

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Control y Alimentación de Actuadores para Brazo Robótico
Asistencial en Cirugía Estereotáctica del Cerebro**

Trabajo de graduación presentado por Diego Ricardo Valdez Cabrera
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



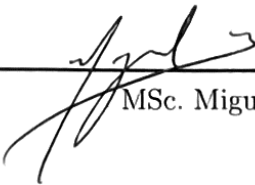
**Control y Alimentación de Actuadores para Brazo Robótico
Asistencial en Cirugía Estereotáctica del Cerebro**

Trabajo de graduación presentado por Diego Ricardo Valdez Cabrera
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica


Guatemala,


2019


Vo.Bo.:

(f) 
MSc. Miguel Zea

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Carlos Esquit

(f) 
MSc. Sol Girón

(f) 
MSc. Pablo Oliva

Fecha de aprobación: Guatemala, 10 de diciembre de 2019.

Agradezco a mis padres, quienes con su ejemplo y dedicación han sido guía y sostén en mi camino. Agradezco a mis hermanas, quienes han sido ejemplo a seguir y apoyo en los momentos difíciles. Agradezco a la Universidad del Valle de Guatemala y a todos mis catedráticos, por haberme mostrado el camino hacia la excelencia. Agradezco a Melissa Blanck Orellana, por el apoyo incondicional en mi camino por esta casa de estudios. Agradezco a Ramón Samayoa, por su ánimo y enseñarme a no rendirme. Agradezco especialmente a la Asociación HUMANA, por haberme permitido plantear este proyecto que espero sea sólo el inicio de un apoyo y asistencia tecnológica que culmine en la implementación de un brazo robótico que asista a los médicos en las intervenciones quirúrgicas que tantos pacientes necesitan para tratar enfermedades neurológicas, tales como la epilepsia.

Prefacio	v
Lista de figuras	x
Lista de cuadros	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
I. Introducción	1
II. Antecedentes	3
III. Justificación	7
IV. Objetivos	9
A. Objetivo general	9
B. Objetivos específicos	9
V. Alcance	11
VI. Marco teórico	13
A. Epilepsia	13
B. Neurocirugía	14
C. AX-12A	15
1. AX-12A-Servo-Library	16
D. Comunicación serial asincrónica Half Duplex	16
VII. Evolución del prototipo	17
A. Disponibilidad y selección de actuadores	17
B. Disposición de actuadores	18
1. Prototipo 1	18
2. Prototipo 2	19

3.	Prototipo 3	20
C.	Selección de microcontrolador	20
1.	Interconexión	21
2.	Selección de librería	23
VIII.	Prueba de actuadores	27
A.	Planteamiento de prueba	27
1.	Estructura de prueba para actuadores	28
B.	Resultados de las pruebas	30
IX.	Alarmas y feedback de actuadores	35
A.	Posición	35
B.	Temperatura	37
C.	Voltaje	38
X.	Conclusiones	39
XI.	Recomendaciones	41
XII.	Bibliografía	43
XIII.	Anexos	45
A.	Gráficas	45
B.	Cuadros	53
C.	Github	59

Lista de figuras

1.	Actuador AX-12A	15
2.	Primer prototipo con 6 actuadores AX12-A	18
3.	Segundo prototipo con 6 actuadores AX12-A	19
4.	Tercer prototipo con 5 actuadores AX-12A y 3 actuadores MX-106	20
5.	Entradas del actuador AX-12A [14]	21
6.	Entradas del actuador MX-106 [15]	21
7.	Entradas de pines de un Arduino Mega [14]	22
8.	Integrado de buffer tri-estado [14]	22
9.	Diagrama de flujo para pruebas de librerías de estabilidad en escritura y lectura	23
10.	Gráfica de correlación posición teórica y real de actuador AX-12A utilizando la librería DynamixelLibrary	24
11.	Gráfica de correlación posición teórica y real de actuador AX-12A utilizando la librería AX-12A-servo-library	24
12.	Gráfica de correlación posición teórica y real de actuador MX-106 utilizando la librería DynamixelLibrary	25
13.	Gráfica de correlación posición teórica y real de actuador MX-106 utilizando la librería AX-12A-servo-library	25
14.	Diseño base para estructura de pruebas de actuadores MX-106 y AX-12A	28
15.	Comportamiento de desplazamiento angular respecto al tiempo de la prueba 750g, velocidad: 852 y 12V	30
16.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 250g y velocidad de 170	33
17.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 100g y velocidad de 170	33
18.	Diagrama de flujo del programa implementado para alarma de posición	36
19.	Diagrama de flujo del programa implementado para alarma de temperatura	37
20.	Diagrama de flujo del programa implementado para alarma de voltaje	38
21.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 250g y velocidad de 511	45

22.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 250g y velocidad de 852	46
23.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 750g y velocidad de 170	46
24.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 750g y velocidad de 511	47
25.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 750g y velocidad de 852	47
26.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 1250g y velocidad de 170	48
27.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 100g y velocidad de 511	48
28.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 100g y velocidad de 852	49
29.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 200g y velocidad de 170	49
30.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 200g y velocidad de 511	50
31.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 200g y velocidad de 852	50
32.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 300g y velocidad de 170	51
33.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 300g y velocidad de 511	51
34.	Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 300g y velocidad de 852	52

Lista de cuadros

1.	Tabla de diferencias actuador MX-106	31
2.	Tabla de diferencias actuador AX-12A	32
3.	Tabla RMS MX-106	53
4.	Tabla promedios MX-106	54
5.	Tabla de puntos máximos de desviación MX-106	55
6.	Tabla RMS AX-12A	56
7.	Tabla promedios AX-12A	57
8.	Tabla de puntos máximos de desviación AX-12A	58

Este trabajo desarrolla las características de alimentación y control que deben tener los actuadores que inyectan el movimiento de un brazo robótico que servirá de herramienta de apoyo y asistencia en los procedimientos quirúrgicos que realizan los médicos de la Asociación HUMANA durante las cirugías que se practican a pacientes que padecen enfermedades neurológicas, tales como la epilepsia y el mal de Parkinson.

La Asociación HUMANA surgió en Guatemala para el tratamiento y atención médica de los pacientes que sufren este tipo de enfermedades, y es ahí donde se practican procedimientos quirúrgicos invasivos mediante los cuales se insertan electrodos en el cerebro y localizar con mayor precisión el área causante de la epilepsia.

Adicionalmente, se trabaja en un sistema de retroalimentación del funcionamiento de los actuadores, para lo cual se prevé la medición constante de las condiciones de voltaje, temperatura y posición. Todo ello con el objeto de poder detectar las características de operación de los servomotores para que, de forma automática y en línea, se alerte a los cirujanos y se implanten las medidas de corrección necesarias para garantizar en todo momento el buen funcionamiento del brazo robótico y asegurar que no se correrán riesgos ni se producirá problema alguno que ponga en peligro o comprometa los resultados de la cirugía.

This thesis work develops the principal characteristics of feeding and control of the servomotors or actuators that inject the movement to a robotic arm must have. This robotic arm will serve as a support and assistance in the surgical procedures performed by the doctors of HUMANA Association, during the surgeries that are performed patients suffering from neurological diseases, such as epilepsy and Parkinson.

The HUMANA Association emerged in Guatemala for the treatment and medical care of patients suffering from this type of disease, and that is where invasive surgical procedures are performed by means of which electrodes are inserted into the brain and more accurately locate the area causing the disease.

Additionally, a feedback system of the actuators operation is worked, for which the constant measurement of the voltage, temperature and position conditions is foreseen. All this in order to be able to detect the operating characteristics of the actuators. So that, automatically and online, surgeons are alerted and the necessary corrective measures are implemented to guarantee at all times the proper functioning of the robotic arm and ensure that risks will not be run or any problem will arise that puts danger or compromise the results of the surgery.

Es un hecho indiscutible la importancia que la tecnología digital ha adquirido en el mundo de la medicina en las últimas décadas. El campo de la medicina, y especialmente el área de las intervenciones quirúrgicas, se ha visto beneficiado por avances tecnológicos tales como la robótica y el desarrollo de software, hasta el punto de poderse afirmar que el futuro de la medicina va de la mano de lo digital, haciendo mucho más eficaces, precisas y rápidas las prácticas médicas.

La cirugía robótica ha permitido darle mayor precisión a las operaciones delicadas, tales como las neurológicas y las cardíacas, y ha facilitado los procedimientos quirúrgicos de tal manera que se alcanza reducir considerablemente el tiempo de intervención y de ese modo también el de la recuperación del paciente.

En este trabajo de graduación se verá que un brazo robótico es una herramienta que permite compensar las deficiencias y limitaciones que pudiera tener el cirujano al momento de realizar intervenciones delicadas en las que se requiere de mayor precisión y certeza. Se trata de compatibilizar al cirujano con esta herramienta para mejorar los procedimientos quirúrgicos. El brazo robótico puede ayudar a la percepción, puede incluso memorizar una posición o hace la función de una regla o accede a un punto determinado con gran precisión. De manera que puede ser la diferencia en las intervenciones quirúrgicas que se realizan en el tratamiento de enfermedades neurológicas, tales como la epilepsia.

