

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de mando de control para brazo
robótico asistencial en cirugía estereotáctica del cerebro**

Trabajo de graduación presentado por Josué Javier Cifuentes del Aguila
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de mando de control para brazo
robótico asistencial en cirugía estereotáctica del cerebro**

Trabajo de graduación presentado por Josué Javier Cifuentes del Aguila
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,


2019

Vo.Bo.:

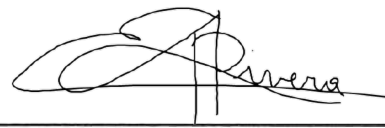
(f)  *RENATO CONEDERA
22.SEP.20*

MSc. Renato Conedera


Tribunal Examinador:

(f) 

MSc. Carlos Alberto Esquit

(f) 

Dr. Luis Alberto Rivera

(f) 

MSc. José Eduardo Morales

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de diciembre de 2019.

Guatemala es un país en vías de desarrollo por lo que sufre de problemáticas sociales como pobreza extrema, corrupción, sistema de salud pública deficiente; entre otros. En consecuencia, la tecnología utilizada en el área de salud no es óptima en comparación con la desarrollada en las potencias mundiales. No resulta económicamente posible importar la tecnología del momento cada año. La Universidad del Valle de Guatemala ha incluido la carrera de Ingeniería Biomédica para poder abordar la problemática expuesta y aportar al desarrollo de soluciones innovadoras. La carrera pertenece al Departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad. La introducción de la Ingeniería Biomédica ha traído consigo múltiples proyectos con instituciones de salud del país con el fin de implementar soluciones modernas a un costo más accesible a distintos problemas de salud.

El proyecto de Biomédica que se trata en el presente trabajo de graduación comprende la primera fase en la robotización de un brazo mecánico, utilizado en cirugías estereotácticas del cerebro en el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA. Se trabajó con servomotores propiedad de la Universidad para diseñar un primer prototipo funcional del proyecto. En las siguientes fases, el diseño variará de acuerdo a los requerimientos y sugerencias de HUMANA conforme se desarrollen iteraciones futuras del prototipo; sin embargo, tomarán sus bases y fundamentos matemáticos de acuerdo a la presente fase.

Este esfuerzo por introducir la robótica en las salas de operaciones de HUMANA traerá beneficio al servicio de salud del país, a los doctores cirujanos y principalmente a los pacientes. No obstante, este proyecto no existiría sin el trabajo del MSc. Carlos Alberto Esquit, Director del departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad, y del Doctor Juan Carlos Lara Girón, neurocirujano Director médico de HUMANA, que llegaron a un acuerdo para la resolución de dicha problemática. Adicionalmente, gracias a las asesorías y consejos del MSc. Miguel Zea y del MSc. Renato Conedera el avance en la primera fase del mando de control ha sido significativo y satisfactorio. La salud es uno de los derechos humanos fundamentales y cualquier esfuerzo por mejorar su calidad debe reconocerse y valorarse al máximo.

Prefacio	VI
Lista de figuras	XII
Lista de cuadros	XIII
Resumen	XVI
Abstract	XVII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	9
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo general	11
4.2. Objetivos específicos	11
5. Alcance	13
6. Marco teórico	15
6.1. Epilepsia	15
6.1.1. Tipos de crisis epilépticas	15
6.1.2. Diagnóstico de la epilepsia	16
6.1.3. Tratamiento de la epilepsia	17
6.2. Arduino Mega	17
6.3. Encoder rotatorio Keyes KY-040	18
6.4. Mando de control	18
6.5. Servomotores Dynamixel	19
6.5.1. Dynamixel AX-12A	19

6.5.2.	Dynamixel MX-106T	21
6.6.	Robótica	23
6.6.1.	Movimiento de cuerpo rígido	24
6.6.2.	Cinemática directa	25
6.6.3.	Cinemática inversa	27
7.	Derivación de primer prototipo de mando de control	33
7.1.	Diseño de mando de control	33
7.1.1.	Requerimientos del sistema	33
7.1.2.	Modelo esencial del mando de control	33
7.1.3.	Modelo de usuario del mando de control	34
7.1.4.	Modelo de diseño final de mando de control	35
7.2.	Módulos	36
7.2.1.	Control a través de Arduino Mega	36
7.2.2.	Botones	38
7.2.3.	Encoder rotatorio	38
8.	Cinemática inversa de la primera etapa de ajuste	41
8.1.	Cinemática directa de primera etapa de ajuste	42
8.1.1.	Asignación de marcos de referencia a brazo robótico	42
8.1.2.	Medición de parámetros de Denavit-Hartenberg y cálculo de matrices de transformación	43
8.2.	Simulación de solución numérica a problema de cinemática inversa en Matlab	44
8.3.	Ecuaciones de cinemática inversa para posición del manipulador	46
8.3.1.	Comparación entre posicionamiento con solución analítica y solución numérica de primera etapa	50
8.4.	Ecuaciones de cinemática inversa para orientación del manipulador	52
8.5.	Consideraciones especiales de las ecuaciones de cinemática inversa	54
8.5.1.	Posicionamiento y orientación de efector final	55
8.5.2.	Restricciones	55
8.5.3.	Ecuaciones finales al problema de cinemática inversa de primera etapa de ajuste	60
9.	Implementación de ecuaciones de cinemática inversa en prototipo electromecánico	65
9.1.	Manejo de posición de servomotores	66
9.1.1.	Posicionamiento de primera etapa	66
9.1.2.	Posicionamiento de etapas posteriores	68
9.2.	Manejo de velocidad angular de servomotores	69
9.2.1.	Velocidad angular de primera etapa	69
9.2.2.	Velocidad angular etapas posteriores	70
9.3.	Resultados de posición y velocidad	70
9.3.1.	Posición y velocidad en Tracker	71
9.3.2.	Análisis gráfico de posición y velocidad	75
10.	Conclusiones	79

11.Recomendaciones	81
12.Bibliografía	83
13.Anexos	85
13.1. Repositorio de algoritmos de programación	85

1.	<i>ROSA®</i> , por <i>Medtech</i>	4
2.	Sistema de neuronavegación, por <i>BrainLab</i>	5
3.	Brazo mecánico <i>Varioguide</i> , por <i>BrainLab</i>	6
4.	Sistema de cirugía <i>daVinci</i>	7
5.	Control por gestos en mirada	7
6.	<i>Arduino Mega</i> , por <i>Arduino</i>	17
7.	Acople mecánico de encoder rotatorio	18
8.	Señales de salida de encoder rotatorio	19
9.	Servomotores Dynamixel en cadena	20
10.	Torque estático y velocidad angular máxima de distintos modelos Dynamixel	20
11.	Relación gráfica entre registro de posición y posición angular de Dynamixel AX-12A	21
12.	Relación gráfica entre registro de posición y posición angular de Dynamixel MX-106	22
13.	Juntas robóticas	24
14.	Ejemplo de rotación al rededor de eje \hat{y}	25
15.	Asignación de marcos y medición de parámetros DH	27
16.	Marcos estándares en la estación de trabajo	28
17.	Cuatro soluciones para el PUMA 560	29
18.	Parámetros DH de manipulador planar	30
19.	Plano geométrico asociado con robot planar	31
20.	Diagrama de secuencia de brazo robótico	34
21.	Diagrama de flujo de interacción de Doctor con brazo robótico	35
22.	Idea preliminar de diseño de mando de control	36
23.	Tiempo de interrupción de <i>Timer 1</i>	37
24.	Comunicación serial con servos AX-12A y MX-106T	38
25.	Circuitos eléctricos botones	39
26.	Señales de salida de encoder rotatorio	39
27.	Primer prototipo de manipulador robótico diseñado por Fernando Salazar	42

28.	Primera etapa de ajuste con sus juntas en posición cero	43
29.	Marcos propuestos para primera etapa de ajuste	43
30.	Interfaz gráfica de simulación de posicionamiento de brazo en coordenadas esféricas	45
31.	Simulación a trayectoria dependiente al ángulo azimutal de la solución analítica (azul) vs la numérica (roja) vista desde el plano XY	51
32.	Simulación a trayectoria dependiente al ángulo polar de la solución analítica (azul) vs la numérica (roja) vista desde el plano XZ	52
33.	Simulación a trayectoria dependiente al radio de la solución analítica (azul) vs la numérica (roja) vista desde el plano XZ	53
34.	Brazo robótico con sus juntas en la posición cero	54
35.	Simulación de trayectoria de revolución en la posición de ángulo azimutal del efector final con radio de $20cm$ y ángulo polar de 45°	57
36.	Simulación de trayectoria de media revolución en la posición de ángulo polar del efector final con radio de $20cm$ y ángulo azimutal de 0°	58
37.	Simulación de trayectoria lineal en la posición radial del efector final	59
38.	Simulación de trayectoria variando el ángulo azimutal de -90° a 90° con ángulo polar de -45° y radio de $25cm$	62
39.	Simulación de trayectoria variando el ángulo polar de -45° a 45° con ángulo azimutal de -45° y radio de $25cm$	62
40.	Simulación de trayectoria variando el radio de $5cm$ a $25cm$ con ángulo azimutal de 0° y ángulo polar de -30°	63
41.	Trayectoria sobre superficie de elipsoide con ejes $a = 20cm$, $b = 10cm$ y $c = 15cm$	63
42.	Segundo prototipo de brazo electromecánico diseñado por Fernando Salazar	66
43.	Juntas finale del segundo prototipo electromecánico diseñado por Fernando Salazar	68
44.	Medición de trayectoria en función de ángulo azimutal con <i>Tracker</i>	72
45.	Medición de trayectoria en función de ángulo polar con <i>Tracker</i>	73
46.	Medición de trayectoria en función del radio con <i>Tracker</i>	74
47.	Trayectorias sobre eje de ángulo azimutal con rapidez mínima y máxima programadas	76
48.	Trayectorias sobre eje de ángulo polar con rapidez mínima y máxima programadas	77
49.	Trayectorias sobre eje radial con rapidez mínima y máxima programadas	78

Lista de cuadros

1.	Especificaciones Dynamixel AX-12A	21
2.	Especificaciones Dynamixel MX-106T	23
3.	Parámetros DH de primera etapa de manipulador robótico	44
4.	Parámetros para simulaciones de ajuste de primera etapa	45
5.	Parámetros para simulaciones de ajuste de primera etapa	56
6.	Pares ordenados de posiciones de la junta con posición del servomotor	67
7.	Restricciones en movimiento angular de servomotores.	67

Este trabajo se enfoca en el diseño e implementación de un mando de control para una versión robotizada de *Varioguide* de *Brainlab*. Su funcionalidad radica en que sea implementable con el sistema de navegación *Vector Vision 2008*. En Guatemala, el Centro Neurológico HUMANA se enfoca en el tratamiento de la epilepsia sin fines de lucro. HUMANA cuenta con los sistemas de *BrainLab* y solicitó ayuda a la Universidad del Valle de Guatemala para robotizar el brazo mecánico con el fin de acortar tiempos de cirugía.

El proyecto se dividió en tres trabajos de graduación con enfoques distintos. Un trabajo consistió en el análisis de los servomotores de Dynamixel AX-12A y MX-106T, otro en el diseño de la estructura mecánica del primer prototipo y el último en el diseño del mando de control. El mando de control debía buscar ser implementado por un microcontrolador para poder reducir sus dimensiones físicas. Debido a las limitaciones computacionales de un microcontrolador, las soluciones a los problemas de cinemática inversa del brazo debían ser ecuaciones de forma cerrada. Entonces una temática importante de la investigación fue determinar las ecuaciones de ajuste.

Varioguide se ajusta por etapas. La primera etapa es un ajuste tridimensional, la segunda es un ajuste angular y la tercera corresponde a un ajuste angular y axial. El problema de cinemática inversa recaía especialmente en la primera etapa. Se utilizó el método de Pipier cuando tres ejes se intersectan para resolver de manera analítica la cinemática inversa de la primera etapa. Las ecuaciones resultantes sí cumplían con el posicionamiento del efector final del brazo robótico; sin embargo, no tomaba en cuenta cambios abruptos de posición en cada una de sus juntas ni colisiones entre sus propios eslabones. Apoyado en simulaciones, se restringió el movimiento de la primera etapa y se modificaron las ecuaciones obtenidas originalmente para evitar los problemas mencionados.

Al obtener las ecuaciones finales sin problemas de colisión o saltos de posición, se implementaron en el prototipo electromecánico de Fernando Salazar. El prototipo reaccionó de manera satisfactoria a los comandos de movimiento del mando de control. El único problema persistente fue la estabilidad del sistema. Se aplicó un algoritmo de

cambio de velocidad para mejorarla pero fue imposible eleminarla debido al material de la estructura mecánica.

The present work focuses in the design and implementation of a controller for a robotized version of the *Varioguide* mechanical arm, patented by *BrainLab*. The Neurological Center HUMANA specializes in the non-profit oriented treatment of epilepsy in Guatemala. HUMANA utilizes *BrainLab's* neurological navigation system to perform stereotactic brain surgery. The institution asked for the Universidad del Valle's aid to robotize *Varioguide* to reduce brain surgery time.

The task was divided in three distinct graduation projects. One project consisted in the analysis of Dynamixel actuators, another project focused on the mechanical design of the robotic arm, and the last project revolved around the design and implementation of the robot controller. The controller had to be microcontroller-based to reduce its mechanical dimensions. Due to microcontrollers' computational restrictions, the solutions to the inverse kinematics of the robot had to be closed-form solutions.

The robotized *Varioguide* is adjusted in three steps. The first step corresponds to a tridimensional adjustment, the second one to an angular adjustment and the third one to a translational and angular adjustment. Pieper's solution when three axes intersect was used to find the closed-form equations to the inverse kinematics problem; nevertheless, these equations did not consider sudden changes in a joint position or the collision of different robot links. Therefore, some equations were modified and therefore simulated in MATLAB's Robotics Toolbox to test if the problems persisted.

Once the closed-form equations provided smooth and collision-free movement for the robotic manipulator, they were implemented in Arduino to test Fernando Salazar's electromechanical arm prototype. The robotic arm was successfully positioned and oriented, but showed some stability problems. Dynamixel's actuators' maximum speed was controlled in each movement trajectory to obtain steadier motion; however, it was impossible to completely eradicate structure vibrations.

La robótica es una rama interdisciplinaria de la ciencia e ingeniería que está siendo ampliamente utilizada en aplicaciones industriales, educativas, ingenieriles y médicas. La robotización de procesos se realiza con el fin de automatizar tareas de manera precisa, eficaz y eficiente. En este trabajo se desarrolla una aplicación médica para la robótica, en el que se encuentra la solución en forma de ecuaciones cerradas de un manipulador robótico que emula al brazo mecánico *Varioguide*, de *BrainLab*. Por lo tanto, el enfoque exclusivo de este proyecto recae en la robótica.

El Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA (Guatemala) utiliza el sistema de navegación *Vector Vision* y el brazo mecánico *Varioguide* de manera asistencial en cirugías estereotácticas del cerebro. El proceso requiere de precisión y agilidad por lo que HUMANA ha solicitado a la Universidad del Valle de Guatemala ayuda en la robotización del brazo mecánico. Por consiguiente, se propuso diseñar un mando de control para manejar la posición y orientación del efector final de *Varioguide* siguiendo las etapas de ajuste de *Vector Vision*. Al ser una aplicación médica, el mando de control se realizó con el fin de garantizar movimientos con desplazamientos y velocidades en la magnitud de centímetros y centímetros por segundo, respectivamente, en busca de precisión y seguridad en la sala de operaciones. Adicionalmente, el uso de servomotores de precisión de la familia Dynamixel en posesión de la Universidad del Valle permite una gran resolución en movimientos milimétricos. No obstante, el control de un robot requiere de resolución a los problemas de cinemática directa e inversa del manipulador mismo.

En el diseño de control de un robot, debe conocerse la transformación que existe de junta a junta. Siguiendo la cadena de eslabones con sus transformaciones se puede encontrar la transformación que describe la posición y orientación el efector final de un robot con respecto a la base del mismo. Entonces, con esta transformación puede encontrarse la posición y orientación del efector final en función de la posición angular de cada junta en el proceso de cinemática directa. Este proceso se

realiza principalmente para poder describir el comportamiento del robot y conocer el espacio de trabajo del mismo. El problema de cinemática inversa se aborda para poder controlar las posiciones angulares de cada junta para llegar a una posición y orientación deseada. Este procedimiento conlleva una extensa labor matemática. En el presente documento se explica el desarrollo de ecuaciones cerradas para la solución a la cinemática inversa.

Las bases matemáticas y de implementación encontradas en el trabajo controlan de manera satisfactoria el prototipo electromecánico, diseñado por Fernando Salazar, que emula a *Varioguide*. Los resultados muestran que es posible la robotización del brazo mecánico y brindan certidumbre sobre un posible uso en la sala de cirugía estereotáctica de HUMANA en un futuro.

La epilepsia es una de las enfermedades conocidas más antiguas por lo que, a lo largo de la historia, ha sido objeto de estigmatización social y discriminación. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2019, aproximadamente 50 millones de personas padecen de la enfermedad alrededor del mundo con un 80 % de los pacientes provenientes de países de medianos y bajos ingresos de los cuales tres de cada cuatro no reciben el tratamiento adecuado. La epilepsia representa el 0.6 % de la tasa de morbilidad mundial afectando de mayor manera a las personas de países de escasos recursos. En los países de altos ingresos, por cada 100,000 habitantes se registran de 30 a 50 casos de epilepsia anuales con la disponibilidad de ser atendidos por una media de 7.1 neurólogos. En contraste, en los países de medianos y bajos ingresos, por cada 100,000 habitantes los casos anuales registrados pueden duplicarse contando con el apoyo de una media de 0.1 neurólogos. Esto se traduce a 4.2 a 7 pacientes nuevos por neurólogo en países de altos ingresos en contra de los 600 a 1000 pacientes nuevos por neurólogo en países de escasos recursos. Esta brecha terapéutica se debe principalmente a la susceptibilidad de las personas de países de escasos recursos a sufrir una mayor incidencia de traumatismos; por ejemplo, en accidentes automovilísticos, y a un mayor riesgo de padecer enfermedades endémicas como el paludismo.[1]

La epilepsia puede tratarse con fármacos, procesos quirúrgicos, estimulaciones eléctricas como la del nervio vago y hasta con dietas cetogénicas. En el ámbito de los procesos quirúrgicos, la epilepsia se ha tratado a través de los años con cirugía estereotáctica del cerebro. Este proceso consiste en la reconstrucción tridimensional del cerebro del paciente para planear una trayectoria de introducción de electrodos con el fin de quemar o extirpar los puntos focales donde se origina la crisis epiléptica. El método de operación ha ido evolucionando con los años. A inicios de la cirugía estereotáctica, se colocaba la cabeza del paciente en un marco de metal, denominado halo de esterotaxia, que servía de referencia mientras mantenía la cabeza inmóvil. Del marco surge un casco especial con el cual, al calcularse el punto de inserción del

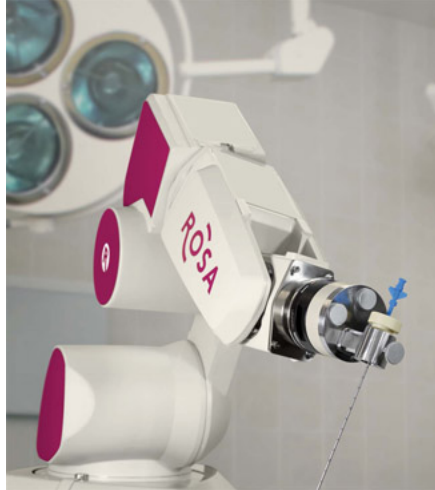


Figura 1: ROSA[®], por Medtech [3]

electrodo y la trayectoria de entrada en tres coordenadas ortogonales, se manipulaban las posiciones angulares del mismo. Spiegel y Wycis introdujeron las primeras herramientas estereotácticas en 1947 que sentaron bases a los procesos con marcos hasta la llegada de la neuronavegación. [2]

En la actualidad, uno de los dispositivos tecnológicos más avanzados en los países de altos ingresos para la cirugía del cerebro es el robot ROSA (Asistencia Robótica Estereotáctica, por sus siglas en inglés) desarrollado por Medtech (ahora conocido como Zimmer Biomet) y utilizado por hospitales de Asia, Europa y Norteamérica, dónde destaca el Hospital para Niños Lucile Packard de Stanford. Este brazo robótico, mostrado en la *Figura 1* posee seis grados de libertad que emulan los movimientos de un brazo humano permitiendo así total libertad para elegir la trayectoria de inserción del electrodo. Adicionalmente el sistema cuenta con neuronavegación asistida por computadora por lo que el cirujano puede observar la posición de los instrumentos con respecto al paciente y al punto de inserción en tiempo real brindando así confianza y seguridad en el proceso quirúrgico. [3]

En el Hospital Lucile Packard, ROSA se utiliza para neuroendoscopia ventricular, extirpación de tumores o focos epilépticos, navegación craneal, electroencefalografía estereotáctica (sEEG), estimulación profunda del cerebro (DBS), biopsias y neuroendoscopia transnasal [4]. Distintos procesos quirúrgicos requieren de distintas herramientas por lo que ROSA puede adaptarse a distintos utensilios que se colocan sobre su efector final. Estos artefactos están diseñados especialmente para que el sistema de neuronavegación pueda reconocer su posición y orientación y así indicar en pantalla la ubicación dentro del cráneo del paciente al momento de ser insertado [3]. Durante la cirugía, el posicionamiento del brazo es automático; sin embargo, puede ser dirigido por el cirujano en caso de ser necesario. De acuerdo a datos del hospital de Stanford, el tiempo de anestesiamiento se ha podido reducir hasta en un 80 % disminuyendo así la duración del período de recuperación del paciente [4].

En Guatemala, existen más de 350,000 pacientes que padecen de epilepsia. La epi-



Figura 2: Sistema de neuronavegación, por *BrainLab* [6]

lepsia es tratable en la mayoría de los casos con medicamentos y control del paciente; no obstante, el 30 % de las personas requerirán una cirugía invasiva del cerebro para prevenir o disminuir los ataques epilépticos. El tratamiento del trastorno se lleva a cabo principalmente por el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA. En 2006 se realizó la primera cirugía de epilepsia por HUMANA con resultados exitosos por lo que se decidió fundar el sitio de neurocirugía actual que desde el 2011 es el centro de referencia de la red hospitalaria nacional especializado en el tratamiento integral de la epilepsia. Su misión es “brindar servicios médicos y de salud eficientes y humanitarios con calidez y máxima calidad a pacientes con enfermedades del sistema nervioso especialmente a los pacientes con epilepsia, contando con el mejor desarrollo tecnológico y las mejores Praxis Médicas, en un ambiente amable, de acceso a todos los niveles sociales y económicos del país.” [5]

En HUMANA han utilizado un proceso quirúrgico estereotáctico que ha evolucionado con el tiempo. En sus inicios utilizaban un halo de estereotaxia con sistema de arco centrado para localizar el punto deseado dentro del espacio tridimensional de la cabeza del paciente con exactitud milimétrica. Actualmente, se utiliza el sistema de navegación *Vector Vision 2008* (Figura 2) y el brazo mecánico *Varioguide* (Figura 3) de *BrainLab* con los que han logrado garantizar seguridad con un proceso quirúrgico que presenta no más de 5 % de casos con complicaciones y 0.4 % de mortalidad. En ambos casos se reconstruye el espacio tridimensional del cerebro con imágenes tomográficas y de resonancia magnética. [5]

La cirugía estereotáctica con el equipo de *BrainLab* es similar a la de *ROSA*: posee un sistema de navegación que detecta en tiempo real la posición de un brazo que sostiene utensilios especiales que dicho sistema reconoce. Entonces, la diferencia



Figura 3: Brazo mecánico *Varioguide*, por *BrainLab* [6]

principal radica en que el brazo de *BrainLab* no es robótico sino mecánico. *Vector Vision* funciona como sistema de guía en la cirugía y brinda retroalimentación de imagen de la posición y orientación de tanto el efector final de *Varioguide* como de la herramienta que este sostenga. Al ser un brazo mecánico, el ajuste del mismo se hace por cuatro etapas. La primera etapa consiste de las juntas esférica - revoluta - esférica (vistas desde la base en la *Figura 3*) y su ajuste tiene el fin de colocar el efector final cerca del punto de inserción. Durante la segunda etapa se realiza un ajuste angular de solo un grado de libertad. Luego, en la tercera etapa, la junta cilíndrica permite un movimiento axial y angular. Finalmente, en la cuarta etapa se ajusta el efector final de manera angular para definir la orientación de la herramienta. Esta pieza posee una antena que es detectada por *Vector Vision* para poder indicar el posicionamiento adecuado de cada etapa de ajuste al médico cirujano encargado de la operación. Adicionalmente, al rotar el efector final se puede seleccionar el diámetro adecuado para el utensilio a utilizar. La inserción de la herramienta en *Varioguide* es realizada por el cirujano. El sistema es exclusivamente asistivo. [6]

Según el Dr. Juan Carlos Lara, director médico de HUMANA, el acople manual de *Varioguide* puede tomar hasta 30 minutos por electrodo por lo que los tiempos de cirugía y el desgaste del personal médico es significativo a comparación de *ROSA*. [5]

En el diseño de robótica es común utilizar herramientas de simulación para análisis de posicionamiento, orientación, velocidad; entre otros parámetros, del robot a fabricar. Una herramienta muy popular es *Robotics Toolbox* de Peter Corke [7]. En este complemento de *MATLAB* se pueden crear juntas prismáticas o revolutas con sus eslabones respectivos utilizando los parámetros de Denavit-Hartenberg. Con los eslabones conectados entre sí, se puede calcular la cinemática directa para obtener la posición del efector final respecto a la coordenada base dependiendo de la posición angular de las juntas y la cinemática inversa para obtener las posiciones angulares de las juntas en función de las posiciones cartesianas. En consecuencia, también per-



Figura 4: Sistema de cirugía *daVinci* [8]

mite computar las matrices de transformación entre eslabones de manera numérica o simbólica. Finalmente, para brindar retroalimentación visual al usuario del diseño robótico, la herramienta puede graficar la máquina en un espacio tridimensional y animar alguna trayectoria definida por el usuario en el código del programa.

