

Pontificia Universidad Javeriana



Trabajo de Investigación de Maestría

Estrategia de control de posición-fuerza para un manipulador robótico aplicado a la reparación de tuberías hidrosanitarias.

Autor:

**Ing. Cristhian Yesid Bello
Ceferino**

Directores:

**Dr. Diego Alejandro Patiño
Dr. Fredy Ruiz**

*Tesis presentada como requisito
para obtener el grado de Magister
en Ingeniería Electrónica*

Departamento de ingeniería electrónica.

Noviembre 2015

Contenido

1. INTRODUCCION:.....	3
1.1 Objetivos:	5
1.1.1 Objetivo General	5
1.1.2 Objetivo Especifico	5
2. ESTRUCTURA MECANICA.....	6
2.1 Modulo Fijación.....	7
2.2 Modulo Parchado.....	8
2.3 Modulo Lijado.	9
2.4 Modelado de estructura mecánica:	10
2.4.1 Modelo de <i>SolidWorks</i>	10
2.4.2 Parámetros Denavit Hartenverg	13
3. ARQUITECTURA DE CONTROL:	15
3.1 Diagrama de Control	15
3.2 Generador de trayectoria.....	16
3.3 Control de la trayectoria:	22
3.3.1 Realimentación de estados	23
3.3.2 Control LQR	24
3.3.3 Resultados:	27
3.4 Control de fuerza.....	31
3.4.1 Pruebas de esfuerzo mecánico	31
3.4.2 Modelado de la fuerza externa en <i>SimMechanics</i>	33
3.4.3 Lazo de control de fuerza.....	34
3.4.4 Resultados	35
4. FIGURAS.....	39
5. BIBLIOGRAFIA	39

1. INTRODUCCION:

En la actualidad, es necesario realizar la inspección de tuberías no solo en Bogotá sino en todo territorio nacional, debido a la falta de planos que indiquen las rutas que llevan este tipo de estructuras. Además, este proceso permite la inspección de las condiciones en las que se encuentran las tuberías y realizar los arreglos pertinentes en cada caso.

Aunque hoy en día se está realizando esfuerzos por darle solución a esta problemática, la tecnología con la que se trabaja es limitada y se hace indispensable actualizar este sistema. Si bien es cierto que hay modelos implementados en el exterior que realizan estas actividades de forma exitosa como es el caso de Rovion Digisewer, el robot creado en Boecillo (España) en el año 2003, el robot Raposa, PureRobitcs, o Versatrax 300 vlr (KUKA., 2013) la mayoría de estos son muy costosos y es por esto que se busca implementar un modelo con tecnología inalámbrica, con la capacidad de identificar su localización dentro de la tubería y visualizar el estado de esta con la resolución de gama alta como la que ofrece las cámaras con tecnología CMOS. Versatrax 300 funcionó como inspiración para el modelo estructural al prototipo de exploración desarrollado en el proyecto YNAMI;

El proyecto YNAMI, es un trabajo realizado por la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) junto con la Universidad Militar, financiado por Colciencias y coejecutado por la empresa Hidráulica y Urbanismo H&U, el cual pretende encontrar una solución viable, eficaz y económica para la exploración, inspección y reparación de tuberías en Bogotá. Este proyecto separo la tarea de exploración y reparación en dos plataformas robóticas independientes, solo la primera cuenta con electrónica de medición abordo, la plataforma de reparación solo contara con los motores y la electrónica de control de dichos motores dentro de ella.

“Estrategia de control de posición-fuerza para un manipulador robótico aplicado a la reparación de tuberías hidrosanitarias”, cuenta con varios trabajos previos entre los que se encuentran:

- “Ingeniería conceptual de sensores y actuadores para una plataforma robótica de exploración y reparación de sistemas hidrosanitarios” (Ramirez, 2012), realizado por Juan Pablo Andrés Ramírez Pardo y Julián David Pareja Garzón, este trabajo de tesis realizó la escogencia de la electrónica interna de la plataforma de exploración.
- “Sistema de supervisión de sensores para una plataforma robótica de exploración y reparación de tuberías hidrosanitarias” (B., 2013) realizado por Deisy Alejandra Barrera y Cristhian Yesid Bello, este trabajo de tesis desarrolló la programación necesaria para comunicar la electrónica interna de forma que (por medio de los sensores) se pudiera conocer el estado de la plataforma robótica y generar alarmas (según los niveles de operación establecidos por la empresa H&U).
- “Desarrollo de estrategia de control para un brazo mecánico reparador de tuberías hidrosanitarias” (Pareja, 2014) realizado por Julián David Pareja Garzón. Su trabajo de maestría tuvo como objetivo hacer el control de posición para una plataforma robótica con la estructura de un brazo robótico.

La plataforma de reparación deberá ser remolcada o empujada por la plataforma de exploración y está encargada de utilizar los datos recogidos en el proceso de exploración tales como: localización de la fisura y diámetro de la tubería, una vez obtenidos esos datos, la plataforma debe posicionarse con ayuda de la plataforma de exploración he inicial el proceso de reparación el cual consisten en tres etapas:

1. Fijación: Por medio del módulo de fijación, (ver capítulo ESTRUCTURA MECÁNICA) la plataforma debe conocer el diámetro de la tubería en la que se encuentra y abrir la estructura de fijación de forma automática para generar una fuerza que mantenga en su posición a la plataforma de reparación mientras genera el lijado y parchado en la tubería.
2. Lijado: La plataforma robótica debe estar en capacidad de generar una trayectoria alrededor de la fisura hallada y lijar la superficie seleccionada para asegurar que el parchado sea eficaz, para cumplir con ello cuenta con un módulo de lijado de tres grados de libertad cuyo control es el trabajo central de este trabajo de tesis.
3. Parchado: Una vez la superficie de la tubería cuenta con el nivel de adherencia deseado, se debe retirar el módulo de lijado y reemplazarlo por el módulo de parchado, y (luego de repetir la etapa 1) mantener un parche con la presión seleccionada para que el material del tubo y la gravedad de la fisura para que la tubería quede completamente reparada.

Con el fin de contribuir al desarrollo de un proceso de mantenimiento efectivo a las tuberías, es que este proyecto de grado trata de desarrollar una estrategia de control para el módulo de desbaste del robot reparador de tuberías hidrosanitarias. El proyecto se fundamenta en la correcta elección de los algoritmos de control para obtener la cantidad de fuerza correcta que se debe ejercer en el desbaste del área de la fisura mientras se asegura que la ejecución de la trayectoria requerida sea completada exitosamente. Para cumplir con esta tarea la arquitectura debe construir la trayectoria articular a lo largo de la trayectoria cartesiana, lo cual requiere de los parámetros *Denavit Hartenberg* de la estructura, el modelo de la plataforma robótica como planta de control, y la odometría de la fisura que se desea reparar.

El proyecto está basado en el manejo de dos software muy importantes: *Solidworks* y *Matlab*. *Solidworks* es una plataforma de desarrollo CAD que permite simular las propiedades físicas de casi cualquier estructura. Con ayuda de este programa se debe realizar el ensamble de la estructura mecánica que conformara el robot reparador, es importante resaltar que la estructura mecánica que se desea simular debe contar con las relaciones de posición entre piezas estrictamente necesarias para poder exportar un modelo suficientemente controlable a *Matlab* con ayuda del complemento *SimMechanics*, por esta razón los detalles como tornillos, tuercas y demás son tenidos en cuenta dentro del peso de una pieza maciza central dando como resultado una estructura de Aluminio con siete segmentos diferentes que al ser ensamblados conforman un robot de tres articulaciones, dos prismáticas y una rotacional. Una vez el modelo mecánico de la plataforma robótica ha sido exportado a *Matlab* es compactado dentro de un subsistema en *Simulink* para mayor facilidad y se puede iniciar el proceso de creación de la arquitectura de control.

1.1 Objetivos:

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar una Estrategia de control de posición-fuerza para un manipulador robótico aplicado a la reparación de tuberías hidrosanitarias.

1.1.2 Objetivo Especifico

- Implementar un modelo CAD que integre la dinámica y mecánica del módulo de lijado del robot y la interacción del efector final con la tubería.
- Diseñar un estimador de la fuerza de contacto entre el efector final y la tubería a partir de la medición de corriente de los motores que componen el manipulador.
- Diseñar una estrategia de lijado que garantice el cubrimiento de toda el área a tratar respetando limitaciones de fuerza y velocidad del manipulador.
- Desarrollar una arquitectura de control de seguimiento de la trayectoria para el módulo de desbaste a partir de mediciones de velocidad, posición y la estimación de fuerza articular.
- Validar la arquitectura de control y la estrategia de lijado en un ambiente simulado, verificando el error de seguimiento de la trayectoria seleccionada.

2. ESTRUCTURA MECANICA

La plataforma de reparación del proyecto *YNAMI* es una propuesta mecánica por parte de la Universidad Militar Nueva Granada que cumple con los siguientes requerimientos:

- La estructura debe tener una morfología que le permita navegar correctamente en el entorno cilíndrico de las tuberías.
- La plataforma de reparación debe poder ser operada de forma manual para permitir al operario acercarse al efector final a la grieta detectada.
- El área de trabajo debe ser de 20x20 cm.
- El proceso de lijado debe evitar perturbaciones externas a causa de la inercia del movimiento del efector, por esta razón la plataforma requiere módulos de fijación a la tubería.

Finalmente, la estructura debe estar en capacidad de cumplir a cabalidad con la totalidad del siguiente procedimiento:

- Detección de fisura de forma manual, la plataforma cuneta con una cámara abordo que permite asegurar que las coordenadas en las que la plataforma de exploración detecto la fisura son correctas.
- Fijación de la plataforma a la tubería, según el análisis de fuerza realizado por la universidad Militar (Militar, Analisis por elementos finitos con fuerza normal en la zapata, 2013), es necesario un módulo de fijación a cada extremo de la plataforma para evitar movimientos inerciales que perturben el procedimiento de lijado.
- Acercamiento del efector final a la grieta detectada, este procedimiento se hace de forma manual haciendo uso de la cámara con la que cuenta la plataforma.
- Lijado de la superficie, el cual es el procedimiento que se desarrolla a lo largo de este trabajo de grado.
- Cambiar de efector final, el procedimiento aprovecha las características modulares de la plataforma para evitar sobrecargarla de herramientas. Como consecuencia, el efector final de lijado y el de parchado son montables sobre la misma estructura. Así que al terminar el lijado hay que reemplazar el efector final para terminal el procedimiento con el efector final de parchado.
- Parchado, el módulo de parchado debe mantener la presión entre el parche y la superficie de la tubería mientras la mezcla adhesiva se seca.
- Revisión final, cuando el parche ha sido colocado en su posición solo resta revisar por medio de la cámara que no se haya formado burbujas durante el procedimiento de parchado que puedan comprometer la calidad de la reparación.

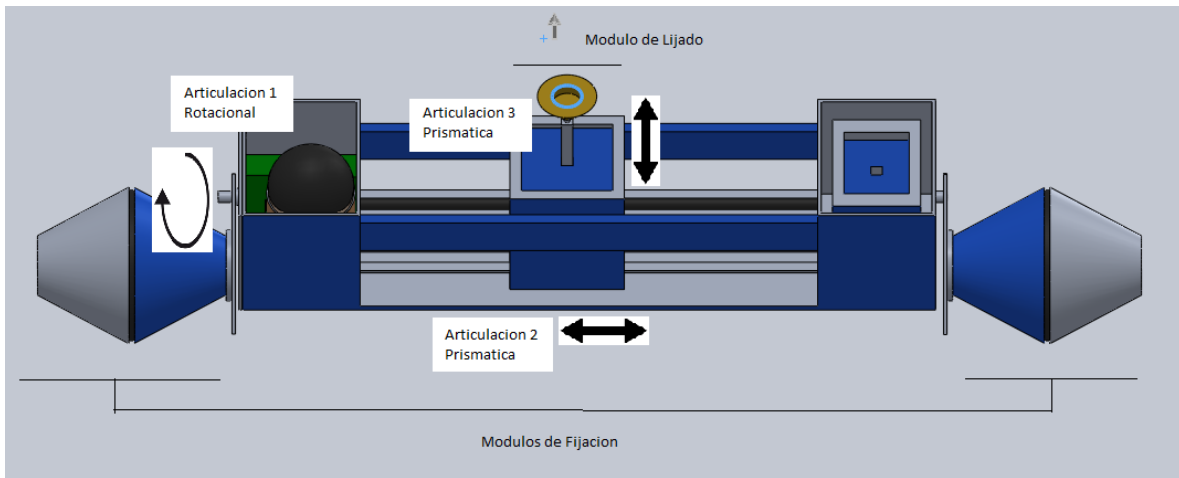


Figura 1: Plataforma de reparación importada desde *SolidWorks* hacia *Matlab*.

La estructura mecánica requiere de un modelo que pueda ser exportable a *Matlab* para poder montar la arquitectura de control sobre ella, para esta tarea se utilizó el complemento de *Matlab* “*SimMechanics*”. El complemento construye un archivo .xml con las características físicas de la estructura en estructura de árbol (la estructura de árbol se encarga de mantener la relevancia de la conexión de cada segmento con el segmento anterior). Es importante resaltar que la estructura mecánica que se desea simular debe contar con las relaciones de posición entre piezas estrictamente necesarias para poder exportar un modelo suficientemente controlable desde *SolidWorks* a *Matlab* con ayuda del complemento “*SimMechanics*”, por esta razón, como se muestra en la figura 1, los detalles como tornillos, tuercas y demás son tenidos en cuenta dentro del peso de una pieza maciza central. Una vez el modelo mecánico de la plataforma robótica ha sido exportado a *Matlab* es compactado dentro de un subsistema en *Simulink* para mayor facilidad y se puede iniciar el proceso de creación de la arquitectura de control.

2.1 Modulo Fijación.

Al encontrar la fisura por medio de la cámara del reparador, el robot debe asegurar que su posición sea fija para que el seguimiento de la trayectoria se lleve a cabo sin disturbios adicionales a los que puedan encontrarse en la superficie del tubo. Para balancear la estructura, existe un módulo de fijación a cada extremo de la estructura.

La cantidad de fuerza que se espera realizar por parte del motor de este módulo según el peso aproximado de la estructura y el material de los tubos para los cuales la estructura robótica está diseñada es de 50Kg. Este cálculo fue realizado en el estudio de fuerzas presentado por parte de la universidad Militar Nueva Granada (Militar, Analisis por elementos finitos con fuerza normal en la zapata, 2013).

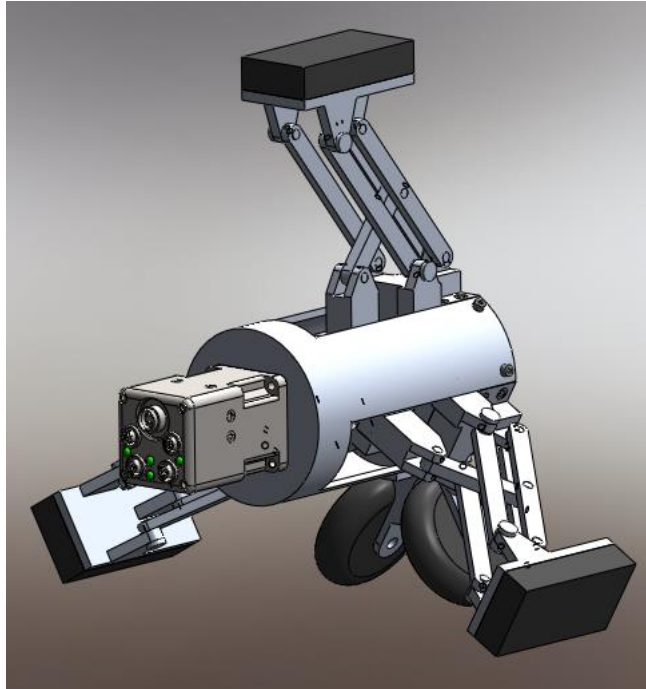


Figura 2: Módulo de fijación de la plataforma robótica de reparación.