Este trabajo de graduación se centra en los elementos que hacen posible el movimiento del brazo robótico asistencial en cirugía estereotáctica del cerebro, específicamente sobre los aspectos de alimentación y control de los actuadores o servomotores que deben tenerse en cuenta para el diseño de esta importante herramienta que permitirá asistir ese tipo de intervenciones quirúrgicas que se realizan en Guatemala, gracias al apoyo de la Asociación Humana, que nace en este país para atender a los pacientes que padecen enfermedades neurológicas como la epilepsia, , y para ello es importante analizar elementos indispensables que nos ofrecen los actuadores.

El Robot ROSA o tecnología ROSA, como también se le conoce, es una solución de plataforma integrada que combina software y hardware, para la planificación y la navegación neuroquirúrgica. Posee un brazo robótico de alta tecnología, diseñado especialmente para asistir al neurocirujano, sin pretender sustituirlo, reduciendo significativamente el tiempo de la intervención quirúrgica, proveyendo una mayor precisión y garantizando la seguridad de la cirugía en todo momento. El sistema fue diseñado por Zimmer Biomet Robotics, Montpellier, Francia y actualmente ya se utiliza en varios hospitales de Europa, América del Norte, Asia y Australia. Este asistente robótico es una de las más recientes innovaciones en la atención de neurocirugías y ha llegado a ser una herramienta muy valiosa, ya que ofrece esta avanzada tecnología en las cirugías que se practican para el tratamiento de la epilepsia y otras afecciones neurológicas, de manera más segura, precisa y en mucho menor tiempo que la que tendría que realizarse sin la asistencia del robot ROSA. Este robot permite a los cirujanos:

- Con una técnica menos invasiva, colocar electrodos en el cerebro mucho más rápido que con los métodos tradicionales, con lo cual el paciente requerirá estar anestesiado por mucho menos tiempo. En algunos casos se alcanzan mejoras en el tiempo de hasta un ochenta por ciento. Esto no sólo beneficia al cirujano, quien puede desempeñarse de manera más efectiva, sino que beneficia al paciente, pues menos tiempo bajo anestesia trae como beneficio una recuperación más rápida y menos efectos secundarios.
- El mapeo cerebral que realiza la tecnología ROSA ayuda a los cirujanos a enfocarse en zonas del cerebro con mayor efectividad y precisión.
- No es necesario rasurar la cabeza del paciente para realizar la cirugía.
- Esta tecnología permite realizar una cirugía mínimamente invasiva, por lo que el paciente tendrá menos dolor posquirúrgico y, por lo tanto, se necesitará tomar menos medicamentos para el dolor.

[1]

Pero, ¿cómo funciona ROSA? El robot ROSA asiste en la navegación que el cirujano requiere realizar en el cerebro, tal y como un GPS asiste en la navegación de un vehículo automotor por las calles de una ciudad; así, ROSA mapea el cerebro y facilita la navegación en el mismo, proporcionando la precisión necesaria y asegurando los resultados esperados por el cirujano. A través de una consola y un brazo robótico para controlar el movimiento, se logran posicionar los diminutos instrumentos que son necesarios para la realización de una cirugía con un enfoque y una técnica mínimamente invasivos. El cerebro de la computadora de ROSA y el brazo robótico trabajan juntos, controlados por el cirujano, sin llegar a reemplazarlo. La tecnología ROSA es una tecnología robótica médica desarrollada por la empresa francesa Zimmer Biomet Robotics, y está siendo utilizada en más de 120 hospitales de Europa, América del Norte, Asia y Oriente Medio.

El dispositivo permite procedimientos estereotácticos, que son intervenciones quirúrgicas mínimamente invasivas que utilizan un sistema de localización tridimensional para ubicar pequeñas áreas u objetivos específicos dentro del cuerpo, en este caso, dentro del cerebro, para realizar sobre ellos algún trabajo o alguna acción, todo lo cual aumenta en gran medida la precisión y reduce considerablemente el tiempo de la cirugía. Es especialmente efectivo para:

- La estereoelectroencefalografía (SEEG, por sus siglas en inglés), que es la práctica médica de registrar señales a través de electrodos de profundidad, los cuales se implantan quirúrgicamente en el tejido cerebral. Se puede usar tanto para pacientes con epilepsia que requieren un tratamiento quirúrgico como para investigación médica, recopilando datos neuronales de regiones específicas del cerebro, como la corteza auditiva, para buscar reconstruir los estímulos que finalmente hacen que el paciente oiga. Esto fue introducido en el diagnóstico de la epilepsia en el Hospital S. Anne de París, en la segunda mitad del siglo XX. Los electrodos se colocan dentro de las áreas que se desea registrar para captar la actividad eléctrica durante las convulsiones, lo cual ayuda a definir con precisión los límites de la zona epileptogénica, que son las que deben reducirse y resecarse quirúrgicamente para lograr la eliminación de la fuente de la enfermedad.
- La estimulación cerebral profunda o DBS (por sus siglas en inglés), que consiste en la colocación de un neuroestimulador, el cual envía impulsos eléctricos a objetivos específicos en el cerebro, cambiando directamente la actividad cerebral de manera controlada.
- Procedimientos endoscópicos, resección de tumores cerebrales y cirugía.

[2]

VarioGuide es un sistema diseñado para realizar procedimientos estereotácticos guiados por imágenes, sin el empleo de marco, que tiene como el objetivo de evaluar con precisión el punto de interés que se desea tratar en el cerebro. Este sistema fue lanzado recientemente por BrainLAB AG, Feldkirchen, Alemania. El método que utiliza el sistema es el de abordar los puntos objetivo desde diferentes ángulos, evaluando su desviación a partir de los planos x, y y z. Las mediciones obtenidas con este sistema producen una desviación promedio del punto objetivo de alrededor de los 0.7 mm. Muchos pacientes portadores de lesiones intracraneales pueden ser diagnosticados mediante biopsia gracias al sistema VarioGuide, El rendimiento en el diagnóstico alcanza el 93%. El sistema consiste en:

- Un brazo Estereotáctico que guía al cirujano a través del procedimiento. Este brazo está unido a la pinza de cabeza o mesa de operaciones. Tiene un mango central y cuenta con tres articulaciones funcionales para el posicionamiento general sobre el cráneo.
- Un módulo de software para la integración con el sistema de Software BrainLAB Vector Vision.

Después de acostar al paciente y fijarle la cabeza de modo convencional, con la ayuda de un pinza, se realiza la navegación empleando el Vector Vision. Luego de realizar las trayectorias planeadas de forma anticipada y con la posibilidad de realizar una nueva trayectoria utilizando el puntero, se realiza la incisión focalizada en la piel, se accede al cerebro mediante el agujero de la fresa y la incisión. Se inicia entonces el procedimiento con la ayuda del software de VarioGuide y se posiciona el brazo estereotáctico, con la precisión deseada. Con la ayuda de los instrumentos calibrados y adaptados del sistema se coloca y fija la aguja para la biopsia. La profundidad de la aguja se muestra en el Monitor del VectorVision, así como la distancia al objetivo. Alcanzado el objetivo, se procede a la biopsia.

Algo que se tiene que tomar en cuenta con el mecanismo de VarioGide es que dada la naturaleza compleja del procedimiento descrito y la necesidad de imágenes preparatorias, parece ser que este procedimiento podría ser de bastante duración, lo que podría resultar en un aumento de los gastos médicos, así como del tiempo de recuperación del paciente [3].

Justificación

En Guatemala existen más de 350,000 pacientes con epilepsia y casi el doble padece de alguna enfermedad neurológica, incluyendo problemas de columna y espina bífida. De cada cien personas, se estima que dos padecen de epilepsia por lo que se trata de una enfermedad que requiere de todo un sistema de atención y tratamiento especializado.

Atendiendo a esa necesidad, en 2012 nace en Guatemala la Asociación HUMANA para dar respuesta y solución a las necesidades de estos pacientes y sus familias. Un grupo de profesionales y especialistas de esta rama de la medicina unen esfuerzos y realizan la primera cirugía de epilepsia en Guatemala, naciendo así el sueño de integrar a un grupo sólido de médicos y paramédicos especialmente entrenados para brindar una atención integral a los pacientes con epilepsia y ofrecerles la oportunidad de tener acceso a procedimientos quirúrgicos que presentan un alto grado de complejidad, no importando el nivel económico o social de los pacientes y sus familias.

Este tipo de cirugías son de alto costo, por lo que se hace un esfuerzo para que toda la población afectada por esta enfermedad pueda tener acceso a este tipo de procedimientos. La mayoría de los pacientes que presentan epilepsia durante la infancia se curan y luego de un prolongado tratamiento con medicamentos correctos, el paciente puede llegar a estar libre de alguna crisis, sin necesidad de más medicación. Otro grupo de pacientes llegan a controlar sus síntomas si toman el medicamento de forma constante. Sin embargo, alrededor del 30% de los pacientes que padecen esta enfermedad no van a lograr librarse de las crisis epilépticas a pesar de un régimen constante de medicamentos.

Para este grupo de pacientes existe la alternativa de la cirugía, la cual llega a ser en muchos casos curativa. Este Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional de la Asociación HUMANA busca ofrecer a todos los pacientes que lo necesiten, el diagnóstico y tratamiento adecuados para cada tipo de paciente, con el objetivo primordial de asegurarle una mejor calidad de vida y la mejor alternativa de tratamiento para cada caso.