La epilepsia no es la única condición médica que se trata con robots especializados. Además, ROSA no es el único sistema robótico presente en las salas de operaciones. En el artículo publicado por Carri Printz en 2011 [8], se menciona el uso de robótica para remover tumores y tratar el cáncer, especialmente en la oncología. Rosalia Viterbo, cirujana oncológica indica que la cirugía de riñones requiere de movimientos finos y alta destreza que pueden conseguirse con el uso de robots [8]. El robot en el artículo es el *da Vinci Surgical System* de *Intuitive Surgical, Inc* (Figura No. 4). El cirujano maneja este robot desde una consola donde observa una imagen tridimensional del espacio de trabajo. El robot cuenta con una cámara telescópica que le permite magnificar la imagen hasta 14 veces. En cuanto al manejo de instrumentos, emula movimientos de cirujano y puede realizar incisiones hasta 100 veces menores que las de cirugía abierta. Al igual que ROSA, un beneficio del uso de este robot es la reducción en el tiempo de recuperación del paciente. No obstante, su uso se limita a cirugías laparoscópicas. [8]

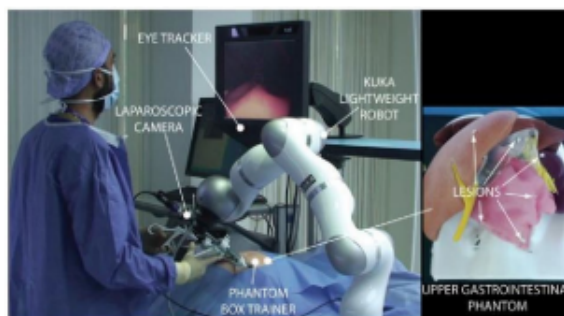


Figura 5: Control por gestos en mirada [9]

Por otra parte, la precisión y destreza que brinda la robótica no son los únicos beneficios de la misma. Un estudio en 2013 liderado por Kenko Fujii [9] demostró que con los gestos de la mirada puede controlarse el manipulador robótico utilizando modelos de Markov. Este hecho trae como beneficio brindar un sistema "manos libres" para el cirujano permitiéndole utilizar sus manos en la dirección de la cirugía. [9]. En la *Figura No. 5* se muestra el concepto con el que se rige el reconocimiento de gestos en la mirada.

Según datos del Banco Mundial [10], Guatemala corresponde a un país de mediano y bajo ingreso por lo que su situación ante la epilepsia es ínfima en contraste con países de alto ingreso. El ingreso nacional bruto (INB) *per cápita* en Guatemala hasta 2018 fue de 4410, inferior al promedio de países de mediano y bajo ingreso de 4837.042 [10]. Hay 350,000 pacientes que padecen de epilepsia en el país y el acceso al tratamiento de la misma puede dificultarse por el aspecto económico o la falta de consciencia sobre el trastorno mismo [5]. HUMANA con su misión se propone hacer accesibles económicamente estos tratamientos por lo que se financia mayoritariamente por donaciones. Han logrado avanzar de utilizar un halo de estereotaxia a utilizar el sistema de *BrainLab* descrito anteriormente. Con *Vector Vision* y el brazo mecánico *Varioquide* realizan exitosamente muchas cirugías de epilepsia en HUMANA; sin embargo, de acuerdo al al Dr.Lara Girón, la inserción de cada electrodo puede tomar hasta 30 minutos y en ciertos casos se requieren hasta ocho electrodos por paciente. Esto puede cuantificarse en cuatro horas de cirugía invasiva del cerebro sin contar los retardos por desgaste del personal médico.

Los médicos de HUMANA se sienten inspirados y fascinados por el sistema *ROSA* por lo que desean contar con un sistema como tal. *ROSA* podría acortar los tiempos de cirugía y eliminaría la dificultad de ajustar *Varioquide* con márgenes de error milimétricos manualmente ya que sería un proceso automático;sin embargo, HUMANA no se posee los fondos suficientes para adquirir dicha tecnología. Entonces, durante reuniones con el Director médico de HUMANA, el Dr. Juan Carlos Lara, se solicitó ayuda a la Universidad del Valle de Guatemala para solucionar este problema con la robotización y automatización del brazo existente en las instalaciones de la institución, sin alterar el sistema *Vector Vision* y garantizando que el seguimiento en las etapas de ajuste sea el mismo para que la retroalimentación visual del equipo mantenga su validez.

Dado que no se puede tomar información digital del sistema actual debido a que

infringe en los derechos de la institución sobre el equipo e incurriría en gastos adicionales, se descartó la automatización del brazo robótico utilizando la visión de computadora. *BrainLab* posee los derechos sobre las imágenes tridimensionales fabricadas por el sistema de navegación *Vector Vision* por lo que la máquina no permite obtener el dato bruto de imagen al menos que *BrainLab* lo autorice. Entonces, surgió la necesidad de utilizar un mando de control para posicionar el brazo robótico de manera precisa y con un funcionamiento intuitivo para que pueda ser manejado por el Doctor a cargo de la cirugía. Adicionalmente, resulta mandatorio indicar al médico a través de dicho mando el estado mecánico y eléctrico del dispositivo para evitar fallas severas durante la operación quirúrgica. Al poseer el sistema en su totalidad requerimientos muy específicos, es preferible diseñar el mando de control acorde a la necesidad y gusto del Doctor que lo utilizará para alcanzar la máxima eficiencia posible durante la cirugía.

La robotización del brazo mecánico es un avance médico importante en el país, pues no hay registro que se tenga un sistema de este tipo para neurocirugía más que el halo de estereotaxia. Al reducir los tiempos de cirugía y aumentar la precisión y velocidad de ajuste del brazo los pacientes estarán sometidos a menor anestesia y el período de recuperación se acortará. Se abre la oportunidad a mejorar la calidad de vida al 30% de las 350,000 personas que padecen epilepsia en Guatemala brindando la presente solución tecnológica al centro de referencia de la red hospitalaria nacional. Por añadidura, en un segundo plano, robotizar un brazo que posee más de seis grados de libertad (suficiente para orientarse y posicionarse dentro de cualquier espacio) representa un reto que ampliaría el estudio de la robótica en la Universidad del Valle y en la nación.

4.1. Objetivo general

Diseñar el mando de control de un brazo robótico asistencial para la inserción de electrodos en cirugía invasiva del cerebro contra la epilepsia que se acople al funcionamiento del sistema *BrainLab Vector Vision 2008* existente en las instalaciones de HUMANA para reducir retardos por imprecisión humana o fatiga y que proporcione medidas de seguridad para el paciente y los cirujanos.

4.2. Objetivos específicos

- Proyectar los componentes de entrada sobre el mando de tal manera que emule a los dispositivos comunes en robótica para brindar un manejo intuitivo con diseño ergonómico al usuario del brazo en cada etapa de posicionamiento.
- Traducir los comandos de movimiento de servomotores a movimientos tridimensionales, lineares o angulares del brazo según corresponda por etapa utilizando métodos de cinemática inversa.
- Disminuir el espacio en memoria y el tiempo de procesamiento del microcontrolador para agilizar la velocidad de respuesta del brazo robótico hallando soluciones analíticas cerradas a los problemas de cinemática inversa.
- Permitir al usuario un amplio rango en busca de precisión para distancias pequeñas y rapidez para distancias largas para agilizar el acople de cada etapa.
- Indicar al usuario sobre cualquier situación de riesgo como sobretorque, sobrecoorriente o temperaturas excedentes a las operacionales para el equipo electrónico con el fin de evitar accidentes en la sala de operaciones.

- Habilitar una opción para bloquear las entradas del mando de control para evitar que el cirujano pueda ingresar comandos de manera accidental cuando ya se haya ajustado la etapa presente.

Este proyecto se centra en el diseño y funcionalidad de un mando de control para un brazo robótico que se emplee en conjunto con *BrainLab Vector Vision 2008* como asistencia en cirugía cerebral. El brazo robótico realizado con la asociación y colaboración de Didier Salazar y Diego Valdez debe ser estable, robusto, intuitivo de manejar, debe permitir movimientos suaves y precisos y debe brindar retroalimentación del estado del dispositivo en general al Doctor operario. En total, se cuentan con nueve grados de libertad en el brazo por lo que corresponde a nueve servomotores (uno por cada junta del robot) que pueden ser manejados independientemente o en conjunto conforme lo requiera la situación. Adicionalmente, deben poder leerse el estado mecánico y eléctrico de cada servomotor para prevenir fallos durante el proceso quirúrgico.

El producto final del mando de control debe ser intuitivo de utilizar y manejar a los motores conforme a cada etapa de *BrainLab Vector Vision*; es decir, debe proveer movimiento en tres dimensiones, movimiento traslacional o movimiento angular según corresponda por etapa de ajuste; añadido a la suavidad y estabilidad en la moción. Debe poder enviar señales de control a los servomotores y poder leer sus mediciones de corriente, temperatura y voltaje para prevenir que se den condiciones de fallo por el exceso o escasez de alguno de los parámetros mencionados. En caso que exista riesgo de falla o que la misma sea inminente, debe avisar al usuario para que éste pueda detener el uso del sistema inmediatamente. En definitiva, debe satisfacer las necesidades y preferencias de los doctores que utilicen dicho sistema en HUMANA.

En el aspecto electromecánico, el mando posee pulsadores los cuales cuentan con protección antirebote para evitar lecturas falsas en los comandos de movimiento. Los pulsadores se utilizan tanto para el movimiento del brazo robótico como para la navegación entre etapas de ajuste. Un botón especial bloqueará la posición de la etapa actual para evitar cambiar la posición ajustada del brazo por error. La primera etapa presenta un movimiento tridimensional, la segunda, angular, la tercera, traslacional

y angular y la última, angular. El paso y velocidad de movimiento por cada pulso de botón es modificable con un encoder rotatorio. El prototipo finalizado debe ser capaz de manejar hasta nueve servomotores Dynamixel de las familias AX y MX.

6.1. Epilepsia

La epilepsia se define como un trastorno neurológico crónico en el que las neuronas cerebrales transmiten señales de manera anormal causando convulsiones y pérdida de conciencia. Las neuronas se comunican a través de impulsos eléctricos, pero durante un ataque, varias neuronas envían señales llegando a la tasa de 500 veces por segundo. Este sobre envío de señales puede provocar que el paciente sufra de movimientos involuntarios y pérdida temporal del conocimiento. Estas convulsiones o crisis generalmente duran unos breves minutos. [11]

En la mayoría de casos se desconoce la causa de la epilepsia. En caso de conocerse, las causas varían entre las cuales las razones más destacables son: factores genéticos, anomalías en el desarrollo del cerebro, infección, lesión cerebral traumática, accidente cerebrovascular o tumores cerebrales. En el caso que la epilepsia esté provocada por lesión o motivos fuera de lo genético, ésta puede ser tratada y detener las crisis, aunque la posibilidad de lo mismo sea incierta. [11]

6.1.1. Tipos de crisis epilépticas

Los ataques epilépticos se suelen dividir en dos grandes ramas: crisis focales y crisis generalizadas. Las crisis focales se originan en una parte del cerebro. Generalmente las crisis focales diagnosticadas son las del lóbulo frontal y lóbulo temporal medial. Las crisis focales pueden categorizarse como crisis focales sin pérdida de conocimiento y crisis focales con alteración de la conciencia. El primer tipo de convulsión puede afectar motricidad, sentimientos y sensaciones mientras que el segundo tipo puede provocar que se realicen movimientos repetitivos. Cabe mencionar que justo previo a una crisis focal puede sentirse un aura que es básicamente una crisis focal

sin pérdida de conocimiento que advierte la ocurrencia de una crisis focal mayor. Las crisis generalizadas se producen en todas las áreas del cerebro. Se clasifican en seis tipos principales. Las crisis de ausencia se caracterizan por episodios de mirada fija y movimientos corporales sutiles. Las crisis tónicas causan rigidez muscular y pueden ocasionar caídas. Las crisis atónicas causan la pérdida del control muscular por lo que se corre el riesgo de un colapso repentino. Las crisis clónicas producen movimientos musculares espasmódicos repetitivos. Las crisis mioclónicas se caracterizan por movimientos espasmódicos breves y repentinos. Las crisis tonicoclónicas se considera el tipo de ataque más intenso debido a que puede provocar pérdida abrupta del conocimiento, rigidez, sacudidas de cuerpo, pérdida de control de la vejiga y mordeduras de lenguas. [11]

6.1.2. Diagnóstico de la epilepsia

Existen distintos métodos y pruebas para diagnosticar la epilepsia y el tipo de epilepsia para conocer como se puede tratar el problema [12].

- **Electroencefalograma (EEG):** Se fijan electrodos en el cuero cabelludo del paciente para medir la actividad eléctrica cerebral. El fin de este método es detectar la zona de origen de las crisis focales.
- **Electroencefalografía de alta densidad:** Se colocan los electrodos a una menor distancia para conocer con mayor precisión la zona de origen de las convulsiones. En algunos casos pueden colocarse los electrodos de manera invasiva en el cerebro del paciente para detectar zonas de origen de convulsiones en las partes medias y bajas del órgano
- **Tomografía computarizada (TC):** Obtiene imágenes transversales del cerebro con el uso de rayos X. Con este método pueden encontrarse tumores, quistes, sangrados, etc. en el cerebro que pueden estar causando las convulsiones.
- **Resonancia magnética (RM):** Con ondas de radio e imanes se puede crear una vista detallada del cerebro. Al igual que la tomografía, puede ayudar a detectar anomalías que causen las convulsiones.
- **Resonancia magnética funcional (RMf):** Mide cambios en el flujo sanguíneo que ocurren debido a actividad cerebral. La RMf se utiliza principalmente para hallar áreas funcionales del cerebro para evitar extirparlas durante la cirugía.
- **Tomografía por emisión de positrones (TEP):** Se utiliza una pequeña dosis de material radioactivo para visualizar áreas del cerebro.
- **Tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT):** Igualmente al TEP, inyecta una baja dosis de material radioactivo en la vena para generar un mapa tridimensional de las regiones cerebrales. El fin es detectar el flujo sanguíneo del cerebro durante una convulsión.

6.1.3. Tratamiento de la epilepsia

La epilepsia puede tratarse a través de medicamentos, cirugía, dietas o terapias como la estimulación del nervio vago. La opción química suele ser la primera en aplicarse y en caso de fracasar -la epilepsia es resistente contra los fármacos- puede evaluarse si es viable una cirugía invasiva. El proceso preoperatorio requiere conocer de la ruta de ingreso al cerebro y de la fuente focal de epilepsia en el paciente con alguno de los exámenes mencionados anteriormente. En algunos casos incluso puede ser conveniente realizar una EEG invasiva para poder encontrar el origen del problema de manera más precisa. [12]

Cirugía estereotáctica

Es un tipo de cirugía común para la epilepsia y es el utilizado por HUMANA en Guatemala. Se basa en encontrar una correlación entre el espacio físico y el espacio de imagen, en utilizar un dispositivo señalador para la interacción con el sistema y en obtener retroalimentación de imagen para guiar el sistema de inserción de electrodos utilizando una interfaz de computadora. Puede utilizarse un marco o no para sostener la cabeza del paciente en un punto de referencia. En caso de no sostenerse, debe colocarse una antena como referencia para que el sistema de imagen pueda correlacionar el espacio. En el sistema de imagen deben colocarse los resultados de alguno de los exámenes mencionados anteriormente para que pueda reconstruirse la cabeza del paciente y asignarse con detalle la ruta de inserción de cada electrodo. Una vez el sistema de imagen reconstruye la cabeza, guía al doctor en una serie de pasos para que pueda insertarse el electrodo en el mundo físico mientras que le brinda retroalimentación de la posición actual del electrodo con respecto a la cabeza del paciente. [13]

6.2. Arduino Mega

Tarjeta que utiliza el microcontrolador ATmega256, *Figura 6*. Opera a 5V que puede recibir de manera directa o regular internamente un voltaje entre 6V y 20V.

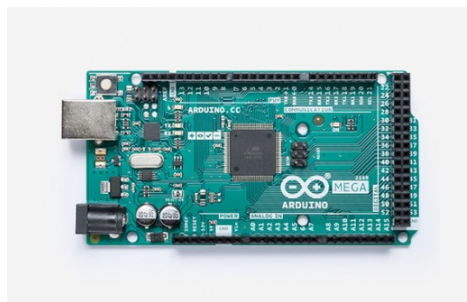


Figura 6: *Arduino Mega*, por *Arduino Mega* [14]

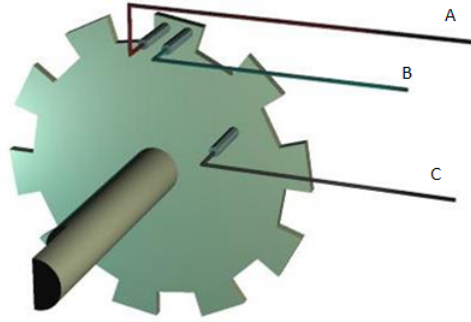


Figura 7: Acople mecánico de encoder rotatorio [15]

Posee 54 pines digitales y cada uno puede soportar hasta 40mA de corriente. Sólo seis de sus 54 pines digitales pueden configurarse con interrupciones externas: 2, 3, 18, 19, 20 y 21. Cuenta con tres temporizadores internos a los cuales se les puede configurar interrupciones también. En cuanto a comunicación, permite el uso del protocolo serial, SPI o I²C. [14]

6.3. Encoder rotatorio Keyes KY-040

Dispositivo rotatorio que indica cuántas veces su manija ha sido rotada y hacia qué dirección. Al hacerlo girar mecánicamente se producen *clicks* que indican al usuario que ha cambiado algo en el dispositivo. Tres pines son necesarios para realizar la codificación. Dos pines corresponden a la salida de codificación y el otro es un pin común. Ambas salidas funcionan como interruptores con el pin en común. En cada movimiento de rotación, ambos pines se abren pero por su posición mecánica uno se abre antes del otro dependiendo de la dirección de rotación como se muestra en la *Figura 7*. El pin en común se conecta a tierra y los otros dos pines en configuración *pullup* para que al abrirse envíen un estado alto de voltaje. El integrado como tal posee cinco pines de los cuales CLK y DT corresponden a las salidas del codificador y los otros pines son para alimentación, tierra y el pulsador del encoder. Las salidas con respecto al tiempo esperadas por el giro del encoder se muestran en la *Figura 8*. [15]

6.4. Mando de control

El mando de control funciona como la interfaz que conecta al usuario con algún dispositivo en específico. El producto debe ser un artefacto diseñado para algún propósito en específico dados ciertos componentes, recursos y restricciones. El diseño de una interfaz efectiva requiere de cuatro pasos principales: recolectar requerimientos e información de transfondo, diseñar el modelo esencial, convertir el modelo esencial en el modelo de usuario y transformar el modelo de usuario al diseño de interfaz final. [16]

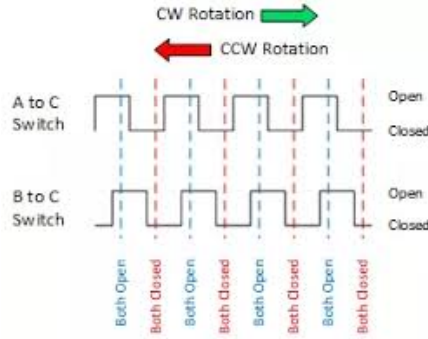


Figura 8: Señales de salida de encoder rotatorio [15]

En el modelo esencial, se definen las tareas que debe realizar un usuario sin conocer aun cómo se llevarán a cabo. Se basa principalmente en los motivos e intenciones del usuario y no deambula en la ejecución. La información requerida para este modelo son las entradas, salidas y frecuencia con la que se hará cada actividad. [16]

El modelo del usuario trata de comunicar al usuario a través de la interfaz. Consiste en las tareas, operaciones y relaciones que conciernen al usuario y busca como unir todos esos conceptos. Una forma simple de realizar este modelo es basándose en la solución existente variando únicamente un poco el diseño para atacar los nuevos problemas. Con este diseño, se deben realizar diagramas de secuencias para dirigir como se resuelve cada problema con una combinación de acciones para poder llegar al diseño final de la interfaz. [16]

6.5. Servomotores Dynamixel

Dynamixel es un actuador inteligente desarrollado por Robotis con el fin de conectar juntas en un robot o estructura mecánica. Los actuadores Dynamixel están compuestos por un motor DC, engranajes de reducción, un controlador, un driver de potencia y una red. Estos servomotores son programables y se puede leer su estatus a través de un flujo de paquetes. Se pueden conectar en cadena y la comunicación a cada servomotor se hace a través de un ID tal como se visualiza en la *Figura No. 9*. Los modelos de los servomotores son: AX-12A, AX-12W, AX-18A, RX-24F, RX28, RX-64, MX-28, MX-64 y MX-106. Los modelos varían principalmente en velocidad y torque (*Figura No. 10*).

