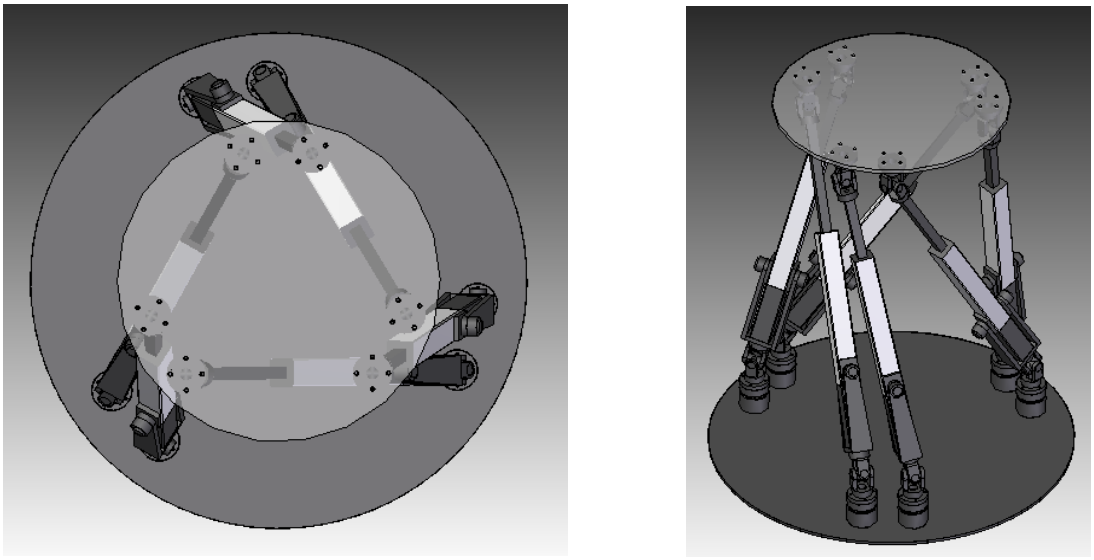


Figura 37. Simulación rotación en Z.

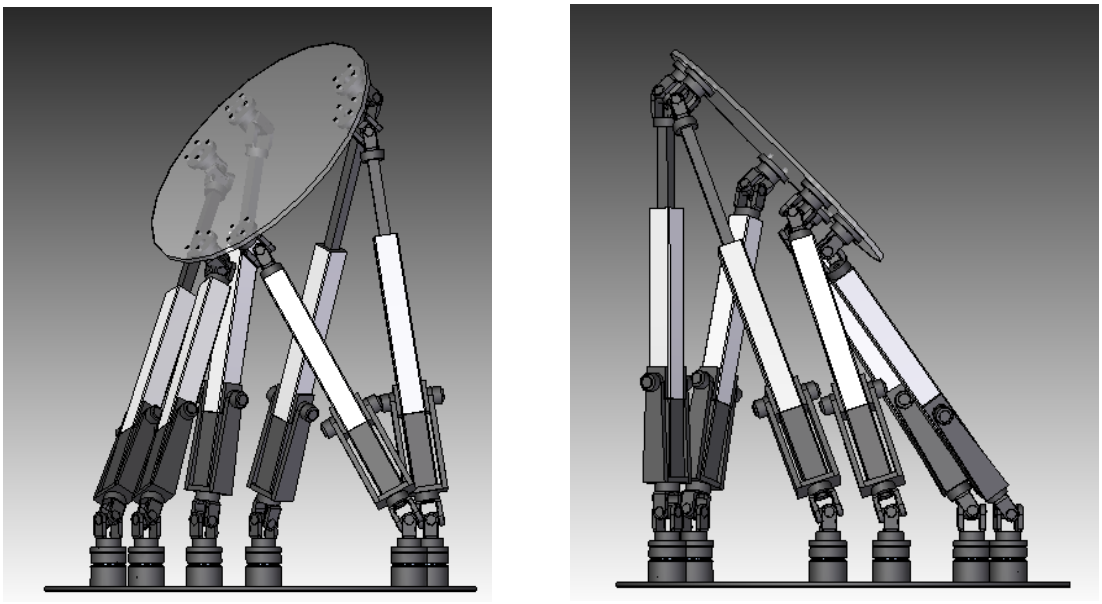


Figura 38. Simulación rotación en X.

4. DISEÑO DE SOLUCION

Según lo planteado en la propuesta las modificaciones que se deben implementar son una unión universal superior y una rotacional inferior. Se deben realizar los cálculos estructurales necesarios para la fabricación de los elementos necesarios. Estos elementos se evaluaran teniendo en cuenta la fuerza pico que ejerce un actuador de 1676N [Isaza] y el peso de carga máxima que se desea de la plataforma de 3300N. Se realizan los cálculos tomando el acero 4140 para la fabricación del eje con una resistencia a la fluencia de 645MPa.

Unión Universal Cardan

Para este elemento se seleccionó una unión comercial la representación CAD se puede encontrar en la figura 36 [Isaza]. Estas uniones son de un proveedor nacional, el mismo proveedor de las uniones ya implementadas en la plataforma actual (Figura 39).

Figura 39. Unión Universal Seleccionada

A esta unión se le debe realizar un acople para que sea compatible con los actuadores. Esta unión debe ser un cilindro de 1” ajustado por una cuña y un prisionero con rosca fina interna de ½”. Este acople se diseña de esta forma para que pueda ser cambiar en caso de deterioro sin afectar ni la unión ni el actuador.

Unión Rotacional

Se diseñará para la manufactura e implementación futura en la Plataforma Stewart. Se quiere que este elemento sea robusto ya que todo el peso de la estructura será soportado en estas seis uniones. Se realizaron los cálculos pertinentes enfocados en dos elementos cruciales de la estructura como lo son el eje y los rodamientos.