En HUMANA se han preocupado por crear diferentes programas de apoyo para los pacientes y sus familiares. Programas que buscan el apoyo continuo a nivel personal y la

reinserción laboral y escolar. Se trabaja dinámicamente para sacar a los pacientes del estigma y del rezago social que han enfrentado, así como de la discriminación, de manera que todos los programas de tratamiento incluyen, además de la atención médica y quirúrgica, una atención psicológica e integral para que el paciente alcance un verdadero cambio de vida. [4]

Se realizaron visitas a HUMANA y se llevaron a cabo pláticas con sus miembros y doctores, quienes indicaron que para localizar con mayor precisión el área causante de las epilepsias en el cerebro, era necesario un procedimiento invasivo, por medio de inserciones en el cerebro con electrodos.

Dicho procedimiento, que actualmente se hace en su totalidad por manos de los médicos, sin el apoyo de alguna herramienta digital, tiene una alta duración, por lo que el procedimiento se vuelve agotador, tanto para los doctores como para el paciente y esto puede llevar a complicaciones. Es por lo anterior que se analizaron alternativas de apoyo, determinando que HUMANA requiere una nueva herramienta para facilitar el proceso de intervención quirúrgica, como el robot ROSA.

El robot ROSA no puede ser una opción por su alto costo y el sistema VarioGuide, a pesar de que realiza el procedimiento exitosamente, en su artículo científico no se aborda el tiempo de duración del procedimiento derivado de la utilización de la herramienta y la calibración de los parámetros.

HUMANA decidió contactar con la Universidad del Valle de Guatemala para dialogar y encontrar una solución más viable al problema de la prolongación del procedimiento [3]. Fue entonces que se decidió implementar un brazo robotizado, que asemeje a los instrumentos que actualmente los médicos utilizan, para facilitar el procedimiento quirúrgico, reduciendo así el tiempo de la operación, mediante la utilización de esta herramienta tecnológica, de manejo seguro y confiable.

A. Objetivo general

Controlar y alimentar los actuadores designados para el brazo robótico encargado de apoyar en el procedimiento de posicionamiento de inserción de electrodos.

B. Objetivos específicos

- Mantener retroalimentación del estado de los actuadores para detectar algún tipo de falla .
- Implementar un sistema de alarma contra cualquier falla de seguridad y mal funcionamiento del equipo para alertar al personal y suspender el uso de la herramienta.
- Evaluar el impacto del voltaje de alimentación de los actuadores, comparando los valores recomendados por el fabricante, con un voltaje más común dentro de los rangos establecidos para determinar el voltaje de alimentación de los actuadores.
- Mantener el movimiento de los actuadores preciso y suave para que sus operarios se sientan seguros y cómodos a la hora del procedimiento.

Este trabajo establecerá los parámetros y el dimensionamiento de los valores que deben manejarse en la implementación de los actuadores para alcanzar la optimización en el control y la alimentación de los mismos. Debe tomarse en cuenta que los actuadores serán los encargados de mantener un movimiento controlado de las articulaciones del robot de apoyo y asistencia médica, el cual busca permitir a los doctores de HUMANA movimientos precisos, suaves y seguros en los diversos procedimientos quirúrgicos relacionados con la colocación de electrodos para el tratamiento de epilepsia. Por las características que deben reunir los actuadores, el brazo robótico también podrá ser empleado en el tratamiento quirúrgico de otro tipo de enfermedades, tales como el Parkinson. Adicionalmente se prevé desarrollar un sistema de retroalimentación de los actuadores, el cual permitirá realizar, en todo momento, un análisis del estado de dichos actuadores, mediante la interpretación de las condiciones que presenten, contra los parámetros preestablecidos, con lo cual se podrá arrojar, de ser necesario, un estado de alerta que dé aviso oportuno de la situación a los médicos que se encuentren realizando el procedimiento quirúrgico.

Se buscará, a través del sistema de brazo robótico, simular el sistema de VarioGuide para que los miembros de HUMANA logren trabajar con una herramienta amigable, robusta y confiable, que sea capaz de dar aviso oportuno de cualquier situación anormal, para la prevención de fallas y, a la vez, permita una mayor precisión y exactitud de movimiento, eliminando lo más posible el error humano. Todo lo anterior, con el fin primordial de disminuir considerablemente la complejidad en la colocación de electrodos y de mismo modo lograr reducir el tiempo del procedimiento quirúrgico para evitar complicaciones y brindar mayor comodidad tanto al médico como al paciente. Asimismo, la disminución del tiempo de la intervención quirúrgica tiene efectos positivos en la recuperación del paciente.

A. Epilepsia

La epilepsia es una enfermedad del sistema nervioso central en la que se presenta una actividad eléctrica anormal en la corteza cerebral, la cual provoca a la persona una serie de ataques repentinos, tales como convulsiones violentas y pérdida del conocimiento. Afecta tanto a hombres como a mujeres de todas las razas, etnias y edades. Una persona que haya padecido al menos dos convulsiones no provocadas tendría que acudir a un médico especializado en busca de diagnóstico. Además de las pruebas neuropsicológicas de rutina necesarias para determinar las habilidades del pensamiento, la memoria y el habla, entre los procedimientos de diagnóstico se encuentran:

- Electroencefalograma (EEG). Estudio en el que se te fijan electrodos en el cuero cabelludo con una sustancia pastosa o con un gorro, con el fin de registrar la actividad eléctrica del cerebro.
- Electroencefalograma de alta densidad. En este estudio los electrodos se colocan más cercanos entre sí que en el electroencefalograma convencional, con una separación aproximada de medio centímetro. El electroencefalograma de alta densidad puede ayudar al médico a determinar con mayor precisión qué áreas del cerebro están afectadas por convulsiones.
- Exploración por tomografía computarizada (TC). En este estudio se emplean rayos X para obtener imágenes transversales del cerebro para detectar la presencia de anomalías en el cerebro que podrían causar convulsiones, como tumores, sangrado y quistes.
- Imágenes por resonancia magnética (RM). Se emplean ondas radioeléctricas e imanes para crear una vista detallada del cerebro.
- Resonancia magnética funcional (RMf). Estudio que mide los cambios en el flujo sanguíneo del cerebro que suceden cuando existe actividad específica, como cuando la

persona habla, come o se mueve, entre otras. Se emplea antes de la cirugía para identificar las ubicaciones exactas de funciones críticas, de modo que los cirujanos puedan evitar causar lesiones en esas áreas durante la operación.

- Tomografía por emisión de positrones (TEP). Exploración que utiliza una pequeña cantidad de material radioactivo en dosis baja que se inyecta en una vena para ayudar a visualizar áreas activas del cerebro y detectar anomalías.
- Tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT). Al igual que la anterior, utiliza una pequeña cantidad de material radioactivo en dosis baja que se inyecta en una vena para crear un mapa tridimensional detallado de la actividad del flujo sanguíneo en el cerebro durante las convulsiones.
- Pruebas neuropsicológicas. En estas pruebas los médicos evalúan al paciente. Los resultados de las pruebas ayudan a los médicos a determinar qué áreas del cerebro están afectadas.

Esta enfermedad puede controlarse con medicamentos, pero a veces, la cirugía es la solución para controlar las convulsiones en la mayoría de las personas con epilepsia. Aproximadamente el uno por ciento de la población con epilepsia puede presentar complicaciones que pueden causarle la muerte súbita inesperada, debido a trastornos cardíacos o respiratorios, o bien se presenta un estado epiléptico de actividad convulsiva continua, que dura más de cinco minutos o se tienen convulsiones recurrentes en las que no se recupera el conocimiento por completo, lo cual pone al paciente en riesgo de sufrir un daño cerebral permanente o la muerte [5].

B. Neurocirugía

La Neurocirugía es la rama de la medicina que trata las enfermedades del sistema nervioso mediante operaciones quirúrgicas. Su historia se remonta incluso a épocas prehistóricas, pues se han encontrado cráneos fósiles trepanados, incluso con muestras de supervivencia a la cirugía, en todos los continentes, especialmente en América. Pero es en la Grecia Antigua en donde ya se practicaba la trepanación, como tratamiento para la epilepsia y traumatismos de cráneo, así como se consolidan los primeros conocimientos anatómicos que luego llegan a culminar en el Renacimiento. La Neurocirugía, como una especialidad moderna tendrá algo más de cien años, gracias a Harvey Cushing, quien en 1904 presentó su trabajo “The Special Field of Neurosurgery” ante la Academia de Medicina de Cleveland. Actualmente, gracias al avance tecnológico de los últimos años, se ha logrado incorporar a esta rama de la medicina varias técnicas que le han dado mayor potencial en la investigación y en el tratamiento de enfermedades del sistema nervioso central, tales como la epilepsia [6].

C. AX-12A

Los AX-12A es un actuador inteligente comúnmente usado en aplicaciones robóticas, en el mercado es uno de los actuadores más avanzados en su rango de precios. El actuador AX-12A tiene incorporado un sistema de control y memoria que permite obtener datos internos como el voltaje, la velocidad, temperatura, posición y corriente. La posición y la velocidad de sus movimientos puede ser controlada por medio de una resolución de 1024 pasos.