6.5.1. Dynamixel AX-12A

Las características principales del modelo Dynamixel AX12-A se encuentran resumidas en el *Cuadro 1*. Este servomotor permite el control de su posición y velocidad angulares deseadas y la lectura de datos como posición angular, velocidad angular, voltaje de entrada y temperatura interna actuales. La posición angular del servomotor se escribe con un valor de diez bits por lo que se utilizan dos registros de

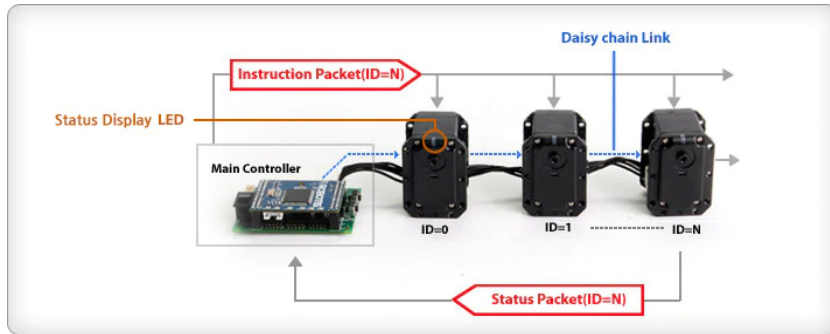


Figura 9: Servomotores Dynamixel en cadena [17]

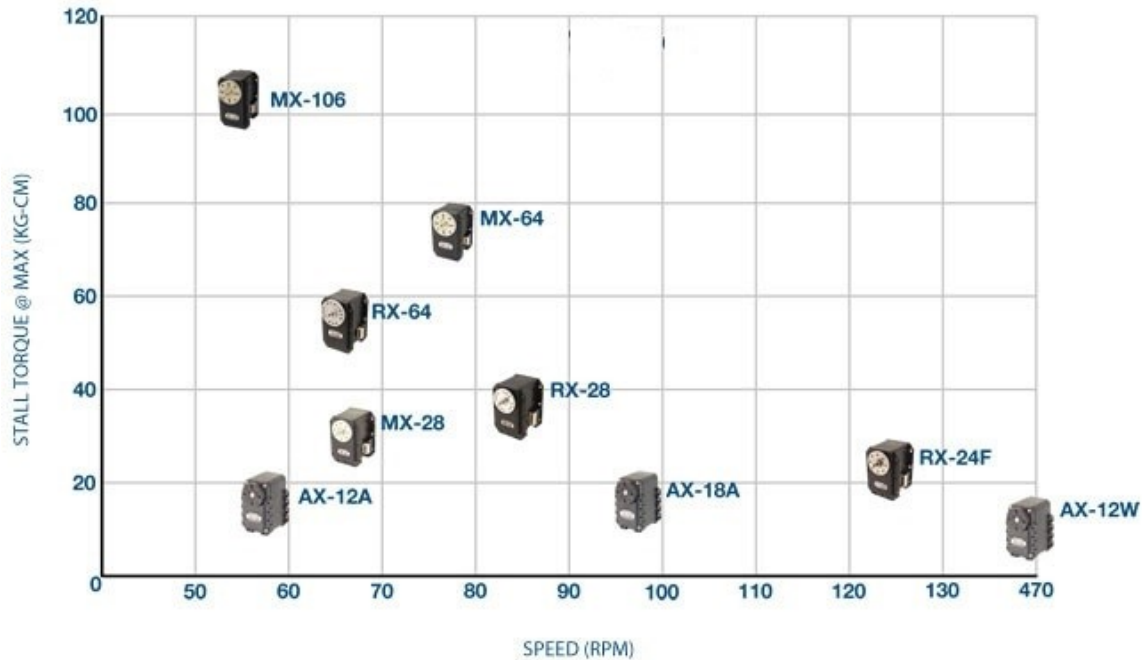


Figura 10: Torque estático y velocidad angular máxima de distintos modelos Dynamixel [17]

ocho bits del servomotor para almacenar este dato. La posición angular varía en el registro desde 0 hasta 1023 correspondiendo una posición angular desde los cero grados hasta los trescientos grados, brindando así una resolución de aproximadamente 0.29° . La *Figura No. 11* retrata la relación entre el registro de posición objetivo y la posición angular del actuador. La velocidad angular objetivo también ocupa diez bits de información alocados en dos registros de ocho bits. La unidad es de aproximadamente $0.111rpm$ por lo que la velocidad angular aumenta por esta cantidad por cada valor que se le aumente al registro. En el modo de rotación continuo, la velocidad utiliza once bits del registro. El bit más significativo indica la dirección de giro y los diez bits restantes el porcentaje de la velocidad máxima por lo que la unidad representa aproximadamente un 0.1% de la velocidad angular máxima. [18]

En cuanto a la lectura, los registros de posición actual manejan la información igual que los registros de posición objetivo. La posición actual es en la que se encuentra

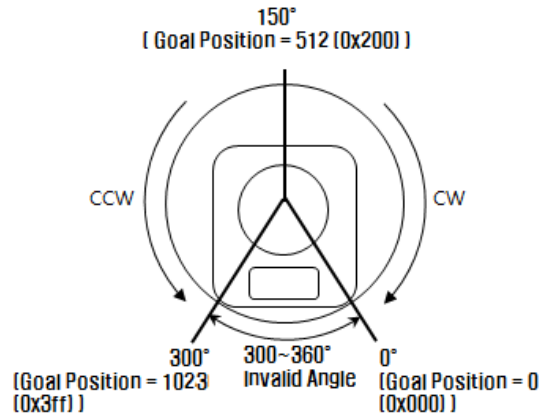


Figura 11: Relación gráfica entre registro de posición y posición angular de Dynamixel AX-12A [18]

el servomotor en el instante y la objetivo a la que el controlador quiere llegar. Los registros de velocidad actual utilizan once bits al igual que el registro de velocidad objetivo para indicar velocidad angular instantánea y dirección de giro. El registro de voltaje actual indica el voltaje de alimentación en decivoltios por lo que se debe dividir su valor en diez para conocer el valor en voltios. El registro de temperatura almacena la información en grados Celsius. [18]

Item	Especificación
Baud Rate	7843 bps ~ 1 Mbps
Resolución	0.29°
Posición angular	0° ~ 300°
Torque estático	1.5N*m (12V, 1.5A)
Velocidad sin carga	59rpm (12V)
Temperatura de operación	-5°C ~ 70°C
Voltaje de entrada	9.0 ~ 12.0V
Conexión física	Bus TTL Half Duplex
ID	0 ~ 253

Cuadro 1: Especificaciones Dynamixel AX-12A [18]

6.5.2. Dynamixel MX-106T

Las características principales del modelo Dynamixel MX-106T se encuentran resumidas en el *Cuadro 2*. La diferencia entre el modelo MX-106R y MX-106T es el protocolo de comunicación que utilizan para comunicarse. El modelo R utiliza el protocolo RS485 y el modelo T el protocolo TTL Half Duplex. El modelo MX-106 permite el control de su posición y velocidad angulares deseadas y la lectura de datos como posición angular, velocidad angular, voltaje de entrada, temperatura interna y corriente consumida actuales. Nuevamente hay dos registros de un byte cada uno para la posición angular. En el modo de control de posición se utilizan doce bits (valor de

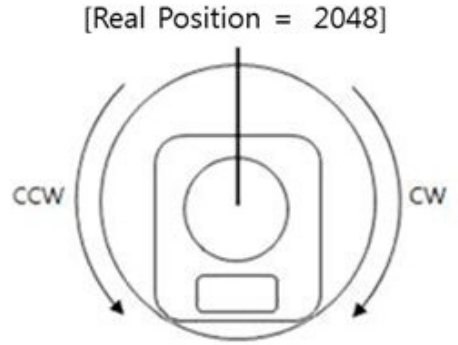


Figura 12: Relación gráfica entre registro de posición y posición angular de Dynamixel MX-106 [19]

0 a 4095) para determinar la posición angular del actuador en una revolución brindando así una resolución de aproximadamente 0.088° (Figura No. 12). En el modo multigiros se utilizan hasta quince bits de los registros para representar siete vueltas en cualquier dirección (valores entre -28,672 y 28,672). Adicionalmente, este modelo permite la modificación de las variables PID del controlador de posición. La velocidad angular funciona similarmente al modelo AX-12A con un margen de diez bits (0 a 1023) con la diferencia que la unidad para el modelo MX-106 es de aproximadamente $0.114rpm$. En el modo de rotación continuo, la velocidad utiliza once bits del registro. El bit más significativo indica la dirección de giro y los diez bits restantes representan la velocidad con una resolución de $0.114rpm$ nuevamente. [19]

En cuanto a la lectura, los registros de posición actual manejan la información igual que los registros de posición objetivo ya sea en el modo de control de posición o de multigiros. Los registros de velocidad actual utilizan once bits al igual que el registro de velocidad objetivo para indicar velocidad angular instantánea y dirección de giro. El registro de voltaje actual indica el voltaje de alimentación en decivoltios por lo que se debe dividir su valor en diez para conocer el valor en voltios. El registro de temperatura almacena la información en grados Celsius. La corriente se almacena en dos registros y varía sus valores entre 0 y 4095. La resolución de la corriente es de $4.5mA$ y el valor central que representa $0A$ es 2048. La ecuación 1 describe la corriente medida en cuestión al valor del registro. El valor 0 representa $-9.2115A$ y el valor 4095 representa $9.2115A$. [19]

$$I = (4.5mA) * (Valor_{Registro} - 2048) \quad (1)$$

La versión 2.0 de este tipo de motores permite un control de aceleración por lo que el cambio de posición puede seguir trayectorias más suaves con el tiempo. Posee registros de perfiles de velocidad y aceleración con los cuales se puede configurar una velocidad de impulso, rectangular y trapezoidal que genera cambios en la posición de escalón, lineal y cuadrático, respectivamente. Además, no solo permite editar las constantes PID del controlador de posición sino que también las constantes PI del controlador de velocidad. [20]

Item	Especificación
Baud Rate	8000 bps ~ 4.5 Mbps
Resolución	0.088°
Posición angular	0° ~ 360°
Torque estático	8.4N*m (12V, 5.2A)
Velocidad sin carga	45rpm (12V)
Temperatura de operación	-5°C ~ 80°C
Voltaje de entrada	10.0 ~ 14.8V
Conexión física	Bus TTL Half Duplex
ID	0 ~ 253

Cuadro 2: Especificaciones Dynamixel MX-106T [19]

6.6. Robótica

Un robot está compuesto por juntas y eslabones rígidos unidos en cadenas cinemáticas que permiten movimientos complejos en conjunto para realizar alguna tarea específica. Las juntas robóticas no pueden unir más de dos enlaces. Las más conocidas (*Figura 13*) son [21]:

- **Revoluta:** Consiste en la unión de dos eslabones en un eje. Permite movimiento de rotación alrededor del eje de la junta por lo que posee solo un grado de libertad.
- **Prismática:** Permite movimiento traslacional a lo largo de la dirección de la junta. Posee un grado de libertad.
- **Helicoidal:** Consiste en la unión de dos eslabones con un tornillo. Al girar uno de los eslabones en el tornillo se consigue rotación como con la revoluta con la adición de un movimiento de traslación en la dirección del eje del tornillo. Se considera que tiene solo un grado de libertad ya que la traslación sobre el eje es proporcional a la rotación.
- **Cilíndrica:** Similar a la helicoidal con la diferencia que los movimientos de rotación y traslación son independientes ya que no van unidos por un tornillo. Toma su nombre ya que su extremo puede describir al cuerpo de un cilindro. Tiene dos grados de libertad.
- **Universal:** Está formada por un par de juntas revolutas con ejes ortogonales por lo que tiene dos grados de libertad.
- **Esférica:** Simula la junta de un hombro humano por lo que permite la rotación en cualquiera de los tres ejes rectangulares ortogonales; por consiguiente, cuenta con tres grados de libertad.

6.6.1. Movimiento de cuerpo rígido

La posición y orientación de un cuerpo rígido en un espacio tridimensional puede describirse al adjuntarse un marco al objeto. El marco del cuerpo se relaciona con un marco de referencia fijo a través de una matriz 4x4 que describe la transformación en cuanto a posición y rotación que ocurre para llevar al objeto rígido desde el marco de referencia hasta su posición actual o cualquier otra posición deseada. Para describir únicamente la rotación que se produce para pasar de un marco al siguiente se requiere una matriz 3x3 en la cual cada columna describe la coordenada cartesiana (x , y y z , respectivamente) y el valor de cada fila indica la proyección del nuevo eje rotado sobre los ejes anteriores. Por esta razón, la norma euclidiana de cada vector columna de la matriz debe ser igual a la unidad para evitar comprimir o estirar el espacio durante la rotación. Las siguientes matrices corresponden a una rotación al rededor de cada uno de los ejes cartesianos por un ángulo θ . [21]

$$\begin{aligned}
 R(\hat{x}, \theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, R(\hat{y}, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \\
 R(\hat{z}, \theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Combinando las matrices de rotación con un vector columna de posición para cada eje mostrado en la *Figura 14*, se obtiene la matriz homogénea de transformación 4x4 con la cual puede trasladarse de un marco de referencia al siguiente mediante producto matricial. Las matrices en cuerpos rígidos son utilizadas para representar la configuración de posición y orientación del cuerpo, para cambiar de marco de referencia actual o para desplazar algún marco o vector. La forma general de una matriz homogénea se muestra en la *ecuación 3* y posee las siguientes propiedades [21]:

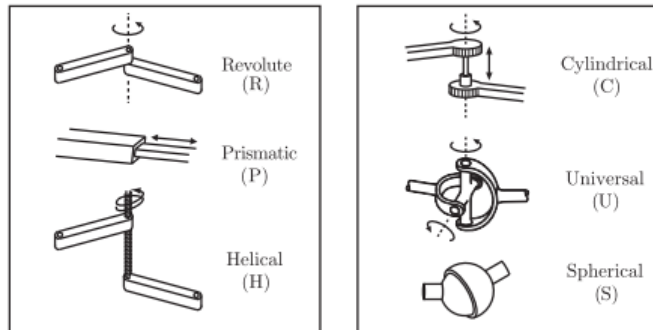


Figura 13: Juntas robóticas [21]

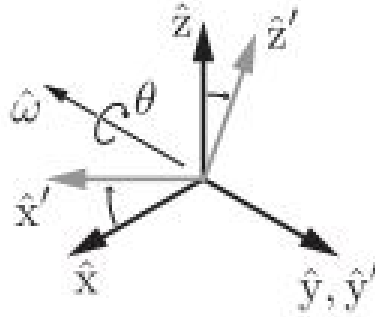


Figura 14: Ejemplo de rotación al rededor de eje \hat{y} [21]

$$T = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

- La matriz inversa T también es una matriz de transformación (en sentido contrario) y se define como:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

- El producto de dos matrices de transformación también es una matriz de transformación.
- La multiplicación de las matrices de transformación es asociativa.

$$(T_1 T_2) T_3 = T_1 (T_2 T_3) \quad (5)$$

6.6.2. Cinemática directa

La cinemática directa consiste en el cálculo de la posición y orientación de un robot con base en las coordenadas angulares de cada junta. El efector final de un robot puede adquirir una posición y orientación en específico de varias maneras distintas. Para realizar este proceso primero se debe escoger un marco de referencia fijo 0 (en la base del robot) y un marco de efector final n (al final del último eslabón n). Se escoge un marco de referencia por cada junta en orden ascendente desde el marco 0 hasta el marco del efector final n y se calculan matrices de transformación de una junta a la junta siguiente. La matriz final que caracteriza la transformación desde la referencia fija hasta el efector final y relaciona la posición y orientación del robot con las distintas posiciones angulares de cada junta se calcula con la ecuación [21]:

$${}^0T_n = {}^0T_1 T_1^2 T_2^3 \dots {}^{n-1}T_n \quad (6)$$

Parámetros de Denavit-Hartenberg

Los parámetros de Denavit-Hartenberg (DH) permiten obtener las matrices de transformación de la junta de un robot a la siguiente de manera estandarizada. Primero, deben colocarse los marcos del brazo robótico (uno por cada grado de libertad) conforme a las siguientes normas [22]:

1. Identificar el eje de cada junta y dibujar una línea a través de cada uno.
2. Identificar la perpendicular en común entre los ejes adyacentes o el punto de intersección. En el punto de intersección o sobre el punto donde la perpendicular común se une con el i -ésimo eje, asignar el origen del marco.
3. Asignar el eje \hat{Z}_i a la línea que cruza el eje de cada i -ésima junta.
4. Asignar el eje \hat{X}_i a la línea que señala a lo largo de la perpendicular común. Si los ejes se intersectan, asignar \hat{X}_i de manera que sea normal al plano que contiene ambos ejes.
5. Asignar el eje \hat{Y}_i sobrante de tal manera que el sistema coordinado sea de mano derecha.

Una vez estén asignados los distintos marcos del robot, se deben medir los cuatro parámetros de Denavit-Hartenberg. En la *Figura 15* se muestra un ejemplo de cómo colocar los marcos y el cálculo respectivo de los parámetros. Los parámetros DH se miden de la siguiente manera [22]:

- $a_i = \text{distancia desde } \hat{Z}_i \text{ hasta } \hat{Z}_{i+1} \text{ a lo largo de } \hat{X}_i;$
- $\alpha_i = \text{ángulo de rotación al rededor de } \hat{X}_i \text{ desde } \hat{Z}_i \text{ hasta } \hat{Z}_{i+1};$
- $d_i = \text{distancia desde } \hat{X}_{i-1} \text{ hasta } \hat{X}_i \text{ a lo largo de } \hat{Z}_i;$
- $\theta_i = \text{ángulo de rotación al rededor de } \hat{Z}_i \text{ desde } \hat{X}_{i-1} \text{ hasta } \hat{X}_i$

Entonces la matriz homogénea de transformación vista en la *ecuación 3* puede encontrarse con los parámetros DH a través de la *ecuación 7*.

$${}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

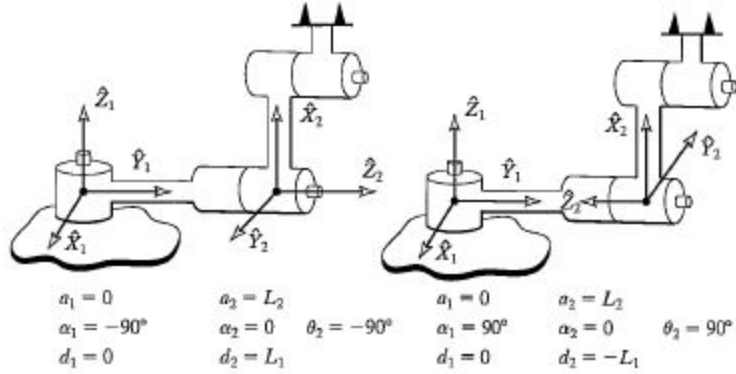


Figura 15: Asignación de marcos y medición de parámetros DH[22]

Marcos estándares con nombre

Como convención, se suelen colocar y asignar nombres específicos a algunos marcos dentro de la estación de trabajo del robot y el robot mismo. Los marcos mostrados en la *Figura 16* son [22]:

- **Marco base, {B}**: Se coloca en la base estática del robot y en la asignación de marcos es el marco {0}.
- **Marco de estación, {S}**: Se considera el marco universal debido a que es la referencia del sistema coordenado del robot y todas las acciones se realizan con referencia a él.
- **Marco de muñeca, {W}**: Es el marco correspondiente al efector final del robot. Se encuentra al final del último eslabón.
- **Marco de herramienta, {T}**: Los robots pueden sostener alguna herramienta de trabajo por lo que es necesario realizar una transformación desde el marco de la muñeca al marco de la herramienta para conocer dónde se encuentra ésta en el espacio.
- **Marco de meta, {G}**: Este marco describe la posición a la cuál debe llegar la herramienta del robot para llevar a cabo una tarea de manera exitosa. El robot debe moverse de tal forma que el marco de herramienta y el marco de meta puedan coincidir.

6.6.3. Cinemática inversa

A diferencia de la cinemática directa, se calculan las posiciones angulares que debe tomar cada junta considerando las dimensiones y desfases de los enlaces y la posición y orientación del efector final. La relación entre estas variables puede calcularse al ir multiplicando las matrices inversas de transformación en la *ecuación 6*. En resumen,

el proceso es el inverso a la cinemática directa ya que se transforma desde el efector final hasta la referencia fija. Este problema es más complicado que el de cinemática directa debido a que deben resolverse múltiples ecuaciones no lineales para hallar una solución. [21]

En cuestión de los marcos, el objetivo de la cinemática inversa es encontrar la posición angular de las juntas para posicionar el marco de la herramienta $\{T\}$ en alguna posición deseada con respecto al marco de estación $\{S\}$. Para lograr esto, primero se debe encontrar el marco de la muñeca $\{W\}$ con respecto al marco de la base $\{B\}$ y luego realizar el proceso de cinemática inversa. [22]

Un robot está limitado a un espacio de trabajo debido a la longitud de sus eslabones y a las restricciones angulares de sus juntas. Entonces, el problema de cinemática inversa únicamente posee solución si la posición deseada del efector final está dentro del espacio de trabajo. El espacio de trabajo suele denominarse como espacio de trabajo alcanzable y se define como el volumen de espacio que el robot puede alcanzar con al menos una orientación. Un subconjunto importante del espacio de trabajo alcanzable es el espacio de trabajo de destreza que está definido como el volumen de espacio que el efector final del robot puede alcanzar con cualquier orientación. Por consiguiente, si un robot opera dentro de su espacio de trabajo, el problema de cinemática inversa posee múltiples soluciones como se observa en la *Figura No. 17* con el ejemplo del robot PUMA 560. Si el robot está operando fuera del espacio de trabajo de destreza pero dentro del espacio de trabajo alcanzable entonces la solución al problema de cinemática inversa es única puesto que solo hay una posible orientación con la cual posicionarse sobre dicho espacio. [22]

Al tratarse de ecuaciones no lineales, no existe un algoritmo general para resolver el problema de cinemática inversa. Por lo tanto, los métodos de solución se dividen en dos grandes grupos: soluciones de forma cerrada y soluciones numéricas. Las soluciones numéricas se encuentran a través de un método iterativo por lo que generalmente convergen a una solución de manera más lenta que las soluciones cerradas. Por ende, los manipuladores robóticos suelen utilizar soluciones cerradas. Este tipo de solución

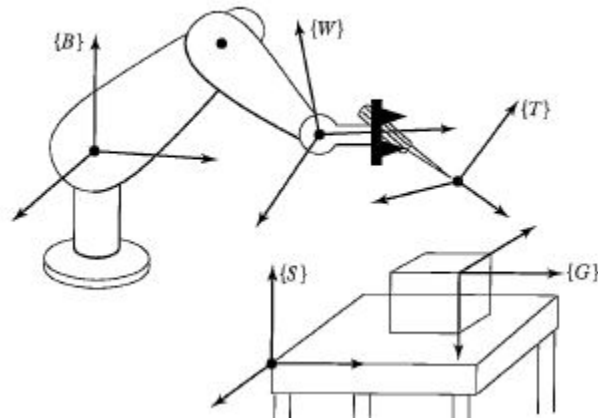


Figura 16: Marcos estándares en la estación de trabajo [22]

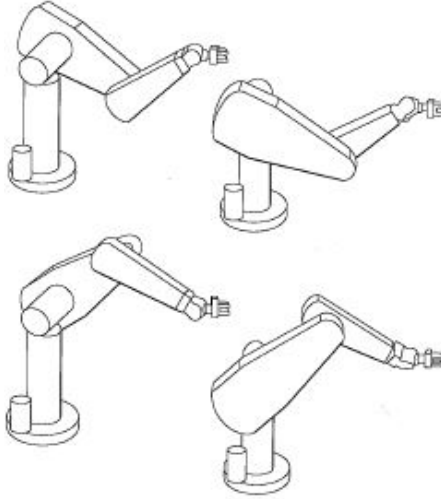


Figura 17: Cuatro soluciones para el PUMA 560 [22]

tiene dos enfoques: el algebraico y el geométrico. [22]

Solución algebraica

Consiste en encontrar la transformación del marco de base al marco de muñeca ${}^B T_W$ en términos de los parámetros DH de los distintos enlaces del robot. Luego, los elementos de la cuarta columna de la transformación corresponden a la posiciones cartesianas del manipulador robótico; es decir, ${}^B T_{W_{14}}$ corresponde a la posición x , ${}^B T_{W_{24}}$ corresponde a la posición y y ${}^B T_{W_{34}}$ corresponde a la posición z de la muñeca del robot. En el robot planar de la *Figura No. 18* se obtiene la siguiente matriz ${}^B T_W$ con la que se puede resolver el sistema de ecuaciones para la posición en x y y . [22]

$${}^B T_W = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0.0 & l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0.0 & l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

Elevando ambas ecuaciones al cuadrado, sumándolas y utilizando la identidad de suma de ángulos para el coseno y el seno se obtiene la siguiente ecuación para el coseno de la posición angular de la segunda junta. Las posiciones angulares se deben obtener en función de $\text{atan2}(y, x)$ para tomar en consideración el cuadrante en el que se posiciona el robot.

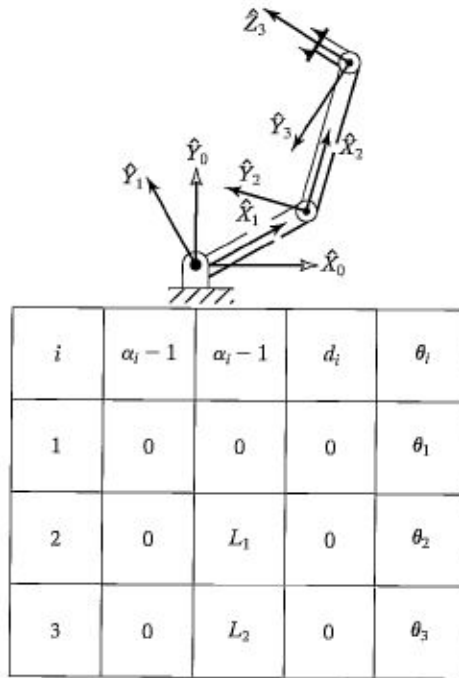


Figura 18: Parámetros DH de manipulador planar [22]

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}$$

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2)$$

Utilizando las ecuaciones previas conociendo el resultado para θ_2 se obtiene el siguiente resultado para la primera posición angular. La tercera posición angular únicamente determinará la orientación del efector final. Al estar en el mismo plano la orientación corresponde a la suma de la posición angular de cada junta.

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) - \text{atan2}(l_2 \sin \theta_2, l_1 + l_2 \cos \theta_2)$$

$$\theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2$$

Solución geométrica

El método geométrico se basa en descomponer el espacio geométrico del brazo robótico en distintos problemas de geometría planar. Es común utilizar la ley de senos, la ley de cosenos y el teorema de Pitágoras al emplear este enfoque. En el

ejemplo del manipulador robótico planar anterior se puede aplicar la ley de cosenos para obtener las posiciones angulares de las primeras dos juntas para la posición del marco $\{W\}$. Tomando como base los ángulos en la *Figura No. 19* primero se aplica la ley de cosenos para encontrar la posición angular de la segunda junta tomando en cuenta que la línea negra central corresponde a la distancia planar a la muñeca del brazo. [22]

$$\begin{aligned}
 x^2 + y^2 &= l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\pi + \theta_2) \\
 \cos(\pi + \theta_2) &= -\cos \theta_2 \\
 \cos \theta_2 &= \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \\
 \sin \theta_2 &= \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2} \\
 \theta_2 &= \text{atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2)
 \end{aligned}$$

Se obtiene exactamente la misma ecuación para la posición de la segunda junta que la del enfoque algebraico. Luego, se computa β con el arcotangente de dos argumentos con base en el teorema de Pitágoras y las funciones trigonométricas para considerar su posicionamiento sobre cualquier cuadrante. Al mismo tiempo se utiliza la ley de cosenos para encontrar ψ debido a la relación que estos dos ángulos tienen con θ_1 . Nótese que ψ debe estar restringido entre 0 a π ya que proviene de la función arcocoseno. Dependiendo de la posición del codo del manipulador la posición de la primera junta será una suma o resta de los ángulos recién mencionados como se logra apreciar en la *Figura No. 19*. Al igual que en el caso algebraico, la orientación del efector final depende de la suma planar de las posiciones angulares de las juntas.