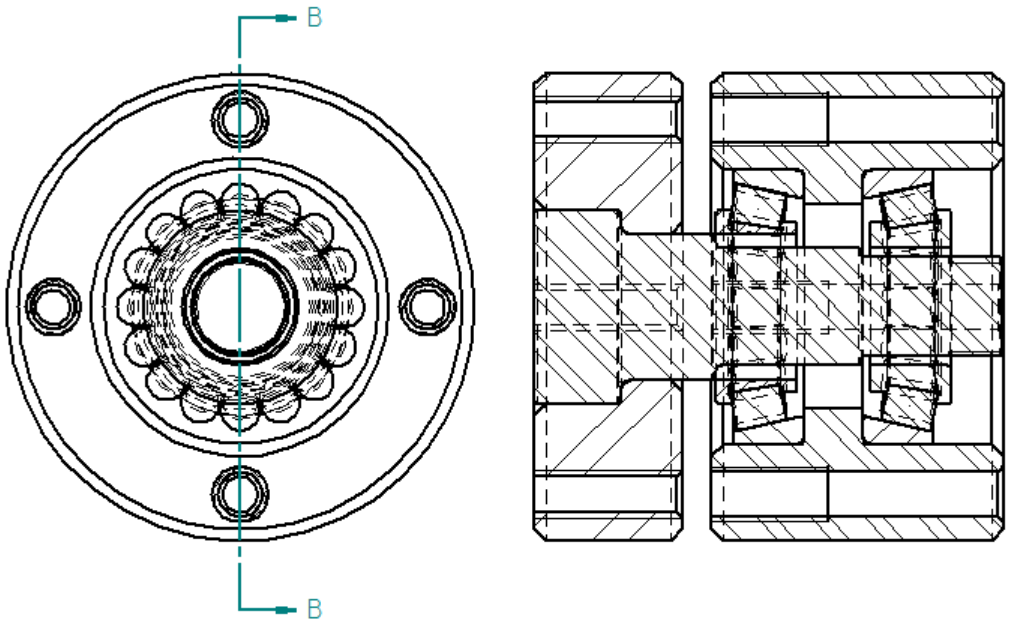


Figura 40. Diseño de unión rotacional

Este sistema consta de seis elementos estructurales los cuales incluye la base del eje, el eje, un par de rodamientos de rodillos cónicos y una base para los rodamientos (Figura 40). De estos elementos los más críticos con el eje y los rodamientos. Por esta razón se debe realizar una selección apropiada de estos elementos.

Tabla 7. Lista de Piezas

4.1. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Se seleccionaron rodamientos de rodillo cónico debido a sus cualidades de soportar magnitudes altas de esfuerzo axial como radial. Estos sistemas son una buena solución cuando se desea aplicar un esfuerzo combinado. Se deben implementar estos rodamientos a pares para ya que su función solo es en una dirección. Según el tipo y las dimensiones del rodamiento este soporta el esfuerzo de forma diferente y es representado por un factor de carga. En la ecuación (2) Se puede identificar la relación entre el esfuerzo axial permitido, el esfuerzo radial permitido y valor de carga máxima.

Figura 41. Rodamiento de rodillos cónicos. [Koyo]

Donde,

$$C_r = F_r + Y_0\, F_a \quad (2)$$

C_r , Valor de Carga Básica (valor en catalogo)

F_r, Fuerza radial

F_a, Fuerza Axial

Y_0, Factor de carga

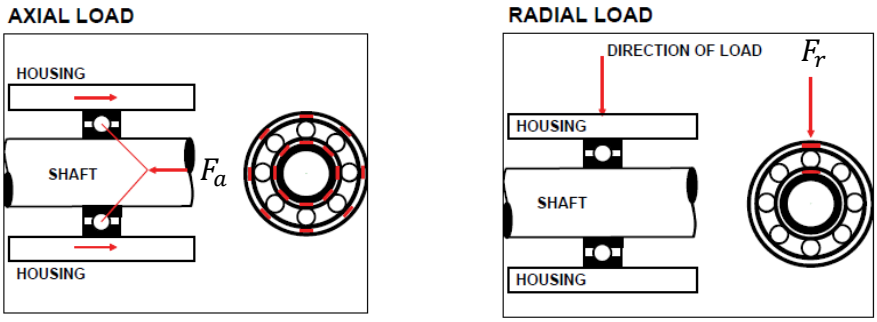


Figura 42. Dirección de fuerza axial y fuerza radial [Koyo]

Para nuestro caso se tiene una carga axial de 550N que es la carga máxima permitida más el peso de la plataforma dividido en las seis uniones. Se tiene una fuerza radial de 1676N que es la fuerza pico del actuador. Para la unión rotacional se escogieron los rodamientos 30204 y 32005 con coeficientes de carga de 0.94 y 0.77 respectivamente. Con estos valores podemos encontrar si cumplen con la carga máxima.

Rodamiento 30204

Se conoce el factor de carga que es de 0.94 para lo que se encuentra una carga básica de 2193N. Este rodamiento tiene una capacidad máxima de carga básica de 27,000N lo que nos brinda un factor de seguridad de aproximadamente 12.3.

Rodamiento 32005

Se conoce el factor de carga que es de 0.77 para lo que se encuentra una carga básica de 2100N. Este rodamiento tiene una capacidad máxima de carga básica de 37,700N lo que nos brinda un factor de seguridad de 18.

Disposición rodamientos

Para ubicar los rodamientos en el eje se tienen dos posibilidades, estas son posibles dado que los rodillos forman un ángulo direccionando la fuerza que aplican. La primera es la disposición en 'O' que direcciona la fuerza hacia afuera figura 43-1, La segunda es la disposición en 'X' que direcciona la fuerza hacia adentro figura 43-2. Se seleccionó la disposición en X para evitar los juegos de vuelco [Schaeffler].

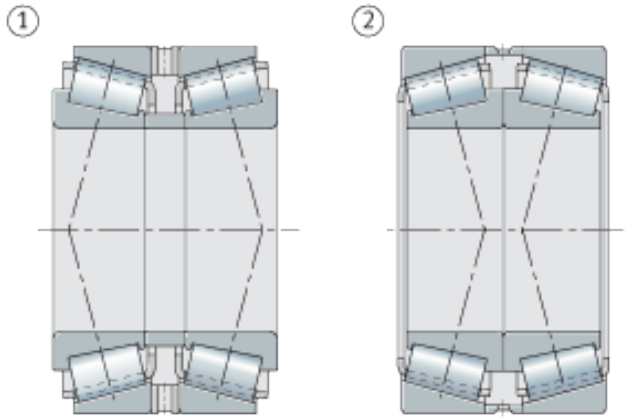


Figura 43. Disposición de los rodamientos

4.2. SELECCIÓN DE EJE

Las dimensiones del eje se seleccionaron según las dimensiones del eje. Se realizaron los cálculos pertinentes para asegurarse que no fuera a fallar el elemento.

Se realizaron análisis de esfuerzo axial y de flexión y luego se encontraron los esfuerzos máximos con la ecuación (3).

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + {\tau_{xy}}^2} \quad (3)$$

Análisis Axial

Para el análisis axial se tomaron dos fuerzas la primera es la del peso de la estructura por unión, con un factor de seguridad de 2, de 1100N y un componente de las fuerza radial transmitida por el rodamiento en fuerza axial. Esta relación se explica por la ecuación 4 donde aparece un nuevo coeficiente de relación Y que determina la cantidad de fuerza transmitida [SKF].

$$F_a = \frac{0.5\ F_r}{Y} \quad (4)$$

Dado esta información los valores para F1 y F2 son 1100N y 240N respectivamente. Se utilizó el programa MD Solids para calcular la repartición de carga y los esfuerzos del eje:

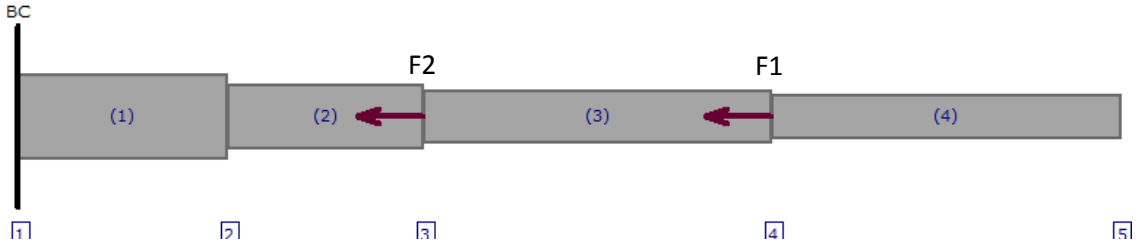


Figura 44. Diagrama del análisis axial.