Figura 1: Actuador AX-12A

Este actuador tiene dos estados, uno de ellos es el de vueltas continua, en este estado el actuador se comporta como un motor DC con una caja de reducción, en el otro modo se comporta al igual que un servomotor de 300° de vuelta. Otras de las funciones de este actuador es la capacidad de elegir el valor de distintos parámetros máximos, tales como la velocidad, la corriente, la temperatura, el voltaje, el torque, etc. En dado caso que se excedan o no se cumplan las condiciones internas seleccionadas, el actuador tiene la habilidad de reaccionar y activar un led en forma de alerta.

Una de las grandes maravillas de este tipo de actuadores es su forma de comunicación la cual utiliza el protocolo de comunicación serial asincrónica Half duplex. Cada actuador mantiene un ID, el cual lo identifica y es necesario especificar el ID para controlar que actuador realizara la acción. Es posible controlar y conectar más de un actuador para mantener únicamente una señal de control, esto es gracias al método de la cadena daisy, la cadena de daisy es una forma de interconexión de dispositivos en serie, lo cual permite que en una red de actuadores AX-12A se comparta la alimentación y la señal de comunicación, es por esto la importancia de el ID de los actuadores. [7].

1. AX-12A-Servo-Library

Esta librería fue fundamental para el control apropiado de los servos, esta fue desarrollada específicamente para utilizar con Arduino. Se encontró en GitHub y es administrada por ThingType.

D. Comunicación serial asincrónica Half Duplex

En los sistemas integrados existen distintos tipos de módulos, de los más importante y frecuentemente utilizados es el módulo de comunicación conocido como puerto serial. El puerto serial consta de dos conexiones, uno para transmitir y uno para recibir la información (Tx y Rx). Se le llama puerto serial debido a su función de serializar los datos en forma de una red binaria con un protocolo específico. Existen distintos tipos de comunicación serial, la comunicación sincrónica y la asincrónica. [8]

La comunicación asincrónica es aquella que se efectúa entre dos dispositivos que no comparten la misma frecuencia de pulsos para su funcionamiento interno. Half Duplex es un tipo de comunicación asincrónica la cual funciona en solo una vía, es decir, un dispositivo no puede mandar y recibir señales al mismo tiempo en la comunicación, es necesario primero mandar y luego recibir las señales o viceversa. [9]

A. Disponibilidad y selección de actuadores

Para recrear el sistema VarioGuide se pensó en un brazo mecanizado que tendría la misma cantidad de juntas y grados de libertad, que el sistema original, para poder simular las posiciones y el funcionamiento con mayor exactitud al mecanismo VarioGuide. Al inicio se disponía únicamente de los actuadores Dynamixel y en particular se pensó en los actuadores AX-12A por su peso de 54.3g y resolución de 0.29° [10]. Un peso liviano en los actuadores resulta conveniente para disminuir el torque necesario para mover las juntas. La selección de los actuadores debe ser tal que el movimiento rotacional pueda realizarse en intervalos pequeños que permitan posicionar el brazo en el punto exacto en donde debe realizarse la inserción de los electrodos en el cerebro. Esto se debe a que el software utilizado por HUMANA para la inserción de electrodos permite asegurar la posición de las juntas si la orientación de cada junta se encuentra en un rango menor a 0.3° medido a partir de la posición indicada por el sistema. Una resolución del actuador mayor a 0.3° impediría, en definitiva, una inserción segura.

Posteriormente, como se verá en el documento, se determinó la necesidad de complementar los actuadores AX-12A con los actuadores Dynamixel MX-106. Los actuadores MX-106 tiene un peso de 153g, 2.82 veces mayor al AX-12A, una resolución de 0.088° , con lo que se obtiene 3.3 veces más capacidad de resolución que con el AX-12A, y se alcanza un torque máximo de 8.4 Nm a 12V, a comparación del actuador AX-12A que posee un torque de 1.5 Nm en las mismas condiciones de alimentación [11] [10].

B. Disposición de actuadores

El diseño mecánico y modelado de este brazo robótico fue parte del trabajo de graduación del estudiante Didier Salazar, por lo tanto se hablará a grandes rasgos de estas características y se tomará como tema principal la disposición de los actuadores en cada uno de los prototipos.

1. Prototipo 1

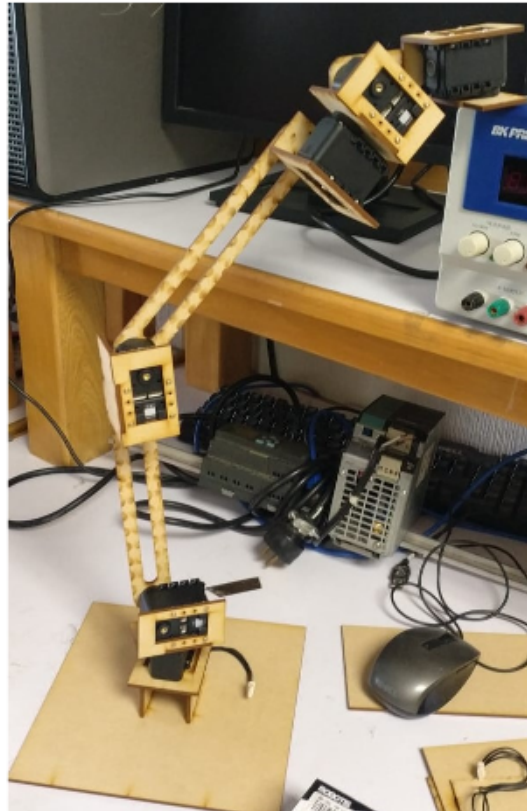


Figura 2: Primer prototipo con 6 actuadores AX12-A

Inicialmente se dispuso de 6 actuadores AX-12A proporcionados por la Universidad del Valle de Guatemala, con los cuales se pretendió simular el comportamiento del mecanismo VarioGuide, sin tomar en cuenta las últimas dos juntas. Este diseño fue descartado debido a que por su falta de simetría presentaba inestabilidad.

2. Prototipo 2



Figura 3: Segundo prototipo con 6 actuadores AX12-A

Nuevamente se tuvo limitación en el número de actuadores, pues únicamente se disponía de 6 dispositivos AX-12A. Se realizó una nueva iteración implementando mayor simetría con el objetivo de crear un prototipo más estable. Los primeros tres actuadores, iniciando desde la base, no lograban soportar la carga en su totalidad, activando así las alertas internas de los actuadores AX-12A y bloqueando su funcionamiento por seguridad. Debido a la incapacidad de soportar las cargas generadas, faltando 2 actuadores que supondría aún más peso, se decidió sustituir los actuadores mencionados por unos más robustos como los MX-106.

3. Prototipo 3

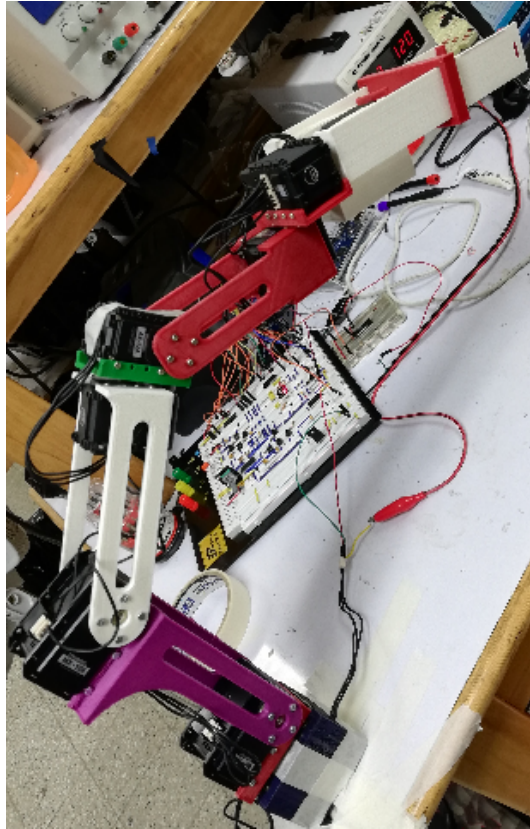


Figura 4: Tercer prototipo con 5 actuadores AX-12A y 3 actuadores MX-106

En el tercer prototipo se decidió cambiar el material de MDF a PLA con la finalidad de tener mayor rigidez y se seleccionó una nueva distribución y colocación de los actuadores MX-106. Aunque representa una mejora en la disminución de las vibraciones internas del brazo, éstas aún se presentan en el mecanismo.

C. Selección de microcontrolador

La manera de poder controlar a los actuadores AX-12A y MX-106 es por medio de un microcontrolador. Dichos actuadores pertenecen a la familia Dynamixel y esta familia, a su vez, pertenece a la marca Robotis. Robotis posee distintos tipos de placas para controlar sus actuadores, las placas de Robotis, disponibles y compatibles para ambos actuadores son las siguientes: CM-5, CM-510, CM530, CM700, OpenCM9.04(+ OpenCM485 Expansion Board), OpenCR [12]. Sin embargo, ambos actuadores tienen la flexibilidad de poder ser controlados con microcontroladores ajenos a la marca Robotis, como lo son los Arduinos o los PICs. Inicialmente se consideró utilizar el PIC16F887 ya que permite un manejo óptimo de sus recursos, pero la librería disponible únicamente permite la escritura hacia los actuadores y parte de los objetivos de este trabajo es tener retroalimentación de las condiciones internas de los actuadores, por lo cual, la lectura es indispensable, así que dicho microcontrolador se

descartó. Finalmente, se eligió la placa Arduino Mega por la cantidad de GPIO que presenta, por la existencia de múltiples librerías que permiten tanto la lectura como la escritura a los actuadores y adicionalmente se seleccionó debido a la disponibilidad de dichas placas en el mercado.