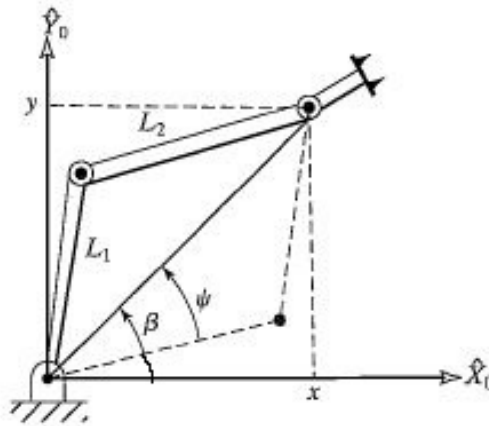


Figura 19: Pano geométrico asociado con robot planar [22]

$$\begin{aligned}
\beta &= \text{atan2}(y, x) \\
\psi &= \arccos \frac{x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1\sqrt{x^2 + y^2}} \\
\theta_1 &= \beta \pm \psi \\
\theta_3 &= \phi - \theta_1 - \theta_2
\end{aligned}$$

La solución para la segunda junta diferió en forma a la encontrada con el método algebraico pero son equivalentes.

Solución de Pieper

Un robot general de seis grados de libertad no posee una solución de forma cerrada únicamente en algunos casos especiales. Pieper estudió manipuladores de seis grados de libertad en los que tres ejes consecutivos se intersectan en un mismo punto. El método de Pieper se aplica principalmente para robots de seis grados de libertad con todas las juntas revolutas. Generalmente, las últimas tres juntas se intersectan por lo que las primeras tres juntas se utilizan para posicionar la muñeca del robot y las últimas tres para determinar la orientación del efector final. La posición se define como [22]:

$${}^0P_{4ORG} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3P_{4ORG} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Derivación de primer prototipo de mando de control

7.1. Diseño de mando de control

Siguiendo los pasos establecidos en la sección 6.4 de este documento (basados en [16]), primero se enlistaron los requerimientos del sistema, luego se diseñó el modelo esencial del mando, después se realizó el diseño de usuario y se obtuvo el diseño final.

7.1.1. Requerimientos del sistema

El sistema debía emular al brazo mecánico *Varioguide* para que pudiera trabajar con el sistema existente *Vector Vision 2008*; es decir, que manipulara el brazo a través de cuatro etapas contemplando los grados de libertad necesarios para cada una. Entonces, el doctor debía poder mover el brazo etapa por etapa, asegurando la junta de cada uno de los pasos y decidiendo si regresar a la etapa anterior de ser necesario o continuar con la siguiente.

7.1.2. Modelo esencial del mando de control

El sistema trabajará durante horas dependiendo del número de cirugías que deba realizar y la extensión de cada una por lo que cada acción se puede realizar con gran frecuencia. El sistema debe ser seguro por lo que al utilizarse frecuentemente debe indicar al usuario si hay riesgo de falla para detener el sistema.

Entradas del sistema:

- Comandos de movimiento del brazo.
- Comando para avanzar de fase.
- Comando para regresar a fase anterior.
- Comando para ajustar o permitir la manipulación de la junta de la etapa actual.

Salidas del sistema:

- Movimiento del brazo robótico.
- Indicador de condición de riesgo.
- Indicador de etapa de ajuste actual.

7.1.3. Modelo de usuario del mando de control

En esta etapa de diseño se utilizó un diagrama de flujo (*Figura 21*) para comprender las acciones que debe realizar el doctor seguido de un diagrama de secuencia (*Figura 20*) para interrelacionar cada acción con algún componente electrónico del mando de control.

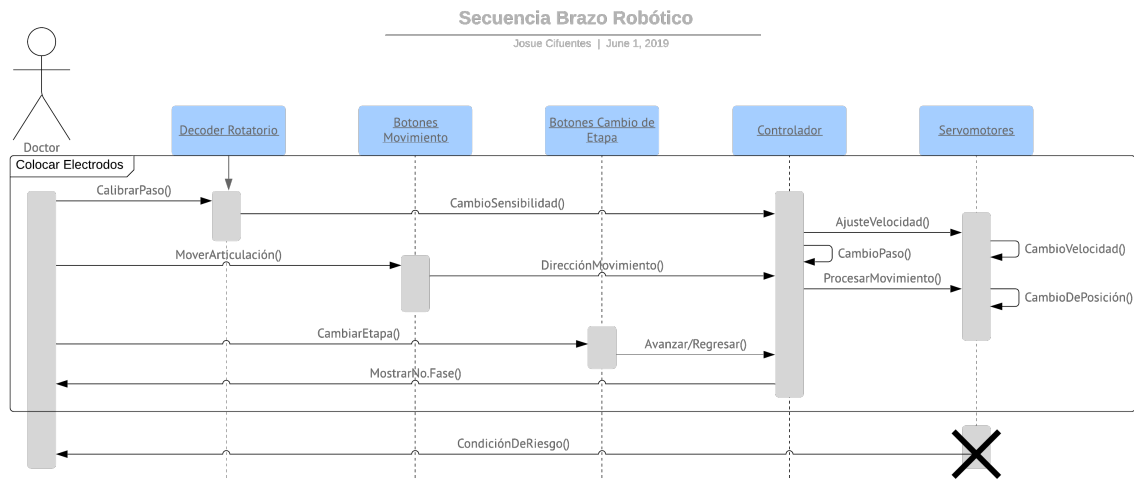


Figura 20: Diagrama de secuencia de brazo robótico

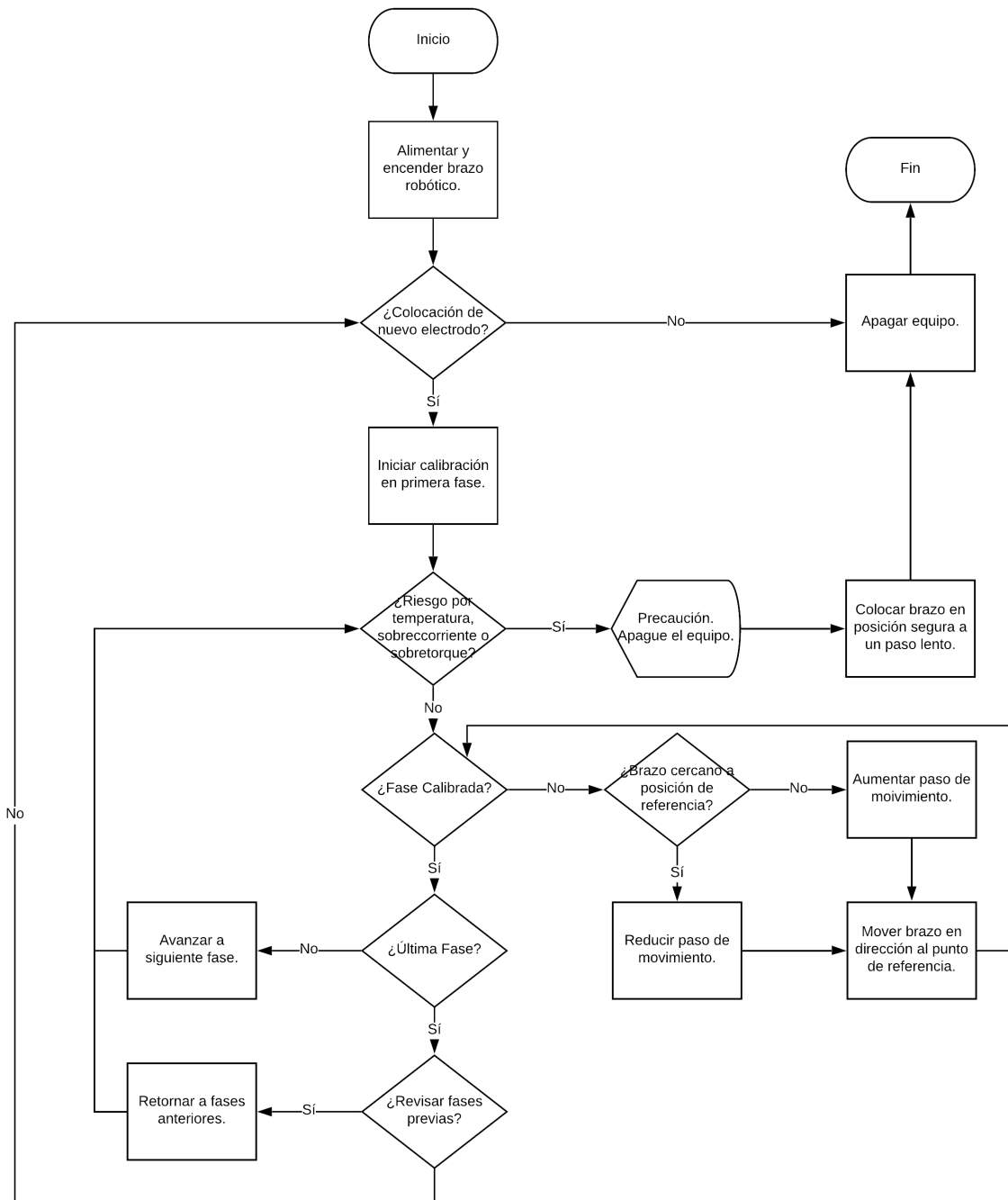


Figura 21: Diagrama de flujo de interacción de Doctor con brazo robótico

7.1.4. Modelo de diseño final de mando de control

Se realizó el diseño preliminar del mando de control que contará con seis botones para controlar los movimientos del brazo, dos botones para cambiar entre etapa, un botón para permitir el movimiento de las juntas de cada etapa y otro para bloquearlas,

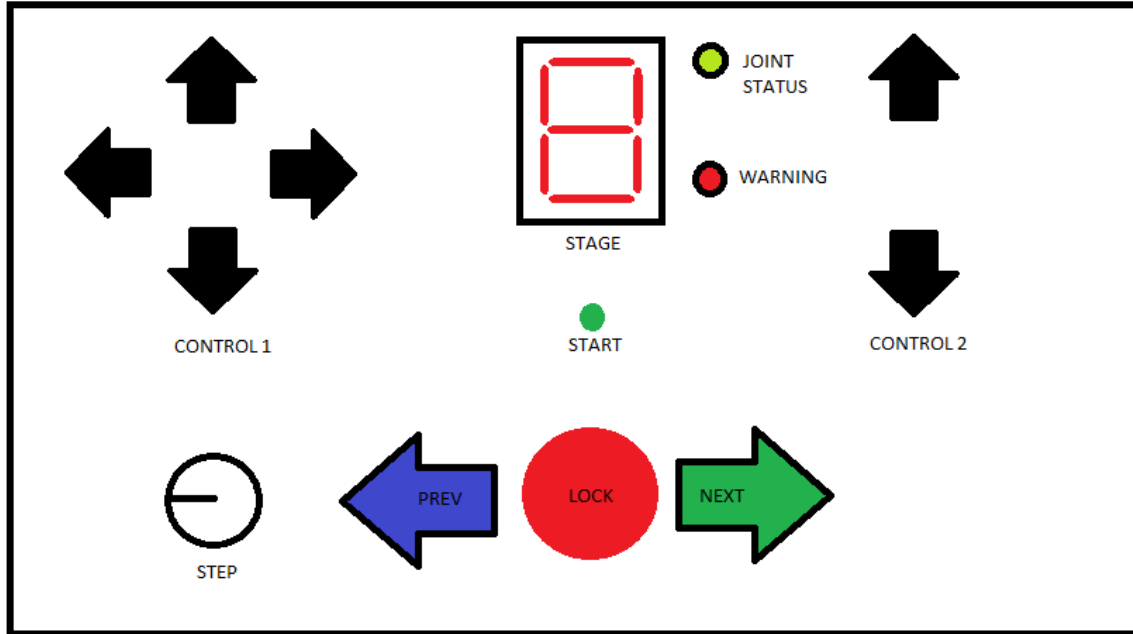


Figura 22: Idea preliminar de diseño de mando de control

dos LEDs indicadores de situación de riesgo y estado de la junta (libre o bloqueada), encoder rotatorio para el paso y velocidad del sistema y un display 7 segmentos para indicar la fase de acoplamiento que está siguiendo la máquina. La *Figura 22* muestra la idea del diseño inicial.

El funcionamiento de cada componente del mando es acorde al acoplamiento que se está realizando en el momento. A continuación, en la sección 7.2 se detalla el funcionamiento de cada componente electrónico:

7.2. Módulos

7.2.1. Control a través de Arduino Mega

La tarjeta *Arduino Mega* con el microcontrolador ATmega256 se seleccionó como el cerebro del mando de control puesto a la gran necesidad de pines por todos los pulsadores e indicadores presentes en el proyecto. Todo componente va a excepción de las señales de interrupción de los botones y el display 7 segmentos van conectados directamente a los pines digitales de la tarjeta. Para controlar la salida del display 7 segmentos se utilizó el convertidor BCD a display 7 segmentos *SN74LS48N* con el fin de utilizar únicamente dos pines para el display en lugar de siete. Se utilizan solo dos pines ya que existe la posibilidad que la cuarta etapa se ajuste de manera manual debido a que es el efector final y antena de *Varioguide* por lo que solo se requieren de dos bits para representar números del 0 al 3. No se interrumpió cada botón de manera individual debido a que el Arduino Mega cuenta únicamente con seis pines

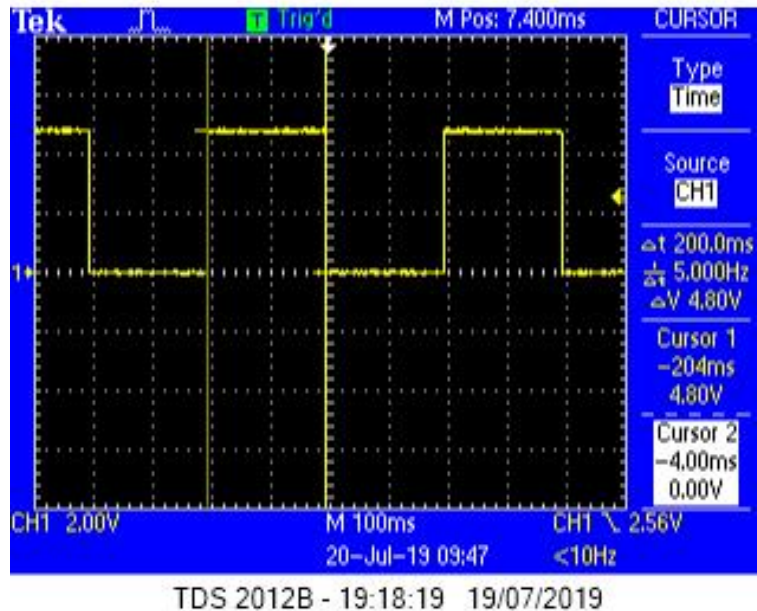


Figura 23: Tiempo de interrupción de *Timer 1*

de interrupción por lo que se utilizó el circuito en la *Figura 25b*.

Interrupciones

Se requirieron únicamente dos tipos de interrupción: temporizador y por pin externo. La interrupción por pines externos se utilizó en 2 pines para determinar si algún botón de movimiento o de navegación había sido presionado y en otro pin adicional para manejo del encoder rotatorio mientras que se utilizó el temporizador *Timer 1* del microcontrolador para la lectura continua de pulsadores y antirebote del mismo. Se optó por un período de interrupción de 200ms como prueba preliminar. Con retroalimentación de los médicos de HUMANA se podría cambiar dicho valor.

Para validar el uso del temporizador se midió un pin de salida de la tarjeta y se corrió un algoritmo que cambiara el estado de la salida por cada interrupción. En un osciloscopio pudo verse que el tiempo de interrupción fue en efecto de 200ms como se aprecia en la *Figura 23*.

Comunicación serial

Diego Valdez trabajó con la comunicación de los Servos de la familia AX por lo que brindó el circuito de la *Figura 24* para su conexión con comunicación serial. Se trabajó con un baudaje de 1Mbps.

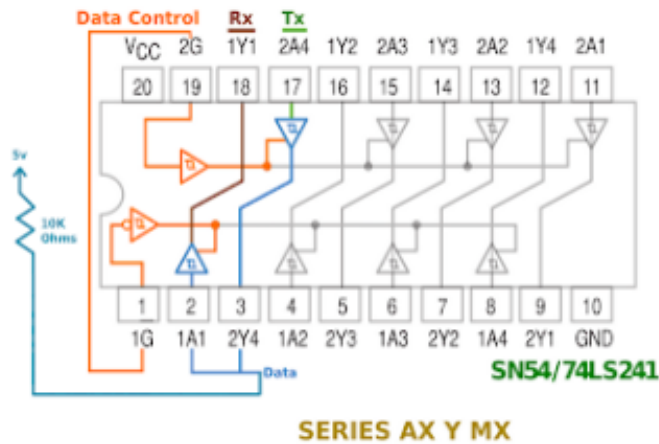


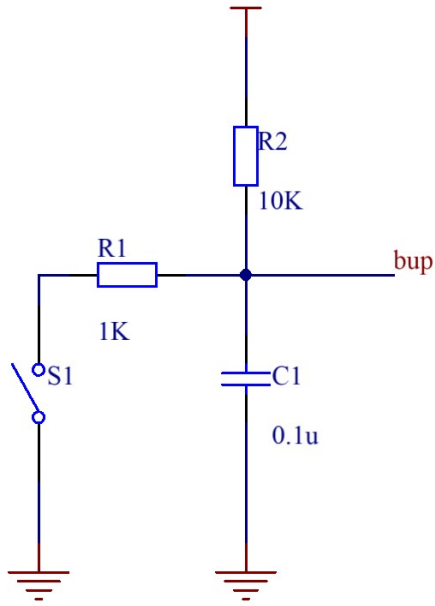
Figura 24: Comunicación serial con servos AX-12A y MX-106T

7.2.2. Botones

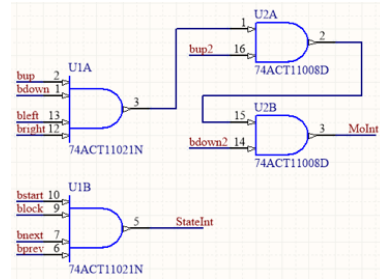
Los pulsadores se conectaron con un circuito *pullup* antirebote a pesar de contar con esta protección por medio de *software* (Figura 25a). Adicionalmente, se "multiplexaron" la salida de varios botones por medio de *ORs* digitales como se muestra en la Figura 25b para que cuando se presionara cualquiera de esos botones se enviara una señal de interrupción al microcontrolador.

7.2.3. Encoder rotatorio

Se midió la salida del encoder cuando se giraba en distintas direcciones para verificar como realizar el código del mismo. Conectando el canal 1 del osciloscopio para la señal CLK y el canal 2 para Data se obtuvieron los resultados de las siguientes figuras. El flanco de bajada mostró ser más apto para interrupción debido a su abrupto cambio de estado. Entonces se interrumpe en flanco de bajada de CLK y se lee el estado de Data en ese momento. Si está bajo, se giró hacia la derecha y si está alto, hacia la izquierda.

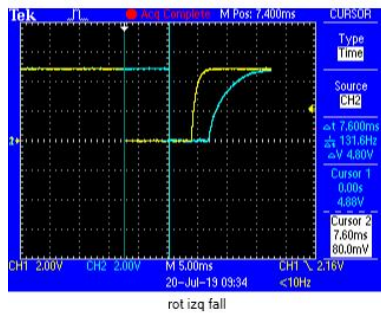


(a) Circuito para antirebotes de botones

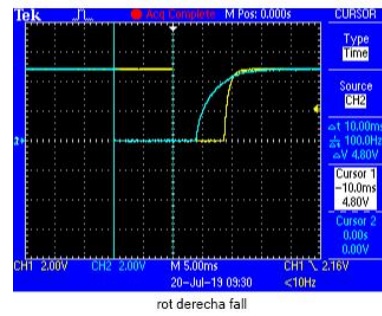


(b) Multiplexación de pulsadores para interrupción

Figura 25: Circuitos eléctricos botones



(a) Rotación hacia la izquierda



(b) Rotación hacia la derecha

Figura 26: Señales de salida de encoder rotatorio

Cinemática inversa de la primera etapa de ajuste

Se realizó la cinemática inversa de la primera etapa del manipulador robótico para obtener las ecuaciones de posición y orientación del efector final; es decir, la punta del tercer eslabón que marca el final de la primera etapa de ajuste de *Varioguide* como se puede contemplar en la *Figura 3*. La *Figura 27* muestra el primer prototipo del manipulador robótico diseñado por Fernando Salazar que cuenta con los primeros cinco juntas y los primeros tres eslabones correspondientes a la primera etapa de ajuste del brazo. Cada servomotor controla la posición de una junta revoluta y brinda un grado de libertad al mismo; por consiguiente, la primera etapa de ajuste cuenta con cinco grados de libertad.

Con el afán de conseguir las ecuaciones que representan la posición y orientación angular de la primera etapa de ajuste juntas en función de la posición deseada del efector final, se llevó a cabo los siguientes pasos:

- Asignación de un marco a cada una de las juntas y al efector final. Asignación de marco de estación como referencia.
- Medición de parámetros DH.
- Cálculo de matrices de transformación para la cinemática directa de la primera etapa.
- Simulación de cinemática inversa numérica en *MATLAB* en coordenadas esféricas.
- Solución de Pieper de ecuaciones no lineales de posición.
- Comparación de método numérico vs analítico en posicionamiento.

- Solución a problema de cinemática inversa para orientación.
- Validación de ecuaciones finales mediante simulaciones.

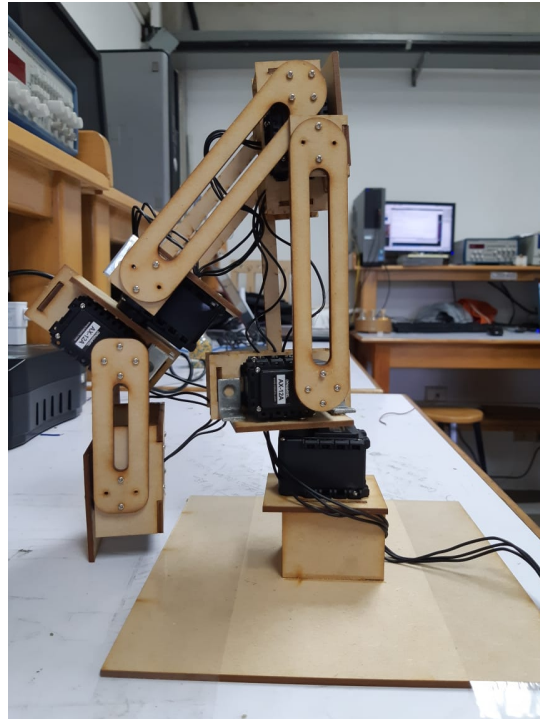


Figura 27: Primer prototipo de manipulador robótico diseñado por Fernando Salazar

8.1. Cinemática directa de primera etapa de ajuste

El proceso de resolución del problema de cinemática inversa requiere que se conozca la cinemática directa del robot por lo que deben calcularse las matrices de transformación del marco de cada junta a la siguiente. Es necesario definir los marcos del brazo robótico y los parámetros DH para encontrar las transformaciones correspondientes.

8.1.1. Asignación de marcos de referencia a brazo robótico

La asignación de marcos se llevó a cabo como en la *Figura 29*. Cabe mencionar que, físicamente, los ejes de los servomotores que representan juntas esféricas en *Varioguide* no se intersectan debido a que el volumen de cada actuador evita esto. Sin embargo, la distancia es despreciable en comparación con los eslabones por lo que no se consideran en los cálculos de parámetros. Adicionalmente, la primera etapa de ajuste en *Varioguide* no requiere de precisión en el posicionamiento de la antena sobre la cabeza del paciente; entonces, la simplificación del análisis no tiene efecto significativo sobre la funcionalidad del producto final.

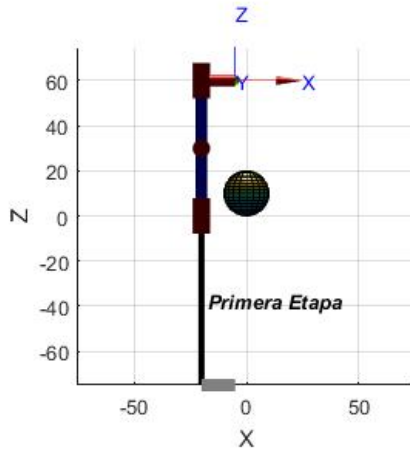


Figura 28: Primera etapa de ajuste con sus juntas en posición cero

8.1.2. Medición de parámetros de Denavit-Hartenberg y cálculo de matrices de transformación

Los parámetros DH fueron medidos de tal forma que la posición angular cero de cada junta coincidiera colocara los primeros dos eslabones del brazo en forma vertical y tercer eslabón de manera horizontal sobre el plano de trabajo. Los parámetros se ubican en el *Cuadro 3*. Una vez se obtuvieron los parámetros se graficó el brazo robótico utilizando *Robotics Toolbox* para corroborar la fidelidad del modelo (*Figura 28*). Luego, se obtuvieron las matrices de transformación desde el marco {S} hasta el efector final {5} (*ecuación 9*). Los parámetros L_1 , L_2 y L_3 corresponden a las longitudes de los eslabones comenzando la numeración desde el eslabón de la base del robot. El parámetro x_0 corresponde a la posición de la base del robot con respecto al centro de la cabeza del paciente (origen) sobre el eje x .