Como se muestra en la figura 2, el Módulo de fijación solo cuenta con un único motor, el cual está encargado de hacer la apertura de las zapatas para generar presión contra el tubo. El número mínimo de zapatas que mantienen equilibrada la estructura y aplican una cantidad de fuerza suficiente para que el módulo de desbaste pueda mantener su posición completamente fija según el estudio hecho por la universidad Militar Nueva Granada son 3 (Militar, Estructura del Robot Reparador, 2013).

2.2 Módulo Parchado

Según lo pactado con la empresa H&U y el diseño de la estructura, el proceso de reparación consta de dos viajes de la estructura de reparación: Un primer viaje para desbastar la superficie del tubo con la intención de asegurar que el parche tenga una un máximo de adherencia y un segundo viaje donde el módulo de parchado (visualizado en la figura 3) está encargado de colocar el parche en la posición correcta para reparar la fisura. El parche debe ser sostenido por un lapso de tiempo de alrededor de 4 minutos con una fuerza superior a los 8Kg según la experiencia de la empresa H&U y pruebas realizadas por parte de la universidad Militar y Javeriana en conjunto (ICONTEC, 2008) (Zalucha) (A. Martín, 1998). Los ingenieros químicos de la Universidad Nacional encargados de diseñar el pegamento para fijar el parche sobre la superficie del tubo y el personal técnico de la empresa H&U encargada de hacer el mismo procedimiento diariamente de forma manual, son quienes permitieron la realización de dichas pruebas y la obtención de datos requeridos para el manejo de este módulo (Javeriana, 2013).

El tamaño del parche y por lo tanto de la almohadilla encargada de colocar el parche es de 20x20 (cm), dicho parámetro fue importante para restringir la trayectoria que se desea realizar con el módulo de lijado.

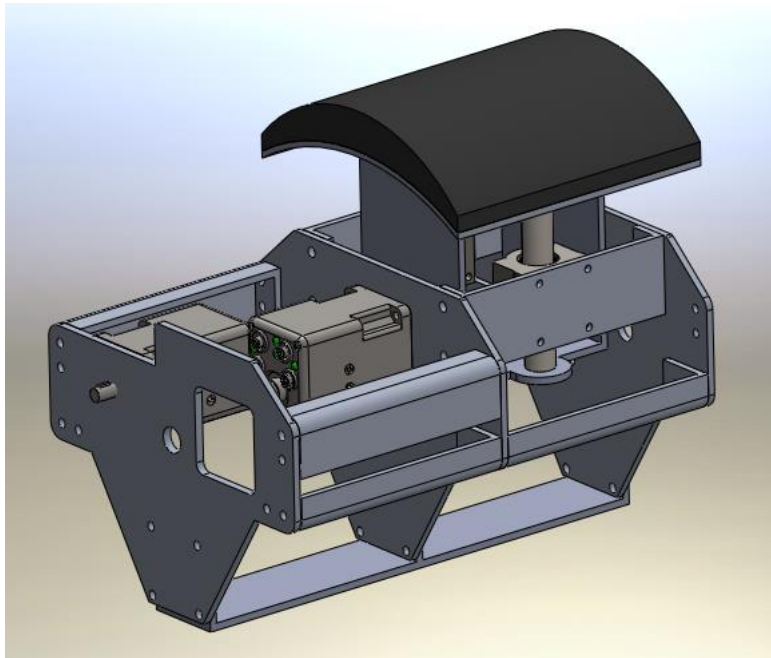


Figura 3: Modulo de parchado de la plataforma robótica de reparación.

2.3 Modulo Lijado.

Este trabajo de grado se centra en realizar el control de posición y fuerza de este módulo debido a que es el único módulo que cuenta con más de un grado de libertad, lo que causa que el control de las articulaciones que lo componen sea significativamente más complejo. Según estudios del procedimiento de lijado sobre el material de la tubería (PCV “Cloruro de Polivinilo”) por parte de la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad Nacional (E.P.A., 1999), la fuerza que se requiere para crear una superficie de adherencia óptima para el parche es entre 1 y 2 Kg con un efector final que gira a 400 RPM.

Como se muestra en la figura 4, el módulo de lijado no solamente está compuesto por las tres articulaciones encargadas de posicionar el efector final en las coordenadas correctas sino además cuenta con una cámara capaz de mostrar en tiempo real la posición relativa del efector final con respecto al tubo para crear la posibilidad de hacer parte del proceso en forma manual o una revisión en caso de que el tipo de fisura requiera la observación de algún experto.

Las tres articulaciones cuentan con motores SM23165D de marca Animatics, los cuales poseen un toque pico de 0.424 N-m y un torque continuo de 0.282 N-m con una fuente de voltaje de 24 V dc. Es importante resaltar que los motores pueden trabajar con una fuente de voltaje de 48V dc para elevar el valor de los parámetros anteriores en caso de que las pruebas en el entorno real lo requieran pero según el estudio de fuerza de la Universidad Militar Nueva Granada (Henrriquez,

2013) (Animatrics, 2011) y los resultados de la arquitectura de control de trayectoria, estos valores son suficientes para cumplir con el trabajo requerido.

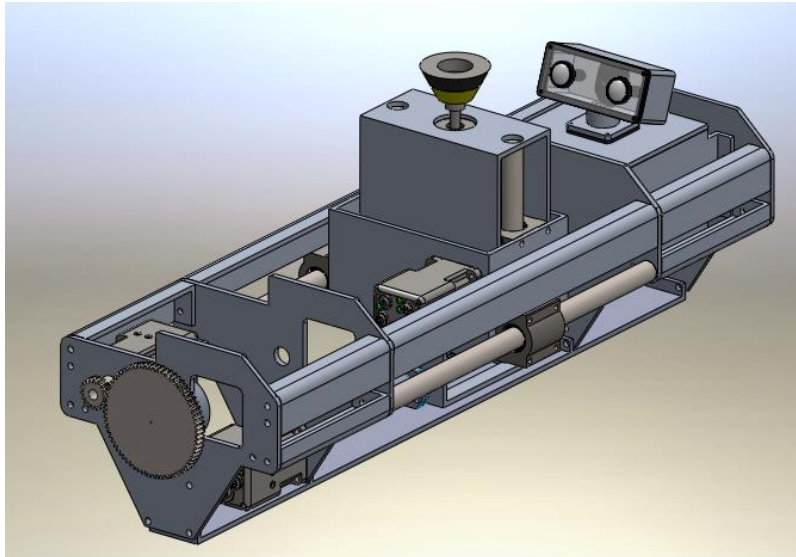


Figura 4: Modulo de lijado de la plataforma robótica de reparación.

2.4 Modelado de estructura mecánica:

2.4.1 Modelo de *SolidWorks*

El modelo de la estructura mecánica completo fue diseñado por ingenieros de la universidad Militar Nueva Granada, quienes escogieron el Aluminio 6061T6 por sus propiedades anticorrosivas, su relación peso densidad y en general porque es una aleación que pertenece a un grupo reconocido de materiales que son utilizados para estructuras aeronáuticas y robóticas (Garcia, 2002) (a. c. Mendez, 2005).

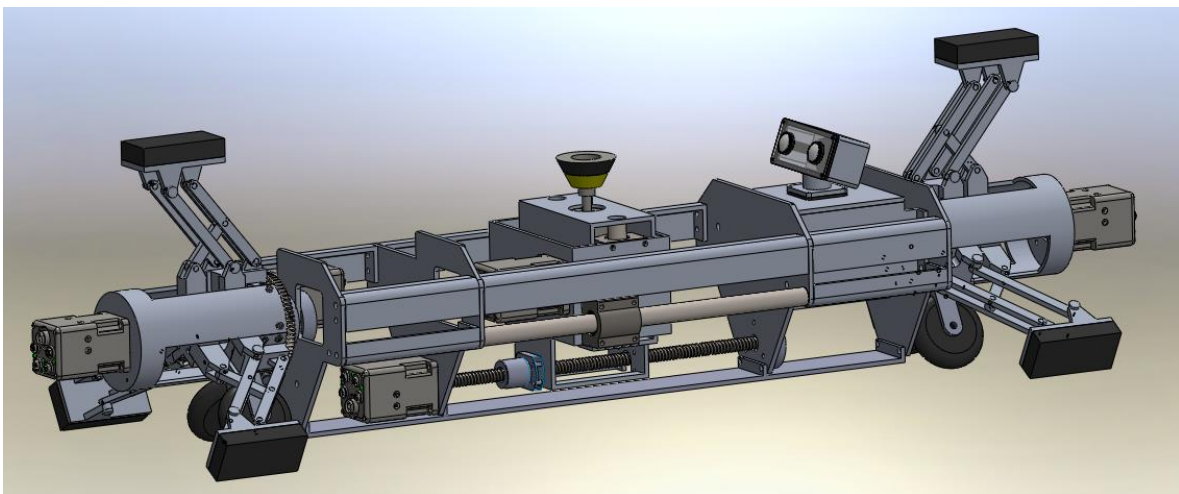


Figura 5: Estructura Mecánica Original con el módulo de desbaste.

La estructura completa se muestra en la figura 5, esta imagen muestra la estructura robótica con el módulo de desbaste que para ahorrar espacio, es desmontable y se debe reemplazar por el módulo de parchado para completar el proceso de reparación.

El primer paso de este trabajo de grado es modelar la estructura mecánica. A continuación se muestra el proceso de diseño requerido para construir un modelo con el comportamiento y las propiedades físicas de la plataforma real pero que evite la sobre segmentación de la plataforma real. Para modelar esta estructura fue necesario realizar un boceto simple donde se visualizara los grados de libertad que tiene la estructura y las dimensiones más significativas de cada módulo (figuras 6 y 7). Debido a la tarea para la que está diseñado este robot (reparación de una tubería cilíndrica), esta plataforma está pensada para hacer uso de coordenadas polares a lo largo de su trayectoria y de esta manera simplificar el cálculo de la trayectoria y reducir el número de articulaciones requeridas a 3.

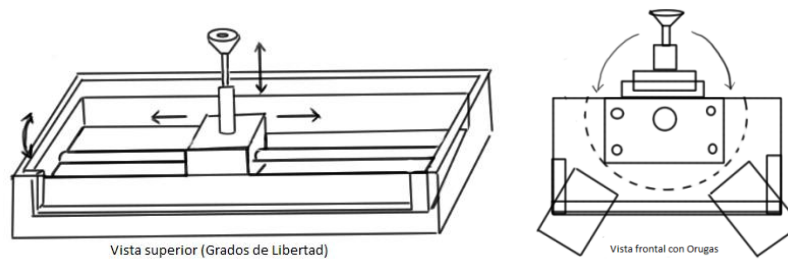


Figura 6: Grados de Libertad de la plataforma robótica de reparación.

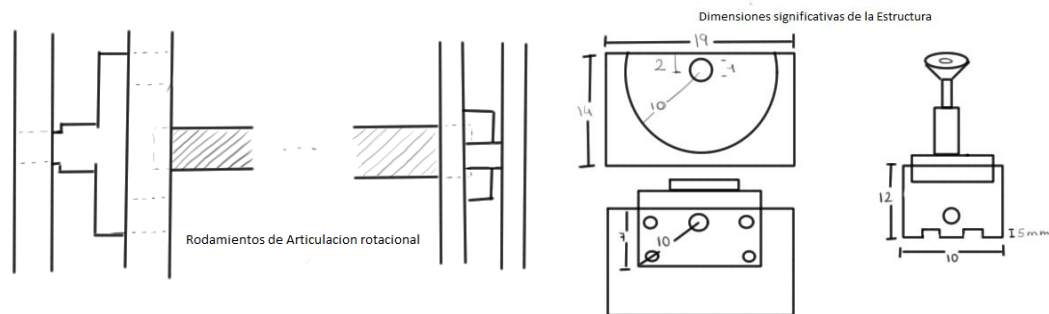


Figura 7: Dimensiones más relevantes de la plataforma robótica de reparación.

Por medio del estudio de la estructura general, la asesoría de los ingenieros mecánicos de la universidad Militar Nueva Granada y el bocetado de los conceptos adquiridos, fue posible construir un modelo que contiene suficientes características físicas del modelo original para funcionar como un modelo valido de la planta que se desea encontrar. El modelo tuvo tres versiones en las cuales se presentaron los siguientes problemas:

Versión 1.0:

Aunque cumple con los grados de libertad requeridos, la relación de posición de la articulación prismática longitudinal se hace por medio de un tornillo sin fin lo cual obstaculiza el movimiento de los piñones internos de la articulación prismática transversal (encargada de hacer contacto entre el efector final y la superficie del tubo).

Versión 2.0:

Aunque cumple con los grados de libertad requeridos, la relación de posición de la articulación prismática longitudinal se hace por medio de dos tornillos sin fin que hacen innecesariamente complejo el diagrama de conexiones en *SimMechanics*, por esta razón su fricción se modela por medio de una relación de posición directamente con la plataforma basculante.

La plataforma basculante de la versión 1.0 es corregida en esta segunda versión para ofrecer 360° de libertad de movimiento como la estructura original. La plataforma no cuenta con la actualización de dimensiones hecha en la estructura original ni con el material de la estructura original.

A la plataforma le hace falta un módulo donde se pueda colocar la circuitería necesaria para hacer el control del movimiento.

Finalmente, tras hacer la corrección de los problemas observados en las dos primeras versiones, se diseñó una tercera versión (figura 8) con las siguientes características:

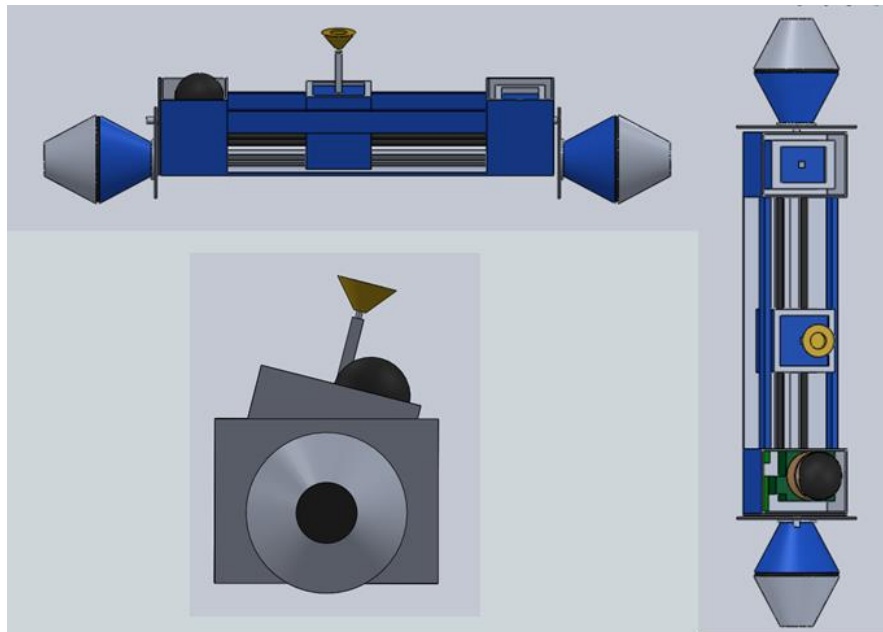


Figura 8: Versión 3.0 del modelo en *SimMechanics* de la plataforma robótica de reparación.