1. Interconexión

Los actuadores AX-12A y MX-106, como puede verse en las figuras 5 y 6, cuentan con 3 pines de entrada. El intervalo de alimentación de los actuadores AX-12A y MX-106 es de 9-12V y de 10-14.8V respectivamente, por lo que al compartir fuente de alimentación resulta en un intervalo de 10-12V. Las entradas de alimentación de los actuadores pueden ser compartidas a las entradas de alimentación mostradas en la Figura 7 que corresponden al Arduino. Lo anterior es debido a que la alimentación recomendada para la placa Arduino Mega es de 7-12V [13]. El pin de entrada y salida de datos en los actuadores se conectó a la salida del integrado descrito en la Figura 8, más adelante se hablara más al respecto de la necesidad de dicho integrado.

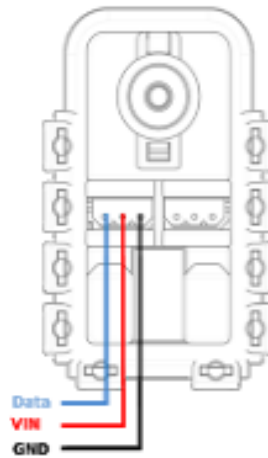


Figura 5: Entradas del actuador AX-12A [14]

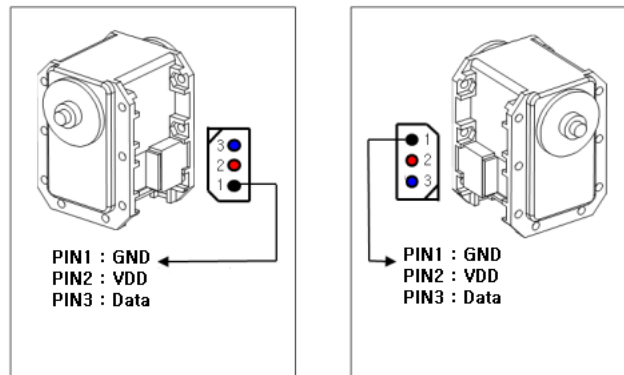


Figura 6: Entradas del actuador MX-106 [15]

En la Figura 7, además de mostrar los pines de alimentación mencionados con anterioridad, se muestran los pines que se utilizaron para la transmisión y recepción de datos, Tx y Rx. Es necesaria la utilización de un pin de control (Data Control) para lograr establecer intervalos estables para la recepción y transmisión de datos por el protocolo de comunicación serial asincrónica Half Duplex.

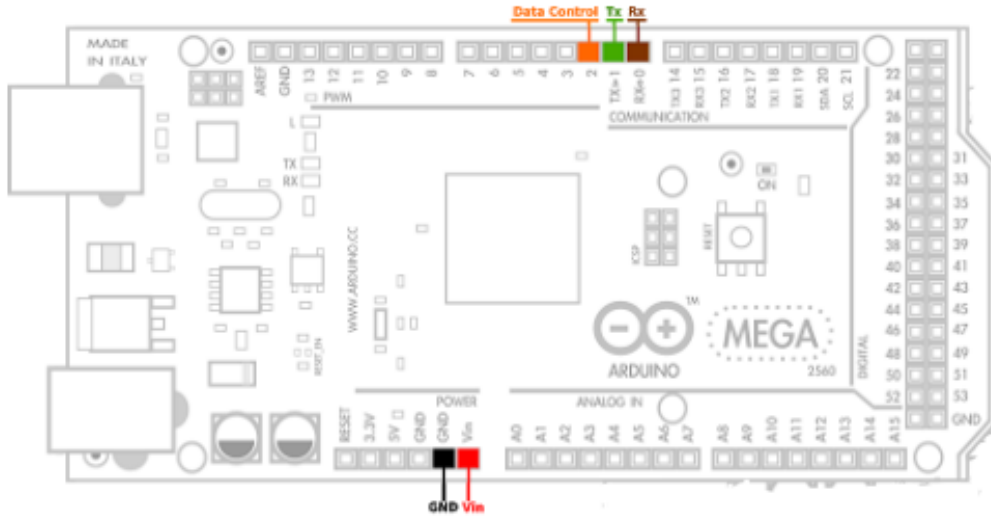


Figura 7: Entradas de pines de un Arduino Mega [14]

La comunicación serial asincrónica Half Duplex no permite que se de al mismo tiempo la escritura y lectura entre el emisor y el receptor. Para lograrlo es necesario establecer periodos donde se intercalan la emisión y recepción de la información. Estos intervalos pueden ser generados por el integrado 74LS241, que se conforma por una serie de buffer tri-estado, los cuales son controlados por un pin de control que regula el flujo de los datos, estableciendo periodos alternos de lectura y escritura. En la Figura 8 se muestran los pines Tx y Rx, los cuales están interconectados con los pines Tx y Rx, respectivamente, detallados en la Figura 7; de igual manera el pin de control detallado en el párrafo anterior se interconecta con el pin Data Control del integrado 74LS241. Con las ventanas establecidas de emisión y recepción de datos, el pin de datos de la Figura 8 se puede conectar con su homólogo en la Figura 5.

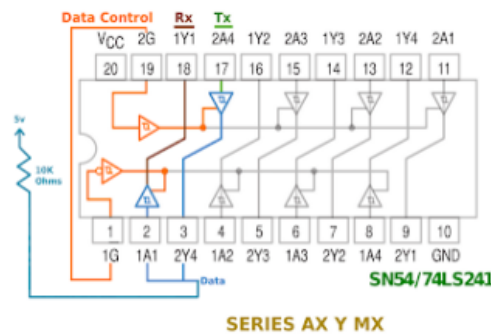


Figura 8: Integrado de buffer tri-estado [14]

2. Selección de librería

Al disponer únicamente de los actuadores AX-12A en el prototipo 1 y 2, se buscó una librería especial para dichos actuadores. La librería encontrada fue AX-12A-servo-library la cual fue desarrollada por ThingType [16], actualmente dicha organización eliminó su contenido de GitHub y fue subido por el usuario jumejume1 en la misma plataforma [17]. La librería anteriormente mencionada no dispone de una documentación sobre sus instrucciones, pero dispone de los ejemplos necesarios para comprender su estructura. Con el prototipo 3 fue necesario el cambio de tres actuadores AX-12A por los MX-106, independientemente de este cambio, la librería AX-12A-servo-library es compatible con ambos actuadores. Se encontró otra librería genérica, compatible con múltiples actuadores, llamada Dynamixel-Serial desarrollada por Savage Electronics, esta a diferencia de AX-12A-servo-library posee documentación, lo cual facilitó su comprensión [14].

Ambas librerías encontradas permiten la lectura y escritura de los actuadores, por lo tanto, se dispuso a comparar ambas mediante el desarrollo de un programa descrito en la Figura 9. El análisis de los datos obtenidos se exportó a excel de manera automática utilizando PLX-DAQ [18]. En las pruebas realizadas se alimentó a los actuadores AX-12A y el MX-106 con el voltaje óptimo según los fabricantes de 11.1V y 12V respectivamente [7].

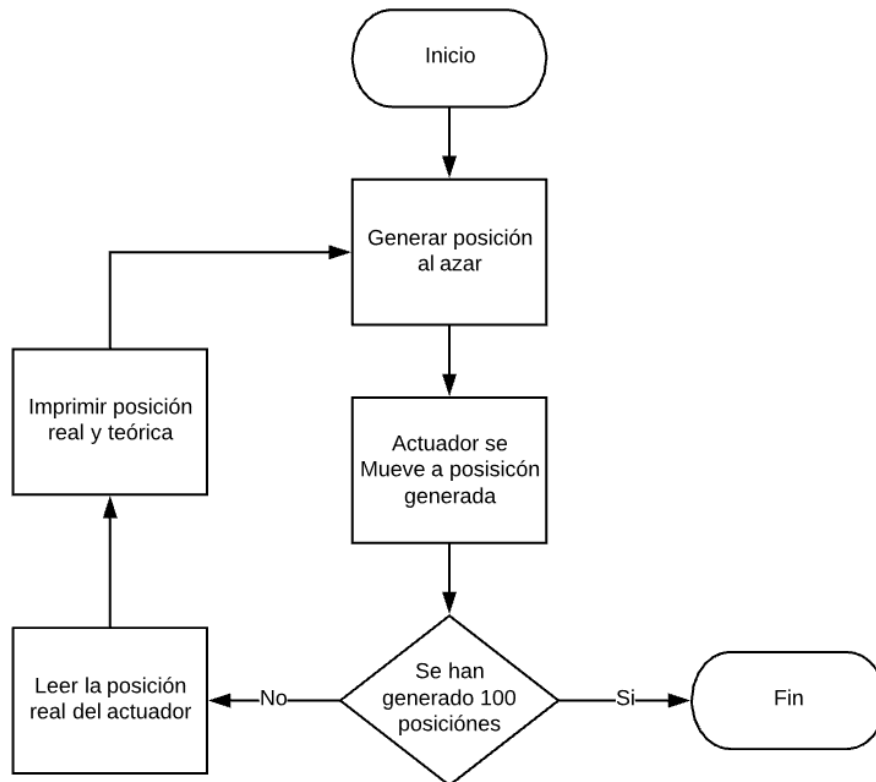


Figura 9: Diagrama de flujo para pruebas de librerías de estabilidad en escritura y lectura