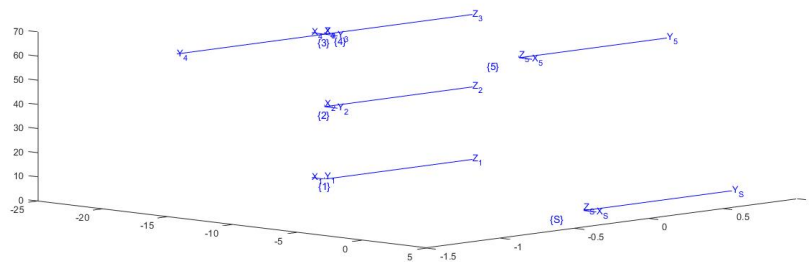


Figura 29: Marcos propuestos para primera etapa de ajuste

Junta	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_1 + 180^\circ$	0	0	90°
2	$\theta_2 + 90^\circ$	0	L_1	0
3	θ_3	0	L_2	0
4	$\theta_4 - 90^\circ$	0	0	-90°
5	$\theta_5 + 180^\circ$	0	L_3	0

Cuadro 3: Parámetros DH de primera etapa de manipulador robótico

$$\begin{aligned}
{}^sT_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^0T_1 &= \begin{bmatrix} -\cos(q_1) & 0 & -\sin(q_1) & 0 \\ -\sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^1T_2 &= \begin{bmatrix} \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(q_2 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & L_1 \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & L_1 \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^2T_3 &= \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\sin(q_3) & 0 & L_2 \cos(q_3) \\ \sin(q_3) & \cos(q_3) & 0 & L_2 \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^3T_4 &= \begin{bmatrix} \cos\left(q_4 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 & -\sin\left(q_4 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ \sin\left(q_4 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 & \cos\left(q_4 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^4T_5 &= \begin{bmatrix} -\cos(q_5) & \sin(q_5) & 0 & -L_3 \cos(q_5) \\ -\sin(q_5) & -\cos(q_5) & 0 & -L_3 \sin(q_5) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{9}$$

8.2. Simulación de solución numérica a problema de cinemática inversa en Matlab

Se realizó una simulación con *Robotics Toolbox* de Peter Corke utilizando una interfaz gráfica en la que se iban variando los parámetros ρ , ϕ y θ de la posición del efector final de la primera etapa respecto al centro de la cabeza del paciente. Debido a que las transformaciones homogéneas se realizan en un plano cartesiano, se tuvo que

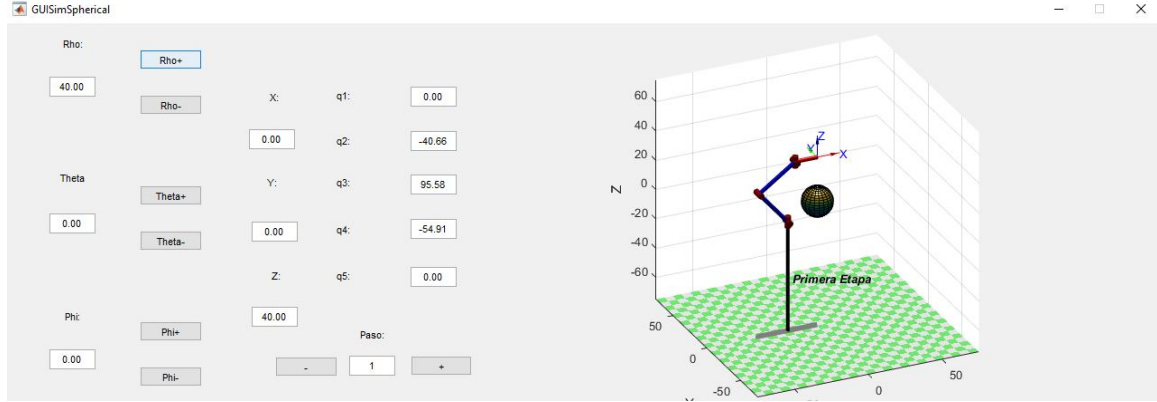


Figura 30: Interfaz gráfica de simulación de posicionamiento de brazo en coordenadas esféricas

describir las coordenadas x , y y z en términos de las coordenadas esféricas mediante las ecuaciones 10. El Cuadro 4 muestra la longitud de los parámetros constantes de las matrices de transformación de las ecuaciones 9.

$$\begin{aligned}
 x &= \rho \sin \phi \cos \theta \\
 y &= \rho \sin \phi \sin \theta \\
 z &= \rho \cos \phi
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

En la interfaz gráfica se utilizó la función $ikine(P, máscara)$ de *MATLAB* en la que P corresponde a una matriz de transformación homogénea indicando únicamente la posición deseada del efector final en la última columna y la máscara indica los grados de libertad del robot que son cinco para este caso en particular. La función devuelve la posición angular que debe tomar cada junta en radianes. Cada vez que se cambiaba la posición respecto a una de las tres coordenadas esféricas, se calculaba la posición en coordenadas cartesianas y luego se realizaba la cinemática inversa numérica para poder graficar la nueva posición del brazo robótico.

Parámetro	Longitud (cm)
x_0	-20
L_1	30
L_2	30
L_3	15

Cuadro 4: Parámetros para simulaciones de ajuste de primera etapa

8.3. Ecuaciones de cinemática inversa para posición del manipulador

Se utilizó la solución de Pieper para llegar a las ecuaciones analíticas de la posición del segundo eslabón ecuaciones 25. Se asume que las primeras tres juntas determinan la posición del efector final de la primera etapa de ajuste del robot; es decir, únicamente se toman en cuenta los primeros dos eslabones L_1 y L_2 y se considera nula la longitud de L_3 . Entonces, la transformación desde el marco de estación al marco de muñeca se define como sigue:

$${}^S T_W = {}^S T_3 = {}^S T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 = \begin{bmatrix} {}^S R_3 & {}^S \mathbf{p}_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^S R_3 = \begin{bmatrix} \sin(q_2 + q_3) \cos(q_1) & \cos(q_2 + q_3) \cos(q_1) & -\sin(q_1) \\ \sin(q_2 + q_3) \sin(q_1) & \cos(q_2 + q_3) \sin(q_1) & \cos(q_1) \\ \cos(q_2 + q_3) & -\sin(q_2 + q_3) & 0 \end{bmatrix},$$

$${}^S \mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} x_0 + L_1 \cos(q_1) \sin(q_2) + L_2 \cos(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) + L_2 \cos(q_1) \cos(q_3) \sin(q_2) \\ \sin(q_1) (L_2 \sin(q_2 + q_3) + L_1 \sin(q_2)) \\ L_2 \cos(q_2 + q_3) + L_1 \cos(q_2) \end{bmatrix}$$

La transformación del marco de estación a la muñeca en término de la orientación y posición del efector final es:

$${}^S A_3 = {}^S T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El posterior análisis se enfoca en la posición de la muñeca del robot por lo que pueden despreciarse las componentes de rotación de la matriz A y asumir que no hay rotación alguna; es decir, se redefine la matriz. Teóricamente es imposible que los marcos se mantengan sin rotar controlando únicamente tres juntas ya que si se controla posición, los tres grados de libertad de orientación se vuelven dependientes a la posición. Sin embargo, la simplificación es válida ya que solo se tomarán en cuenta las posiciones.

$${}^S A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Es importante recalcar que la matriz de transformación T y A definidas previamente son equivalentes. La matriz T existe en función de las posiciones angulares de las juntas y la matriz A en función de la orientación y posición del efector final. Se multiplica la inversa de la matriz de transformación del marco $\{S\}$ al marco $\{0\}$ a ambas matrices para simplificar el análisis.

$$\begin{aligned}
{}^S T_0^{-1} {}^S T_3 &= {}^S T_0^{-1} {}^S T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \\
{}^0 T_3 &= {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \\
{}^0 T_3 &= \begin{bmatrix} {}^0 R_3 & {}^0 \mathbf{p}_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
{}^0 R_3 &= \begin{bmatrix} \sin(q_2 + q_3) \cos(q_1) & \cos(q_2 + q_3) \cos(q_1) & -\sin(q_1) \\ \sin(q_2 + q_3) \sin(q_1) & \cos(q_2 + q_3) \sin(q_1) & \cos(q_1) \\ \cos(q_2 + q_3) & -\sin(q_2 + q_3) & 0 \end{bmatrix} \\
{}^0 \mathbf{p}_3 &= \begin{bmatrix} \cos(q_1) (L_2 \sin(q_2 + q_3) + L_1 \sin(q_2)) \\ \sin(q_1) (L_2 \sin(q_2 + q_3) + L_1 \sin(q_2)) \\ L_2 \cos(q_2 + q_3) + L_1 \cos(q_2) \end{bmatrix};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^S T_0^{-1} {}^S A_3 &= {}^0 A_3 \\
{}^0 A_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x - x_0 \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

El punto de interés de este análisis es la posición del efector final; por lo tanto, se igualan los componentes de posición de las matrices de transformación T y A del marco $\{0\}$ al marco $\{3\}$.

$${}^0 A_{3_{m4}} = {}^0 T_{3_{m4}} \quad (11)$$

$$p_x - x_0 = \cos(q_1) (L_2 \sin(q_2 + q_3) + L_1 \sin(q_2)) \quad (12)$$

$$p_y = \sin(q_1) (L_2 \sin(q_2 + q_3) + L_1 \sin(q_2)) \quad (13)$$

$$p_z = L_2 \cos(q_2 + q_3) + L_1 \cos(q_2) \quad (14)$$

Observando el lado derecho de las ecuaciones 13 y 14 puede notarse que poseen el mismo factor dependiente de las posiciones angulares de la segunda y tercer junta. Por consiguiente, al efectuar la división entre la ecuación 13 y la ecuación 12 se elimina la dependencia de la segunda y tercer junta. El cociente resultante depende únicamente de la posición angular de la primer junta y debe reescribirse en términos de la segunda función de arcotangente para considerar la posición de la muñeca del robot en cualquier parte del plano.

$$q_1 = \text{atan2}(p_y, p_x - x_0) \quad (15)$$

Ahora, pueden encontrarse las ecuaciones para las dos juntas restantes en términos de la primera. Se continua con el mismo procedimiento matricial para encontrar las matrices de transformación T y A del marco $\{1\}$ al marco $\{3\}$.

$$\begin{aligned} {}^S T_1^{-1} {}^S T_3 &= {}^S T_1^{-1} {}^S T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \\ ({}^S T_0 {}^0 T_1)^{-1} {}^S T_3 &= ({}^S T_0 {}^0 T_1)^{-1} {}^S T_1^{-1} {}^S T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \\ {}^1 T_3 &= {}^1 T_2 {}^2 T_3 \\ {}^1 T_3 &= \begin{bmatrix} -\sin(q_2 + q_3) & -\cos(q_2 + q_3) & 0 & -L_2 \sin(q_2 + q_3) - L_1 \sin(q_2) \\ \cos(q_2 + q_3) & -\sin(q_2 + q_3) & 0 & L_2 \cos(q_2 + q_3) + L_1 \cos(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^S T_1^{-1} {}^S A_3 &= ({}^S T_0 {}^0 T_1)^{-1} {}^S A_3 = {}^1 A_3 \\ {}^1 A_3 &= \begin{bmatrix} -\cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & x_0 \cos(q_1) - p_x \cos(q_1) - p_y \sin(q_1) \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ -\sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & p_y \cos(q_1) - p_x \sin(q_1) + x_0 \sin(q_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Nuevamente se igualan las expresiones de las componentes de posición de las matrices T y A .

$${}^1 A_{3m4} = {}^1 T_{3m4} \quad (16)$$

$$x_0 \cos(q_1) - p_x \cos(q_1) - p_y \sin(q_1) = -L_2 \sin(q_2 + q_3) - L_1 \sin(q_2) \quad (17)$$

$$p_z = L_2 \cos(q_2 + q_3) + L_1 \cos(q_2) \quad (18)$$

$$p_y \cos(q_1) - p_x \sin(q_1) + x_0 \sin(q_1) = 0 \quad (19)$$

En este caso en particular, se puede contemplar que el lado izquierdo de las ecuaciones 17 y 19 varían principalmente en la función trigonométrica que acompaña a cada parámetro. Lo mismo se cumple con el lado derecho de las ecuaciones 17 y 18. Entonces, se pueden elevar al cuadrado las ecuaciones y sumarse para buscar eliminar funciones trigonométricas mediante la identidad pitagórica. La suma resultante únicamente depende de la suma de un producto de cosenos y de senos con los mismos argumentos. Aplicando la identidad de suma de argumentos del coseno se elimina la dependencia de la segunda junta y se puede resolver para la tercera al calcular su respectiva función seno para obtener el tangente.

$$\begin{aligned}
(p_x - x_0)^2 + p_y^2 + p_z^2 &= L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2(\cos(q_2)\cos(q_2 + q_3) + \sin(q_2)\sin(q_2q_3)) \\
(p_x - x_0)^2 + p_y^2 + p_z^2 &= L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2\cos(-q_3) \\
(p_x - x_0)^2 + p_y^2 + p_z^2 &= L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2\cos(q_3) \\
\cos(q_3) &= \frac{(p_x - x_0)^2 + p_y^2 + p_z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \\
\sin(q_3) &= \pm\sqrt{1 - \cos^2(q_3)}
\end{aligned}$$

Se divide la función seno sobre la función coseno de la tercer junta para obtener la posición angular en términos del segundo arcotangente. Se toma en cuenta la raíz positiva del seno para garantizar que el tercer servomotor trabaje en su primer cuadrante. El primer cuadrante de la junta corresponde a una configuración de codo hacia afuera por lo que evitaría cualquier contacto con la cabeza del paciente. El resultado se muestra a continuación:

$$q_3 = \operatorname{atan2} \left(\sqrt{1 - \left[\frac{(p_x - x_0)^2 + p_y^2 + p_z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right]^2}, \frac{(p_x - x_0)^2 + p_y^2 + p_z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right) \quad (20)$$

Finalmente se encuentra la matriz de transformación A del marco $\{2\}$ al marco $\{3\}$. La matriz correspondiente T se encuentra en la ecuación 9.

$$\begin{aligned}
{}^S T_2^{-1} {}^S A_3 &= ({}^S T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2)^{-1} {}^S A_3 = {}^2 A_3 = [{}^2 R_3 \quad {}^2 \mathbf{p}_3] \\
{}^2 R_3 &= \begin{bmatrix} \cos(q_1)\sin(q_2) & \sin(q_1)\sin(q_2) & \cos(q_2) \\ \cos(q_1)\cos(q_2) & \cos(q_2)\sin(q_1) & -\sin(q_2) \\ -\sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 \end{bmatrix} \\
{}^2 \mathbf{p}_3 &= \begin{bmatrix} p_z \cos(q_2) - L_1 + p_x \cos(q_1)\sin(q_2) - x_0 \cos(q_1)\sin(q_2) + p_y \sin(q_1)\sin(q_2) \\ p_x \cos(q_1)\cos(q_2) - p_z \sin(q_2) - x_0 \cos(q_1)\cos(q_2) + p_y \cos(q_2)\sin(q_1) \\ p_y \cos(q_1) - p_x \sin(q_1) + x_0 \sin(q_1) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

En esta ocasión, únicamente es necesario igualar las componentes de posición x y y en vista de que se obtendría de nuevo la ecuación 19.

$${}^2 A_{3_{m4}} = {}^2 T_{3_{m4}} \quad (21)$$

$$p_z \cos(q_2) - L_1 + p_x \cos(q_1)\sin(q_2) - x_0 \cos(q_1)\sin(q_2) + p_y \sin(q_1)\sin(q_2) = L_2 \cos(q_3) \quad (22)$$

$$p_x \cos(q_1)\cos(q_2) - p_z \sin(q_2) - x_0 \cos(q_1)\cos(q_2) + p_y \cos(q_2)\sin(q_1) = L_2 \sin(q_3) \quad (23)$$

Ya se conocen los valores de las posiciones angulares de la primer y tercer junta y tanto la ecuación 22 como la ecuación 23 poseen dependencia en las funciones trigonométricas coseno y seno con la posición angular de la segunda junta como argumento. Realizando una substitución y reordenando las ecuaciones mencionadas se obtiene un sistema de ecuaciones 2x2 lineal.

$$\begin{aligned}
u &= \cos(q_2), v = \sin(q_2), \\
\begin{cases} p_z u + [(p_x - x_0) + p_y \sin(q_1)] v = L_1 + L_2 \cos(q_3) \\ [(p_x - x_0) \cos(q_1) + p_y \sin(q_1)] u - p_z v = L_2 \sin(q_3) \end{cases} \\
u = \cos(q_2) &= -\frac{(L_1 + L_2 \cos(q_3))p_z + [(p_x - x_0) \cos(q_1) + p_y \sin(q_1)] L_2 \sin(q_3)}{[(p_x - x_0) \cos(q_1) + p_y \sin(q_1)]^2 - p_z^2} \\
v = \sin(q_2) &= \frac{p_z L_2 \sin(q_3) - [(p_x - x_0) \cos(q_1) + p_y \sin(q_1)] [L_1 + L_2 \cos(q_3)]}{[(p_x - x_0) \cos(q_1) + p_y \sin(q_1)]^2 - p_z^2}
\end{aligned}$$

Se concluye la solución al problema de cinemática inversa al dividir el seno por el coseno de la segunda junta.

$$\begin{aligned}
q_2 = \operatorname{atan2} & \left([(p_x - x_0) \cos(q_1) + p_y \sin(q_1)] [L_1 + L_2 \cos(q_3)] - p_z L_2 \sin(q_3), \right. \\
& \left. [(p_x - x_0) \cos(q_1) + p_y \sin(q_1)] L_2 \sin(q_3) + p_z [L_1 + L_2 \cos(q_3)] \right) \quad (24)
\end{aligned}$$

Los resultados se resumen en la ecuación 25 substituyendo las coordenadas de posición p_x , p_y y p_z por las coordenadas cartesianas x , y y z . Por otra parte, se definieron variables K_1 y K_2 para reducir el tamaño de las ecuaciones y brindar una expresión más clara de las mismas.

$$\begin{aligned}
q_1 &= \operatorname{atan2}(y, x - x_0), \\
q_3 &= \operatorname{atan2}(\sqrt{1 - K_1^2}, K_1), \\
q_2 &= \operatorname{atan2}(K_2(L_1 + L_2 \cos q_3) - z L_2 \sin q_3, K_2 L_2 \sin q_1 + z(L_1 + L_2 \cos q_3)), \quad (25) \\
\text{donde :} \\
K_1 &= \frac{(x - x_0)^2 + y^2 + z^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2L_1 L_2}; \\
K_2 &= (x - x_0) \cos q_1 + y \sin q_1
\end{aligned}$$

8.3.1. Comparación entre posicionamiento con solución analítica y solución numérica de primera etapa

En busca de la validación de las ecuaciones halladas en la subsección anterior, se simularon trayectorias dependientes del ángulo azimutal θ , del ángulo polar ϕ o del

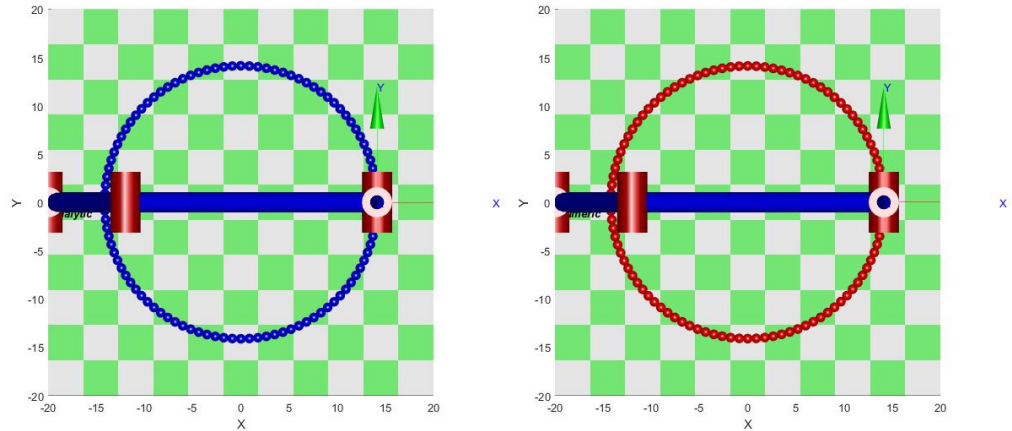


Figura 31: Simulación a trayectoria dependiente al ángulo azimutal de la solución analítica (azul) vs la numérica (roja) vista desde el plano XY

radio ρ y se compararon con la resolución numérica de la función $ikine(p, máscara)$ de la *Robotics Toolbox* de *MATLAB*. Se utilizaron los mismos parámetros que en la simulación anterior (*Cuadro No. 4*, página 45) con la excepción que se ignoró el tercer eslabón puesto que éste está ligado a las últimas dos juntas que definirán la orientación del efector final en la siguiente sección. Las simulaciones consistieron en animar la trayectoria del efector final del robot y graficar puntos por donde pasara el mismo.

Trayectoria dependiente al ángulo azimutal

En la simulación mostrada en la *Figura No. 31* se varió el ángulo azimutal θ desde 0 hasta 2π con un ángulo polar y radio constantes de $\frac{\pi}{4}$ y $20cm$, respectivamente. Teóricamente, esta trayectoria corresponde a un círculo de aproximadamente $14.14cm$ de radio sobre el plano horizontal XY . Visto desde arriba en el plano XY , el robot describió una trayectoria circular con un radio de aproximadamente $14cm$, medida que coincide con el valor teórico, tanto para la simulación con la solución analítica (en azul) como para la simulación con la solución numérica (en rojo). No se observa alguna discrepancia significativa. Esta trayectoria valida las ecuaciones analíticas de posición.

Trayectoria dependiente al ángulo polar

En la simulación de la *Figura No. 32* se varió el ángulo polar ϕ desde $-\frac{\pi}{2}$ hasta $\frac{\pi}{2}$ con un ángulo azimutal de 0 y un radio de $15cm$. Esta trayectoria representa el arco de un semicírculo de $15cm$ de radio sobre el plano XZ . Una vez más, tanto

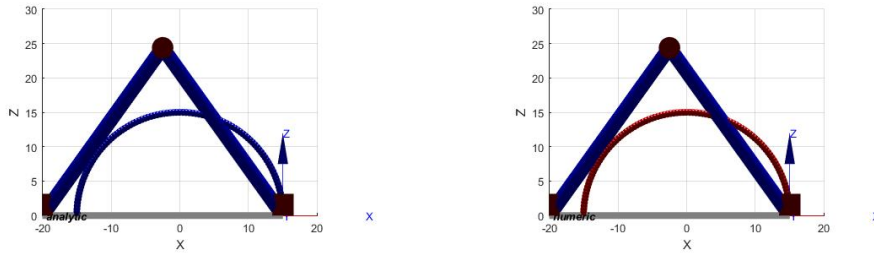


Figura 32: Simulación a trayectoria dependiente al ángulo polar de la solución analítica (azul) vs la numérica (roja) vista desde el plano XZ

la trayectoria con la solución analítica (en azul) como la trayectoria con la solución numérica coinciden con el semicírculo teórico de 15cm de radio y no muestran alguna discrepancia significativa entre ellas. Por otra parte, con esta trayectoria se pudo evidenciar la posición del codo hacia fuera de la tercera junta considerada en la ecuación 20 (página 49). La presente trayectoria valida las ecuaciones analíticas de posición.

Trayectoria dependiente al radio

En esta ocasión se varió el radio ρ desde 0cm hasta 44cm con una dirección de ángulo azimutal de 0 y un ángulo polar de $\frac{\pi}{4}$. En la *Figura No. 33* se aprecia como, visto desde el plano XZ , el brazo robótico sigue una trayectoria de línea recta con pendiente unitaria desde el origen hasta aproximadamente el punto $(31\text{cm}, 31\text{cm})$ del plano. La pendiente unitaria afirma la trayectoria a 45° del eje vertical. Adicionalmente, el punto del efector al final de la simulación está a una distancia alrededor de los 44cm con el codo hacia fuera como se pretendía lograr. Entonces, se validan nuevamente la utilidad de las ecuaciones de posicionamiento.