Versión 3.0:

En la tercera versión, los módulos de fijación fueron tenidos en cuenta dentro del modelo como una masa inercial sin movimiento. Las dos relaciones de movimiento de la articulación 2 (prismática) con respecto a la plataforma basculante fueron agrupadas en una sola, como efecto se facilitó el manejo del diagrama en *SimMechanics*. Se modificó las propiedades físicas de las piezas para tener en cuenta el material seleccionado por la Universidad Militar Nueva Granada (Aluminio 6061T6) y en el caso del efector final (Acero inoxidable). En esta última versión la plataforma cuenta con un módulo para la colocación de la electrónica y además cuenta con estructuras dentro del módulo que asemejan el peso de la electrónica necesaria.

2.4.2 Parámetros Denavit Hartenberg

Los parámetros *Denavit Hartenberg* forman la herramienta geométrica más básica de la robótica para describir la geometría de un manipulador robótico. Los parámetros de este algoritmo permiten resolver la cinemática inversa de un actuador de forma trivial a través de operaciones matriciales. El primer paso es numerar cada uno de los segmentos y colocar un plano cartesiano en el origen de cada uno de los segmentos (Barrientos, 2007).

Antes de entrar en detalle sobre los parámetros DH de la plataforma de reparación YNAMI, es importante determinar cuál es el significado de cada uno de ellos:

“Angulo Teta: Angulo desde X_{i-1} hasta X_i girando alrededor de Z_i .

Distancias d: Cada d_i es la distancia desde el sistema XYZ_{i-1} hasta la intersección de las normales común de Z_{i-1} hacia Z_i , a lo largo de Z_{i-1} .

Distancias a: Cada a_i es la longitud entre la norma común de los planos cartesianos.

Ángulos alfa: Ángulo que hay que rotar Z_{i-1} para llegar a Z_i , rotando alrededor de X_i .”

(Somolinos, 2012)

Matlab cuenta con un *toolbox* de robótica diseñado por *Peter Corke* (Corke, 1999). El *toolbox* es la novena versión de una herramienta que ha sido diseñada para el estudio y simulación de los robots multi-articulados de distribución clásica (cada segmento del robot tiene como máximo dos conexiones, el segmento anterior y posterior).

El uso del *toolbox* se basa en los parámetros *Denavit Hartenberg* para definir la plataforma deseada y crear una estructura que cumpla con las capacidades de movimiento requerido. Para el caso de esta plataforma, la matriz que describe los parámetros DH es:

θ	d	α	a	σ
θ_1	0	0	0	0
$\pi/2$	d_1	0	$\pi/2$	1
0	d_2	0	0	1

Tabla 1: Parámetros DH de la plataforma de reparación YNAMI.

Nota: la última columna σ describe la naturaleza del segmento (0 rotacional, 1 prismático).

Como dos de las articulaciones son prismáticas es necesario dimensionar el alcance que pueden tener por medio del siguiente comando: "L2.qlim=[min max]". Para cada articulación los valores mínimo y máximo son:

	Min	Max
Articulación 2	0	30
Articulación 3	0	11

Tabla 2: Limitación de las articulaciones prismáticas.

En la figura 9 se puede observar el resultado grafico del uso del *toolbox* de Peter Corke. Aunque la relación de movimiento entre los diferentes segmentos que componen la estructura es correcta y es la posición del efector final presenta un comportamiento correcto tanto en las coordenadas cartesianas como las coordenadas articulares, la forma en la que la plataforma es presentada, está a 90° con respecto a la plataforma descrita en los parámetros DH. A pesar de este desperfecto visual del *toolbox*, la herramienta representa una ayuda eficiente y precisa para generar la trayectoria articular requerida por la plataforma del reparador.

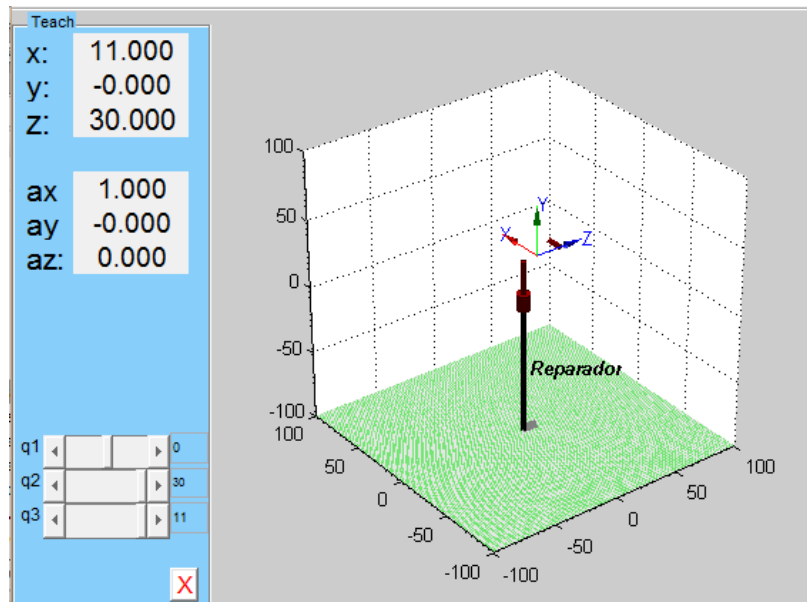


Figura 9: Estructura robótica generada por medio de los parámetros DH.

En conclusión, aunque la herramienta presenta la plataforma robótica en una posición que no es la descrita por los parámetros DH, las funciones del *toolbox* necesarias para calcular la cinemática directa de la plataforma robótica funcionan perfectamente y resultan una herramienta válida para verificar los valores de la matriz DH y en general, verificar la posición del efector final de la plataforma en cualquier instante de tiempo.

3. ARQUITECTURA DE CONTROL:

La plataforma robótica requiere de una arquitectura de control que permita manipular los estados del sistema a voluntad. En la figura 10 se puede ver como el diagrama completo se compone principalmente de dos partes: la construcción de la trayectoria que se desea recorrer y el lazo de control requerido para seguir la plataforma y asegurar el valor de fuerza en la tercera articulación a lo largo de la trayectoria, a su vez, el lazo de control está compuesto del lazo de control de la trayectoria y el lazo de control de Fuerza.

3.1 Diagrama de Control

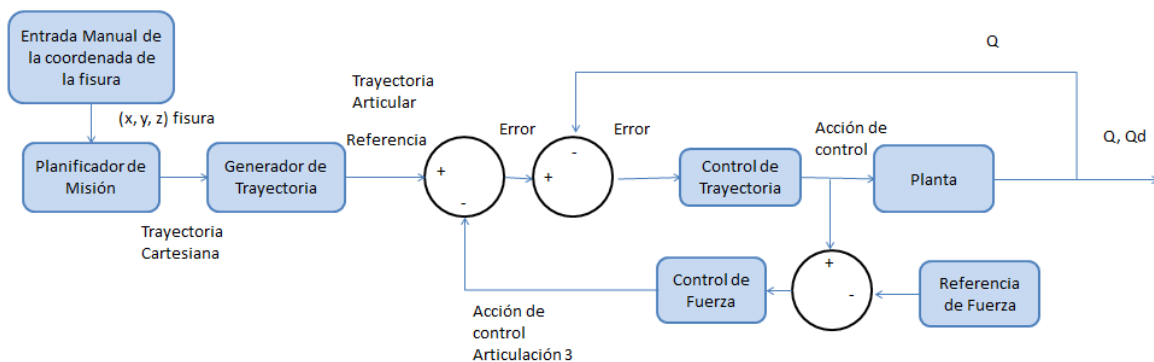


Figura 10: Arquitectura de control.

El generador de trayectoria utiliza los datos de la posición actual del robot y la posición de la fisura para generar una trayectoria cartesiana que por medio de la cinemática de la plataforma y el uso del *toolbox* de robótica se convertirá en la trayectoria articular que debe seguir el robot para cumplir con la trayectoria de lijado.

Como cada cambio de posición supone cambio de estados para la plataforma robótica, es necesario hacer un control que intervenga en el proceso para evitar que un cambio de un punto a otro resulte en un movimiento exageradamente brusco que comprometa la estructura del tubo o se salga de las capacidades de la plataforma robótica. Como este control está encargado no solamente de hacer el posicionamiento del efector final para cada punto de la trayectoria articular, sino también en asegurar un uso de fuerza que este dentro de los límites seguros para ambas estructuras (el tubo y el robot) se debe dividir en un control de trayectoria y uno de fuerza.

3.2 Generador de trayectoria

El robot no hace uso de técnicas de odometría para llegar hasta la fisura (U. Javeriana, 2014), el proyecto YNAMI contempla que sea un operario quien este encargado de observar la posición en la que se encuentra la fisura y llevar la plataforma de reparación hasta el lugar correcto. Además de situar al efector final casi en contacto con la fisura para iniciar el proceso de lijado. El método

para generar la trayectoria de lijado es el de splines de tercer orden. Los splines de tercer orden son el spline más utilizado ya que permiten obtener polinomios que conectan puntos de control que han sido calculados previamente por medio de cambios de aceleración lineales, cambios de velocidad de tipo parabólicos cuadrados y cambios de posición cúbicos (Cortes, 2002) . S (la curva) está definido sobre cada intervalo de tiempo con un polinomio diferente.

$$S = \begin{cases} S_0x \in [t_0, t_1] \\ S_1x \in [t_1, t_2] \\ \dots \\ S_{n-1}x \in [t_{n-1}, t_n] \end{cases}$$

Como

$$S_{i-1}(t_i) = y_i = S_i(t_i)$$

Se cumple que la curva resultante es continua en todo el intervalo de tiempo.

Aunque la demostración de la expresión analítica del spline queda por fuera del tema a trabajar dentro de este trabajo de grado, es necesario utilizar las condiciones de continuidad de los splines y las derivadas primera y segunda para obtener la ecuación:

$$S_i(x) = \frac{Z_i}{6h_i}(t_{i+1} - X)^3 + \frac{Z_{i+1}}{6h_i}(X - t_i)^3 + \left(\frac{Y_{i+1}}{h_i} - \frac{Z_i + h_i}{6}\right)(X - t_i) + \left(\frac{Y_i}{h_i} - \frac{Z_i + h_i}{6}\right)(t_{i+1} - X) \quad (1)$$

De la ecuación (1), las incógnitas son h_i, Z_i , por tanto la solución de la ecuación es:

$$h_{i-1}Z_{i-1} + 2(h_i - h_{i-1})Z_i + h_iZ_{i+1} = \frac{6}{h_{i-1}}(Y_{i+1} - Y_i) - \frac{6}{h_{i-1}}(Y_i - Y_{i-1}) \quad (2)$$

La ecuación (2) varia para cada valor de i, por esta razón la ecuación en si representa un sistema de ecuaciones con n-1 ecuaciones y n+1 incógnitas, esto crea una dependencia de las condiciones iniciales del sistema para poder ser resuelto.

El sistema de ecuaciones descrito puede ser resuelto por medio de eliminación gaussiana para ser escrito de la siguiente forma:

$$S_i(x) = Y_i + (X - t_i)[C_i + (X - t_i)[B_i + (X - t_i)A_i]] \quad (3)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{1}{6h_i}(Z_{i+1} - Z_i) \\ B_i &= \frac{Z_i}{2} \\ C_i &= \frac{-h_i}{6}Z_{i+1} - \frac{h_i}{3}Z_i + \frac{1}{h_i}(Y_{i+1} - Y_i) \end{aligned} \quad (4)$$

Los valores de A, B y C son los que describirán el comportamiento del sistema de ecuaciones en cada instante de tiempo.

El *toolbox* de robótica cuenta con una función para calcular los splines de forma automática, dicha función requiere de los parámetros *Denavit Hartenberg* y datos sobre la posición actual del robot para r como salida los puntos de la trayectoria que debe ser ejecutada por el efector final.

La trayectoria seleccionada para este trabajo se muestra en la figura 11. Como se puede observar existen cambios de posición bruscos que deben ser redondeados para evitar sobre picos de velocidad y aceleración innecesarios. Esta trayectoria fue seleccionada debido a que evita el área sea lijada más de una vez con el efector final, por esta razón las dimensiones de la trayectoria han tenido en cuenta el tamaño del efector final, con el fin de repisar (en lo posible) una sola vez la superficie de 20x20 cm correspondiente al parche que ha sido ideado para la tarea.

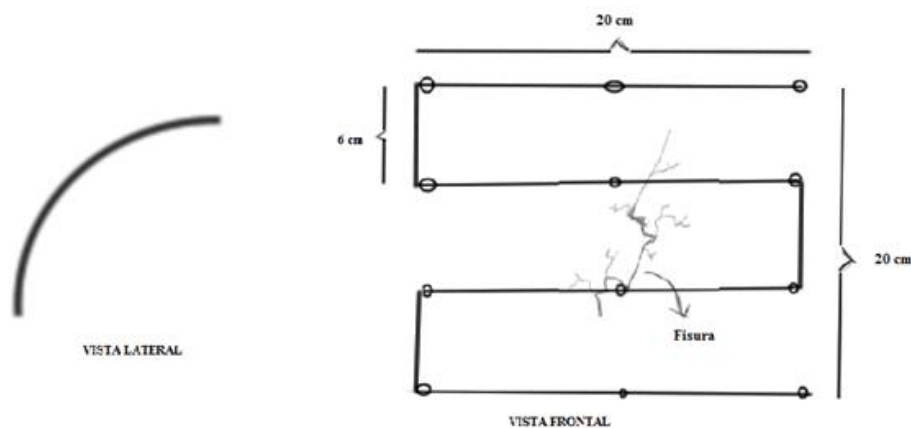


Figura 11: Trayectoria propuesta para el proceso de lijado.

Cada vez que se genera la detección de una nueva falla sus coordenadas deben ser redefinidas para ser tenidas en cuenta dentro del generador de trayectoria, para facilitar esta tarea se diseñó un interfaz gráfica que solicita los datos necesarios para hacer el cálculo, como se puede ver en la figura 12 estos datos son: la cantidad de cm que el robot se encuentra fuera del centro de la tubería tanto en vertical como en horizontal, el radio de la tubería, la distancia que ha recorrido el robot a lo largo de la tubería, y el posicionamiento en "x" y "y" de la fisura (teniendo en cuenta un corte segmentado de la tubería, como se muestra en la figura 13).

En caso de que la detección sea manual la estimación debe hacerse por medio de métricas de la cámara principal del robot explorador, el encoder con el que este cuenta el robot explorador y la experiencia del operario. Si la detección se hace por medio del algoritmo de reconocimiento de imágenes diseñado por el ingeniero Nicolás Vargas (Vargas, 2014) el algoritmo es el encargado de entregar las coordenadas de la fisura y demás datos para calcular la trayectoria.