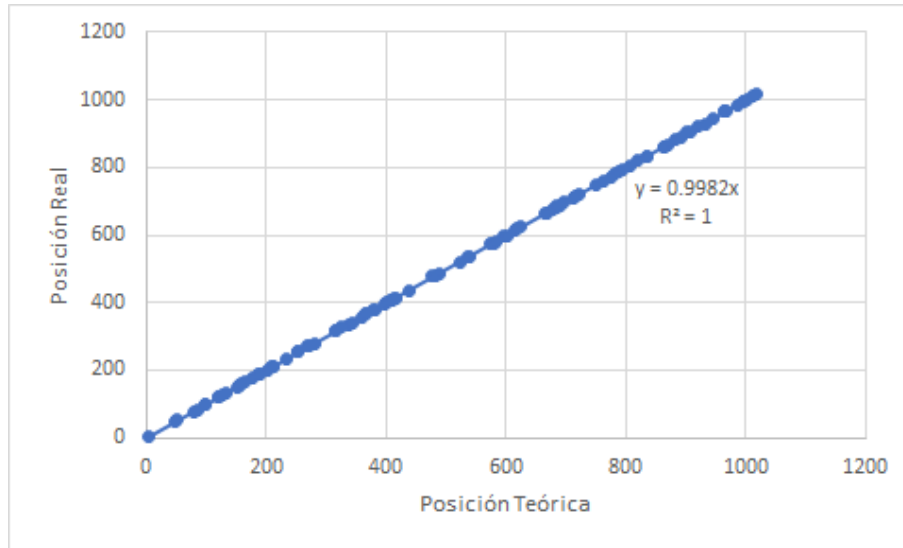


Figura 10: Gráfica de correlación posición teórica y real de actuador AX-12A utilizando la librería DynamixelLibrary

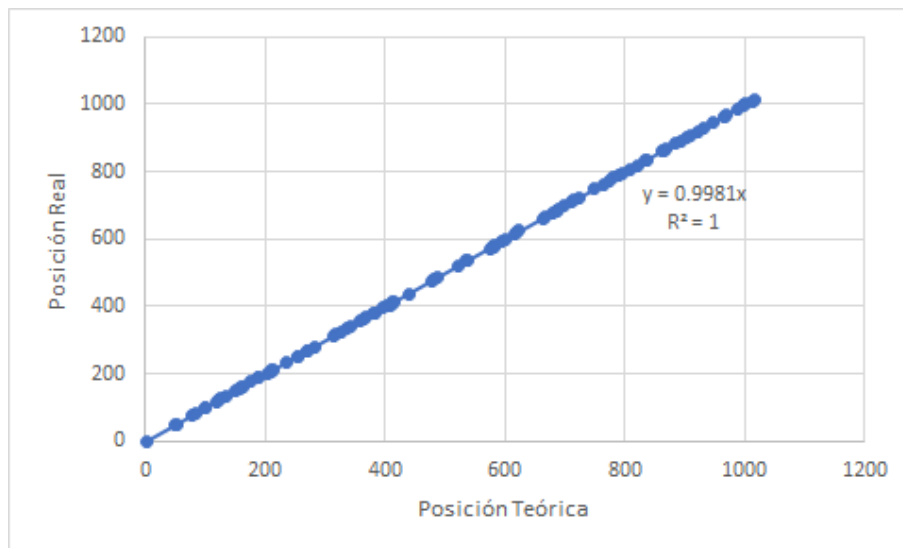


Figura 11: Gráfica de correlación posición teórica y real de actuador AX-12A utilizando la librería AX-12A-servo-library

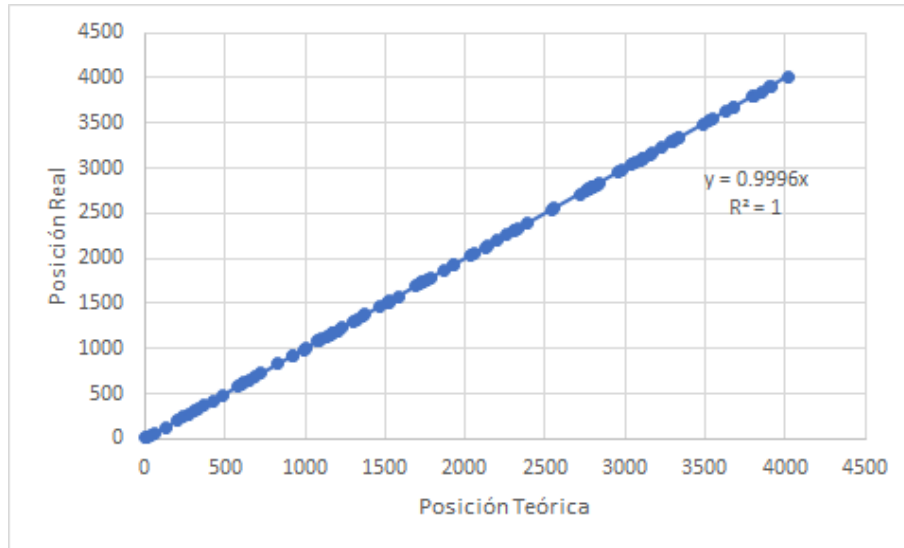


Figura 12: Gráfica de correlación posición teórica y real de actuador MX-106 utilizando la librería DynamixelLibrary

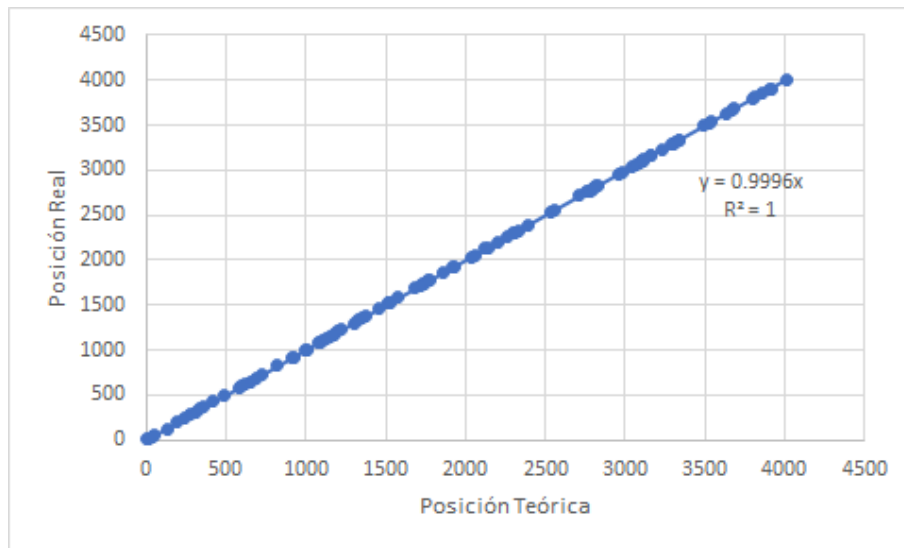


Figura 13: Gráfica de correlación posición teórica y real de actuador MX-106 utilizando la librería AX-12A-servo-library

Con los resultados obtenidos, se realizó una correlación entre la posición real y teórica de los actuadores, encontrando un comportamiento lineal observable en las figuras 10, 11, 12 y 13. Se puede determinar que la posición real del actuador presenta una variación máxima de 0.19% respecto a la posición teórica, lo cual se considera no significativo; adicionalmente no hubo errores en la comunicación por parte de ninguna de las dos librerías, por lo tanto el factor que se tomó en cuenta en la selección es la documentación, así que la librería que se utilizó para control de los actuadores es DynamixelLibrary.

Prueba de actuadores

Entre las variables que son determinantes para alcanzar el funcionamiento óptimo de los Actuadores AX-12A Y MX-106 se encuentran: el voltaje de alimentación y la velocidad del movimiento de rotación. Con el objetivo de determinar los valores que deben tener las variables anteriores para lograr que cada uno de los actuadores funcione de manera conveniente, se realizaron una serie de pruebas, utilizando para ello diversos valores dentro de un rango de operación determinado por las características de operación recomendadas, de acuerdo a la información contenida en el Data Sheet de cada uno de los actuadores.

A. Planteamiento de prueba

El actuador AX-12A opera dentro del rango de los 9 a los 12 Voltios, mientras que el actuador MX-106 opera en el rango de los 10 a los 14.8 Voltios. Debido a lo anterior, se tomó la decisión de realizar pruebas en los siguientes valores de voltaje: 10, 11.1 y 12 V. Se seleccionó 11.1V en vez de 11V ya que el voltaje recomendado para el actuador AX-12A es 11.1V.

Para establecer los valores de velocidad de prueba se tomó en cuenta que la velocidad para cada actuador se determina por la combinación de 8 bits de su registro de velocidad angular, lo cual permite realizar diferentes combinaciones de unos y ceros, resultando 1,024 diferentes valores de velocidad. Para las pruebas se eligieron los valores intermedios dentro de tres intervalos establecidos dentro del rango total de posibles velocidades (0-1023). De esta manera, las velocidades de prueba para ambos actuadores fueron: 170, 511 y 852.