8.4. Ecuaciones de cinemática inversa para orientación del manipulador

Continuando con la solución de Pieper al problema de cinemática inversa, las dos juntas restantes de la primera etapa deben determinar la orientación del efector final. El brazo *Varioguide* que se quiere emular posee etapas de ajuste consecuentes a la primera. Estas etapas se utilizan para finalizar el posicionamiento y orientación

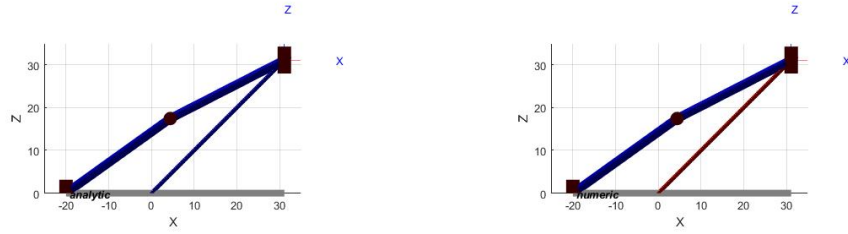


Figura 33: Simulación a trayectoria dependiente al radio de la solución analítica (azul) vs la numérica (roja) vista desde el plano XZ

del electrodo a insertar en la cabeza del paciente. Entonces, se puede asumir una orientación de primera etapa horizontal paralela al eje x positivo. Cualquier ajuste en la orientación del efector final del brazo robótico se podría realizar en las etapas posteriores. El efector final de la primera etapa debe estar paralelo al plano XY y al plano XZ para lograr tal relación.

Estas ecuaciones se calcularon de manera geométrica. En las *Figuras No. 29 y 28* puede percibirse que la cuarta junta posee un eje paralelo a la segunda y tercer junta mientras que el eje de la quinta junta es paralelo al de la primera. Cuando la cuarta y la quinta junta se encuentran en su posición cero, el efector final de la primera etapa está orientado de manera paralela al eje x positivo; entonces, para mantener dicha relación, la cuarta junta debe contrarrestar los cambios ocasionados por la segunda y tercer junta y la quinta junta debe hacer lo mismo con la primera. La dirección de rotación de la primer y quinta junta es igual por lo que basta con que la quinta junta siga el movimiento inverso de la primera para mantener la orientación paralela al plano XZ . La dirección de rotación de las tres juntas restantes es idéntica entre ellas. Entonces, la cuarta junta debe contrarrestar el desfase provocado por la suma de desplazamiento angular de la segunda y tercer junta para asegurar una orientación paralela al plano XY . Las ecuaciones de orientación propuestas (26) son:

$$\begin{aligned} q_4 &= -(q_2 + q_3) \\ q_5 &= -q_1 \end{aligned} \tag{26}$$

8.5. Consideraciones especiales de las ecuaciones de cinemática inversa

Antes de implementar las ecuaciones en el segundo prototipo electromecánico se optó por simular el funcionamiento de las ecuaciones con las dimensiones del prototipo completo. El brazo cuenta con cuatro eslabones y el centro de la cabeza del paciente debe estar colocada justo debajo del efector final cuando cada junta esté en su posición cero. Al ajustar la primera etapa se busca colocar al efector final en una posición en coordenadas esféricas con el centro de la cabeza del paciente como origen al sistema coordenado.

Las ecuaciones deben garantizar la navegación del efector final sobre la cabeza estando siempre en configuración de codo hacia afuera sin cambiar abruptamente la posición angular de alguna junta por el cambio de posición radial o angular. Por ejemplo, si el efector final del brazo se traslada de una posición, (ρ, ϕ, θ) , $(20\text{cm}, -60^\circ, 179^\circ)$ a una posición $(20\text{cm}, -60^\circ, 181^\circ)$, la primera junta debería tener una transición suave y corta pero por su dependencia de la segunda ecuación del arcotangente (ecuación 15) podría pasar desde 179° a -179° ; es decir, dar aproximadamente una revolución. El mando está diseñado para movimientos cortos por lo que un movimiento largo inesperado podría poner en riesgo a los médicos y al paciente presentes. Además, los prototipos del brazo electromecánico construidos en la Universidad del Valle cuentan con la presencia de actuadores Dynamixel AX-12A que únicamente pueden operar fuera de un rango de 300° por lo que las ecuaciones propuestas deben evitar operar fuera de esos valores.

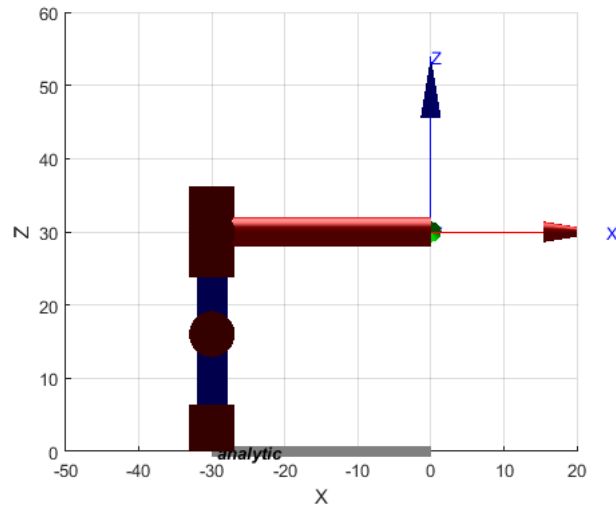


Figura 34: Brazo robótico con sus juntas en la posición cero

8.5.1. Posicionamiento y orientación de efector final

Las juntas que pertenecen a la segunda y tercer etapa de ajuste colocan al cuarto eslabón en la misma dirección cuando se empieza con el ajuste de *Varioguie* debido a que es un requerimiento del sistema de navegación *Vector Vision*. Este requisito, sumado al comportamiento de las ecuaciones 26 aseguran que en la primer etapa de ajuste los últimos dos eslabones sean paralelos al eje x positivo. Las ecuaciones de posicionamiento ya consideran una traslación sobre el eje x igual a x_0 ; entonces, únicamente hay que considerar la traslación horizontal provocada por el tercer y cuarto eslabón. Se sustituyen las ecuaciones 25 por las ecuaciones 27. Las ecuaciones de orientación se mantienen.

$$\begin{aligned}
 q_1 &= \text{atan2}(y, x - x_{offset}), \\
 q_3 &= \text{atan2}(\sqrt{1 - K_1^2}, K_1), \\
 q_2 &= \text{atan2}(K_2(L_1 + L_2 \cos q_3) - zL_2 \sin q_3, K_2L_2 \sin q_1 + z(L_1 + L_2 \cos q_3)), \\
 q_4 &= -(q_2 + q_3) \\
 q_5 &= -q_1
 \end{aligned}$$

donde :

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{(x - x_{offset})^2 + y^2 + z^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2L_1L_2}, \\
 K_2 &= (x - x_{offset}) \cos q_1 + y \sin q_1, \\
 x_{offset} &= x_0 + L_3 + L_4
 \end{aligned} \tag{27}$$

8.5.2. Restricciones

Se simularon nuevamente las trayectorias de la subsección 8.3.1 para verificar su validez en el posicionamiento del efector final en la primera etapa de ajuste. Debido a que el tercer y cuarto eslabón poseen la misma dirección en la primera etapa se tomarón como un solo gran eslabón en la simulación. En la *Figura No. 34* se observa el brazo con las dimensiones del segundo prototipo mostradas en el *Cuadro No. 5*.

En general, los resultados fueron los esperados cuando se posicionaba el efector final en los octantes *I* o *IV* o sobre los ejes x positivo o y . Si se trabajaba sobre los octantes *II* o *III* o sobre el eje x negativo también se lograba la posición de efector final desea; sin embargo, la primera junta tendía a trabajar en los rangos $(\frac{\pi}{2}, \pi]$ y $(-\pi, -\frac{\pi}{2})$. Se gráfico la posición angular de la primera junta contra la coordenada esférica que se estuviese variando en cada caso para observar con mayor detalle el funcionamiento de la junta con respecto a su posición en el espacio.

Parámetro	Longitud (cm)
x_0	-30
L_1	16
L_2	14
L_3	14
L_4	16

Cuadro 5: Parámetros para simulaciones de ajuste de primera etapa

Trayectoria en función del ángulo azimutal

Para revalidar las ecuaciones se trazó un círculo sobre el plano XY variando el ángulo azimutal entre 0^{circ} y 360° con 20cm de radio y 45° de ángulo polar. Los resultados se muestran en la *Figura No. 31*. La primer figura muestra que las ecuaciones 27 posicionan al efector final sobre la posición deseada. No obstante, se encuentran dos problemas que hacen que las ecuaciones no sean implementables en el manipulador robótico real. Primero, cuando el ángulo azimutal pasa del octante *II* al octante *III*, hay un cambio abrupto en la posición angular de la primera junta (*Figura No. 35b*) por lo que se pondría en riesgo la seguridad en la sala de operaciones. Segundo, en esta configuración la quinta junta se opone a la primera; por consecuencia, al trabajar con dirección hacia el eje negativo, la primera junta coloca a la quinta junta sobre el octante *II* o *III* y esta a su vez trata de colocar al efector final sobre el octante *I* o *IV*. Esta oposición puede generar que el brazo se autoimpacte como se ejemplifica en la *Figura No. 35c*.

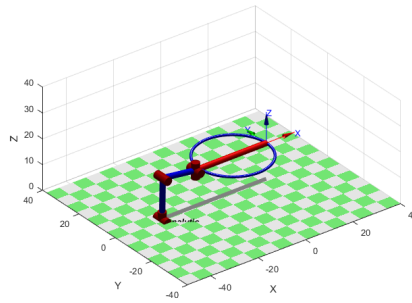
Trayectoria en función del ángulo polar

Nuevamente se trazó un semicírculo sobre el plano XZ (variación de ángulo polar de -90° a 90° y ángulo azimutal de 0° con un radio de 20cm . La *Figura No. 36a* demuestra nuevamente el posicionamiento correcto del efector final sobre la trayectoria deseada. Sin embargo, también ocurre un cambio abrupto en la posición angular de la primer junta (*Figura No. 36b*) y una colisión (*Figura No. 36c*) como en el caso anterior. La diferencia con la trayectoria en función del ángulo azimutal es que el cambio abrupto de la primer junta ocurre cuando el efector final cambia su posición del eje x negativo al positivo.

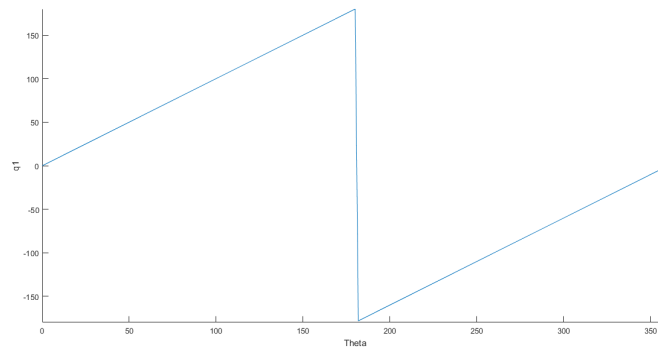
Trayectoria en función del radio

En este caso se utilizaron dos trayectorias. La primer trayectoria fue del lado positivo del eje x (variación radial lineal de 5cm a 30cm con ángulo azimutal de 60° y ángulo polar de 45°) y la segunda sobre el eje x negativo (variación radial lineal de 5cm a 20cm con ángulo azimutal de 0° y ángulo polar de -45°). En ambas trayectorias se posicionó el efector final en la coordenada deseada con la orientación paralela a

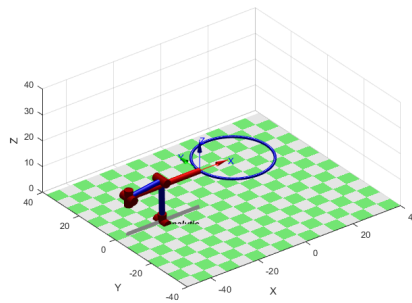
la dirección del eje x positivo. En la primera trayectoria (*Figura No. 37a*) no hubo problema de cambios abruptos con la primera junta (*Figura No. 37b*), ya que mantuvo un valor constante, ni de colisión. En la segunda trayectoria sí existió una colisión (*Figura No. 37c*).



(a) Trayectoria en función de θ en vista ortogonal

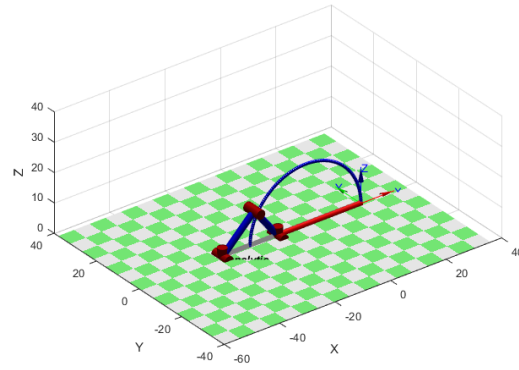


(b) Posición angular de primer junta contra la posición de ángulo azimutal del efector final

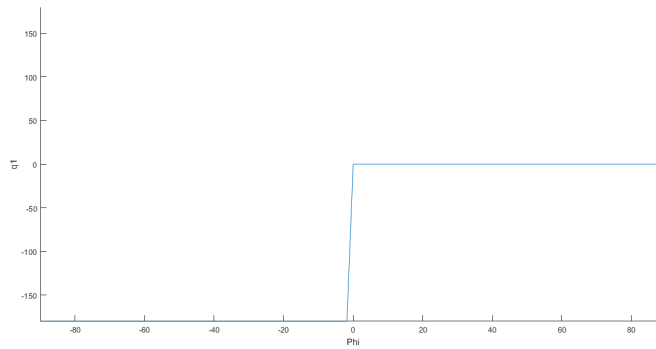


(c) Impacto de manipulador robótico consigo mismo siguiendo trayectoria en función de θ

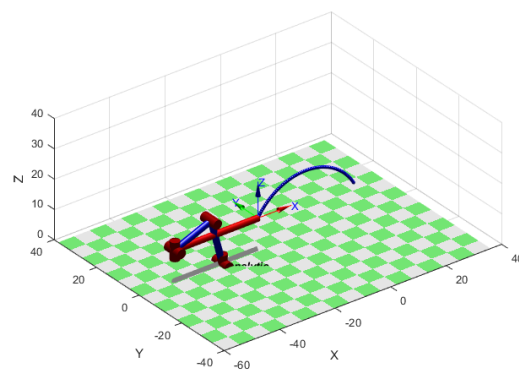
Figura 35: Simulación de trayectoria de revolución en la posición de ángulo azimutal del efector final con radio de 20cm y ángulo polar de 45°



(a) Trayectoria en función de ϕ en vista ortogonal

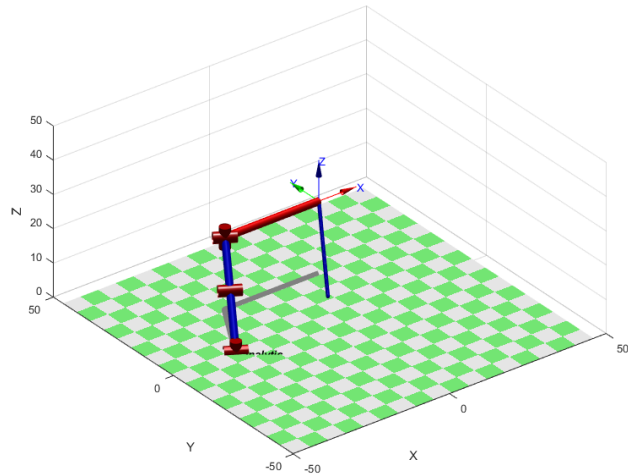


(b) Posición angular de primer junta contra la posición de ángulo polar del efector final en trayectoria *a*

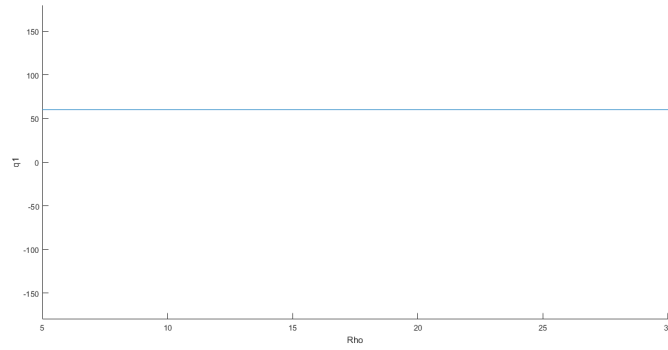


(c) Impacto de manipulador robótico consigo mismo siguiendo trayectoria en función de ϕ

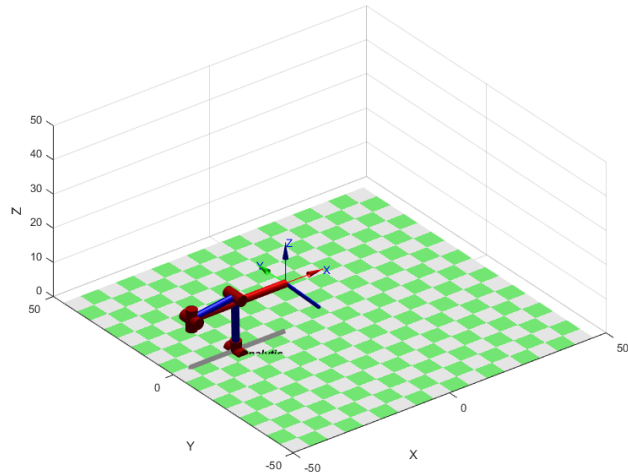
Figura 36: Simulación de trayectoria de media revolución en la posición de ángulo polar del efector final con radio de 20cm y ángulo azimutal de 0°



(a) Trayectoria en función de ρ en vista ortogonal



(b) Posición angular de primer junta contra la posición radial del efector final



(c) Impacto de manipulador robótico consigo mismo siguiendo trayectoria en función de ρ

Figura 37: Simulación de trayectoria lineal en la posición radial del efector final

8.5.3. Ecuaciones finales al problema de cinemática inversa de primera etapa de ajuste

Los problemas de colisión en la sección anterior se dieron principalmente porque se deja a la primer junta trabajar en un rango de $(-\pi, \pi]$ ya que es el dominio de la segunda función del arcotangente. En cuanto a cambios abruptos, la primera junta saltaba una revolución cuando debía pasar de $-\pi$ a π - o viceversa- debido al dominio de la segunda función del arcotangente o cuando cambiaba de signo el valor de posición del ángulo polar debido a que la segunda función del arcotangente le indicaba en qué cuadrante se encontraba. Por lo tanto, se pueden omitir estos factores si se utiliza la función arcotangente típica.

La función arcotangente posee un dominio de $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ y cumple con la solución de las ecuaciones de cinemática inversa. Las soluciones originalmente debían plantearse como arcotangentes típicos pero se utilizó la segunda función del arcotangente para tomar en cuenta el cuadrante en el que opera la junta. Se quiere que la primera junta trabaje únicamente en los octantes *I* y *IV* por lo que regresar la solución de la ecuación a un arcotangente típico es la solución ideal. Únicamente se debe tomar en cuenta que el denominador del argumento no sea cero para no indefinir la función. Un pensamiento lógico podría ser aplicar el límite a la función arcotangente cuando el denominador tiende cero pero esto podría traer saltos entre -90° y 90° dependiendo del signo del argumento de la función. Entonces, la mejor solución es forzar a la primer junta a mantener su valor anterior para evitar cambios abruptos cuando se atraviese el eje y . Adicionalmente, al cambiar de dominio, se debe restringir el ángulo azimutal θ al mismo dominio. Si se desea trabajar en los octantes *II* y *III* se tendrá que realizar la traslación variando el ángulo polar ϕ de valores positivos a negativos. Las ecuaciones finales se muestran a continuación:

$$q_1 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x-x_{offset}}\right), & \text{si } |x - x_{offset}| > 0 \\ q_{1_{prev}}, & \text{si } |x - x_{offset}| = 0 \end{cases},$$

$$q_3 = \text{atan2}(\sqrt{1 - K_1^2}, K_1),$$

$$q_2 = \text{atan2}(K_2(L_1 + L_2 \cos q_3) - zL_2 \sin q_3, K_2L_2 \sin q_1 + z(L_1 + L_2 \cos q_3)),$$

$$q_4 = -(q_2 + q_3),$$

$$q_5 = -q_1,$$

donde :

$$K_1 = \frac{(x - x_{offset})^2 + y^2 + z^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2L_1L_2},$$

$$K_2 = (x - x_{offset}) \cos q_1 + y \sin q_1,$$

$$x_{offset} = x_0 + L_3 + L_4$$

(28)

Validación de ecuaciones finales mediante simulaciones

Por última vez se simularon trayectorias con las nuevas ecuaciones para comprobar que el brazo no diera saltos abruptos ni colisionara consigo mismo. La *Figura No. 38* muestra el funcionamiento adecuado en una trayectoria dependiente del ángulo azimutal θ considerando que una restricción es que varíe únicamente dentro del dominio $(-90^\circ, 90^\circ)$. En la *Figura No. 39* se observa el resultado de simular una trayectoria de arco dependiente al ángulo polar ϕ . Destaca cómo, además de posicionar el efector final de manera efectiva, el codo finaliza en una posición hacia fuera y no hubo saltos abruptos en la primer junta. La *Figura No. 40* valida por tercera vez las ecuaciones finales en una trayectoria dependiente del radio ρ . Para concluir, se hizo pasar el efector final por la superficie de un cuarto de elipsoide centrado en el origen sobre el *II* y *III* octante (*Figura No. 41*). El resultado es satisfactorio ya que no solo consigue trazar la superficie, sino que también logra hacerlo con configuración de codo hacia fuera y sin colisionar consigo mismo. El elipsoide se trazó de abajo hacia arriba. Primero se varió el ángulo polar linealmente de -90° a 0° . En cada paso del ángulo polar se variaba el ángulo azimutal desde -90° hasta 90° . El radio variaba constantemente por lo que se calculaba de forma iterativa con la siguiente ecuación:

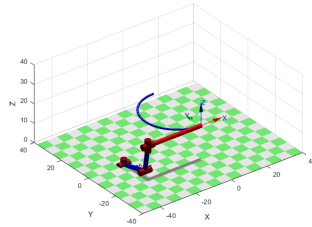
$$\rho = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sin \phi \cos \theta}{a}\right)^2 + \left(\frac{\sin \phi \sin \theta}{b}\right)^2 + \left(\frac{\cos \phi}{c}\right)^2}}$$

donde :

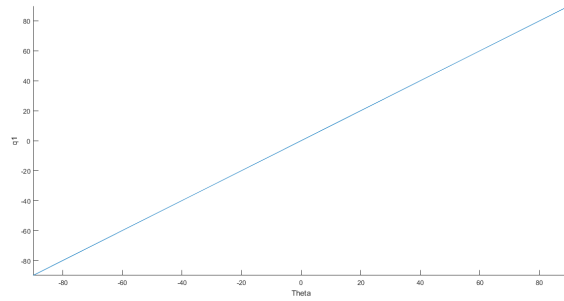
a es la longitud del semieje en x,

b es la longitud del semieje en y,

c es la longitud del semieje en z

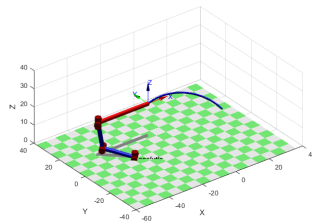


(a) Trayectoria en función de ángulo azimutal

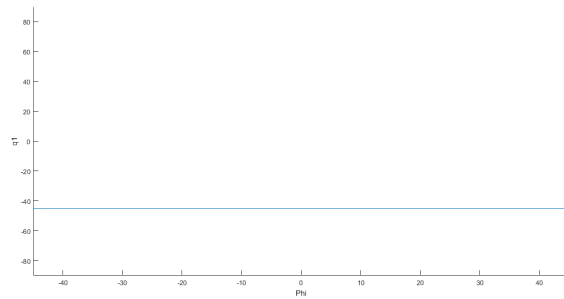


(b) Posición angular de primer junta contra la posición angular azimutal del efector final

Figura 38: Simulación de trayectoria variando el ángulo azimutal de -90° a 90° con ángulo polar de -45° y radio de 25cm

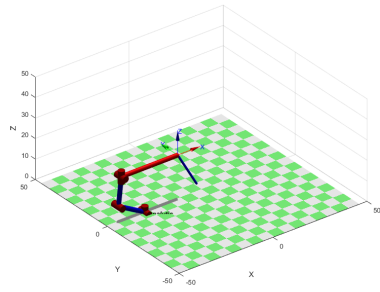


(a) Trayectoria en función de ángulo polar

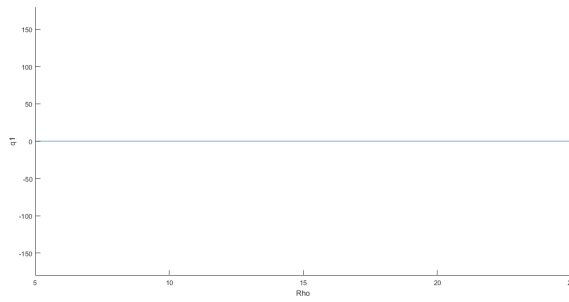


(b) Posición angular de primer junta contra la posición angular polar del efector final

Figura 39: Simulación de trayectoria variando el ángulo polar de -45° a 45° con ángulo azimutal de -45° y radio de 25cm



(a) Trayectoria en función de radio



(b) Posición angular de primer junta contra la posición radial del efector final

Figura 40: Simulación de trayectoria variando el radio de 5cm a 25cm con ángulo azimutal de 0° y ángulo polar de -30°

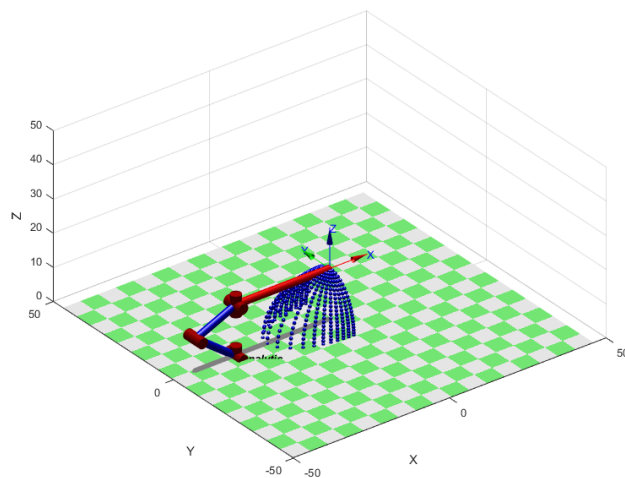


Figura 41: Trayectoria sobre superficie de elipsoide con ejes $a = 20\text{cm}$, $b = 10\text{cm}$ y $c = 15\text{cm}$

Implementación de ecuaciones de cinemática inversa en prototipo electromecánico

En el capítulo anterior se demostró que las ecuaciones 28 posicionan al efector final en coordenadas esféricas sobre la cabeza del paciente con una orientación hacia el frente en la primera etapa de ajuste. Ahora, se implementan las ecuaciones en un *Arduino Mega* para controlar los servomotores *Dynamixel* MX-106T y AX-12A del segundo prototipo electromecánico diseñado por Fernando Salazar. El diseño (*Figura No. 42*) cuenta con ocho servomotores. Desde la base, los primeros siete servomotores corresponden a juntas revolutas y el último a un tornillo infinito que representa una junta prismática. Los primeros cinco actuadores forman parte de la primera etapa de ajuste de cinco grados de libertad. El sexto actuador corresponde a la segunda etapa y los últimos dos a la tercera y última. Solo los primeros tres servomotores de la primera etapa son del modelo MX-106T debido a que soportan el mayor torque. El resto de actuadores son del modelo AX-12A.