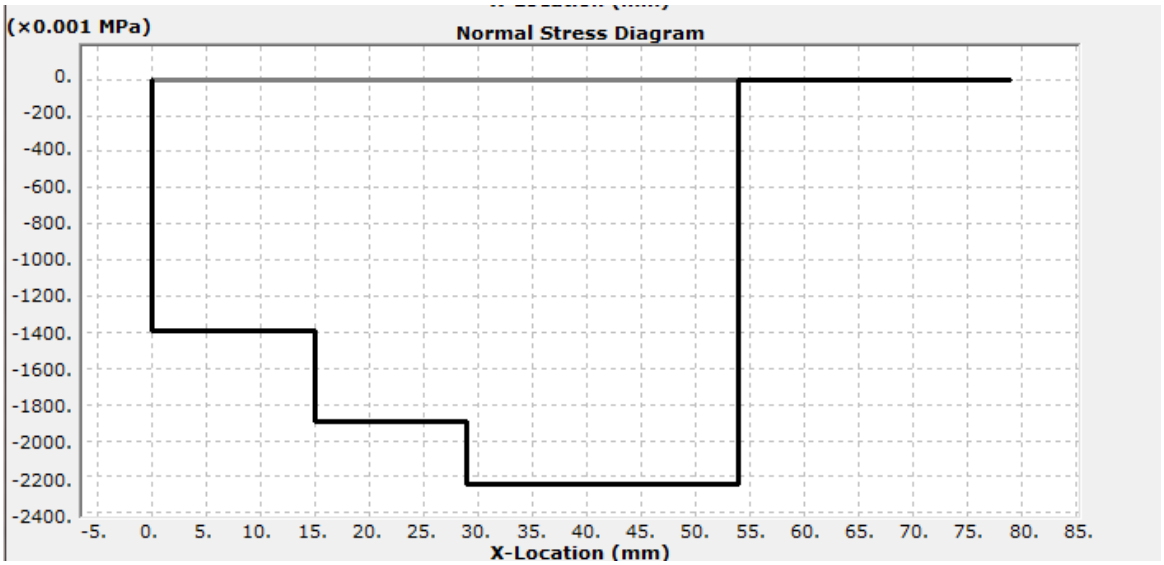


Gráfico 8. Esfuerzos axiales

Debido a las reducciones de sección se debe evaluar los concentradores de esfuerzos encontrados en cada sección con la figura se puede encontrar que para ambas secciones el valor es de 2.3.

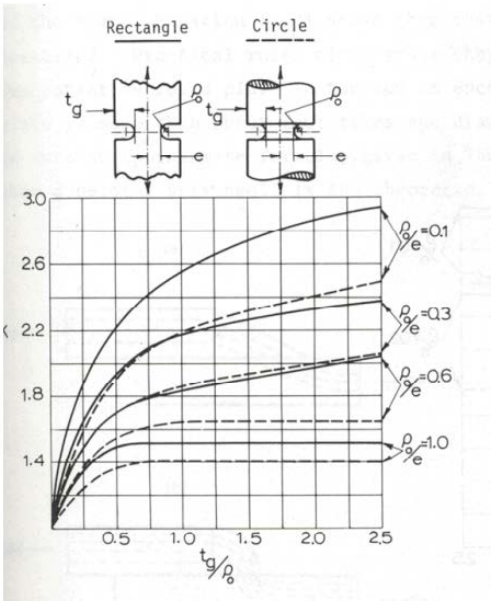


Figura 45. Concentradores de Esfuerzos. [Gonzáles]

Con este análisis se puede ver que el esfuerzo máximo axial es de -5MPa en los puntos a estudiar 3 y 4 (Gráfico 8).

Análisis de Flexión y Cortante

Para el análisis de flexión y cortante el programa nos brinda la distribución de cargas en el eje para con los que luego se calculara los esfuerzos de la viga.

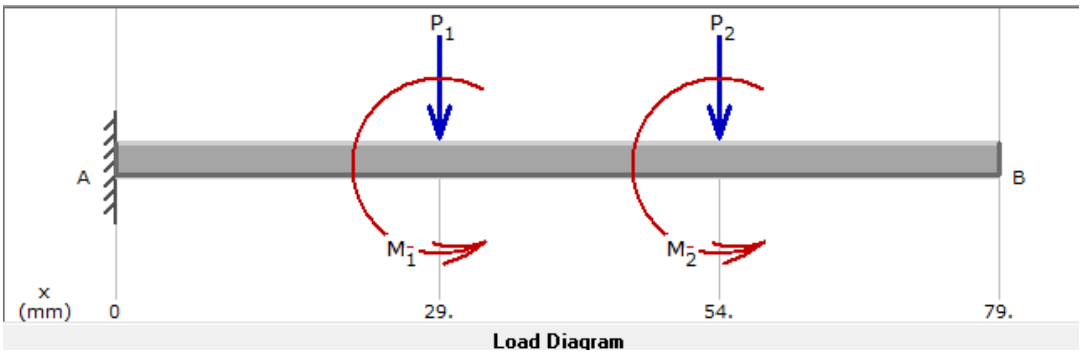


Figura 46. Diagrama de cargas

Esta distribución de cargas se obtiene analizando las cargas que produce el actuador al eje. Con esta información obtenemos el diagrama de momentos y el diagrama de esfuerzos cortantes.

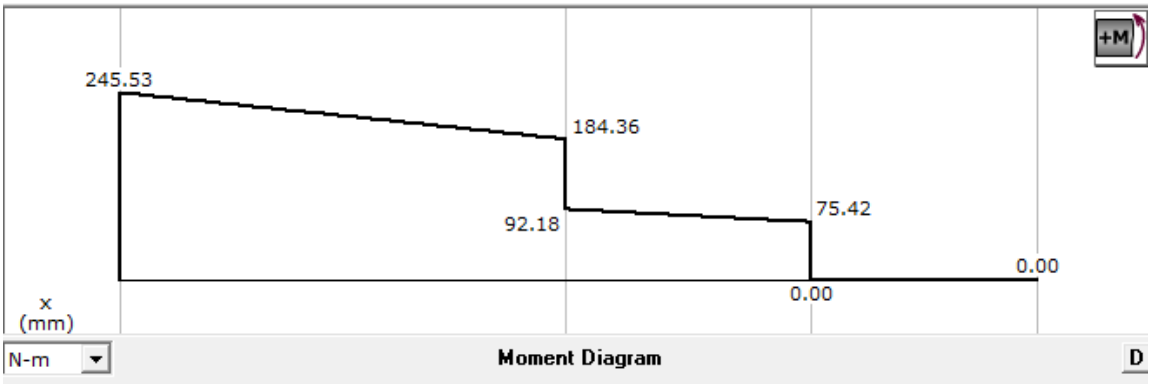


Figura 47. Diagrama de Momentos

En el diagrama 47 podemos identificar como el momento disminuye en las secciones críticas. Tomando los valores de momentos podemos en 3 y 4 se completar el análisis de flexión al implementar la fórmula 5.