Entre las características de operación establecidas en el Data Sheet del Actuador AX-12A, se tiene que el Torque Estacionario Máximo (TEM) o Torque Instantáneo Máximo (TIM) es de 1.5 Nm. Asimismo, para el actuador MX-106 su TEM o TIM corresponde a un

valor de 8.4 Nm. Se recomienda que en la operación del actuador AX-12A para aplicaciones de movimiento fino (intervenciones quirúrgicas, por ejemplo) el torque no sobrepase el valor equivalente a 1/5 de dicho TEM o TIM.

Tomando en cuenta la recomendación dada al respecto de no sobrepasar 1/5 del TEM o TIM, se decidió dividir ese valor en 5 tramos: 0-1.68 Nm, 1.68-3.36 Nm, 3.36-5.04 Nm, 5.04-6.72 Nm y 6.72-8.4 Nm para el actuador MX-106. Para el actuador AX-12A los intervalos fueron: 0-0.3 Nm, 0.3-0.6 Nm, 0.6-0.9 Nm, 0.9-1.2 Nm y 1.2-1.5 Nm.

La prueba que se eligió consistió en someter a cada uno de los actuadores a un desplazamiento angular de 45° empezando en el eje horizontal (0°) y terminando en la misma horizontal. Por medio de una estructura a la cual se incorporan los actuadores. Se seleccionaron 5 distintos pesos para cada actuador, de manera que se generaron cada uno de los intervalos de torque estacionario mencionados en el párrafo anterior. Cada peso seleccionado se probó con las tres velocidades elegidas (170, 511 y 852). Asimismo, cada velocidad se sometió a los tres distintas fuentes de alimentación (10V, 11.1V y 12V).

1. Estructura de prueba para actuadores

El material que se seleccionó para la estructura de las pruebas fue playwood, esto se debió a que era imposible la impresión de eslabones de PLA mayores a 23cm. Asimismo, las características del playwood, como material, son rígidas lo cual evita deformaciones dadas por flexión. Al momento de analizar el torque, no se contaba con el peso del brazo, por lo que se midió y pesó la plancha de playwood, encontrando así la densidad del material, siendo esta de $524.797kg/m^3$. Conociendo la densidad del material se encontró el largo requerido de la estructura. A continuación se detalla el análisis realizado.

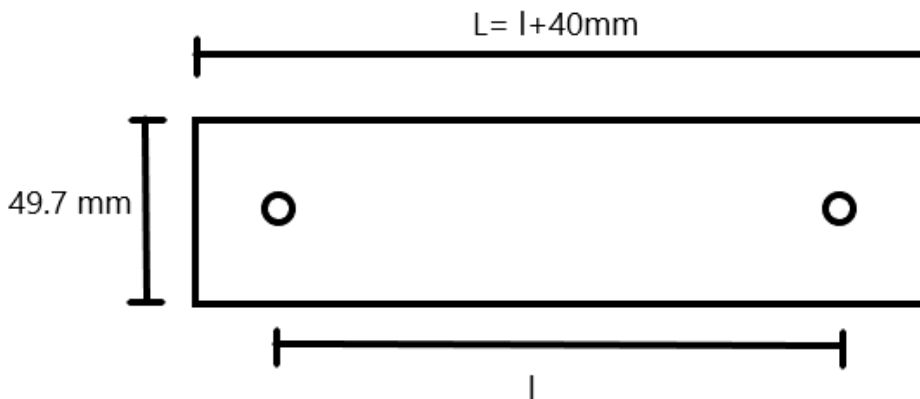


Figura 14: Diseño base para estructura de pruebas de actuadores MX-106 y AX-12A

Evaluando el torque estacionario en su posición más crítica se posee la siguiente ecuación. Tomar en cuenta que se necesitan dos brazos iguales para cada estructura de prueba.

$$\tau - 2(m_{\text{brazo}}g\frac{l}{2}) - m_{\text{lastre}}gl = 0 \quad (1)$$

Siendo τ el torque suministrado por el actuador, m_{brazo} la masa del brazo, g la gravedad, m_{lastre} la masa del lastre que se añadió al brazo y l es el descrito en la Figura 14.

$$\tau - m_{brazo}gl - m_{lastre}gl = 0 \quad (2)$$

$$\tau - (V_{brazo}\rho_{playwood})gl - m_{lastre}gl = 0 \quad (3)$$

$$\tau - (0.0497m \cdot 0.0054m \cdot (l + 0.04m) \cdot 524.797 \frac{kg}{m^3})gl - m_{lastre}gl = 0 \quad (4)$$

$$\tau - (0.1408 \frac{kg}{m} \cdot (l + 0.04m))9.8 \frac{m}{s^2}l - m_{lastre}9.8 \frac{m}{s^2}l = 0 \quad (5)$$

Con los valores de τ de 8.4 Nm y m_{lastre} de 2.5 kg, se despeja l del actuador MX-106 y con los valores de τ de 1.5 Nm y m_{lastre} de 1 Kg, se despeja l del actuador AX-12A

$$l_{MX} = 0.3358m \quad (6)$$

$$l_{AX} = 0.1491m \quad (7)$$

Para establecer los valores de peso a probar con cada actuador se tomó en cuenta la m_{lastre} en la ecuación 5. Se dividió el peso máximo seleccionado para cada actuador entre cinco para obtener cinco intervalos de valores de peso en cada caso. Finalmente se emplearon los valores intermedios de cada intervalo. Esto es:

- Para el actuador AX-12A, en el intervalo de 0 a 1000 gramos: 100, 300, 500, 700 y 900 g.
- Para el actuador MX-106, en el intervalo de 0 a 2500 gramos: 250, 750, 1,250, 1,750 y 2,250 g.

Con los pesos seleccionados se prosiguió con las pruebas de cada actuador, iniciando con el actuador MX-106. Para evitar posibles riesgos de sobrepasar el TIM se estableció un orden ascendente en la prueba de pesos. Se observó que el actuador MX-106 llegó a sus límites cuando se realizó la prueba con el peso de 1250 g, ya que las alarmas de emergencia internas del actuador se activaron. Por esa razón se decidió suspender las pruebas con los pesos subsiguientes. En el caso del actuador AX-12A se decidió cambiar los pesos de prueba a: 100, 200 y 300 g, con el objetivo de no poner en riesgo el funcionamiento del actuador.

B. Resultados de las pruebas

Como resultado de las pruebas se obtuvieron figuras parecidas a la Figura 15, la cual usaremos para explicar los datos recopilados. En los tramos de subida y bajada se realizó una regresión lineal para ver su tendencia, el valor RMS que se obtuvo en cada prueba fue cercana a 0 lo que indica que se aproxima en su mayoría a una recta. Los resultados obtenidos de RMS pueden ser encontrados en los cuadros 3 y 6 en la sección de anexos. Que estas secciones presenten un comportamiento lineal indica que la velocidad angular en estos tramos es constante, por lo tanto el torque se mantiene constante.

Otros datos obtenidos son los promedios inicial, el superior estable y el final estable (PI, PS, PF). Los resultados obtenidos de todas las pruebas realizadas pueden observarse en los cuadros 4 y 7 de la sección de anexos.

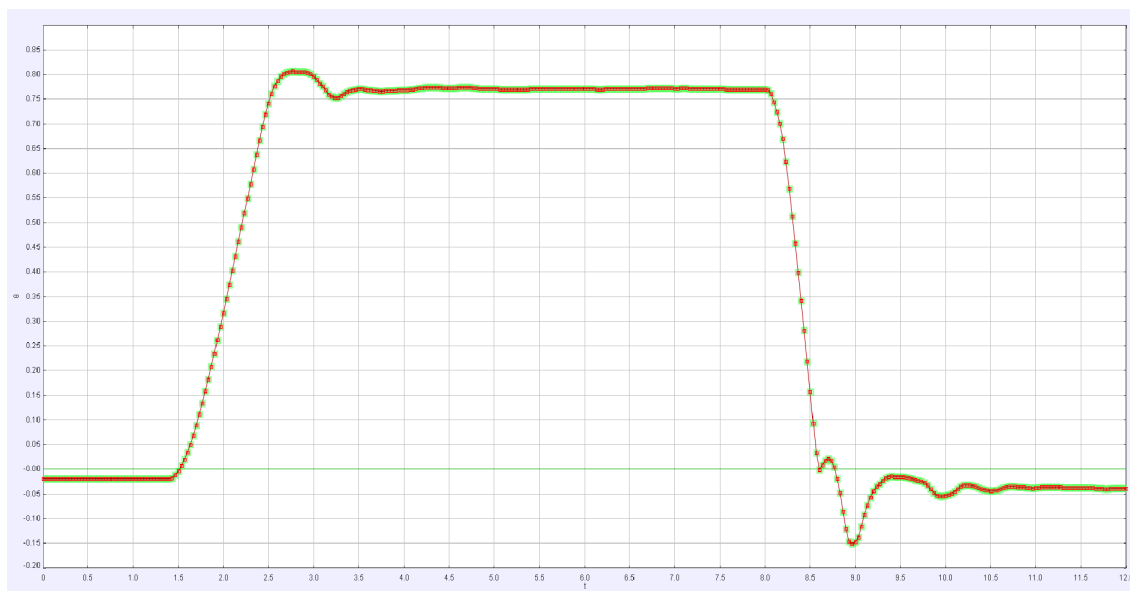


Figura 15: Comportamiento de desplazamiento angular respecto al tiempo de la prueba 750g, velocidad: 852 y 12V

Por último, se analizó el comportamiento de oscilación en la sección final de subida y bajada, el cual representa movimientos bruscos ocasionados por un cambio en el torque para lograr vencer la inercia del movimiento angular y lograr estabilizar la posición deseada. Para poder analizar la magnitud del overshoot (sobre impulso) se recopilaron los puntos máximos de desviación en subida y bajada (PDMS, PDMB), enlistados en los cuadros 5 y 8, comparándolos luego con los valores de PS y PF respectivamente, además de una comparación entre el PI y PF ya que el valor debería ser el mismo. Los resultados de estas comparaciones se enlistan en los cuadros 1 y 2. Este análisis fue importante porque ayuda a visualizar en qué condiciones se presentaron perturbaciones más fuertes, ya que a mayor diferencia, mayor overshoot.