En la implementación se consideraron dos aspectos importantes: la posición y velocidad angular de cada actuador. En la posición, fue importante tomar en cuenta las restricciones dadas por el control de cada servomotor como el rango de movimiento y también las restricciones de cada junta dada por el diseño mecánico del brazo. Además, se tuvo que encontrar distintas funciones lineales para traducir el valor de la junta deseada a un valor que el servomotor pudiese entender en sus registros. La importancia de la velocidad angular radicó en la estabilidad de los movimientos. Una velocidad muy grande para un movimiento leve puede desestabilizar al brazo. Entonces, primero se realizó el análisis de posicionamiento para luego poder obtener funciones lineales para la velocidad angular dependiendo de la moción de cada actuador.

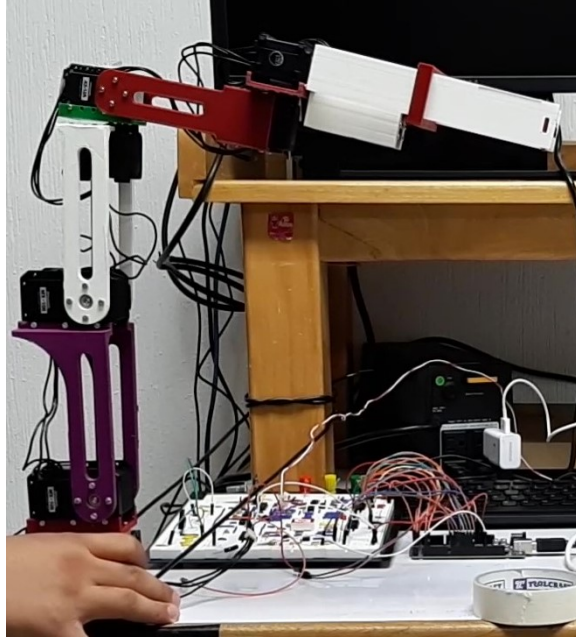


Figura 42: Segundo prototipo de brazo electromecánico diseñado por Fernando Salazar

9.1. Manejo de posición de servomotores

La primera etapa y el resto se comportan de manera distinta. En la primera etapa el movimiento es tridimensional por lo que se ajustan siguiendo las ecuaciones 28 del capítulo anterior. Las dos juntas revolutas restantes únicamente deben aumentar o decrementar su valor de posición actual. Para la junta prismática la posición del servomotor no era relevante solo el número de rotaciones y la velocidad.

9.1.1. Posicionamiento de primera etapa

Se requería traducir las posiciones angulares de cada junta a un valor para el registro del servomotor. Ambos valores corresponden describen un desfase angular respecto a un eje por lo que la conversión es lineal. Entonces, se colocó cada servomotor en dos posiciones distintas para calcular la pendiente y la ecuación lineal correspondiente (ecuaciones 29). Se consideró que la posición en los servomotores MX-106T está en un rango entre 0 y 4095 mientras que para los servomotores AX-12A está entre 0 y 1023. El *Cuadro No. 6* muestra los puntos utilizados para obtener las ecuaciones 30 de conversión. En la programación, el valor de los registros debe ser un número entero. Es de relevancia destacar que en las ecuaciones el cuarto y quinto servomotor dependen de la quinta y cuarta junta, respectivamente, debido a que en el análisis de cinemática directa se consideraron en orden opuesto. El orden no es relevante porque sus ejes se intersectan. En el mando de control (*Figura No. 22*), los botones de la derecha incrementan y reducen el radio, los botones hacia arriba y abajo del lado izquierdo incrementan y reducen el ángulo polar y los botones hacia la derecha e izquierda del lado izquierdo aumentan y reducen el ángulo azimutal.

$$m = \frac{s_2 - s_1}{q_2 - q_1},$$

$$s = mq + (s_1 - mq_1)$$

(29)

donde :

q es la posición angular de la junta en grados,

s es el valor del registro de posición del servomotor

No. actuador	Pos. junta (°)	Pos. registro	Pos. junta (°)	Pos. registro
1	0	2047	90	3071
2	0	1023	90	0
3	0	2047	90	1023
4	0	511	90	818
5	0	511	-90	818

Cuadro 6: Pares ordenados de posiciones de la junta con posición del servomotor

En cuanto a las restricciones mostradas en las ecuaciones 30, se consideraron con base en las restricciones angulares de cada actuador, las restricciones angulares por las ecuaciones previas y las restricciones por la estructura física. En el *Cuadro No. 7* se muestran los intervalos. Las restricciones finales son la intersección de los tres intervalos considerados.

No. actuador	Rest. actuador (°)	Rest. código (°)	Rest. mecánicas (°)
1	(-180, 180]	(-90, 90)	NA
2	(-270, 90]	NA	[-90, 90]
3	(-180, 180]	[0, 180]	[-90, 90]
4	(-150, 150]	(-90, 90)	NA
5	(-150, 150]	NA	[-180, 30]

Cuadro 7: Restricciones en movimiento angular de servomotores.

$$s_1 = \frac{512}{45}q_1 + 2047, q_1 \in [-90^\circ, 90^\circ]$$

$$s_2 = -\frac{341}{30}q_2 + 1023, q_2 \in [-90^\circ, 90^\circ]$$

$$s_3 = -\frac{512}{45}q_3 + 2047, q_3 \in [0^\circ, 90^\circ]$$

$$s_4 = \frac{256}{75}q_5 + 511, q_5 \in (-90^\circ, 90^\circ)$$

$$s_5 = -\frac{256}{75}q_4 + 511, q_4 \in (-150^\circ, 30^\circ]$$

(30)

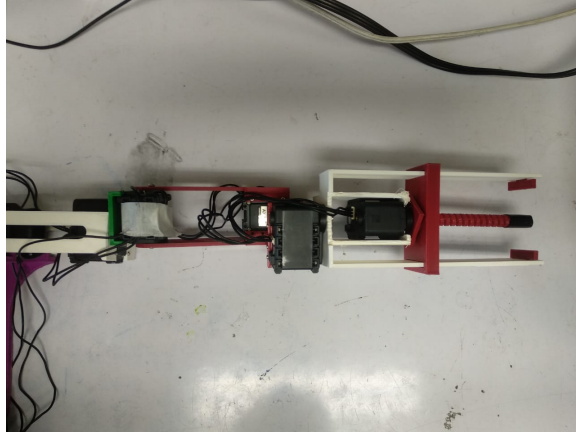


Figura 43: Juntas finale del segundo prototipo electromecánico diseñado por Fernando Salazar

9.1.2. Posicionamiento de etapas posteriores

En estos servomotores no fue necesario generar ecuaciones puesto que únicamente aumentan o decrementan su posición actual. Dos servomotores corresponden a juntas revolutas y uno a una junta prismática. Estos tres servos se encuentran al final del brazo robótico en la *Figura No. 43*.

Posición angular de juntas revolutas

En la *Figura No. 43* están los servomotores de las últimas dos juntas en su posición cero. Puede verse claramente que la primera junta revoluta (de izquierda a derecha) posee una restricción mecánica de $\pm 90^\circ$ y que la segunda no posee restricción mecánica alguna. Entonces, en el código únicamente se debe incrementar o decrementar su valor cuidando no salirse del dominio de $\pm 90^\circ$ para la primer junta y $\pm 150^\circ$ para la segunda (restricción de servomotor AX-12A). En el mando de control (*Figura No. 22*) el primer servomotor corresponde a la segunda etapa y cualquier botón modifica su valor. El segundo servomotor pertenece a la tercera etapa y solo los botones de la izquierda modifican su valor ya que los de la derecha se utilizan para la junta prismática.

Desplazamiento de junta prismática

El tornillo infinito se puede observar en la *Figura No. 43*. Este servomotor AX-12A se configura en modo de rotación continua. Si gira hacia un lado se alarga la junta prismática mientras que para el otro lado se acorta. Únicamente se debe controlar la posición de giro. El algoritmo de control en este caso se realizó para que el servomotor girara de manera continua mientras el usuario presionara un botón del lado derecho del mando de control (*Figura No. 22*). Al soltarlo el servomotor frena inmediatamente su rotación. El botón superior alarga la junta prismática y el inferior la acorta.

9.2. Manejo de velocidad angular de servomotores

Los servomotores AX-12A y MX-106T están configurados para acelerar de golpe a la velocidad que se les configure. Esto puede desestabilizar el movimiento de la estructura. La desestabilización se reduce si la velocidad objetivo es corta y si se evita la aceleración y desaceleración constante. El mando de control permite movimientos continuos si se deja presionado un botón. En esos movimientos si el efector final llega a la posición deseada antes de volver a leer el comando de botón por segunda vez, el brazo desacelerará y acelerará de golpe generano inestabilidad. Entonces, utilizando la ecuación de velocidad angular constante como aproximación pueden reducirse las oscilaciones sin importar si el encoder rotatorio del mando está configurado para distancias largas o cortas. La lectura de botones por segunda vez se realiza cada $200ms$.

$$\omega = \frac{\theta_f - \theta_0}{t} \quad (31)$$

9.2.1. Velocidad angular de primera etapa

El algoritmo general para calcular la velocidad angular en esta etapa requiere que se conozca la posición angular futura y la presente. La posición angular futura es la posición angular final y la presente es la inicial en la ecuación 31. Una vez se calcula la velocidad angular (en $^{\circ}/s$) se debe traducir a la unidad del registro de velocidad de cada servomotor. El valor del registro debe ser mayor a cero y menor o igual a 1023 para cualquier caso. Un valor de cero corresponde a velocidad sin control.

Velocidad angular actuadores Dynamixel MX-106T

La unidad del registro de velocidad del modelo MX-106T es de aproximadamente $0.114rpm$ que equivale a $0.684^{\circ}/s$. Únicamente se debe dividir la velocidad angular deseada por este valor para obtener el valor que se ingresa al registro. El valor del registro debe ser un número entero. Es importante que la velocidad angular esté en grados por segundo para cancelar las dimensional. El valor del registro es adimensional.

$$\omega_s = \frac{\omega}{0.684^{\circ}/s} \quad (32)$$

Velocidad angular actuadores Dynamixel AX-12A

Se realiza el mismo proceso que se ejecutó con el modelo MX-106T. La unidad del registro de velocidad del modelo AX-12A es de aproximadamente $0.111rpm$ que

corresponde a $0.666^\circ/s$.

$$\omega_s = \frac{\omega}{0.666^\circ/s} \quad (33)$$

9.2.2. Velocidad angular etapas posteriores

En las etapas posteriores, todos los servomotores son del modelo AX-12A. Entonces su análisis de velocidad angular es similar. La diferencia radica en que estos servomotores tienen una velocidad constante en todo su movimiento por lo que el cálculo no requiere de conocer la posición angular actual solo el desplazamiento angular o la posición final.

Velocidad angular para juntas revolutas

El encoder rotatorio se configuró con ocho pasos. En estas etapas cada paso corresponde a la unidad de posición del registro de posición del modelo AX-12A; es decir, a aproximadamente 0.29° . Se convierte ese desplazamiento a grados para obtener la velocidad angular y luego se divide por la unidad.

$$\omega_s = \frac{Valor_{encoder} * 360^\circ}{150 \times 0.2s \times 0.666^\circ/s} \quad (34)$$

Velocidad angular para junta prismática

El tornillo sin fin evita que el desplazamiento en la junta prismática sea excesivo por más que trabaje en su velocidad angular máxima el servomotor. Entonces, en este caso, un valor de encoder máximo corresponde a la velocidad máxima controlada de giro del servomotor (1023) en su registro de velocidad). Las demás velocidades son múltiplos de la velocidad máxima.

$$\omega_s = 128 * Valor_{encoder} - 1 \quad (35)$$

9.3. Resultados de posición y velocidad

Finalmente se probó el posicionamiento de la primera etapa de ajuste y se midió su rendimiento en *Tracker*. Se consideró la posición y velocidad angular medida desde el origen para los ángulos polar y azimutal y la posición y velocidad lineal para la trayectoria del radio. Las figuras proporcionadas por *Tracker* no resultaron suficientes

para concluir acerca de la velocidad en las etapas de ajuste por lo que se optó por generar generar figuras propias con datos extraídos de varias corridas de la trayectoria.

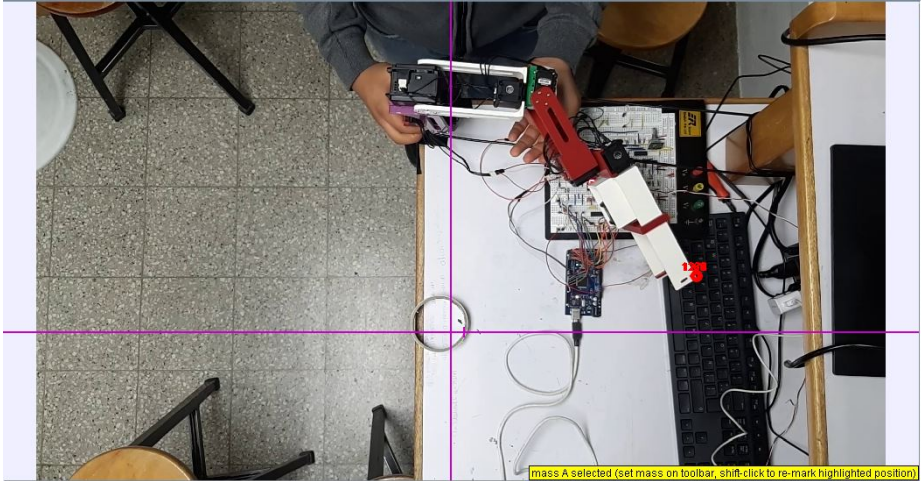
9.3.1. Posición y velocidad en Tracker

En la *Figura No. 44* se muestran los resultados en la trayectoria del ángulo azimutal de -90° a 90° con un ángulo polar de 30° y un radio de 20cm . En el gráfico de posición angular se puede apreciar que ésta aproximación no fue muy precisa para ángulos cercanos a $\pm 90^\circ$ mientras que para ángulos centrales entre ese intervalo si se obtuvo un comportamiento casi lineal como era de esperarse. Este error en los valores límite del ángulo azimutal se pudieron haber dado debido a que la cuarta y quinta junta no se intersectan en el mundo físico tal como se asumió en el proceso de resolución de cinemática inversa. El efector final se gira a pesar de no hacerlo en la simulación como puede verse en la captura del video.

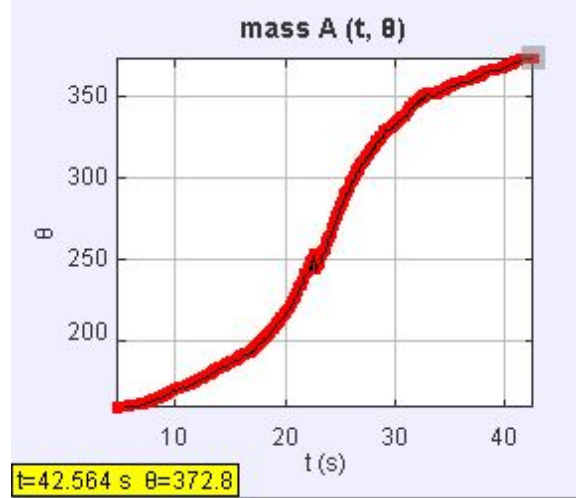
En la *Figura No. 45* se observan los resultados en la trayectoria del ángulo polar de -45° a 45° con un ángulo polar de 30° y un radio de 20cm . En tracker, este trayecto debería variar desde 135° a 45° por la forma en que se colocó el video y el marco de referencia. En la gráfica de posición se observa como el ángulo varió de manera casi lineal exceptuando algunas perturbaciones por la calidad de grabación e inestabilidad de la estructura. Adicionalmente, en Tracker se aprecia como se varió desde 120° a 37° , un intervalo similar en amplitud al que se esperaba. En la primera etapa no hay necesidad de precisión por lo que este resultado valida el algoritmo utilizado.

En la *Figura No. 46* se varió la distancia radial de 20cm a 30cm con ambos ángulos en cero. La gráfica de posición valida el rango de movimiento pero pone en duda la estabilidad debido a la perturbación que se ve en el movimiento.

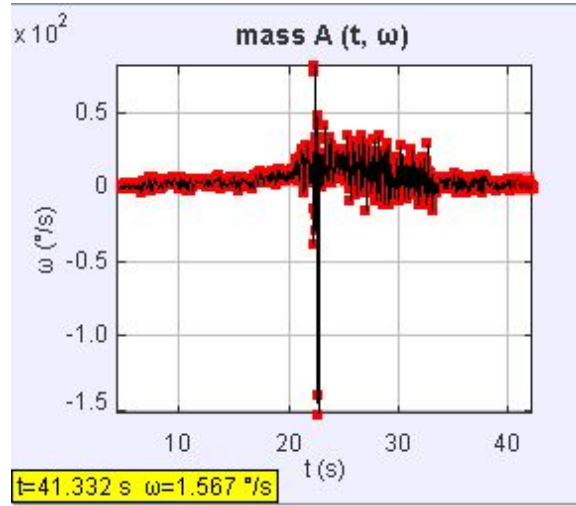
En cuanto a la velocidad lineal o angular, en los tres casos se observa la inestabilidad del sistema en los picos de las figuras por lo que no se puede concluir directamente con *Tracker* sobre los algoritmos de velocidad utilizados en cuanto a la estabilidad. En la siguiente sección se realiza una regresión lineal con datos obtenidos de varias muestras con *Tracker*. La pendiente de la regresión lineal brinda mayor información acerca de la velocidad en la trayectoria. Adicionalmente, en cuanto a interacción con el usuario, el brazo robótico se detuvo en todas las ocasiones cuando el botón dejó de ser presionado por lo que muestra ser amigable con el usuario.



(a) Trayectoria en función de θ en manipulador robótico

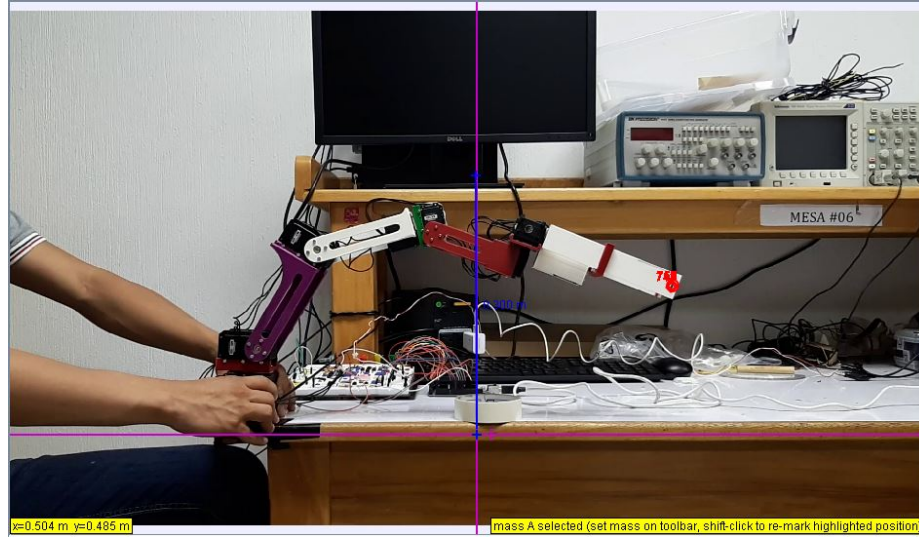


(b) Posición angular en trayectoria de ángulo azimutal

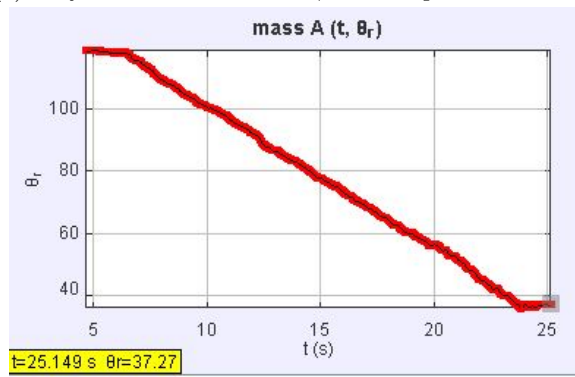


(c) Velocidad angular en trayectoria de ángulo azimutal

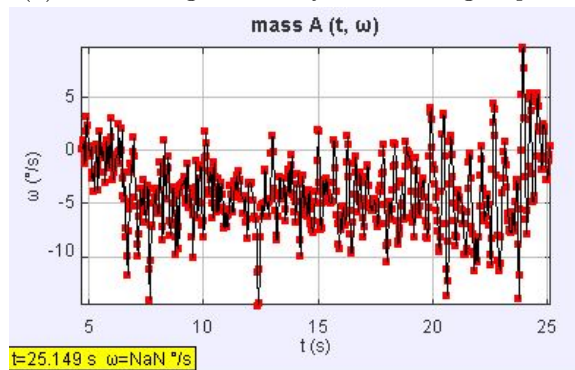
Figura 44: Medición de trayectoria en función de ángulo azimutal con *Tracker*



(a) Trayectoria en función de ϕ en manipulador robótico

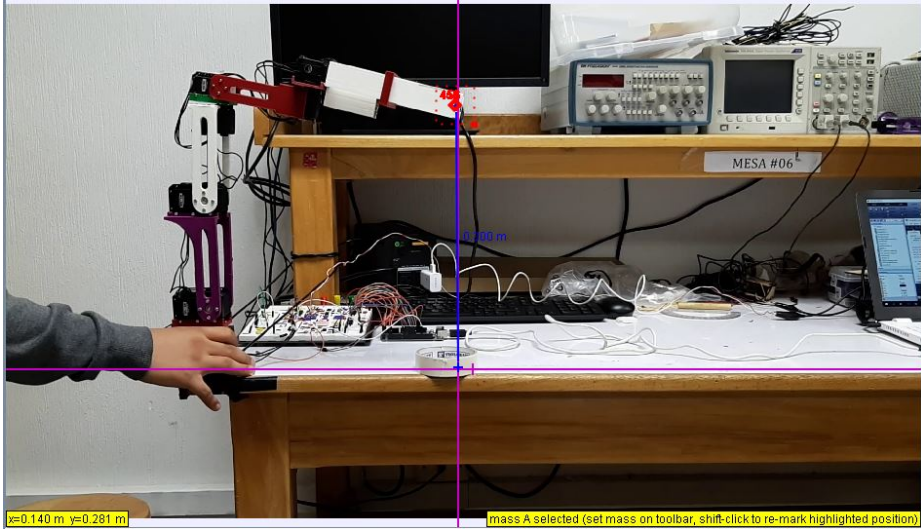


(b) Posición angular en trayectoria de ángulo polar

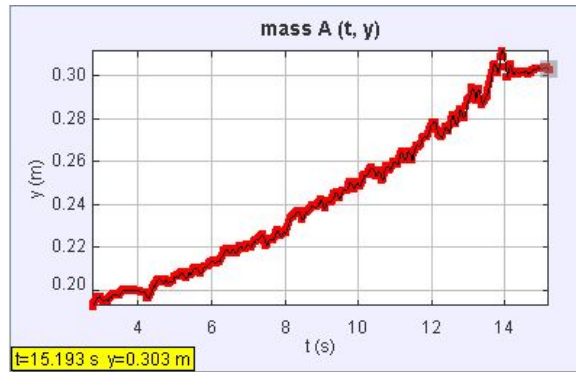


(c) Velocidad angular en trayectoria de ángulo polar

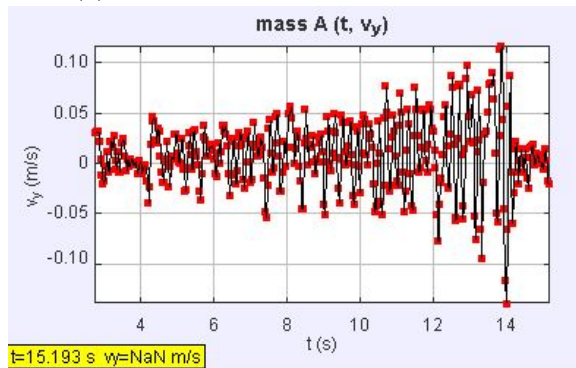
Figura 45: Medición de trayectoria en función de ángulo polar con *Tracker*



(a) Trayectoria en función de ρ en manipulador robótico



(b) Posición angular en trayectoria radial



(c) Velocidad angular en trayectoria radial

Figura 46: Medición de trayectoria en función del radio con *Tracker*

9.3.2. Análisis gráfico de posición y velocidad

Se realizaron tres pruebas para determinar con mayor confianza la funcionalidad de las ecuaciones de cinemática para la primera etapa de ajuste. Cada prueba consistía en variar el movimiento en un eje de las coordenadas esféricas mientras que se limitaba el movimiento en los dos ejes restantes. En cada prueba se sacó el promedio de posición para tres corridas de la trayectoria en la velocidad mínima programada y tres corridas en la velocidad máxima programada.