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (5)$$

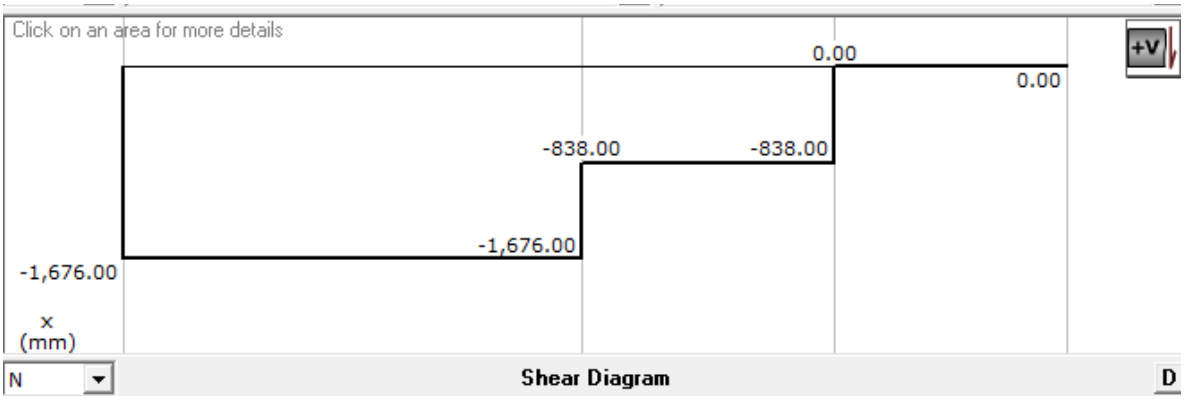


Figura 48. Diagrama de esfuerzo cortante

En el diagrama 46 se puede identificar la distribución de esfuerzos cortantes internos. Esta distribución no permitirá realizar el análisis de esfuerzos cortantes usando la fórmula 6.

$$\tau = -\frac{VQ}{It} \quad (6)$$

En la tabla se resumen los valores obtenidos en los esfuerzos de flexión, esfuerzo axial y esfuerzo cortante. Esta información se utilizara para por medio de la ecuación 3 encontrar los esfuerzos principales del sistema.

Tabla 8. Resultado de análisis de esfuerzos

	Esfuerzo Axial	Esfuerzo de Flexión	Esfuerzo Cortante	Esfuerzos Principales
Punto 3	95MPa	-5MPa	9MPa	(90.5,-0.5)MPa
Punto 4	117MPa	-5MPa	7MPa	(112.6,-0.6)MPa

El sistema se encuentra dentro de las especificaciones de diseño teniendo un factor de seguridad de 5.

4.3. ENSAMBLE

Se diseñó el ensamble visto a continuación garantizando tolerancias de manufactura y de ensamble estrictas

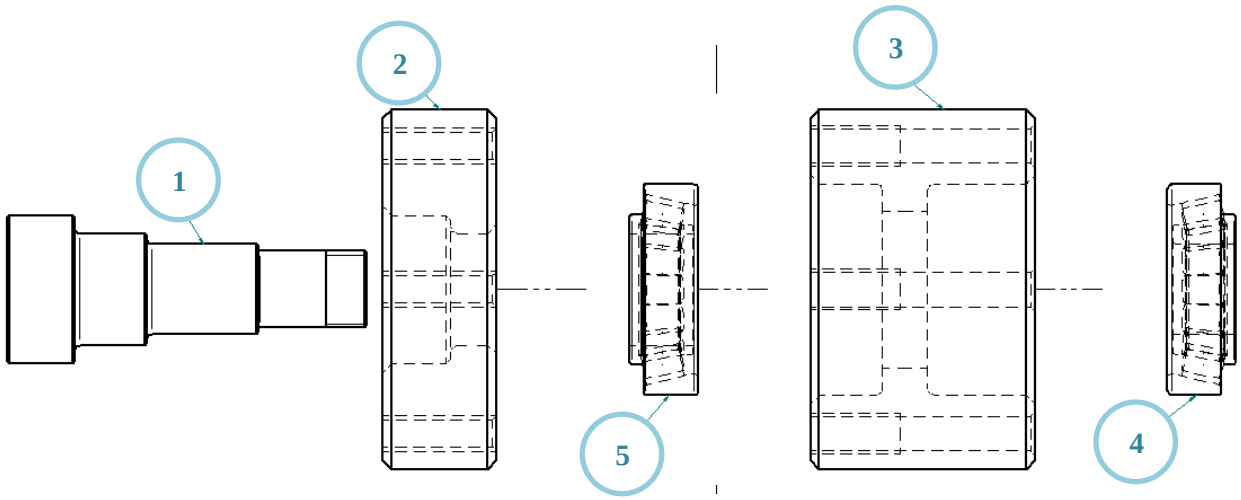


Tabla 9. Orden de ensamble

Orden	Acción
1	Se introduce el eje 1 en el elemento 2. Este ajuste debe ser forzado duro.
2	Se introduce la parte interior del elemento 5 al eje.
3	Se introducen las partes exteriores de los elementos 5 y 4 al elemento 3.
4	Se introduce el elemento 3 al eje.
5	Se introduce la parte interior del elemento 4 al eje.
6	Se ajusta con una tuerca al final del eje.

Con el orden de ensamble y los planos en el Anexo 2 se puede culminar la manufactura de las uniones para la implementación en la plataforma UniAndes.

5. CONCLUSIONES

El proyecto estudio el comportamiento de la plataforma Stewart UniAndes. Se diagnosticó su estado mediante el diseño de un protocolo que mediante pruebas estrictas describió el estado del sistema. El protocolo se implementó describiendo un sistema deteriorado por lo cual se decidió diseñar una solución al sistema. Este proyecto logro cuantificar las vibraciones indeseadas y presento una solución que para minimizar o eliminarlas.

5.1. DIAGNÓSTICO

A partir de los resultados obtenidos a lo largo de este proyecto, es posible afirmar que se ha logrado construir y verificar un protocolo para diagnosticar el estado de operación de la plataforma UniAndes. El protocolo se centra en diagnosticar las tolerancias permitidas en estado estático, que para el caso específico permitió encontrar una tolerancia máxima de 9mm en la dirección de mayor desplazamiento. El protocolo en las pruebas dinámicas permite determinar comportamientos ajenos al esperado de la plataforma.

Se realizó un estudio a fondo sobre los grados de libertad, el cual expuso inconsistencias en el sistema actualmente implementado en la Plataforma Stewart UniAndes. El resultado de este análisis arrojo que le plataforma se encuentra sobre-restringida. El sistema implementado ha solucionado esta inconsistencia alineando las uniones universales de debajo de tal forma que dos uniones restringen el mismo GDL, liberando 6-GDL, la cantidad de grados de libertad controlados que tiene el sistema actual. Por medio de simulaciones se corroboró el estado especial de la plataforma y su funcionamiento correcto cuando sus elementos se encuentran alienados. Se encontró que cuando los elementos no se alinean, no es posible realizar el ensamble de la estructura. Se identificó la falta de alineación como la causante del deterioro de los elementos que llevo a las vibraciones indeseadas, por esta razón se propuso un cambio a la estructura de la plataforma.