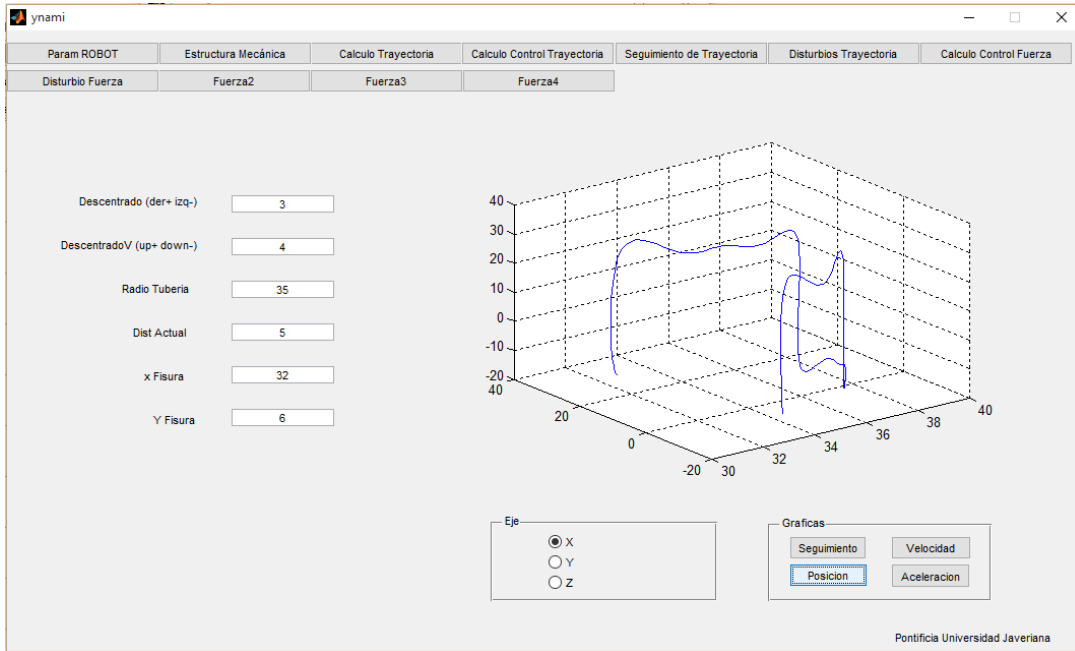


Figura 12: Interfaz Gráfica, Cálculo de trayectoria.

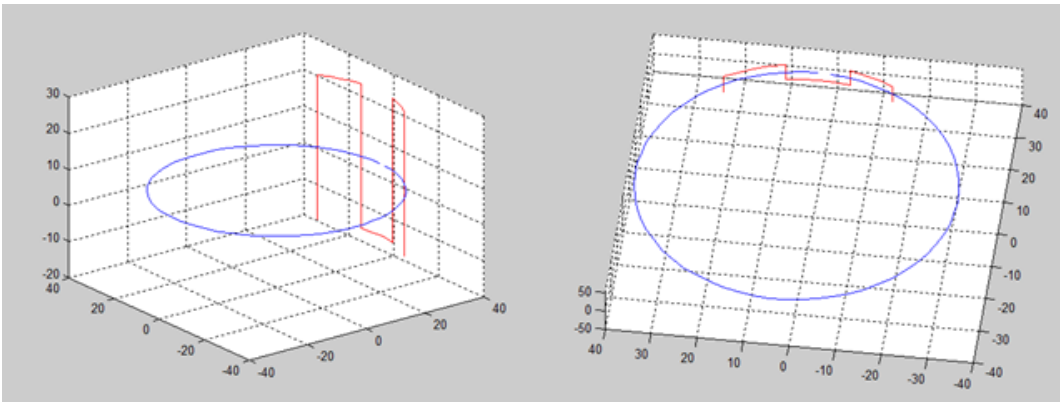
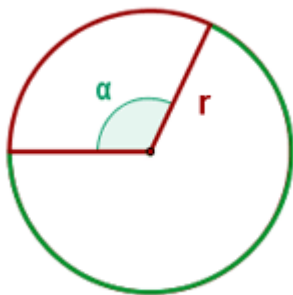


Figura 13: Disposición de la Trayectoria cartesiana para asegurar un área de 20x20 cm.

Para asegurar que el área que se desbasta es siempre de 20x20 cm es necesario encontrar el ángulo que permite obtener 20 cm de perímetro en el arco resultante.



$$L = \frac{2\pi r \alpha}{360} = 20cm(5)$$

Figura 14: Calculo de la longitud del arco de la circunferencia.

Por medio de la ecuación geométrica (5) se encuentra el ángulo requerido para que la longitud del arco de la circunferencia siempre sea 20cm. Luego se dibuja el círculo que hace referencia a la tubería y la trayectoria cumpliendo con los parámetros ingresados anteriormente.

La interfaz gráfica utiliza el *toolbox* de robótica de Peter Corke (Corke, 1999) para permitir observar el movimiento que debe hacer la estructura robótica para cumplir con la trayectoria calculada al pulsar el botón “Seguimiento”. Como se puede observar en la figura 15, la trayectoria articular evita cambios bruscos de posición por medio el suavizado de las esquinas presentes en la trayectoria.

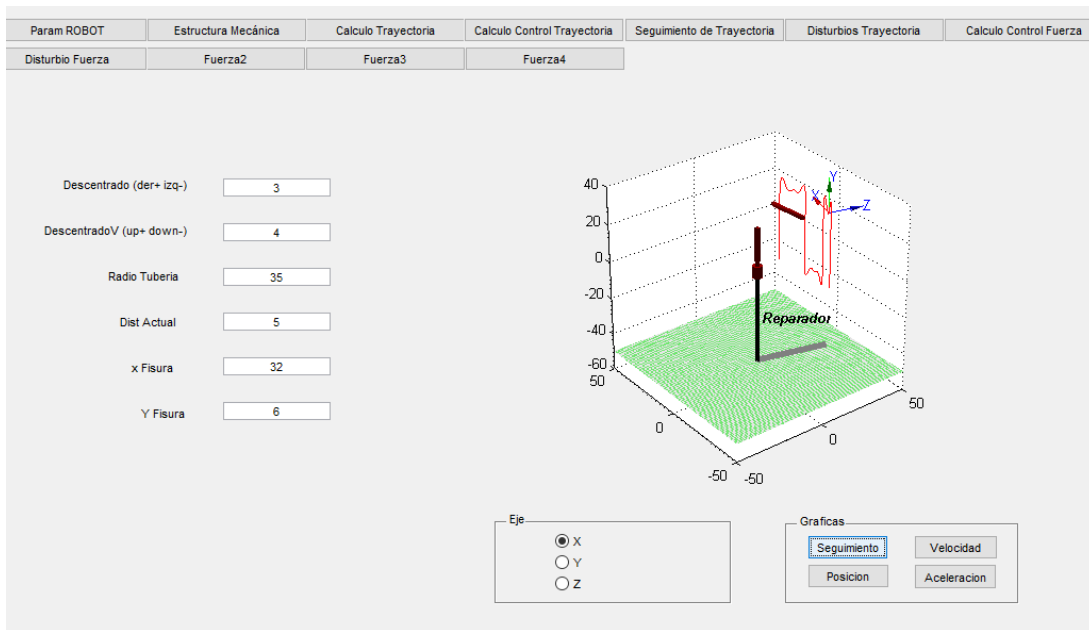


Figura 15: Seguimiento de la trayectoria articular.

Además de las opciones anteriormente explicadas, como se puede ver en la figura 16 la interfaz gráfica permite visualizar los valores de velocidad y aceleración que presenta en cada eje para asegurar que está dentro de los límites que pueda presentar el modelo del motor seleccionado, también es posible utilizar esta característica de la interfaz gráfica para asegurar que los movimientos que el efector final realiza no representen un riesgo para la superficie de la tubería y resulten en una fisura peor que la que ha sido detectada. Una observación importante de las gráficas de aceleración y velocidad que se observan en la figura 16, es que como se esperaba del método de “splines de tercer orden”, los cambios de velocidad tienen un cambio restringido por su función de segundo orden y la aceleración presenta una tasa de cambio restringida a la función de primer orden.

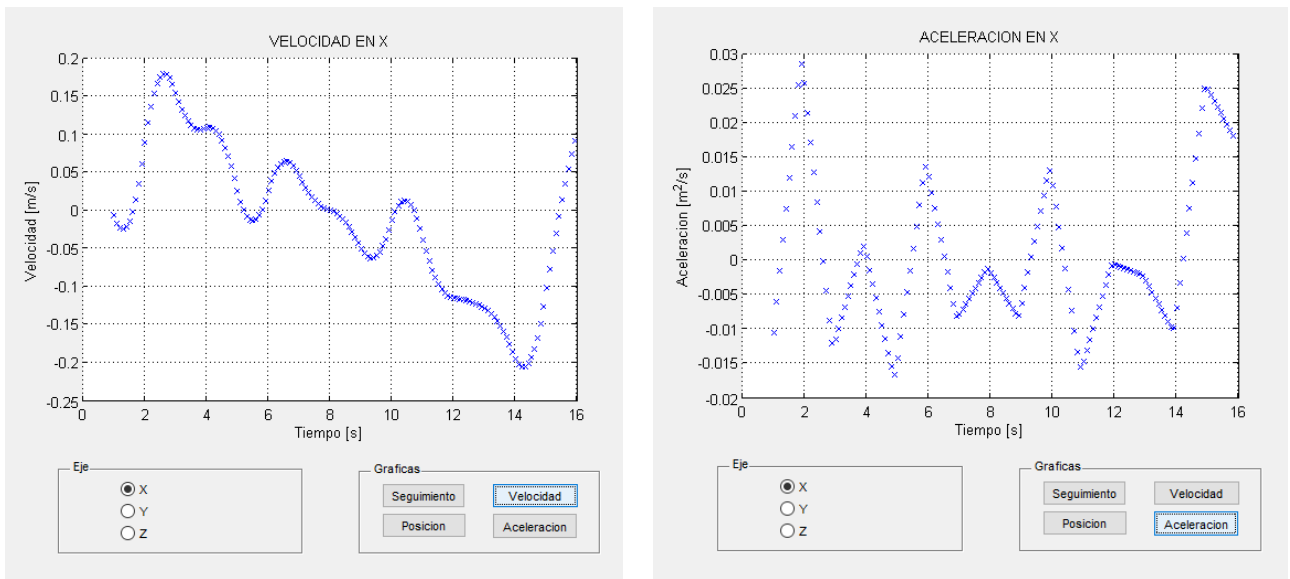


Figura 16: Visualización de Velocidad y Aceleración cartesiana en el eje X.

El manejo de un modelo más exacto (tanto en apariencia física, propiedades de materiales y dimensiones) permite apreciar el seguimiento de la trayectoria con mejor conocimiento del movimiento real de las piezas que componen la plataforma y en resumen representa una herramienta que permite el control de la plataforma de una manera completa sin perder las ventajas del CAD construido anteriormente en *SolidWorks* (figura 17). Como es una herramienta que no depende de la matriz DH, sino de un CAD previamente ensamblado, permite comprobar el modelo de la planta, arquitectura de control y el seguimiento de la trayectoria de lijado, todo al mismo tiempo y por medio de la misma ventana.

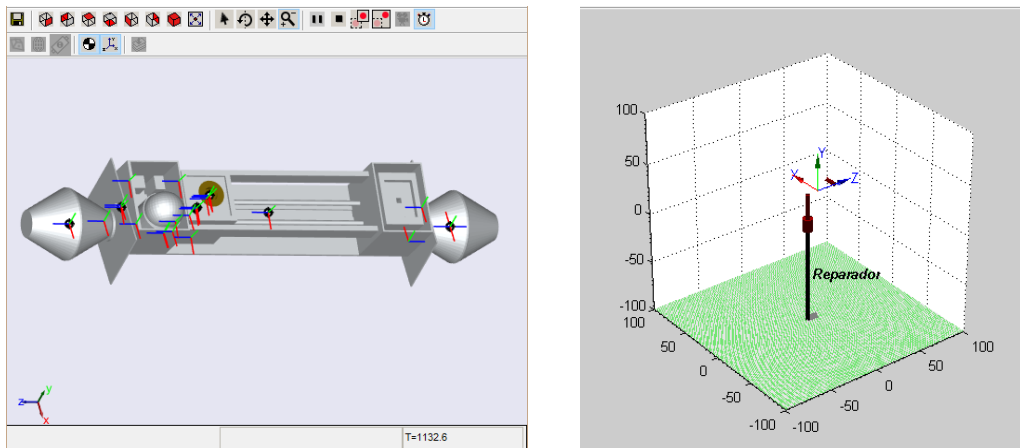


Figura 17: Comparación entre el modelo obtenido por medio del toolbox *SimMechanics* (Izquierda) contra el modelo obtenido con el toolbox de robótica de *Peter Corke* (Derecha).

La plataforma presenta un comportamiento continuo pero no lineal debido a que las ecuaciones de movimiento que regulan su cinemática presentan componentes no lineales. Por esta razón es necesario linealizar el comportamiento de la planta alrededor de un punto de operación. Matlab cuenta con el comando “*linmod*” que utiliza el algoritmo de del jacobiano para determinar un modelo de estados a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema de simulink. De esta manera, “*linmod*” permite linealizar el comportamiento de la planta que fue importada atreves de *SimMechanics* en cada punto de la trayectoria. Al linealizar la planta, se extrae un modelo en espacio de estados para cada punto de trabajo que equivale a cada punto de la trayectoria, esto permite realizar pruebas con el controlador que se desee implementar en la arquitectura de control. Solo hace falta usar el comando: “[A,B,C,D] = linmod('sys');” como resultado se obtendrá el siguiente modelo en variables de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ q\dot{d}_1 \\ q\dot{d}_2 \\ q\dot{d}_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ qd_1 \\ qd_2 \\ qd_3 \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \tau_1 \\ f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$y = C \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ qd_1 \\ qd_2 \\ qd_3 \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \tau_1 \\ f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$$

Del modelo de estados de la ecuación (6) se puede observar que los estados son las tres posiciones y tres velocidades articulares ya que estas son las variables que podemos controlar en el sistema. Como entrada tenemos las fuerzas necesarias para que la articulación llegue a dicha posición, en el caso de la articulación rotacional esa fuerza es un torque.

3.3 Control de la trayectoria:

Antes de iniciar el control de trayectoria es importante tener en cuenta algunas características del modelo linealizado y el vector de la trayectoria generada para evitar futuros errores.

Al linealizar el modelo alrededor de cualquier punto de operación se debe obtener un sistema de matrices como el siguiente:

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$Y = CX$$

Para un caso particular (punto 72 de la trayectoria), las matrices A, B, C, D tienen la siguiente forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.00 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -2.42 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.88 & 0 & -51.48 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Para el caso de la matriz A, se debe verificar que las dimensiones sean de 6x6 ya que son los seis estados de la planta (3 posiciones, 3 velocidades).

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.0 & 0 & 39.84 \\ 0 & 0.33 & 0 \\ 30.80 & 0 & -0.00 \end{bmatrix}$$

La matriz B debe tener el número de columnas de los estados y el número de filas de las entradas, como a la planta se la ingresa en el valor de los torques que se debe hacer en cada articulación, el número de filas es 3.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz C permite definir qué estados de la planta que queremos obtener como salidas y el orden en el que saldrán, así que es importante notar que C sea una diagonal de unos, ya que esto asegurara que los sensores de cada actuador están usando como unidad de medida los radianes y no los grados (en caso de que estén usando grados el valor correspondiente será 57.3 en vez de 1).

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La matriz D refleja la relación directa que pueda existir entre la salida y las entradas del sistema, como esta relación es inexistente para este caso la matriz solo cumple con las dimensiones pero es de valor cero.

3.3.1 Realimentación de estados

La teoría de control permite modificar el comportamiento de una planta por medio del corrimiento de sus polos característicos. En este caso se escogió la realimentación de estados con acción de control integral por dos razones (Ogata):

1. Es una técnica de control que permite modificar el comportamiento dinámico del sistema.
2. Asegura el seguimiento dinámico de la trayectoria (Por medio de la acción de control integral).