Trayectoria sobre eje azimutal

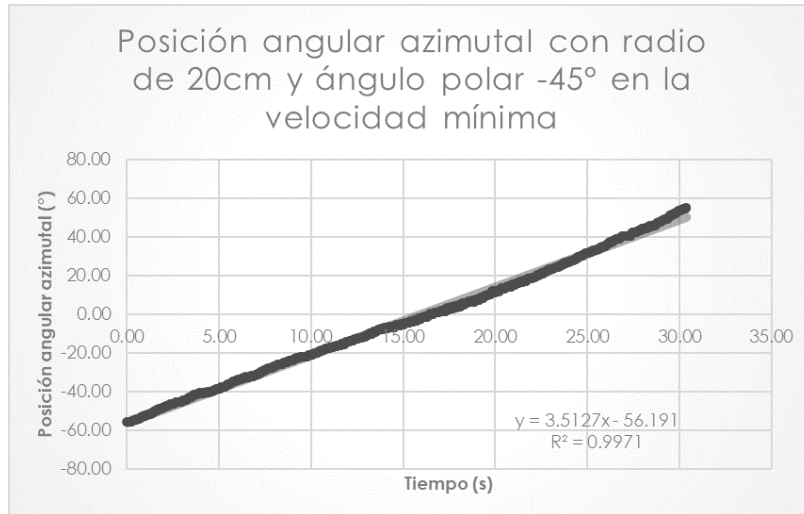
En esta prueba se varió el movimiento de -80° a 80° con una rapidez mínima de $5^\circ/s$ y una rapidez máxima de $30^\circ/s$ manteniendo un radio y ángulo polar constantes de 20cm y -45° respectivamente. En la *Figura No. 47* puede apreciarse como ambas regresiones lineales poseen un coeficiente R^2 mayor a 0.99 denotando así que el brazo se movió de manera esperada sobre una trayectoria lineal en el eje azimutal.

Observando las pendientes de las regresiones lineales se observan velocidades de $3.51^\circ/s$ y $19.00^\circ/s$ para las trayectorias con rapidez mínima y máxima, respectivamente. El error de las rapidezces observadas es de 30 % y 37 % con respecto al valor teórico; sin embargo, puede observarse una razón de 5.4 entre el máximo y mínimo; una diferencia del 10 % con el valor teórico de 5 %. Los altos errores en las rapidezces se debieron principalmente a la idealización del modelo del brazo. Se tomaron las juntas *No.4* y *No.5* como si intersectaran sus ejes cuando en el prototipo real se encuentran sesgados debido a la distancia que hay entre cada uno de los servomotores correspondientes. Este sesgo es más notable cuando se trabaja en los extremos del eje azimutal; las trayectorias parecieran oscilar entre -55° y 55° , 25° alejados de los extremos deseados.

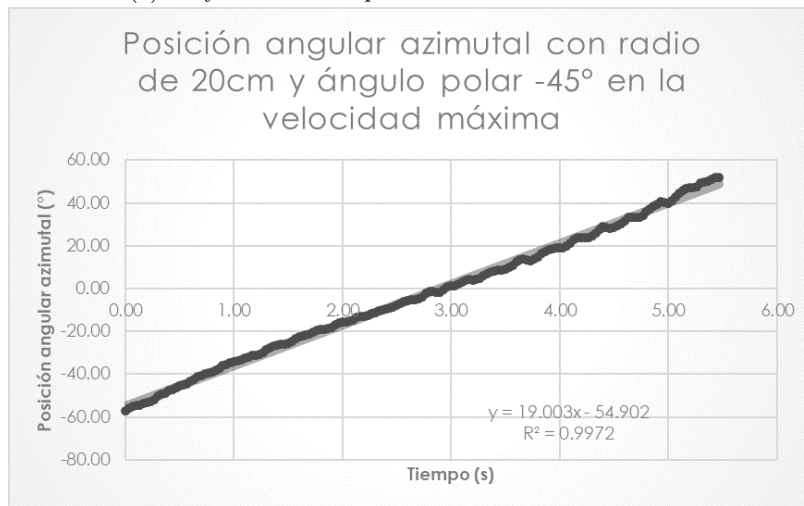
En la práctica, el posicionamiento preciso del brazo en esta etapa no es necesario; sin embargo, puede requerirse utilizar los valores extremos entre el dominio de $(-90^\circ, 90^\circ)$ para poder cubrir cualquier punto de inserción de electrodo deseado. Para valores centrales del ángulo azimutal, la operación puede verse lineal y con variaciones leves en velocidad brindando estabilidad al sistema. Las variaciones y vibraciones se deben principalmente al tipo de material e inestabilidad de la estructura. La relación entre la rapidez mínima y máxima no excede el 10 % por lo que puede desprejarse en esta etapa en la que únicamente es relevante el manejo del brazo y no la posición y velocidad del movimiento.

Trayectoria sobre eje polar

En esta prueba se varió el movimiento de -60° a 0° con una rapidez mínima de $5^\circ/s$ y una rapidez máxima de $30^\circ/s$ manteniendo un radio y ángulo azimutal constantes de 20cm y 0° respectivamente. La *Figura No. 48* despliega un valor de R^2



(a) Trayectoria con rapidez mínima en función de θ

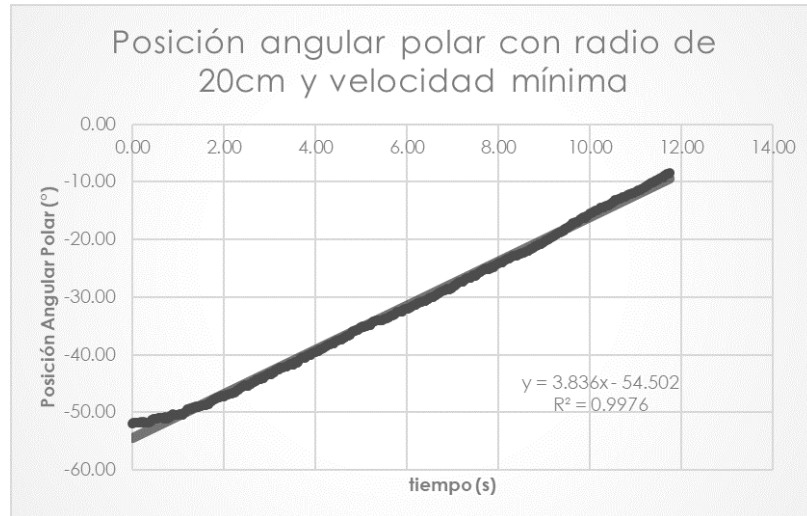


(b) Trayectoria con rapidez máxima en función de θ

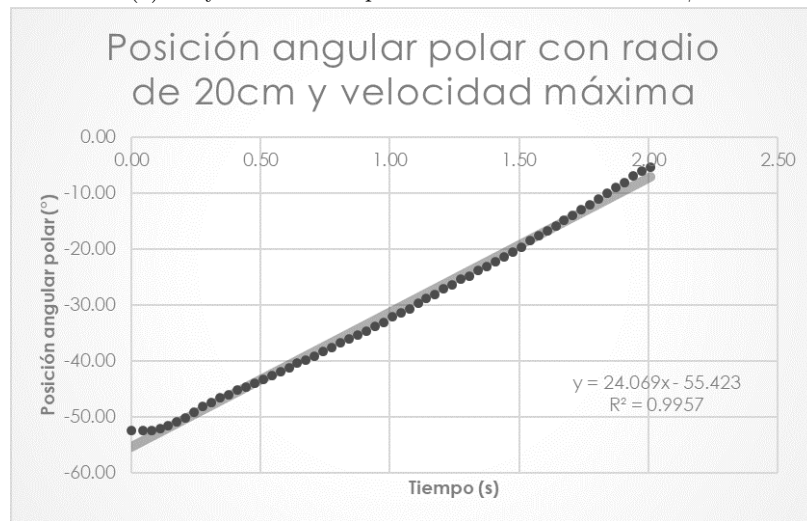
Figura 47: Trayectorias sobre eje de ángulo azimutal con rapidez mínima y máxima programadas

mayor a 0.99 en ambos casos por lo que el movimiento sobre este eje se comportó de la manera deseada.

Observando las pendientes de las regresiones lineales se observan velocidades de $3.84^\circ/s$ y $24.05^\circ/s$ para las trayectorias con rapidez mínima y máxima, respectivamente. El error de las rapideces observadas es de 23% y 20% con respecto al valor teórico. Los errores en este caso disminuyeron pero continúan siendo significativos. En cuanto a la razón entre rapidez máxima y mínima, el valor para esta prueba es de 6.27 que se traslada a una diferencia de 4.5% sobre el valor teórico, menor al caso anterior. Nuevamente, los altos errores pueden atribuirse a la idealización del modelo de las juntas 4 y 5 del brazo. Cabe mencionar que en esta prueba los extremos alcanzaron valores de -55° y 5° , diferencias de 5° con los valores teóricos. Para este caso, los errores disminuyeron. La forma de la gráfica presenta un menor número de oscilaciones con lo que se puede concluir que el movimiento sobre el eje polar es más



(a) Trayectoria con rapidez mínima en función de ϕ



(b) Trayectoria con rapidez máxima en función de ϕ

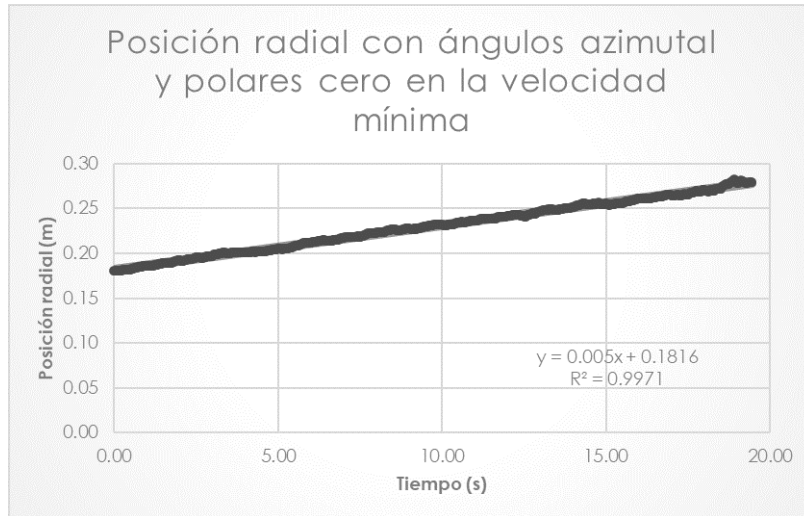
Figura 48: Trayectorias sobre eje de ángulo polar con rapidez mínima y máxima programadas

estable que sobre el eje azimutal.

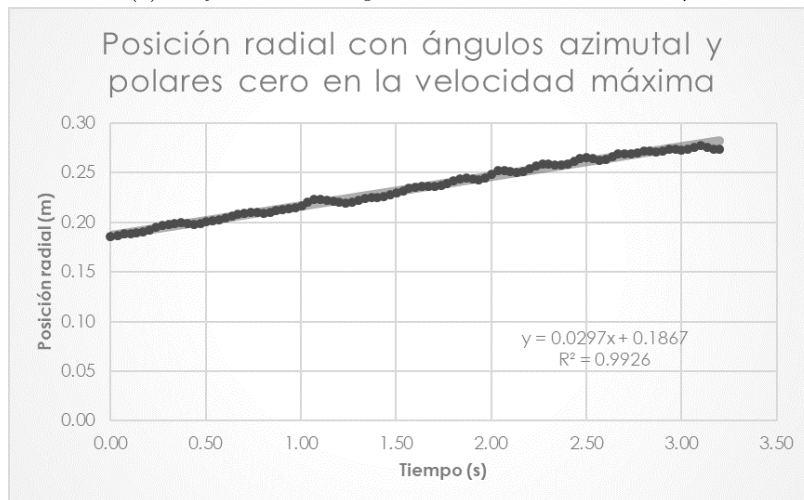
Trayectoria sobre eje radial

En esta prueba se varió el movimiento de 15cm a 25cm con una rapidez mínima de 0.5cm/s y una rapidez máxima de 3.0cm/s manteniendo ángulos azimutal y polar constantes de 0°. En la *Figura No. 49* se observa nuevamente como el coeficiente R^2 mayor a 0.99. La trayectoria muestra una relación lineal como se esperaba teóricamente.

Las velocidades observadas de 0.5cm/s y 2.97cm/s para las trayectorias con rapidez mínima y máxima muestran errores de 0.0% y 1.0%, respectivamente. La razón



(a) Trayectoria con rapidez mínima en función de ρ



(b) Trayectoria con rapidez máxima en función de ρ

Figura 49: Trayectorias sobre eje radial con rapidez mínima y máxima programadas

entre la rapidez máxima y mínima es de 5.94 representando un error del 1.0%. En esta prueba los errores son despreciables considerando que para este movimiento en especial, la precisión de posición y velocidad no son significativas. En cuanto a la inestabilidad se observan mayores oscilaciones en el movimiento en la rapidez máxima en comparación con la rapidez mínima. En ambos casos se observa que el movimiento oscila entre 18cm y 28cm, una diferencia constante de 3cm que puede deberse a un error en la selección de origen en el marco referencial al momento de tomar los datos.

Este trabajo de graduación culmina la primera fase del desarrollo de un brazo robótico para el Centro Neurológico HUMANA. Se obtuvo un prototipo funcional del cual se puede destacar lo siguiente:

- El mando de control permitió que se emulara el proceso de ajuste de *Varioguide* de cuatro etapas utilizando un ajuste tridimensional en coordenadas esféricas para la primera etapa, un ajuste angular para la segunda, un ajuste angular y de rotación continua para la tercera y un ajuste manual del efector final del brazo tal como solicitó HUMANA.
- A pesar que la unión de prototipos de estructura mecánica y mando de control no es apta para la sala de operaciones principalmente por problemas de estabilidad, sí cuenta con dispositivos de seguridad y buen manejo de movimiento que sienta las bases para la siguiente iteración del proyecto de robotización del brazo.
- El mando de control propuesto permite incrementar y decrementar cualquiera de los ejes tridimensionales en coordenadas esféricas brindando funcionalidad al diseño.
- Las ecuaciones cerradas encontradas resuelven el problema de cinemática inversa para el manipulador robótico real por lo que permite posicionamiento adecuado para la primera etapa de ajuste, añadiendo precisión con el uso de las etapas posteriores.
- El uso de coordenadas esféricas en la primera etapa de ajuste provoca que el uso del mando de control sea intuitivo.
- El uso de ecuaciones cerradas sobre numéricas para resolver el problema de cinemática inversa permite que el algoritmo pueda ser implementado por un microcontrolador sin sufrir retardos o fallas por falta de memoria.

- El uso de un encoder rotatorio para ajustar el paso del manipulador robótico añade versatilidad al diseño porque permite precisión de hasta 0.3° o movimientos más amplios para llegar al objetivo rápido y agilizar el proceso de ajuste.
- El uso de servomotores *Dynamixel* añade seguridad en la sala de operaciones debido a que poseen indicadores de emergencia que indican fallas por sobretorque o sobrecalentamiento brindando así confianza en los cirujanos hacia el dispositivo como requirió *HUMANA*.
- La cinemática inversa se diseñó de modo que el brazo no colisionara consigo mismo brindando seguridad al diseño.
- El uso de velocidades variables es amigable con el usuario y evita que hayan aceleraciones y desaceleraciones continuas añadiendo seguridad al dispositivo como pretendía *HUMANA*.
- El algoritmo de velocidad permite un movimiento continuo y suave a pesar que el prototipo de la estructura mecánica aún no es lo suficientemente estable para uso médico.
- A mayor velocidad el sistema produce mayores oscilaciones debidas a la inestabilidad del sistema mecánico y a que los servomotores utilizados en la implementación actual no cuentan con control sobre la aceleración del movimiento.
- Se obtuvo una relación lineal al mover el brazo robótico a una rapidez constante sobre cada uno de los ejes del plano de coordenadas esférico obteniendo un coeficiente R^2 mayor a 0.99 para todos los casos de prueba.
- La idealización de la unión de las juntas *No.4* y *No.5* puede despreciarse para movimientos sobre los ejes polares y radiales pero puede provocar errores de hasta 37% en la rapidez y desviaciones de hasta aproximadamente 25° en los valores extremos del rango de movimiento.
- El botón de bloqueo de juntas evita que cualquier servomotor cambie su registro de posición deseada por lo que evita movimientos accidentales en la sala de operaciones añadiendo seguridad al sistema.

El prototipo del mando de control cumplió con los objetivos deseados; sin embargo, aún no es apto para la sala de operaciones. El problema principal del prototipo electromecánico actual es que posee grados de libertad redundantes al igual que *Varioguide* y no es lo suficientemente estable para asistir en cirugía. En relación al mando de control y el presente trabajo de graduación se recomienda:

- Reducir los grados de libertad de la primera etapa. La primera etapa únicamente sirve en *Varioguide* para aproximar al efector final del brazo al punto de inserción del electrodo. En el presente trabajo se utilizaron únicamente tres grados de libertad para posicionar al efector final de la primera etapa. Se pueden omitir dos grados de libertad que reducirían la complejidad del mando de control y de la estructura misma. Los grados de libertad de las etapas posteriores finalizarían la orientación del efector final de *Varioguide*.
- Los brazos robóticos no son los únicos tipos de robots que existen. Puede utilizarse otra topología o forma que reduzca el peso del producto y la potencia requerida. En tal caso el presente proyecto puede utilizarse como guía matemática para encontrar las soluciones al problema de cinemática inversa en forma cerrada del nuevo manipulador.
- Hacer pruebas del algoritmo presente de velocidad y posición en una estructura estable para buscar mejoras al mismo y garantizar un movimiento con menores magnitudes en la aceleración instantánea del sistema.
- Utilizar la versión 2.0 de los servomotores MX-106T. Dichos motores permiten un control de aceleración y velocidad más complejo por lo que pueden mejorar la estabilidad en los movimientos y del sistema en general. Con estos motores puede disminuirse el aumento de oscilaciones en movimientos encontrados con el aumento de rapidez.

- Incentivar el diseño de la estructura mecánica actual de tal forma que la junta *No.5* se encuentre previo a la junta *No.4* para que la idealización funcione de acuerdo a los cálculos presentados durante esta investigación y así poder reducir los errores obtenidos en los resultados.
- Si se abre la posibilidad de utilizar las reconstrucciones tridimensionales de *Vector Vision 2008*, puede tomarse la imagen y diseñar un sistema de control con retroalimentación a través de imagen a computadora. Esto requeriría de un procesamiento de mayor calidad de la que puede ofrecer un microcontrolador por lo que se tendría que reemplazar el mismo por un microprocesador. En caso esto no sea factible puede utilizarse un microprocesador para el procesamiento de imágenes y un microcontrolador para el movimiento del brazo robótico utilizando la implementación descrita en este documento. Se puede basar el procesamiento de imagen en el trabajo de Fujii [9].

-
- [1] *Epilepsia*, Organización Mundial de la Salud, jun. de 2019. dirección: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/epilepsy>.
- [2] S. N. Salva Camano, “Historia de la estereotaxia, la braquiterapia y la radiocirugía en Cuba,” es, *Revista Médica Electrónica*, vol. 33, págs. 878-892, oct. de 2011, ISSN: 1684-1824. dirección: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242011000700008&nrm=iso.
- [3] *ROSA® Innovative technology*, Medtech, S.A., 2019. dirección: <http://www.medtech.fr/en/rosar-innovative-technology>.
- [4] *ROSA™ technology reduces anesthesia time and provides increased precision and safety*, Stanford Children’s Health, 2019. dirección: <https://www.stanfordchildrens.org/en/service/neurosurgery/rosa>.
- [5] *HUMANA*, Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA, 2018. dirección: <https://www.humanagt.org>.
- [6] *Cranial Navigation Application*, BrainLab, 2014. dirección: <https://www.brainlab.com/surgery-products/overview-neurosurgery-products/cranial-navigation/>.
- [7] P. Corke, *Robotics Toolbox for MATLAB Release 9*. 2013, pág. 208.
- [8] C. Printz, “Robotic surgery offers multiple applications for cancer patients : Robots are being used to assist with more types of surgery, although there are barriers to its widespread adoption,” *Cancer*, vol. 117, 18 2011. DOI: 10.1002/cncr.26507. dirección: <http://gen.lib.rus.ec/scimag/index.php?s=10.1002/cncr.26507>.
- [9] K. Fujii, “Gaze contingent cartesian control of a robotic arm for laparoscopic surgery,” 2013. dirección: <http://gen.lib.rus.ec/scimag/index.php?s=10.1109/IROS.2013.6696867>.
- [10] *Los datos relativos a Ingreso mediano y bajo, Guatemala*, Banco Mundial, 2019. dirección: https://datos.bancomundial.org/?display=map%5C%3Fcid%5C%3DEXT_BoletinES_W_EXT&locations=XO-GT.

- [11] *Las epilepsias y las crisis: Esperanza en la investigación*, National Institute of Neurological Disorders y Stroke, 2017. dirección: https://espanol.ninds.nih.gov/trastornos/crisis_epilepticas.htm#toc.
- [12] K. Garganis, “Intracranial Electrode Investigations in the Presurgical Evaluation of Drug-Resistant Epilepsy,” en *Epilepsy Surgery and Intrinsic Brain Tumor Surgery: A Practical Atlas*. Springer International Publishing, 2019, cap. 8, págs. 107-114.
- [13] F. J. A. Andrew Mcevoy, “Stereotactic Surgery for Epilepsy,” en *The Treatment of Epilepsy*. Wiley-Blackwell, 2009, cap. 78, págs. 975-992.
- [14] *Arduino Mega ADK*, Arduino, 2019. dirección: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMegaADK?from=Main.ArduinoBoardADK>.
- [15] *Keyes KY-040 Arduino Rotary Encoder User Manual*, Henry’s Bench, jun. de 2015. dirección: <http://eeshop.unl.edu/pdf/KEYES%5C%20Rotary%5C%20encoder%5C%20module%5C%20KY-040.pdf>.
- [16] L. E. Wood, *Model-Based User Interface Design: Successive Transformations of a Task/Objetc Model*. CRC Press, 1997, cap. 4.
- [17] *DYNAMIXEL*, ROBOTIS, 2019. dirección: <http://www.robotis.us/dynamixel/>.
- [18] *ROBOTIS e-Manual AX-12A*, ROBOTIS, 2019. dirección: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>.
- [19] *ROBOTIS e-Manual MX-106T/R*, ROBOTIS, 2019. dirección: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-106/>.
- [20] *ROBOTIS e-Manual MX-106T/R(2.0)*, ROBOTIS, 2019. dirección: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-106-2/>.
- [21] F. C. P. Kevin M. Lynch, *Modern Robotics Mechanics, Planning, and Control*, 1.^a ed. Cambridge University Press, 2017, pág. 624.
- [22] J. J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, 3.^a ed. Pearson Education, Inc., 2005, pág. 400.

13.1. Repositorio de algoritmos de programación

En el siguiente enlace se encuentra el repositorio con los códigos de las simulaciones de MATLAB y de las implementaciones en el *Arduino Mega*. Adicionalmente pueden observarse videos del prototipo electromecánico de Fernando Salazar siendo controlado por el mando de control diseñado como parte de este trabajo. Se requiere de una cuenta gmail de la universidad del valle para acceder al contenido del mismo.

- <https://drive.google.com/drive/folders/1NTVJqkBvafM9glwcnYDwtJLmVPgCYeen?usp=sharing>