Es pertinente comentar que han establecido ciertas recomendaciones con respecto a aplicaciones del protocolo para futuros estudios y desarrollo del sistema. El protocolo permite abrir campos de investigación para la creación de programas de mantenimiento como el mantenimiento basado en vibraciones. El Protocolo permite estandarizar las pruebas que se deben realizar a la plataforma para de esta forma obtener resultados repetibles y comparables.

5.2. DISEÑO DE SOLUCION

Para la selección de solución se implementó el modelo de ingeniería que incluye definición del problema y de las restricciones. Se establecieron criterios de ingeniería que nos ayudarían a la selección de la mejor solución. Este proceso nos llevó a una renovación de la estructura implementada a cambio de un diseño con sistema de unión individual que permita cumplir con las restricciones de movilidad.

Para el diseño de la solución se decidió implementar dos tipos de unión; seis uniones comerciales cardan, las cuales fueron adquiridas al final del proyecto y quedan a disposición en el laboratorio COLIVRI de la Universidad de Los Andes. Es importante especificar que queda aún pendiente la manufactura de la segunda clase de uniones, para lo cual los planos de piezas individuales y el manual de ensamble se dejan terminados y se presentan como anexos en este documento.

6. TRABAJO FUTURO

6.1. APLICACIONES DEL PROTOCOLO

- Diseñar un mantenimiento basado en condiciones que permita crear unas magnitudes históricas de la plataforma. Con esta información histórica se podrá predecir el estado de la plataforma e implementar el protocolo cuando las vibraciones excedan una magnitud tolerable. En la figura 45 se puede ver un ejemplo de un histórico de la magnitud de las vibraciones y como se puede predecir el punto donde estas se vuelven no tolerables.

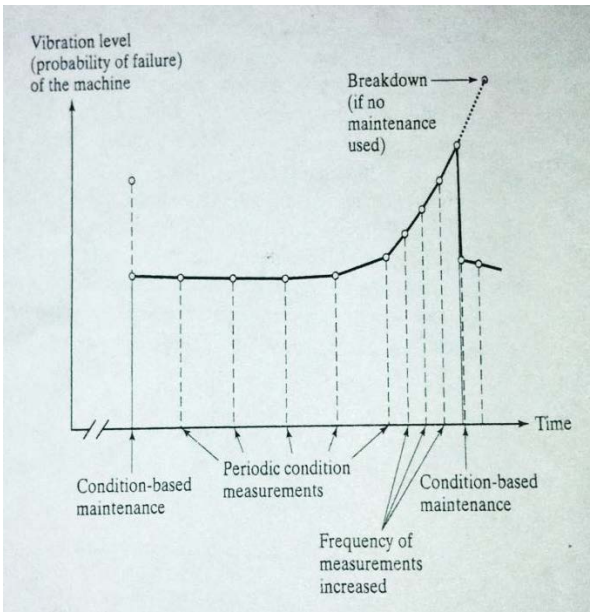


Figura 49. Mantenimiento basado en condiciones

- Realizar un análisis de sensibilidad a la manufactura y de esta forma crear un gráfico que permita establecer cuando las tolerancias permitidas por la plataforma ya no es problema de manufactura si no se trata de deterioro de los elementos.

- Continuar con el desarrollo del método de diagnóstico basado en vibraciones, implementado en el protocolo. Desarrollar las herramientas para poder identificar entre un comportamiento natural del sistema y un comportamiento indeseado. Estudiar la lectura de los espectrogramas para poder identificar elementos en ellos que lleven al diagnóstico de la Plataforma.

6.2. PLATAFORMA STEWART UNIANDES

- Se deben manufacturar las uniones rotacionales para poder realizar el cambio de una unión conjunta a dos individuales.

- Se debe realizar un estudio de la geometría óptima de la plataforma. Se tendrá que definir el radio óptimo entre las dos plataformas. También definir otros parámetros como lo es el desfase entre uniones y descubrir con cuales la plataforma tiene más fuerza y más espacio de funcionamiento.

- Se debe realizar la caracterización de la cinemática inversa de la plataforma. Esta caracterización debe ser implementada en una nueva programación de la plataforma.

7. BIBLIOGRAFIA

Attallah Ola Rashwan, Moataz Mohammad. (s.f). Six DOF Hexapod Challenge of Design and Innovation. THE AMERICAN UNIVERSITY IN CAIRO. Recuperado 03/06/11, del sitio web: http://biotsavart.tripod.com/hexapod.htm

Barreto, Juan Pablo (2008). Implementación de un simulador de conducción en una Plataforma Stewart. Tesis de grado. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Bonev, Ilian. (2003). The true origins of Parallel Robots. The Parallel Mechanisms Information Center. Recuperado 06/09/11, del sitio web: http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html.

Carosio, Federico (2007). Diseño de una Plataforma Stewart. Tesis de grado. Pregrado. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Coleman, Tony (2008). Test rendered. Recuperado 03/06/11, del sitio web:http://www.3dm3.com/forum/f24/male-robot-android-21529/index2.html.

Eisenmann, Robert C, et al. (1998). Machinery malfunction diagnosis and correction. Hewlett-Packard Professional Books.

François Léonard **(**2005**).** Phase spectrogram and frequency spectrogram as new diagnostic tolos. Revista Mechanical Systems and Signal Processing Volume 21, Issue 1, January 2007, Pages 125-137.

González Déctor, Eduardo (2003). Determinación del factor de concentración de esfuerzos en una placa con múltiples concentradores de esfuerzo me diante Algor. Tesis de grado. Universidad de las Américas Puebla.

Isaza, David. (2008). Diseño y construcción de un robot paralelo (Plataforma Stewart). Tesis de grado. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Koyo USA. Koyo JTEKT Group. Recuperado 03/06/11, del sitio web: http://koyousa.com/

Macías, Jorge Andrés. (2009). Diseño de un sistema para la medición del momento de inercia en sólidos rígidos. Proyecto Intermedio. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Ochoa, Nicolás (2008). Percepción de movimiento y sus aplicaciones a simuladores dinámicos de entrenamiento de pasajeros. Tesis de grado . Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Ochoa, Nicolás (2010). Motion systems for a Dynamic Simulator. Tesis de maestría . Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Real Academia Española. Diccionario de la lengua española. Recuperado 03/06/11, del sitio web: http://rae.es/

ROBOTICA (2010). Clasificación Robótica. Recuperado 06/06/11, del sitio web: http://robotica201011c.blogspot.com/p/robots-moviles.html.

Sakai, Nobuo (S.F). The Development of A New Joint Mechanism Based on Human Shoulder Morphology. Depto. of Intelligent Machinery and Systems. Kyushu University.

Schaeffler group (S.F.). Mecanizado y ejecución de los apoyos. Recuperado 05/09/11, del sitio web:http://medias.ina.de/medias/es!hp.tg.cat/tg_hr*ST4_1652155275.