El diagrama que se muestra en la figura 18 es la configuración que describe la realimentación de estados con acción de control integral. La forma en que se modifica los polos de la planta se describen a continuación:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (7)$$

$$Y = CX$$

$$\dot{X}_{n+1} = Ref - Y = Ref - CX$$

$$U = Ki(X_{n+1}) - KpX = [-Kp \quad Ki] \begin{bmatrix} X \\ X_{n+1} \end{bmatrix}$$

Dónde:

X = Estados del sistema

\dot{X} = Estados futuros del sistema

U = Entradas del sistema

A = Matriz de estados

B = Matriz de entrada

C = Matriz de salida

D = Matriz de transmisión directa

Ref = Referencia del sistema

Kp = Ganancia proporcional de la realimentación de estados

Ki = Ganancia integral de la realimentación de estados

X_{n+1} = Estados realimentados

\dot{X}_{n+1} = Estados realimentados futuros

Por tanto:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{X}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BX & BKi \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_{n+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} Ref \quad (8)$$

$$Y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} X \\ X_{n+1} \end{bmatrix}$$

Finalmente:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{X}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_{n+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} Ref \quad (9)$$

$$U = [-Kp \quad Ki] \begin{bmatrix} X \\ X_{n+1} \end{bmatrix}$$

Por tanto el sistema aumentado queda:

$$Aa = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Ba = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

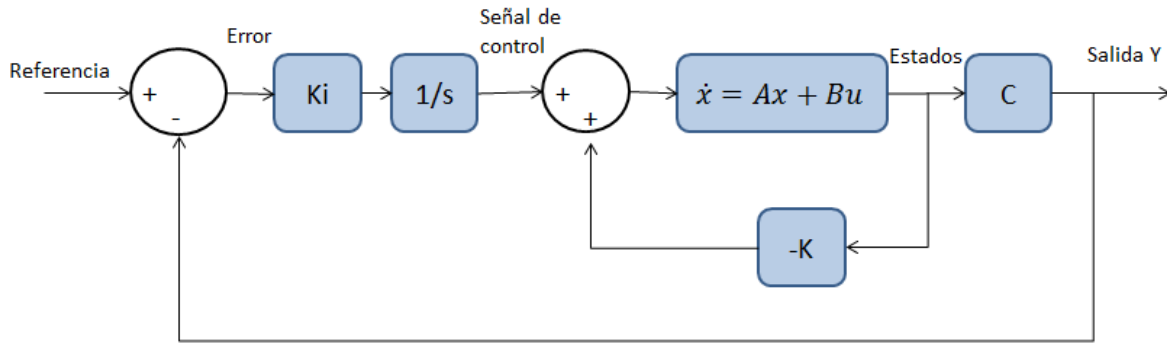


Figura 18: Diagrama de control por realimentación de estados.

El proceso resultante es el siguiente:

1. Selección de punto de trabajo (Escoger el punto de la trayectoria que se evalúa).
2. Asignar las condiciones iniciales al punto de trabajo (punto anterior de la trayectoria).
3. Calculo de las fuerzas a gran señal de la planta para trabajar alrededor del punto de trabajo deseado.
4. Linealización de la planta.
5. Calculo de las matrices aumentadas.

3.3.2 Control LQR

Aunque el cálculo de las ganancias del controlador se pueden calcular por medio de reubicación de polos del sistema para cumplir con el comportamiento dinámico requerido, El trabajo previo desarrollado por el ing. Julián Pareja (Pareja, 2014) demostró la poca fiabilidad del método a la hora de conmutar entre diferentes puntos de operación. En el método de reubicación de polos el conjunto de controladores hallados presenta valores muy erráticos a lo largo del espacio de trabajo de la trayectoria de lijado.

Por esta razón se utiliza el control LQR (*Lineal Quadratic Regulator*). El método LQR, halla el controlador tratando el problema de realimentación como un problema de minimización que evalúa los “esfuerzos” Q y R del sistema de la siguiente manera (Rubio):

Para un sistema linear y continuo en el tiempo de la forma:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (11)$$

Con una función de costo asociada:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt \quad (12)$$

Dónde:

x = Estados del sistema

u = Entradas del sistema

Q = Matriz de peso de los estados

R = Matriz de peso de las entradas

N = Matriz de peso cruzada

Para dicha función de costo, el valor de entrada U que minimizan la función de costo y cumplen la ley de control es:

$$u = -Kx \quad (13)$$

Dónde:

$$K = R^{-1}(B^T P + N^T)$$

El valor de K , permite asegurar la estabilidad en lazo cerrado del sistema y el seguimiento de la referencia. Además, la ganancia de realimentación permite obtener la solución P a la ecuación de Riccati asociada:

$$A^T P + P A - (P B + N) R^{-1} (B^T P + N^T) + Q = 0 \quad (14)$$

Dónde:

A = Matriz de estados

P = Variable de la ecuación de Riccati

B = Matriz de entrada

Q = Matriz de peso de los estados

R = Matriz de peso de las entradas

N = Matriz de peso cruzada

El cálculo del valor del controlador requiere de las matrices Q y R , las cuales hace referencia al costo de la diferencia entre el origen y el tiempo final de cada uno de los estados y el costo de aplicar cada una de las entradas respectivamente. En este caso se usó el inverso del error cuadrático medio para formar cada una de las dos matrices como una matriz diagonal y finalmente el comando "lqr" de *Matlab* para obtener el valor de K .

Las matrices Q y R que permitieron dar un balance entre el peso al error en estado estacionario de la señal y el peso de aplicar las entradas es:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{(0.0058)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(0.0058)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(0.0058)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{(0.0088)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(0.0088)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(0.0038)^2} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & \frac{1}{(0.00020)^2} & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(0.00010)^2} & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(0.00020)^2} \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{(0.3)^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(0.3)^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(0.3)^2} \end{bmatrix}$$

Los tres primeros valores de la diagonal de Q son los que le dan el peso al error de posición de la plataforma, los siguientes tres le dan peso a la velocidad con la que se ejecuta cada movimiento dentro de la trayectoria y los últimos tres son el peso asociado a la acción integral de la realimentación de estados. Para la selección del valor de los errores medios se iniciaron las pruebas con el inverso del error cuadrático medio, pero mediante el análisis de los resultados de las simulaciones obtenidas se determinó que la relación entre los valores debía cambiar de la siguiente forma:

- A excepción de la tercera articulación, el tiempo que se gasta en llevar el efector final al punto requerido tiene más peso que el hecho de llevarlo exactamente a la posición solicitada.
- Para el caso de la tercera articulación, como no se desea tener un sobre pico que perjudique la integridad de la tubería, de quito peso a la velocidad con la que se lleva el efector final a su destino.
- Como los estados realimentados que presentaban mayor variación a lo largo de la trayectoria son la posición de la articulación 1 y 3, son estos a los que se les asigno mayor peso en la matriz Q.

Por su parte R tiene un mismo costo para el uso de cualquiera de las tres entradas del sistema y su valor es de 0.3 para balancear el comportamiento de la función de costos con los valores asociados a la matriz Q.

El valor de K varía debido al punto de linealización de la planta aumentada, por esta razón es necesario hacer un barrido del rango de cada una de las tres articulaciones y formar un espacio

bidimensional en donde cada eje es el mínimo y máximo rango que puede tomar la primera y segunda articulación, la tercera no es tenida en cuenta ya que su movimiento es mínimo y debe ser restringido principalmente por el control de fuerza. Con los valores que puede tomar K en cada posible posición de las dos primeras articulaciones se forma una matriz que servirá para interpolar el valor de K para cualquier posible punto de la trayectoria sin necesidad de utilizar el cálculo “lqr”.

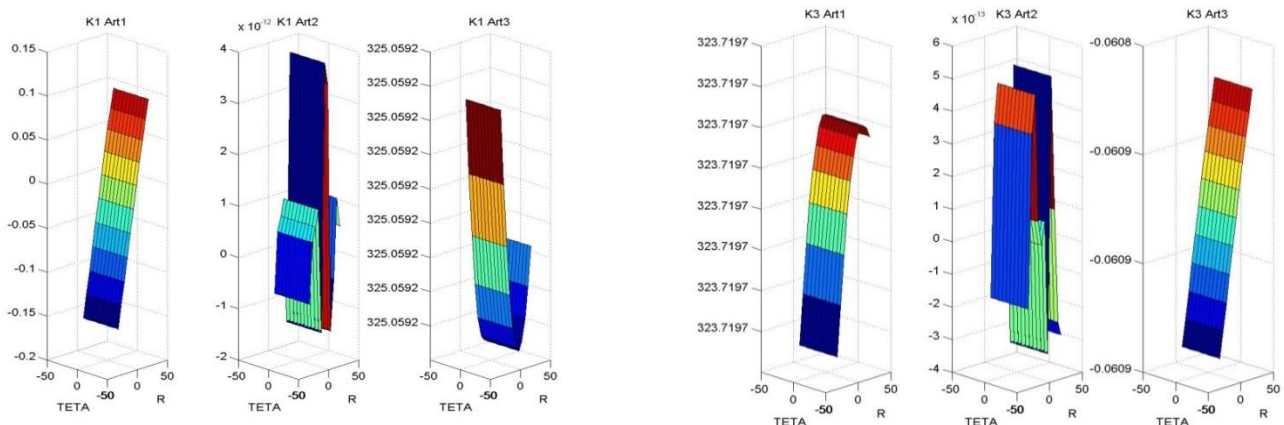
K es una matriz 3x9, ya que hay un valor para cada articulación encargado de controlar tres posiciones articulares, tres velocidades articulares y tres estados realimentados para generar una acción integran dentro del controlador (ver sección 3.3.1 Realimentación de estados).

El comportamiento de cada valor de K respecto a la limitación de las variables articulares 1 y 3 para cada una de las articulaciones se observa en la Figura 19, no todos los valores de K cambian en el espacio explorado lo cual reduce la complejidad de la interpolación, un ejemplo de esto es el valor K1 para la articulación 2 y 3, por esta razón, se omiten los valores de K que nunca presentaron cambios significativos ($>10^{-5}$). Los 9 valores del controlador K hacen referencia a los nueve estados de la matriz de estados aumentada, por esta razón las mayores variaciones de cada valor de K ocurren en el siguiente orden:

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
	Posición			Velocidad			Realim. Posición		
Art 1	X			X			X		
Art 2		X			X			X	
Art 3			X			X			X

Tabla 3: Mayor efecto de cada K a cada Articulación.

Como K2, K5 y K8 no presentaron mayor efecto dentro del cálculo del controlador, se puede concluir que el comportamiento de la segunda articulación es cercano a un comportamiento lineal ya que no presentan mayor variación en el espacio de trabajo de la trayectoria de lijado. Este tipo de comportamiento es causado por la falta de fricción entre los segmentos del robot y porque su movimiento es siempre perpendicular al vector de gravedad lo que simplifica el cálculo de las fuerzas inerciales en cada cambio de posición.



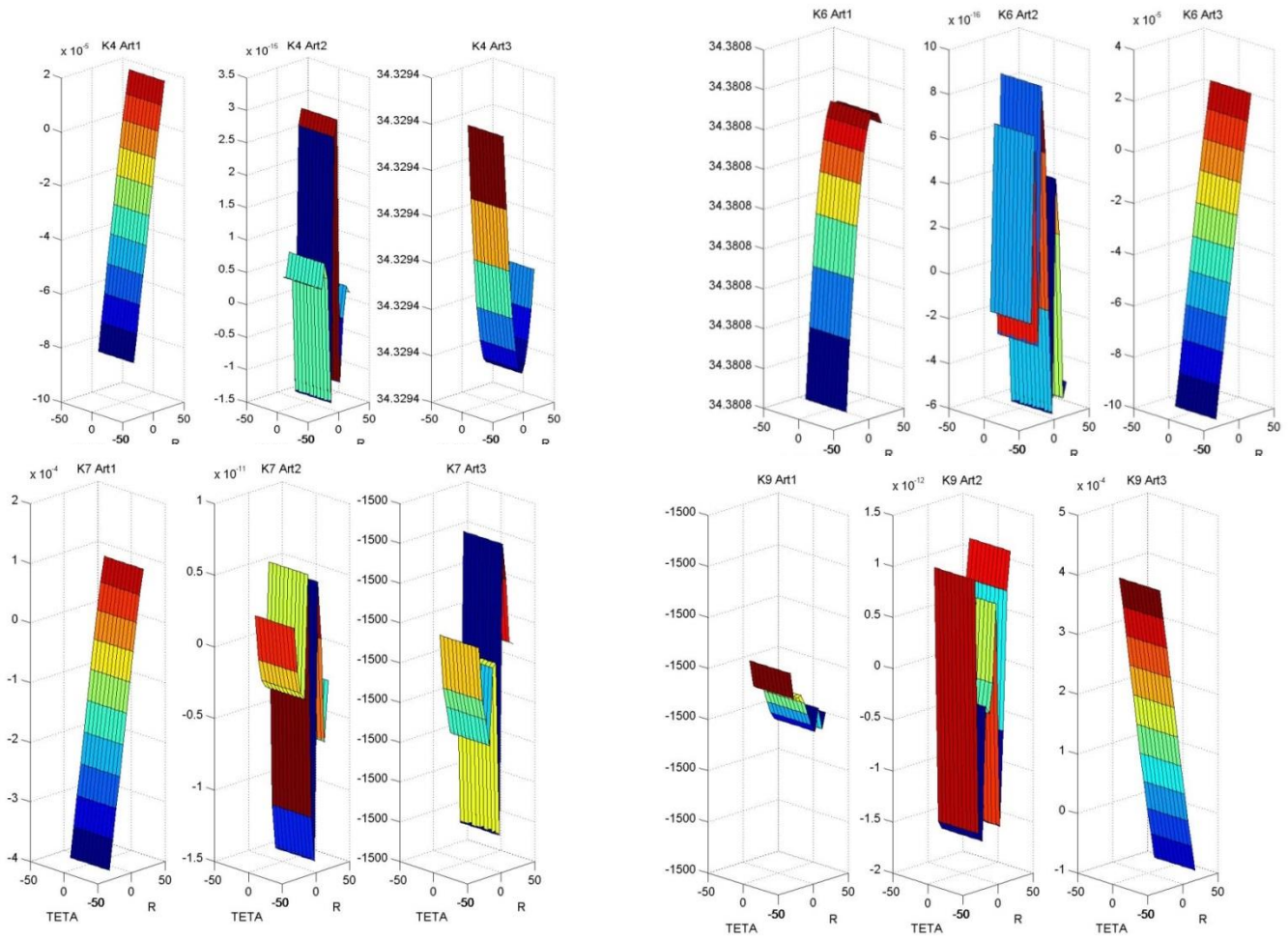


Figura 19: Comportamiento de K en cada posible punto del espacio.

3.3.3 Resultados:

3.3.3.1 Respuesta temporal del sistema para un punto de la trayectoria

El diagrama de control de trayectoria está encargado de reemplazar las ganancias proporcional e integral del controlador de forma automática interpolando sobre la matriz de controladores previamente calculada llamada "Kgrt".

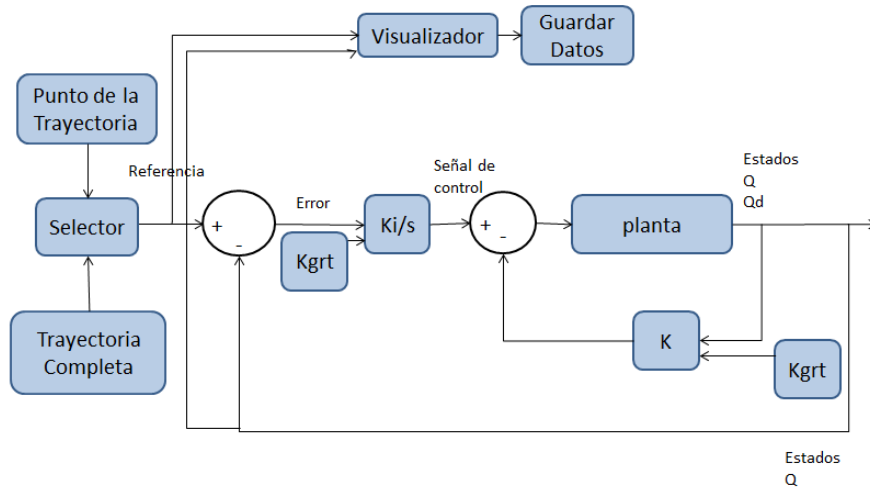


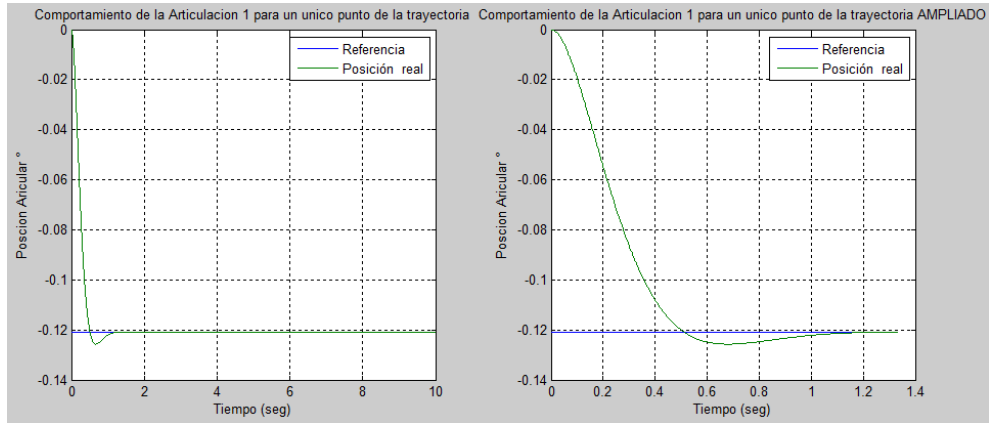
Figura 20: Realimentación de estados para corregir el error de posición.

La matriz “Kgrt” que es la el conjunto de los posibles controladores ($k_1..k_9$) que se obtienen en el espacio teta (variaciones de primera articulación) y R (variaciones de la tercera articulación). En ambos casos se utiliza el valor mínimo y máximo que se espera de la trayectoria y se calcula diez valores igualmente espaciados dentro de ese segmento. Los bloques de interpolación usan los ejes Teta y R, el punto de la trayectoria que se está solicitando y la matriz “Kgrt” para realizar una interpolación por medio del comando

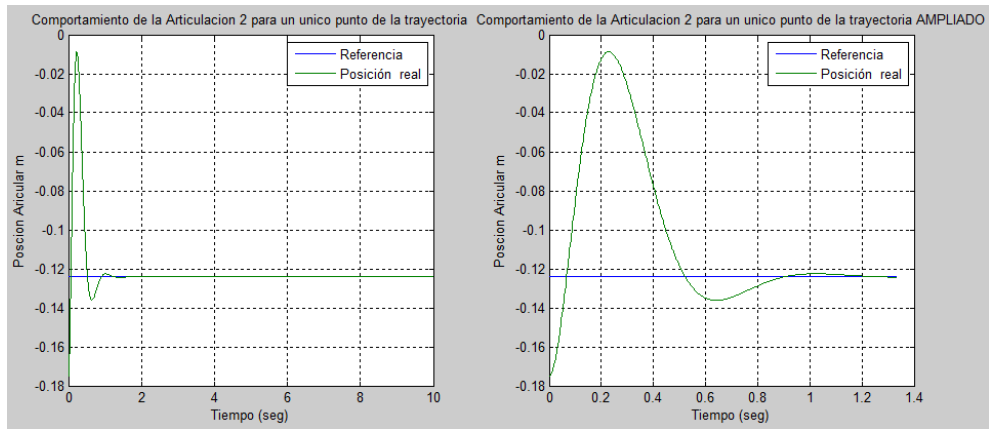
```
“KlgrtArt1Interp=interp2(EjeX, EjeY, KlgrtArt1,Xsolicitado, Ysolicitado, 'spline');”
```

El anterior comando hace uso del algoritmo de splines para interpolar un valor entre los puntos que si han sido calculados anteriormente. Y dar como resultado un valor cercano al que hubiera sido calculado con el comando “lqr”.

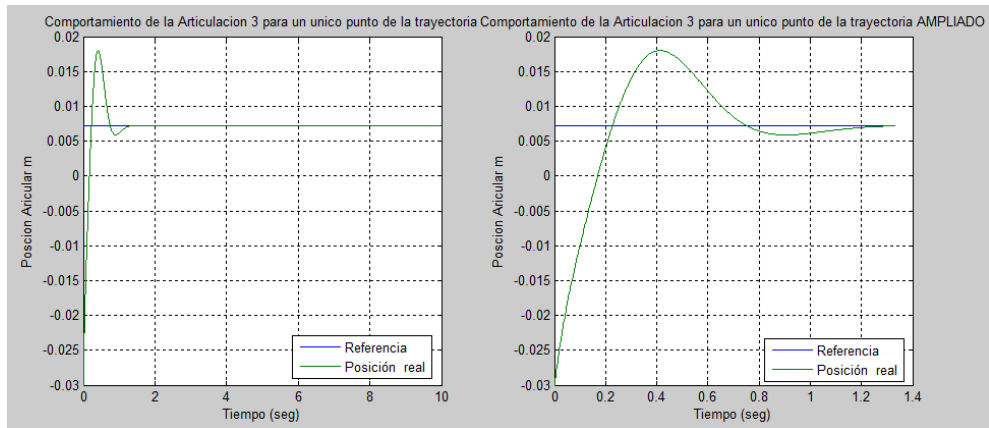
Como resultado de la interpolación, se halla el valor del controlador necesario para la planta linealizada en ese punto de la trayectoria. Como se observa en la gráfica anterior, el diagrama de control cuenta con la capacidad de evaluar un único punto o la trayectoria completa. Para estas pruebas se seleccionó el punto 72 de 130): $\{-0.121, -0.124, 0.007\}$, la respuesta del sistema fue:



Comportamiento de la Articulación 1.



Comportamiento de la Articulación 2.



Comportamiento de la Articulación 3.

Figura 21: Comportamiento dinámico de cada articulación para 1 punto de la trayectoria.

Las primeras articulaciones presentan un sobre pico debido a las condiciones iniciales presentes en el sistema que para este tipo de prueba siempre es el punto anterior, este fenómeno se debe minimizar en la tercera articulación debido a que podría causar un accidente dentro del proceso

de reparación de la tubería por medio del control de fuerza, por esta razón el valor de la velocidad en la matriz de pesos Q, es diferente en la tercera articulación (ver sección 3.3.2 Control LQR)

Para una prueba de 10 puntos de la trayectoria, en promedio se obtuvo los siguientes valores de comportamiento dinámico del sistema :

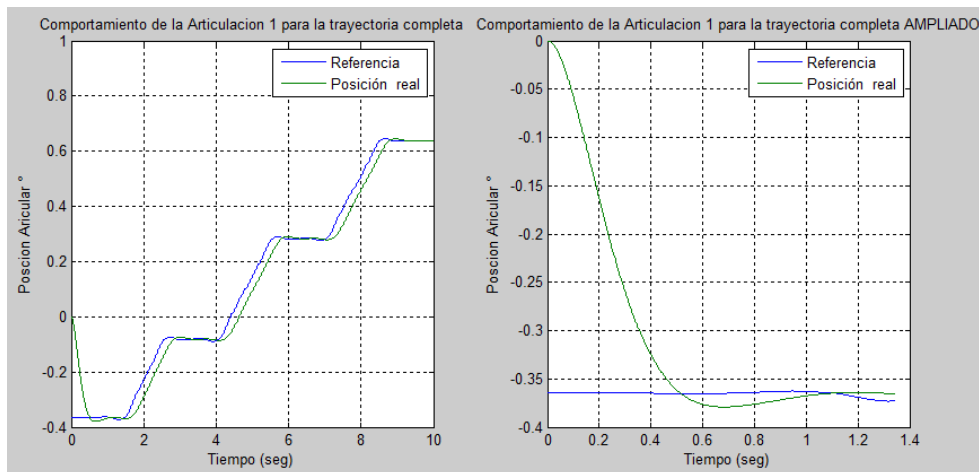
Articulación	Sobre pico (%=cm)	Tiempo de Establecimiento (s)
1	6.6% = 0.008cm	1.2
2	91.6% = 0.023rad = 1.31 °	1.3
3	71.2% = 0.006cm	0.8

Tabla 4: Comportamiento dinámico promedio de cada articulación para 10 puntos aleatorios de la trayectoria.

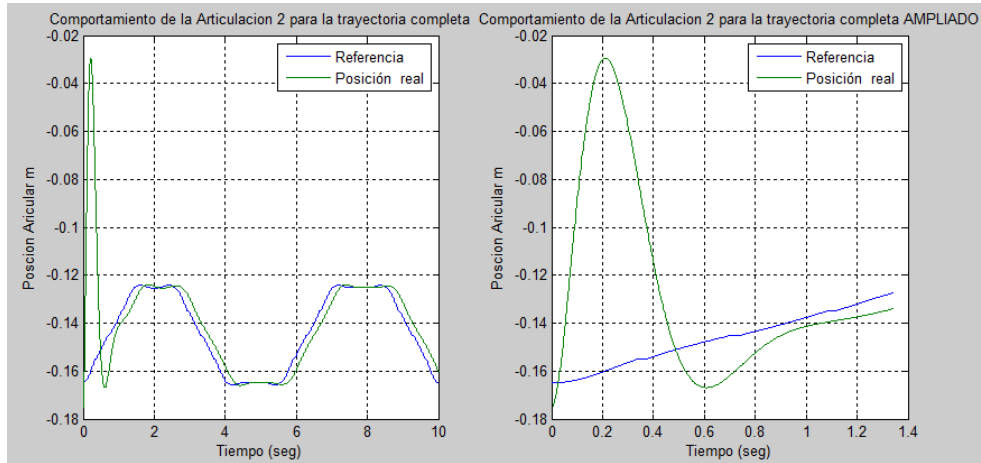
La prueba debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La entrada que se utiliza en el caso de un punto de la trayectoria es una entrada paso.
- Las condiciones iniciales son el punto anterior de la trayectoria, que en general no difieren de más de 0.01 m o 0.01°.

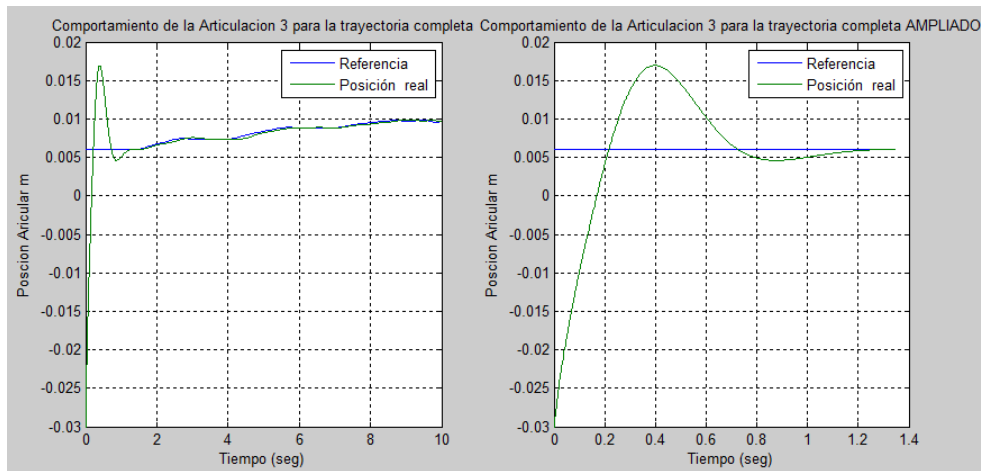
1.3.3.2 Seguimiento de la trayectoria completa



Comportamiento de la Articulación 1.



Comportamiento de la Articulación 2.



Comportamiento de la Articulación 3.

Figura 22: Comportamiento dinámico de cada articulación durante la trayectoria.

Además del sobre pico inicial que se observa en las pruebas realizadas con un único punto de la trayectoria, como se puede ver en la figura 22 se presenta un retardo de 0.2 segundos (aproximadamente) causado por los valores de peso que se le dio a la velocidad del sistema. Debido al tipo de aplicación para la que es requerido el controlador, este retardo no representa ningún inconveniente para el correcto funcionamiento de la plataforma de reparación.

3.4 Control de fuerza

Aunque el control de trayectoria está encargado de proponer la trayectoria de lijado, existen varios inconvenientes que se pueden presentar durante el proceso de lijado como un obstáculo que en caso de no ser detectado podría resultar en la formación de una nueva grieta. Por esta razón el robot debe estar en capacidad de detectar los cambios de nivel de la superficie que está

puliendo y asegurar que en todo momento se aplica la fuerza correcta para obtener como resultado una superficie perfectamente lijada.

El diseño de la etapa de control de fuerza requirió de varias etapas:

- 1- Pruebas de esfuerzo mecánico sobre el material.
- 2- Modelado de la fuerza externa que se provoca por el lijado.
- 3- Modelado en *simMechanics* de la fuerza externa.
- 4- Lazo de control de Fuerza.

3.4.1 Pruebas de esfuerzo mecánico

El proyecto contempla la reparación de tuberías de aguas limpias, las cuales en su gran mayoría se construyen con Cloruro de Polivinilo (PVC) de diferentes calibres dependiendo de la cantidad de flujo y la profundidad para la que este diseñada.

Teniendo en cuenta esto, se realizaron pruebas con un trozo de PVC con un centímetro y medio de grosor. La prueba consiste en hacer uso de un taladro para ejercer diferentes valores de fuerza sobre el material sobre 1, 3 y 5 segundos para verificar la capacidad de penetración que tiene el efector final.

Es importante resaltar que la velocidad a la que se hicieron las pruebas es la velocidad nominal del taladro que es de 400 rpm. Los resultados de la prueba fueron:

Fuerza[Kg]\Tiempo[s]	1	3	5
0.1	1	1	2
2	2	4	7
5	5	9	11
10	10	14	-

Tabla 5: Distancia penetrada con diferentes valores de fuerza para tres lapsos de tiempo [mm].

La prueba permitió determinar que el efector final (figura 23) tiene la capacidad de crear rugosidades suficientemente notables con un valor de fuerza incluso inferior a los 2Kg (1Kg = 9.8 N) y que el rango de penetración se ve afectado exponencialmente con el tiempo de exposición del material. Un inconveniente que se presentó durante la prueba es la acumulación de escombros sobre el efector final, por esta razón, es necesario que el efector final sea cuidadosamente limpiado tras cada procedimiento de lijado para evitar la cristalización de los escombros y su inutilización parcial o total.