SKF (1982). Catalogo General.Catalogo 3200/I Sp. Editorial Carl Gerber GmbH. Alemania

Tachi, Susumu. (1984). The third generation robot. Revista: Technocrat. Vol. 17-No.11

U.N.P., (2010). Teoría de Errores. Universidad Nacional de la Pampa. Laboratorio Mecánica de Fluidos.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO 1. Protocolo de Seguridad Plataforma Stewart

Este protocolo fue desarrollado por Juan Pablo Barreto en la Universidad de los Andes. Se debe incluir en la programación de Y Term este protocolo, debe ser adicionado y corrido antes de realizar cualquier operación con la plataforma.

Protocolo de Seguridad

```
PARA//PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO
TLIM=3;ELIM=2000;TL TLIM,TLIM,TLIM,TLIM,TLIM,TLIM;
KI 0,0,0,0,0,0;KP 1,1,1,1,1,1;KD 5,5,5,5,5,5
ER ELIM,ELIM,ELIM,ELIM,ELIM,ELIM;EN//MANEJO DEL ERROR
#ERROR;//RUTINA QUE REVISA EL ERROR DE POSICION
EA=_TEA;EB=_TEB;EC=_TEC;ED=_TED;EE=_TEE;EF=_TEF
JP#POSERR,@ABS[EA]>0.9*ELIM
JP#POSERR,@ABS[EB]>0.9*ELIM
JP#POSERR,@ABS[EC]>0.9*ELIM
JP#POSERR,@ABS[ED]>0.9*ELIM
JP#POSERR,@ABS[EE]>0.9*ELIM
JP#POSERR,@ABS[EF]>0.9*ELIM
JP #ERROR;EN
#TORQUE;
TA=_TTA;TB=_TTB;TC=_TTC;TD=_TTD;TE=_TTE;TF=_TTF
JP#POSERR2,@ABS[TA]>0.9*TLIM
JP#POSERR2,@ABS[TB]>0.9*TLIM
JP#POSERR2,@ABS[TC]>0.9*TLIM
JP#POSERR2,@ABS[TD]>0.9*TLIM
JP#POSERR2,@ABS[TE]>0.9*TLIM
JP#POSERR2,@ABS[TF]>0.9*TLIM
JP #TORQUE;EN //"Dummy" program
```

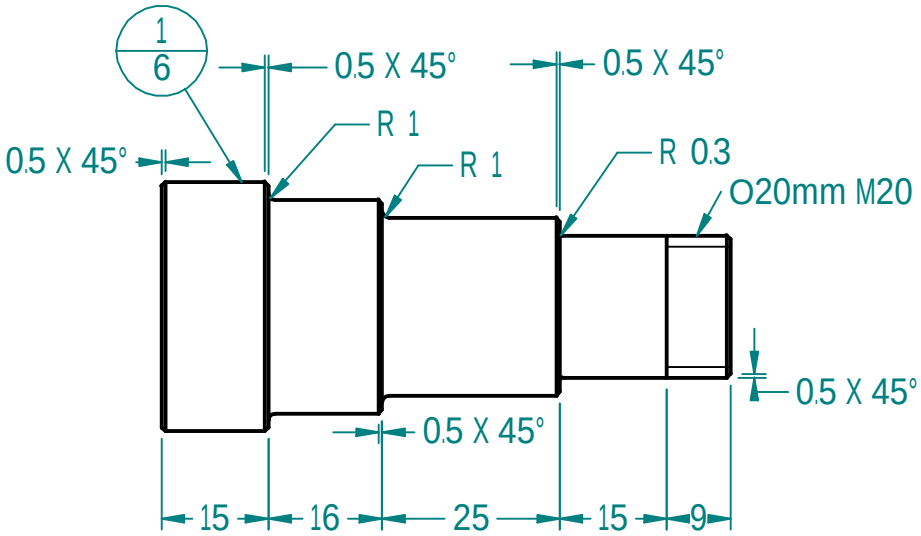
```
#POSERR //Start error routine on error

ST ABCDEF //Stop motor

AM ABCDEF //After motor stops

MG "ERROR, SE SUPERO EL ERROR LIMITE PERMITIDO"

TE;MG "LOS MOTORES QUEDAN EN SUS MANOS, VUELVA A  INICIO Y REINICIE EL
SISTEMA"//Send message

SB 1;AB1;HX; //Return to main program

#POSERR2 //Start error routine on error

ST ABCDEF //Stop motor

AM ABCDEF //After motor stops

MG "ERROR, SE SUPERO EL TORQUE PERMITIDO"

MG "LOS MOTORES QUEDAN EN SUS MANOS, VUELVA A INICIO Y REINICIE EL
SISTEMA"//Send message

SB 1;AB1;HX;
```

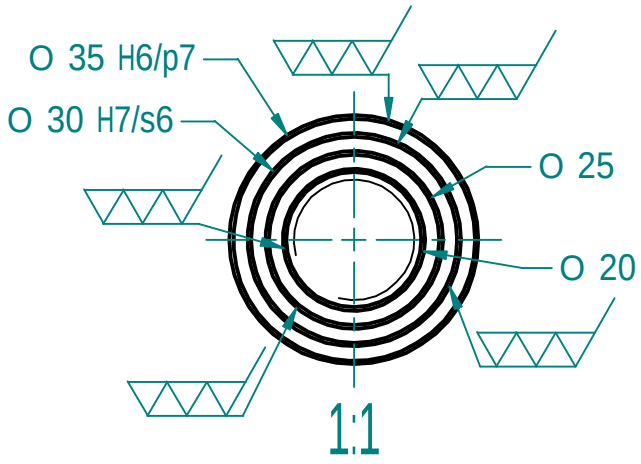
8.2. ANEXO 2. Planos de Ingeniería

Los planos de las estructuras se pueden encontrar en el CD anexo al trabajo.

Todos planos se encuentran en el documento Plano.dft

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado





	Nombre	Fecha
Dibujado	JAM	15/06/11
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1º

Solid Edge ST
Siemens PLM Software

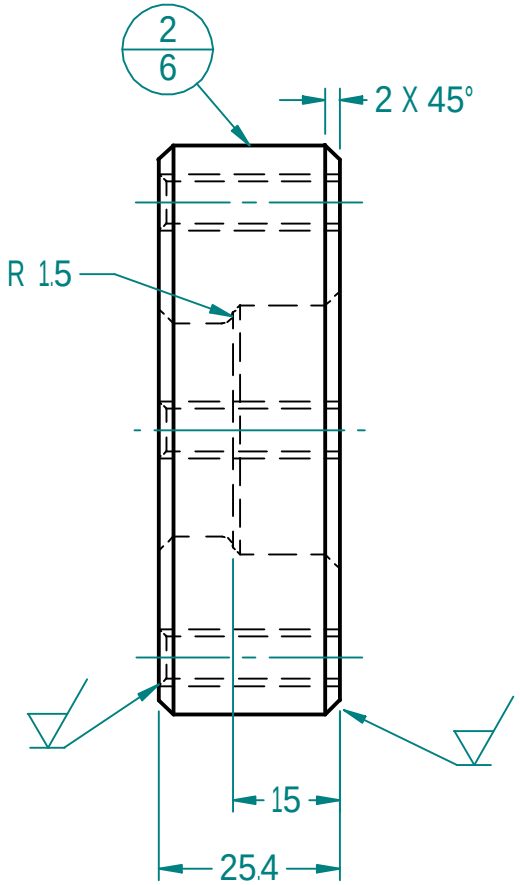
Título
Uniones Plataforma Stewart

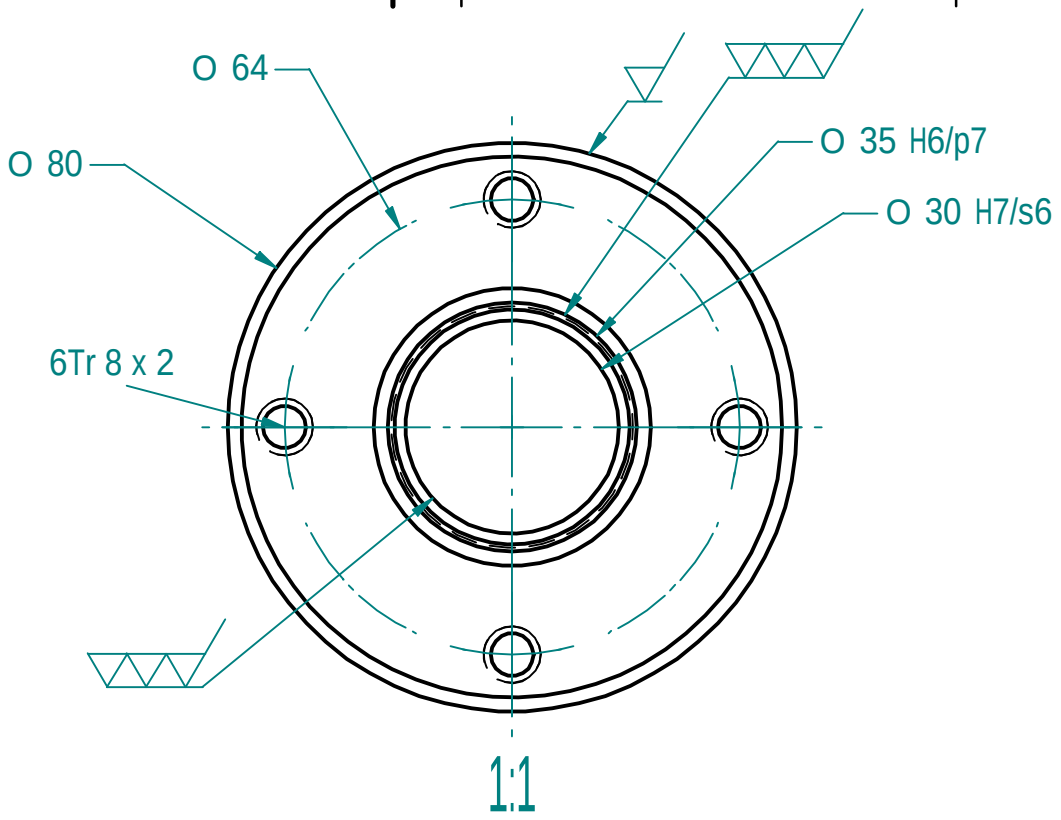
A4	Plano **Proyecto de Grado 2011-1**	Rev 1

Archivo: Planos3.dft

Escala	Peso	Hoja 1 de 6

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado





	Nombre	Fecha
Dibujado	JAM	15/06/11
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1º

Solid Edge ST
Siemens PLM Software

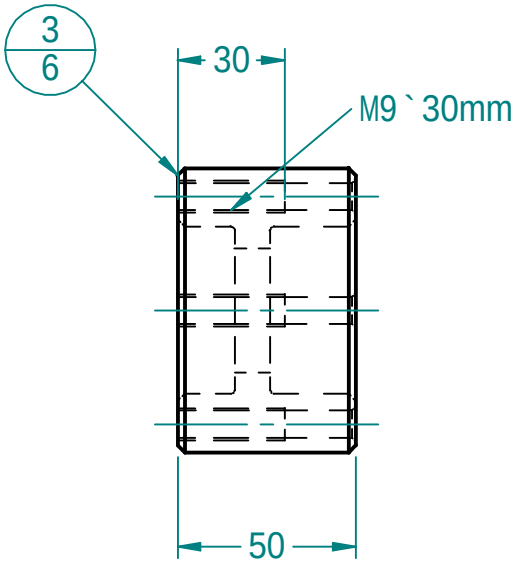
Título
Uniones Plataforma Stewart

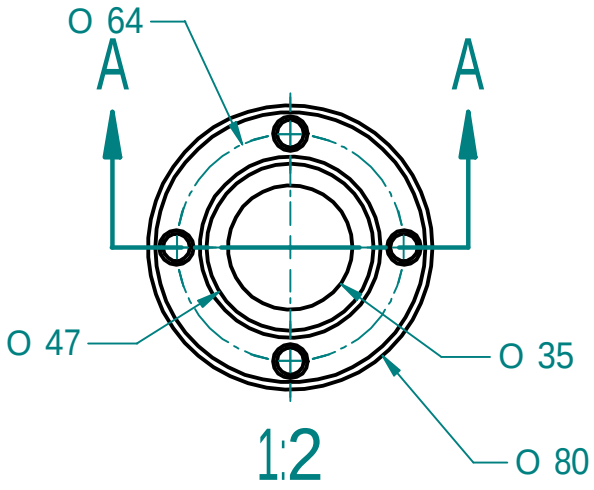
A4	Plano Proyecto de Grado 2011-1	Rev 1

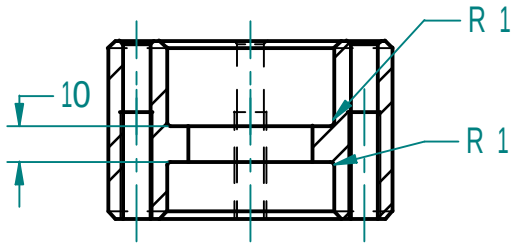
Archivo: Planos3.dft

Escala	Peso	Hoja 2 de 6

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado







CORTE A-A

	Nombre	Fecha
Dibujado	JAM	15/06/11
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1º