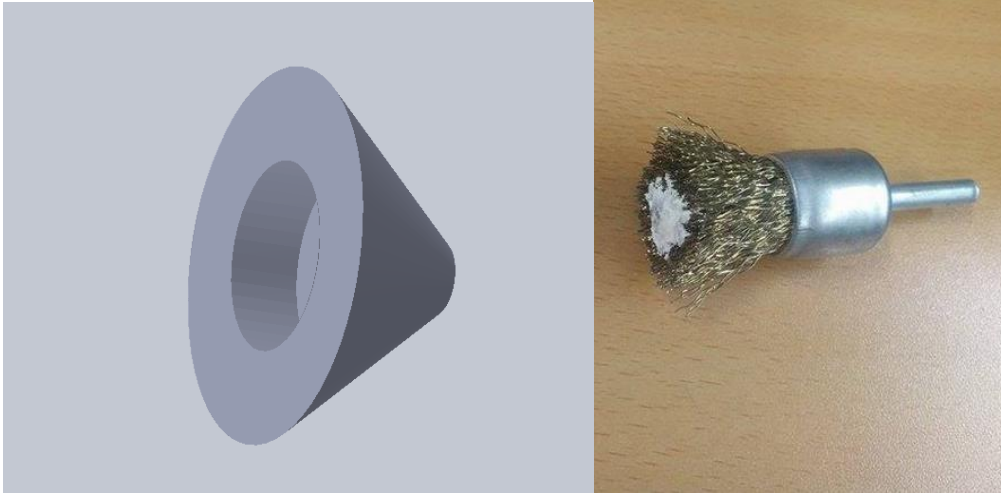


Figura 23: Modelo del efector final y su contraparte real.



Figura 24: Resultados de prueba de fuerza sobre tubo de PVC.

3.4.2 Modelado de la fuerza externa en *SimMechanics*

El modelo construido en SolidWorks facilita el uso de un vector de fuerza externa aplicada sobre el robot pero debido a las capacidades del software de modelado (*SimMechanics 1 Generación*), es imposible ingresar dicha fuerza obtenida dentro del diagrama de control, la solución que ofrece el modelo es generar una fuerza externa fija que permita estudiar el comportamiento del lazo de control de fuerza en diferentes escenarios.

Para el modelado de la fuerza externa se hizo uso de un resorte que une el final de la tercera articulación a un punto del plano cartesiano (Figura 25), esta unión por medio de un resorte permite estudiar el efecto que tiene un obstáculo en el esfuerzo mecánico requerido durante la

ejecución de la trayectoria. El endurecimiento de la constante de elasticidad del resorte eleva el valor de fuerza necesario para alcanzar la posición deseada y continuar con la trayectoria solicitada.

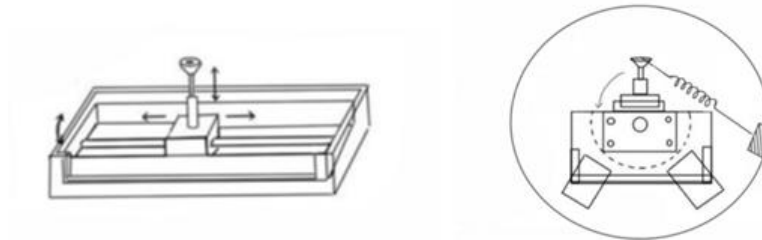


Figura 25: Modelado virtual de la fuerza externa.

Dentro del diagrama de *SimMechanics* únicamente hacen falta dos bloques para simular su comportamiento los cuales se visualizan en la Figura 26.

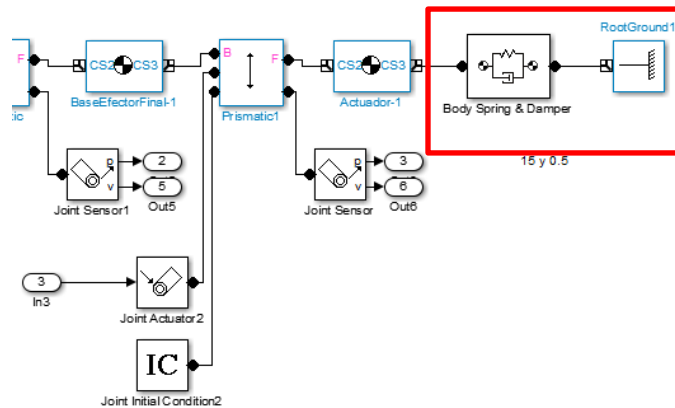


Figura 26: Modelado grafico de la fuerza externa.

3.4.3 Lazo de control de fuerza

Por medio de las pruebas y el modelado matemático de la fuerza externa se determinó que 0.05Kg o 0.5 N es la referencia de fuerza mínima necesaria para generar una rugosidad suficiente para que el parche sea fijado en la superficie del tubo (teniendo en cuenta que la trayectoria se realiza en 10 segundos). Para seguir la referencia de fuerza, se halla el error en fuerza que se provoca en cada punto de la trayectoria y se realimenta por medio de un control integral que permite corregir la trayectoria que se le solicita seguir a la articulación no 3. Como resultado se obtiene el siguiente lazo de control:

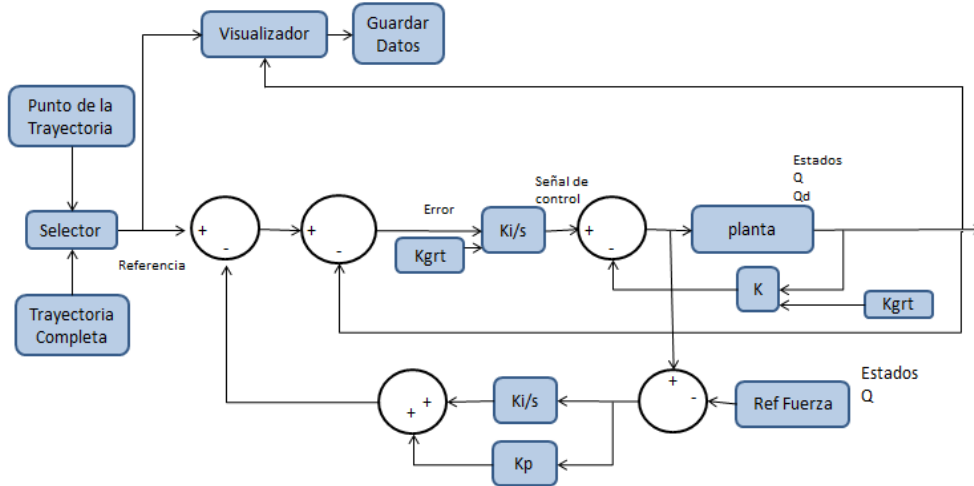


Figura 27: Realimentación del error de fuerza en la trayectoria sugerida por el generador de trayectorias.

El valor del controlador es establecido de la siguiente manera:

- Ganancia integral:

La ganancia integral debe responder al error acumulado para asegurar una realimentación suficiente al generador de trayectoria. Como se desea que la desviación estándar del error sea de máximo 0.01 (0.49 a 0.51) con una precisión de menos de un centímetro para no generar una acción de control que termine de romper el tubo, se obtiene que:

0.01 N debe corresponder una realimentacion de 0.8cm

$$GainI = \frac{cmrealimentados}{Variaciondefuerzadetecteda} = \frac{0.8cm}{0.01N} = 80$$

- Ganancia proporcional:

La ganancia proporcional ayuda a que el comportamiento del sistema reduzca sus características oscilatorias, pero aumenta significativamente el tiempo de procesamiento debido al ruido de alta frecuencia que permite pasar (figura 28). Según las pruebas de simulación los valores que permites reducir las oscilaciones del sistema sin agregar un erro de estado estable perceptible están en el rango entre los 0.1 y 0.6, por esta razón se usó 0.5.

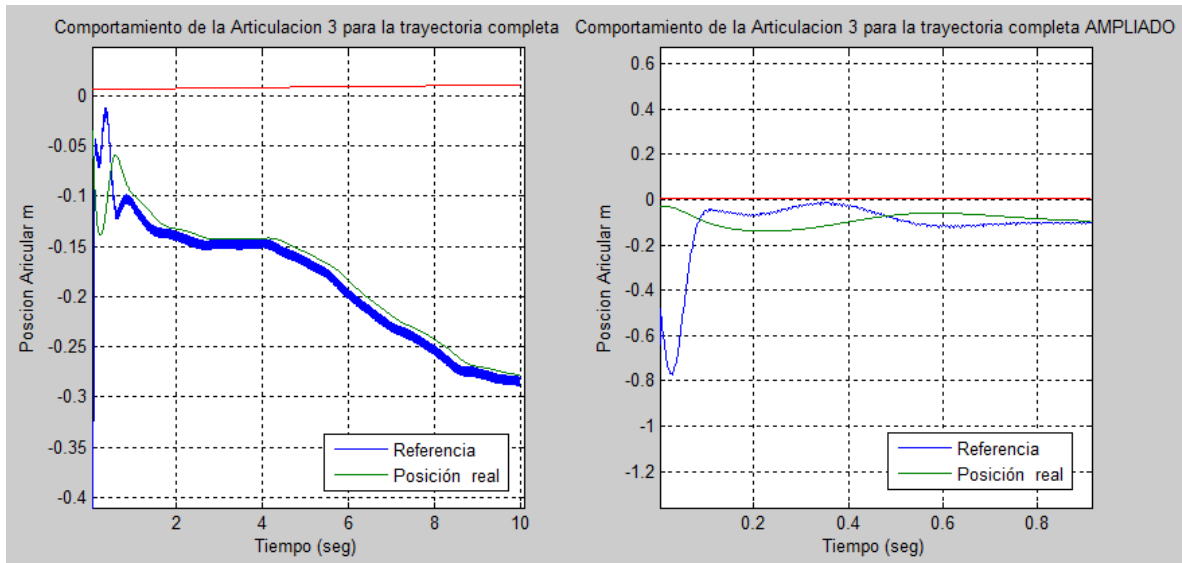
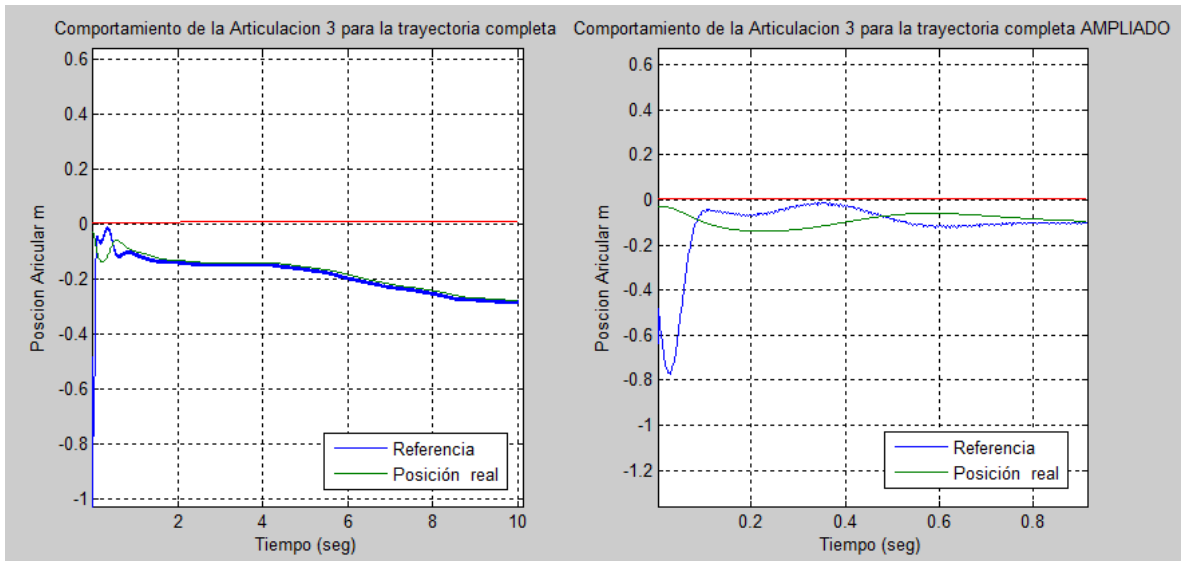


Figura 28: Simulación de falta de fuerza de contacto por parte del tubo.

3.4.4 Resultados

3.4.4.1 Seguimiento de la trayectoria completa con el control de fuerza activo.

El objetivo del lazo de control es ejercer la misma cantidad de fuerza en todo momento, por esta razón, si la constante de elasticidad del resorte es alta, el efector final sentirá una fuerza adicional que sobrepasa la referencia que se le solicita seguir y hará que la tercera articulación se retraiga para evitar el contacto con la superficie. En caso de que la constante de elasticidad del resorte sea muy pequeña, el lazo de control modificara la trayectoria sugerida para que la tercera articulación se extienda más de lo sugerido por el generador de trayectorias y consiga fijar el efector final contra la superficie virtual con la fuerza que se le da de referencia. Debido a el posicionamiento de la segunda tierra virtual (donde se fija el resorte) y la dirección del vector de torque, la distancia que se usa como referencia para la tercera articulación es negativa, por tal razón, extender la articulación hace más negativa la referencia y retraerla la hace menos negativa.



Control PI sin obstáculo.

Figura 29: Simulación de falta de fuerza de contacto por parte del tubo.

En este escenario, la constante de elasticidad del resorte es de 0.5 y la de amortiguamiento es de 5. El lazo de control asegura que la trayectoria sugerida por el generador de trayectorias (línea roja) sea modificada (línea verde: nueva trayectoria sugerida) para salir a buscar la fuerza de contacto que hace falta extendiendo el resorte virtual que se encuentra unido a la tercera articulación, (línea azul: trayectoria seguida modificada).

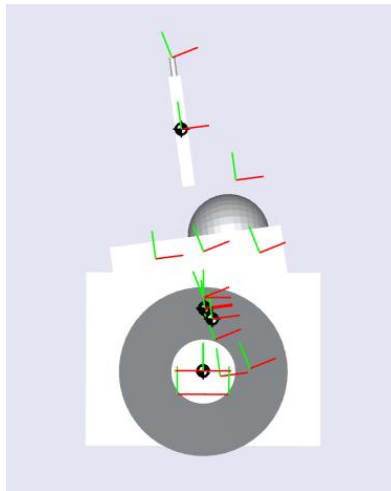


Figura 30: Comprobación visual del efecto de la falta de fuerza de contacto.

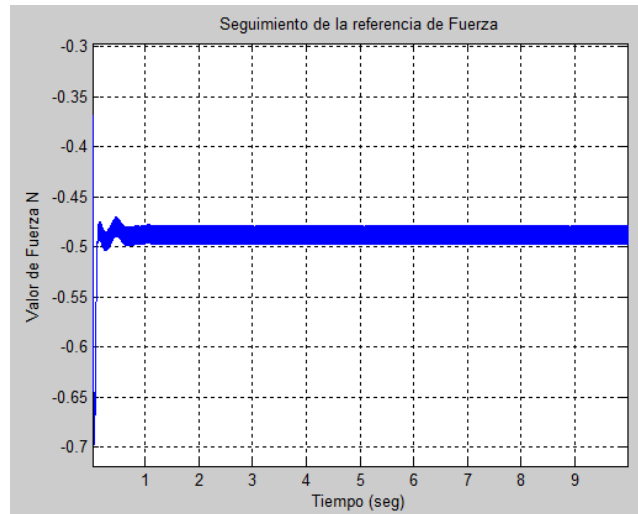
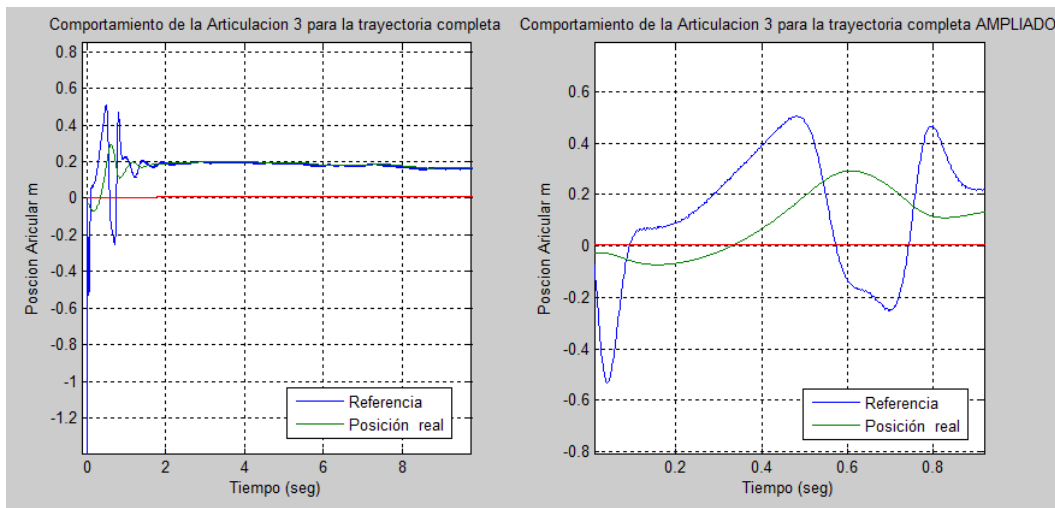


Figura 31: Seguimiento de la referencia de Fuerza.

Para este caso, la constante de amortiguamiento es la única que controla el comportamiento dinámico de la respuesta del sistema. En un ambiente real serán las propiedades del material y de la superficie que se desea lijar quienes determinaran este comportamiento.



Control PI con obstáculo.

Figura 32: Simulación de un obstáculo como fuerza de contacto presente en el tubo.

En este escenario, la constante de elasticidad del resorte es de 5 y la de amortiguamiento es de 5. El lazo de control asegura que la trayectoria sugerida por el generador de trayectorias (línea roja) sea modificada (línea verde: nueva trayectoria sugerida) para evitar la fuerza de contacto que se presenta por parte del resorte virtual que se encuentra unido a la tercera articulación, como consecuencia retrae la articulación no 3, (línea azul: trayectoria modificada).

A pesar que las modificaciones que se hacen sobre la trayectoria son considerables respecto al valor de referencia inicial calculado por el generador de trayectorias, se debe tener en cuenta dos aspectos de las pruebas realizadas:

- El retardo del controlador compensa el comportamiento oscilatorio de la señal
- Los escenarios que se han presentado son casos extremos que difícilmente se presentarán, lo cual es evidente en la confirmación visual del comportamiento de la plataforma robótica.

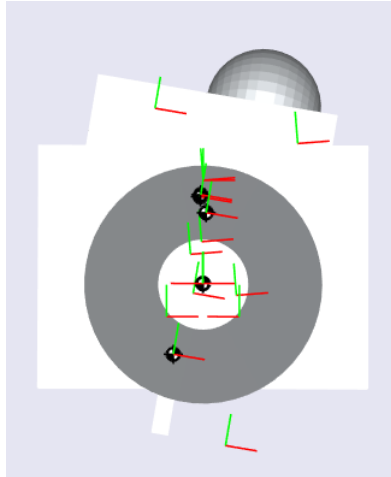


Figura 33: Comprobación visual de un obstáculo como fuerza de contacto presente en el tubo.

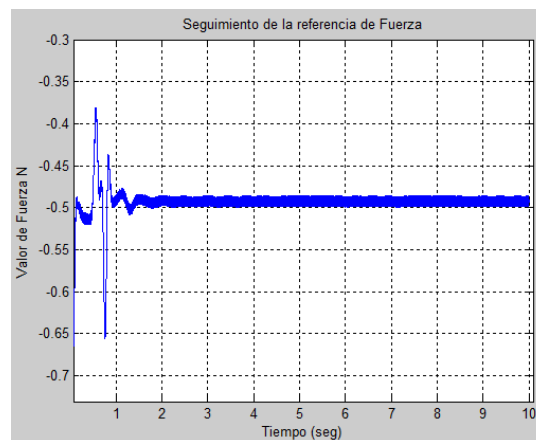


Figura 34: Seguimiento de la referencia.

El seguimiento de la referencia en este caso es más oscilante debido al alto valor asignado a la constante de elasticidad del resorte virtual, lo que causa que en todo momento el efector este realizando la evaluación de la fuerza externa para determinar si el obstáculo continúa presente a lo largo de la trayectoria o si ya puede continuar con la trayectoria sugerida desde el generador de trayectoria.

4. CONCLUSIONES

Se construyó un modelo CAD que permite trabajar con la dinámica del modelo original propuesto por la universidad militar pero evita el sobre segmentamiento de sus articulaciones. En el modelado CAD de la plataforma robótica, los detalles como tuercas y tornillos fueron tenidos en cuenta dentro de la masa inercial de los segmentos que componen las articulaciones de la plataforma. Una reducción del 70% de las piezas que componían la estructura mecánica en simulink resulto en una reducción del tiempo de simulación del 40% y en la reducción considerable de los errores numéricos de simulación por sobre segmentación del modelo.

Con el modelo CAD se desarrolló una arquitectura de control. El control recibe como parámetros de entrada la trayectoria articular que se requiere para lijar el área circundante a una fisura encontrada de forma manual en la tubería. Con la trayectoria articular, el control debe asegurar dos cosas: el seguimiento de la trayectoria planeada y la cantidad de fuerza que ejerce el efector final sobre la tubería. La trayectoria planeada será modificada en caso de que el valor de fuerza no sea el correcto.

El ambiente virtual creado en Matlab permite validar el comportamiento de la plataforma bajo el efecto de la arquitectura de control gracias a los módulos de sensores y el render gráfico con los que cuenta el complemento de Matlab "*SimMechanics*".

Como técnica de control se utiliza realimentación de estados con acción integral para posibilitar el seguimiento de referencias dinámicas. En el caso del control de la trayectoria, esta técnica de control es combinada con el control óptimo LQR para conseguir valores de controlador que puedan ser interpolables a lo largo de cada punto de la trayectoria. Como resultado el efector final logro un error de estado estacionario de 0.4% en el seguimiento de la trayectoria, con un tiempo de estabilización promedio de 1.2 segundos y un retardo de 0.2 segundo en la ejecución de la trayectoria.

La fuerza externa que es causada por un escombros presente en la tubería es modelada por medio de la constante de elasticidad de un resorte virtual conectado entre el efector final y un punto del entorno virtual externo a la plataforma. Al endurecer la constante del resorte la plataforma siente un esfuerzo adicional para poder llevar a cabo la trayectoria y como consecuencia se contrae para evadir el obstáculo, en caso de que la constante sea del orden de 0.5 o inferior envía el mensaje a la plataforma de que el efector final no está en contacto con la tubería y la plataforma extiende la tercera articulación para hacer el contacto requerido.

El control de fuerza utiliza un controlador proporcional integral (PI) para realimentar el error con respecto a la señal de fuerza de referencia. El tiempo de estabilización promedio de la trayectoria modificada por el control de fuerza es de 1 segundo y un retardo de 0.35 segundos aproximadamente. El tiempo de estabilización del seguimiento de referencia de la fuerza de la articulación número tres, tiene un tiempo de estabilización de entre 1 segundo y 1.7 segundos dependiendo del caso (obstáculo en la tubería o falta de contacto entre el efector final y la tubería). Para el caso de un obstáculo presente en el tubo el comportamiento oscilatorio de la

señal de fuerza de la articulación tres presenta sobre picos de hasta el 30% en el primer instante de tiempo (sobre amortiguamiento) verificando la existencia del obstáculo y del 5% en la región de estabilización.

La trayectoria de lijado tiene en cuenta las dimensiones del actuador final para cubrir el área de trabajo una única vez y no crear irregularidades en la superficie al lijar más de una vez una misma región, es por esta razón que el control de fuerza tiene un efecto en la articulación longitudinal de la plataforma. Si la acción de control del control de fuerza modificara las variables articulares 1 o 2, causaría que existieran regiones sin lijar o donde se ha lijado más de una vez.

A pesar que el control de la trayectoria se hace por medio del control de posición, el control de la velocidad que deben experimentar los actuadores depende del tiempo de simulación en el que se realiza toda la trayectoria. En las pruebas realizadas el tiempo de simulación es de 10 segundos, lo cual quiere decir que la máxima velocidad que experimentan las articulaciones es de 4 RPM valor que no sobrepasa los 6 RPM, valor tenido en cuenta en el estudio de movimiento articular realizado por los ingenieros Mecánicos de la Universidad Militar Nueva Granada (U. Javeriana, 2014), ni los 8.8 RPM de máxima velocidad descrito en la hoja de datos del actuador (Animatrics, 2011).

El hardware y software de alto nivel presente en los motores SM 23165D permite realimentar las entradas y salidas de la plataforma sin que dicha medida de datos represente un consumo significativo de energía. Por esta razón la realimentación de estado es una arquitectura valida y suficiente para llevar a cabo la tarea de controlar la posición y fuerza del efector final de la plataforma robótica.

Un trabajo futuro, podría suponer la optimización de la trayectoria de control propuesta. La optimización de la trayectoria podría contemplar como aspectos de trabajo la cantidad de energía que consume cada articulación y construir una trayectoria que siga cubriendo la totalidad de la región necesaria pero minimice el gasto de energía de la plataforma.

5. FIGURAS

Figura 1: Plataforma de reparación importada desde SolidWorks hacia Matlab.	7
Figura 2: Modulo de fijación de la plataforma robótica de reparación.	8
Figura 3: Modulo de parchado de la plataforma robótica de reparación.	9
Figura 4: Modulo de lijado de la plataforma robótica de reparación.	10
Figura 5: Estructura Mecánica Original con el módulo de desbaste.	10
Figura 6: Grados de Libertad de la plataforma robótica de reparación.	11
Figura 7: Dimensiones más relevantes de la plataforma robótica de reparación.	11
Figura 8: Versión 3.0 del modelo en SimMechanics de la plataforma robótica de reparación.	12
Figura 9: Plot de la estructura robótica generada por medio de los parámetros DH.	14
Figura 10: Arquitectura de control.	15
Figura 11: Trayectoria propuesta para el proceso de lijado.	17
Figura 12: Interfaz Gráfica, Cálculo de trayectoria.	18
Figura 13: Disposición de la Trayectoria cartesiana para asegurar un área de 20x20 cm.	18
Figura 14: Calculo de la longitud del arco de la circunferencia.	19
Figura 15: Seguimiento de la trayectoria articular.	19
Figura 16: Visualización de Velocidad y Aceleración cartesiana en el eje X.	20
Figura 17: Comparación entre el modelo obtenido por medio del toolbox SimMechanics (Izquierda) contra el modelo obtenido con el toolbox de robótica de Peter Corke (Derecha).	21
Figura 18: Diagrama de control por realimentación de estados.	24
Figura 19: Comportamiento de K en cada posible punto del espacio.	29
Figura 20: Realimentación de estados para corregir el error de posición.	29
Figura 21: Comportamiento dinámico de cada articulación para 1 punto de la trayectoria.	31
Figura 22: Comportamiento dinámico de cada articulación durante la trayectoria.	33
Figura 23: Modelo del efector final y su contraparte real.	35
Figura 24: Resultados de prueba de fuerza sobre tubo de PVC.	35
Figura 25: Modelado virtual de la fuerza externa.	36
Figura 26: Modelado grafico de la fuerza externa.	36
Figura 27: Realimentación del error de fuerza en la trayectoria sugerida por el generador de trayectorias.	37
Figura 28: Simulación de falta de fuerza de contacto por parte del tubo.	38
Figura 29: Simulación de falta de fuerza de contacto por parte del tubo.	39
Figura 30: Comprobación visual del efecto de la falta de fuerza de contacto.	39
Figura 31: Seguimiento de la referencia de Fuerza.	40
Figura 32: Simulación de un obstáculo como fuerza de contacto presente en el tubo.	40
Figura 33: Comprobación visual de un obstáculo como fuerza de contacto presente en el tubo.	41
Figura 34: Seguimiento de la referencia.	41

6. TABLAS

<i>Tabla 1: Parámetros DH de la plataforma de reparación YNAMI.</i>	13
<i>Tabla 2: Limitación de las articulaciones prismáticas.</i>	14
<i>Tabla 3: Mayor efecto de cada K a cada Articulación.</i>	27
<i>Tabla 4: Comportamiento dinámico promedio de cada articulación para 10 puntos aleatorios de la trayectoria.</i>	31
<i>Tabla 5: Distancia penetrada con diferentes valores de fuerza para tres lapsos de tiempo [mm].</i>	34

7. BIBLIOGRAFIA

- a. c. Mendez, m. p. (2005). *Evaluacion de la resistencia a la corrosion de aleaciones para oleoductos*. Bogota.
- A. Martin, J. R. (1998). *Efecto de los tratamientos de limpieza superficial en la vida util a fatiga de las aleaciones de aluminio*. Bogota.
- Animatrics. (2011). *Datasheet SM23165D & DT*. Moog.
- B., Y. B. (2013). *Desarrollo de estrategia de control para un brazo mecánico reparador de tuberías hidrosanitarias*. Bogota.
- Barrera, C. Y. (2013). *Sistema de supervisión de sensores para una plataforma robótica de exploración y reparación de tuberías hidrosanitarias*. Bogota.
- Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de Robotica*. S.A. MC Graw-Hill.
- Corke, P. (Dic de 1999). *Peter Corke*. Obtenido de http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html
- Cortes, F. R. (2002). *Control de Robots Manipuladores*. Alfaomega.
- E.P.A. (1999). *Operacion y Mantenimiento del alcantarillado, Limpieza e inspeccion de Tuberias*.
- Garcia, M. R. (2002). *Resistencia de Materiales vol12*. Universidad Jaume.
- Henriquez, L. F. (2013). *Estudio de fuerzas de movimiento de la plataforma robotica Ynami*.
- ICONTEC, I. C. (2008). *Cemento solvente para Sistemas de tubos Plasticos de PVC*. Bogota.
- J. Zico Kolter and Andrew Y. Ng - Computer Science Department, S. U. (2010). *Task-Space Trajectories via Cubic Spline Optimization*.
- Javeriana, U. M. (2013). *Determinacion de la ventana de operacion del adhesivo seleccionado, Primer Informe de Avance Conciencias*. Bogota.
- KUKA. (Sept de 2013). Obtenido de Kuka Robotics: http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/small_robots/versatrax300/start.htm
- Militar, U. (2013). *Analisis por elementos finitos con fuerza normal en la zapata*. Bogota.
- Militar, U. (2013). *Estructura del Robot Reparador*. Bogota.
- Ogata, K. (s.f.). *Ingenieria de Control Moderna*. Pearson.

- Pareja, J. (2014). *Desarrollo de estrategia de control para un brazo mecánico reparador de tuberías hidrosanitarias*. Bogota.
- Ramirez, J. D. (2012). *Ingeniería conceptual de sensores y actuadores para una plataforma robótica de exploración y reparación de sistemas hidrosanitarios*. Bogota.
- Rubio, F. R. (s.f.). *Control Adaptativo y Robusto*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Somolinos, J. A. (Junio de 2012). *Ciencia Explicada*. Obtenido de <http://www.ciencia-explicada.com/2013/02/parametrizacion-denavit-hartenberg-para.html>
- Sur, U. A. (2005). *Generación de trayectorias para un robot manipulador utilizando procesamiento de imágenes y splines*. Mexico DC.
- U. Javeriana, U. M. (2014). *Diseño y construcción de una plataforma robótica de exploración y reparación de tuberías hidrosanitarias operada remotamente*. Bogota.
- Vargas, N. (2014). *Implementación de un sistema automático de identificación y caracterización de fallas para una plataforma robótica de exploración y reparación de tuberías hidrosanitarias mediante visión por computador*. Bogotá.
- Zalucha, K. A. (s.f.). *The Chemistry of Structural Adhesive: Epox, Urethane and Acrylic Adhesives*. Stringer.