Solid Edge ST
Siemens PLM Software

Título
Uniones Plataforma Stewart

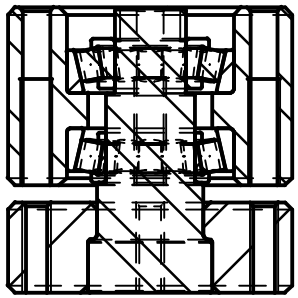
A4	Plano Proyecto de Grado 2011-1	Rev 1

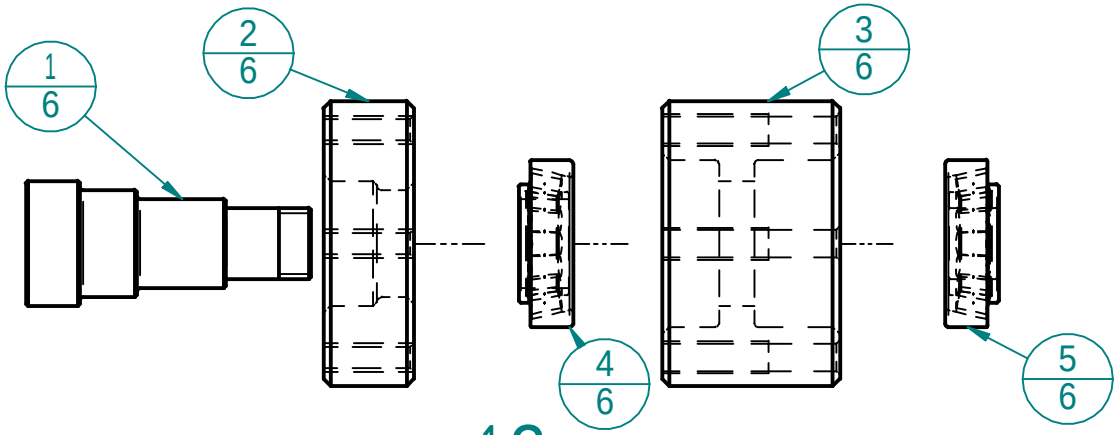
Archivo: Planos3.dft

Escala	Peso	Hoja 3 de 6

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

Lista de Piezas					
Numero de Pieza	Titulo	Descripción	Material	Peso Unitario (Kg)	Cantidad
1	Eje Escalonado	Varilla 1 1/2" x 65mm	Acero AISI 4140	0.23	6
2	Flanche Eje	Flanche 1" x Ø 85mm	Acero AISI 1020	0.8	6
3	Base Rodamientos	Varilla Ø 3 1/2" x 40mm	Acero AISI 1020	1.2	6





1:2

	Nombre	Fecha
Dibujado	JAM	15/06/11
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1º

Solid Edge ST
Siemens PLM Software

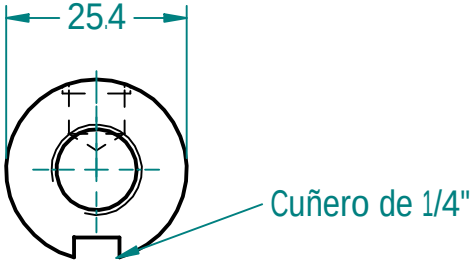
Título
Uniones Plataforma Stewart

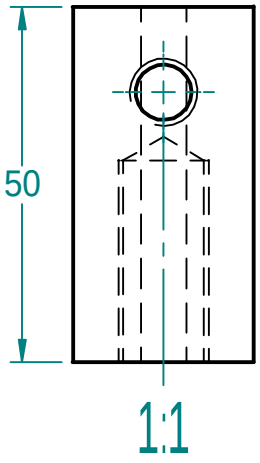
A4	Plano Proyecto de Grado 2011-1	Rev 1

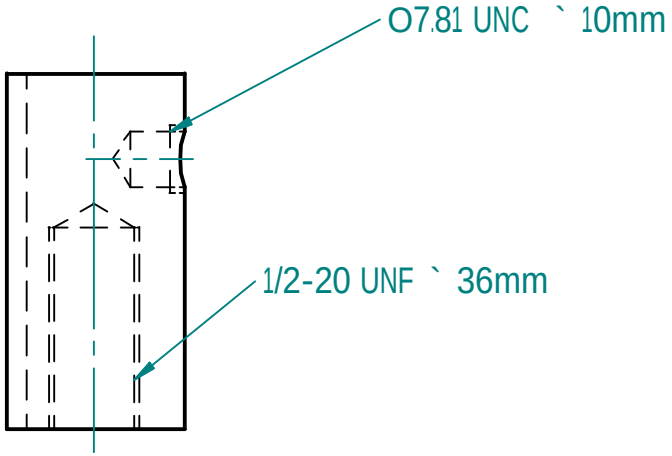
Archivo: Planos3.dft

Escala	Peso	Hoja 4 de 6

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado







	Nombre	Fecha
Dibujado	JAM	15/06/11
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1º

Solid Edge ST
Siemens PLM Software

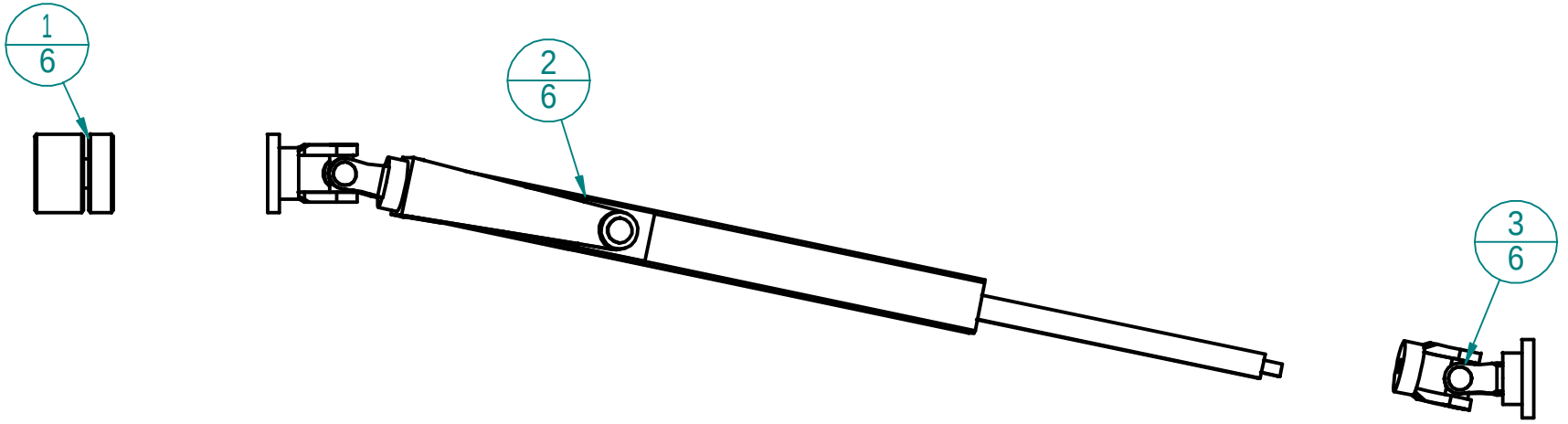
Título
Uniones Plataforma Stewart

A4	Plano Proyecto de Grado 2011-1	Rev 1

Archivo: Planos3.dft

Escala	Peso	Hoja 5 de 6

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



1:6.67

Numero de pieza	Titulo	Cantidad
1	Union Rotacional	6
2	Actuador con union universa	6
3	Union Universal con acople	6

	Nombre	Fecha
Dibujado	JAM	15/06/11
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1º

Solid Edge ST
Siemens PLM Software

Título
Uniones Plataforma Stewart

A4	Plano Proyecto de Grado 2011-1	Rev 1

Archivo: Planos3.dft

Escala	Peso	Hoja 6 de 6