Masa (g)	Velocidad (0-1023)	Voltaje (V)	PS/PDMS	PF/PDMB	PI/PF
250	170	10	0.005014	0.003459	0.002637
		11.1	0.009098	0.001443	0.002523
		12	0.010833	0.003937	0.022547
	511	10	0.005657	0.020414	0.007557
		11.1	0.020968	0.025146	0.021716
		12	0.036786	0.027558	0.028984
	852	10	0.006606	0.014767	0.028953
		11.1	0.012584	0.029807	0.036793
		12	0.039452	0.027208	0.022196
750	170	10	0.011674	0.011404	0.023539
		11.1	0.018254	0.014208	0.000980
		12	0.015506	0.013975	0.019595
	511	10	0.011434	0.048049	0.073401
		11.1	0.025870	0.097376	0.005917
		12	0.033780	0.108703	0.011656
	852	10	0.010745	0.080966	0.049740
		11.1	0.016404	0.077823	0.039388
		12	0.035049	0.112798	0.019776
1250	170	11.1	0.007737	0.046905	0.019703
		12	0.008950	0.035766	0.000103

Cuadro 1: Diferencia entre valores promedio y diferencia entre puntos máximos de desviación en las pruebas del actuador MX-106. Diferencia entre promedio superior y el punto máximo de desviación en subida (PS/PDMS), diferencia entre promedio final y el punto máximo de desviación en bajada (PF/PDMB) y diferencia entre el promedio inicial y final (PI/PF)

Masa (g)	Velocidad (0-1023)	Voltaje (V)	PS/PDMS	PF/PDMB	PI/PF
100	170	10	0.011308	0.011927	0.026424
		11.1	0.017108	0.015572	0.018952
		12	0.023283	0.015548	0.011306
	511	10	0.091633	0.177074	0.000171
		11.1	0.119728	0.207455	0.000049
		12	0.139983	0.236282	0.003475
	852	10	0.095566	0.181304	0.003854
		11.1	0.116845	0.209748	0.003618
		12	0.137986	0.237906	0.003772
200	170	10	0.025714	0.012595	0.029241
		11.1	0.037434	0.011381	0.018011
		12	0.041107	0.011160	0.014919
	511	10	0.077162	0.242499	0.000000
		11.1	0.102658	0.262096	0.007045
		12	0.116881	0.227166	0.005096
	852	10	0.076836	0.241067	0.011792
		11.1	0.099710	0.271481	0.006431
		12	0.117153	0.217192	0.002956
300	170	10	0.038273	0.017295	0.036981
		11.1	0.027242	0.010882	0.021556
		12	0.029440	0.006968	0.007403
	511	10	0.040111	0.243571	0.030517
		11.1	0.073809	0.217410	0.028523
		12	0.096658	0.256748	0.007317
	852	10	0.046141	0.258336	0.014379
		11.1	0.076107	0.223422	0.033401
		12	0.092034	0.258685	0.007197

Cuadro 2: Diferencia entre valores promedio y diferencia entre puntos máximos de desviación en las pruebas del actuador AX-12A. Diferencia entre promedio superior y el punto máximo de desviación en subida (PS/PDMS), diferencia entre promedio final y el punto máximo de desviación en bajada (PF/PDMB) y diferencia entre el promedio inicial y final (PI/PF)

El sistema que se utilizó para obtener los datos en los cuadros 1 y 2 fue el software Tracker, un software el que permite seguir puntos de referencia, establecer centros y ejes sobre un archivo de vídeo, logrando obtener distintos tipos de correlaciones. Uno de los resultados de los cuadros 1 y 2, que se logró definir, es el comportamiento de la diferencia PS/PDMS en el que manteniendo el peso y la velocidad constante, se aprecia un incremento del PS/PDMS a medida que aumenta el valor del voltaje. Este efecto es visible en las figuras 16 y 17. Este comportamiento se repite para la mayoría de pesos y velocidades, lo cual se observa en las figuras 21-34 en la sección de anexos, exceptuando los casos correspondientes a las figuras 23 y 32.

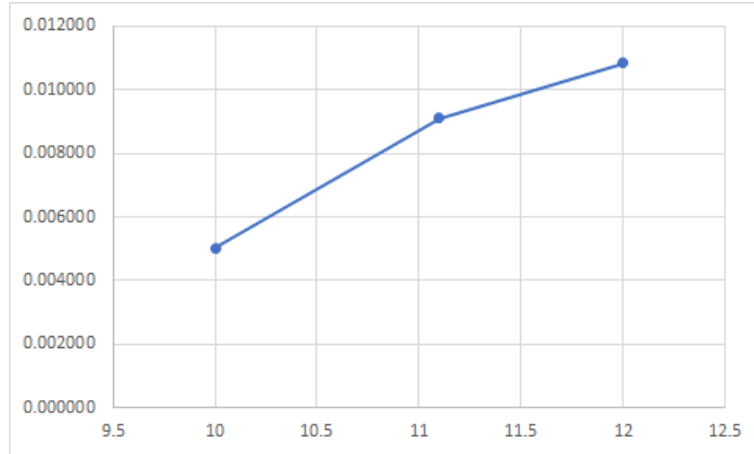


Figura 16: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 250g y velocidad de 170

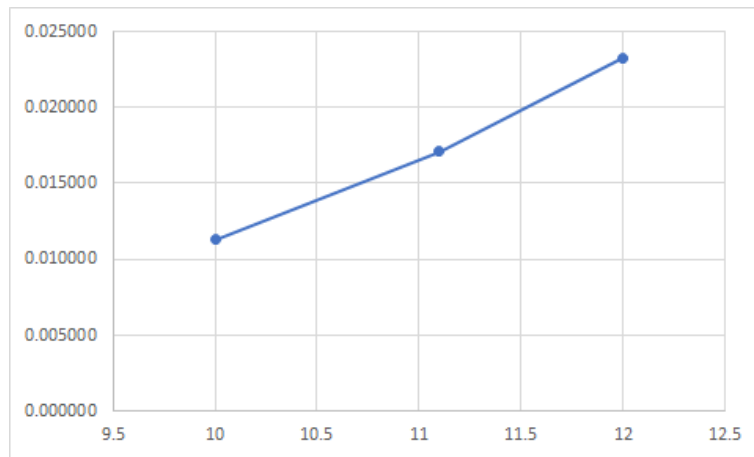


Figura 17: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 100g y velocidad de 170

Además, los valores mínimos de PS/PDMS en los cuadros 1 y 2 se presentan en las condiciones de peso, velocidad y voltaje mínimos (250g-170-10V para el MX-106 y 100g-170-10V para el AX-12A). El valor mínimo de PF/PDMS en el Cuadro 1 pertenece a la prueba con variables de 300g-170-12V del actuador MX-106 y el valor mínimo de PF/PDMS en el Cuadro 2 pertenece a la prueba con variables de 250g-170-11.1V del actuador AX-12A. En ambos casos, el valor mínimo de PF/PDMS ocurrió a la velocidad más baja (170). Tomando en cuenta lo anterior, se decidió utilizar valores menores a 170 para la velocidad y, para el voltaje, una alimentación de 10V.

No se pudo obtener otros resultados concluyentes ya que en el caso de PF/PDMS el valor corresponde al tramo de bajada, en donde los movimientos fueron más rápidos y, debido a que el software Tracker no es un software avanzado, este tuvo problemas para el seguimiento del punto de referencia y en muchas ocasiones ese punto de referencia cambiaba de lugar en el tramo final del movimiento.

Alarmas y feedback de actuadores

Con el sistema descrito en el **Capítulo VII**, es posible detectar oportunamente las variables de posición, temperatura y voltaje de alimentación internas de los actuadores. Con el conocimiento de estas variables se pensó en la implementación de un sistema de alarmas para el uso del brazo robótico.

A. Posición

En un caso de uso, es posible que en media operación el doctor o los asistentes golpeen físicamente el brazo de asistencia quirúrgica que ponga en riesgo al paciente. Por esta razón surgió la necesidad de implementar un sistemas de alerta que active una alarma visual y auditiva al momento de un cambio en la posición deseada. Este sistema de alerta fue implementado mediante un código en Arduino Figura 18. La alarma visual consiste en la intermitencia de un LED y la alarma auditiva consiste en un buzzer (zumbador).

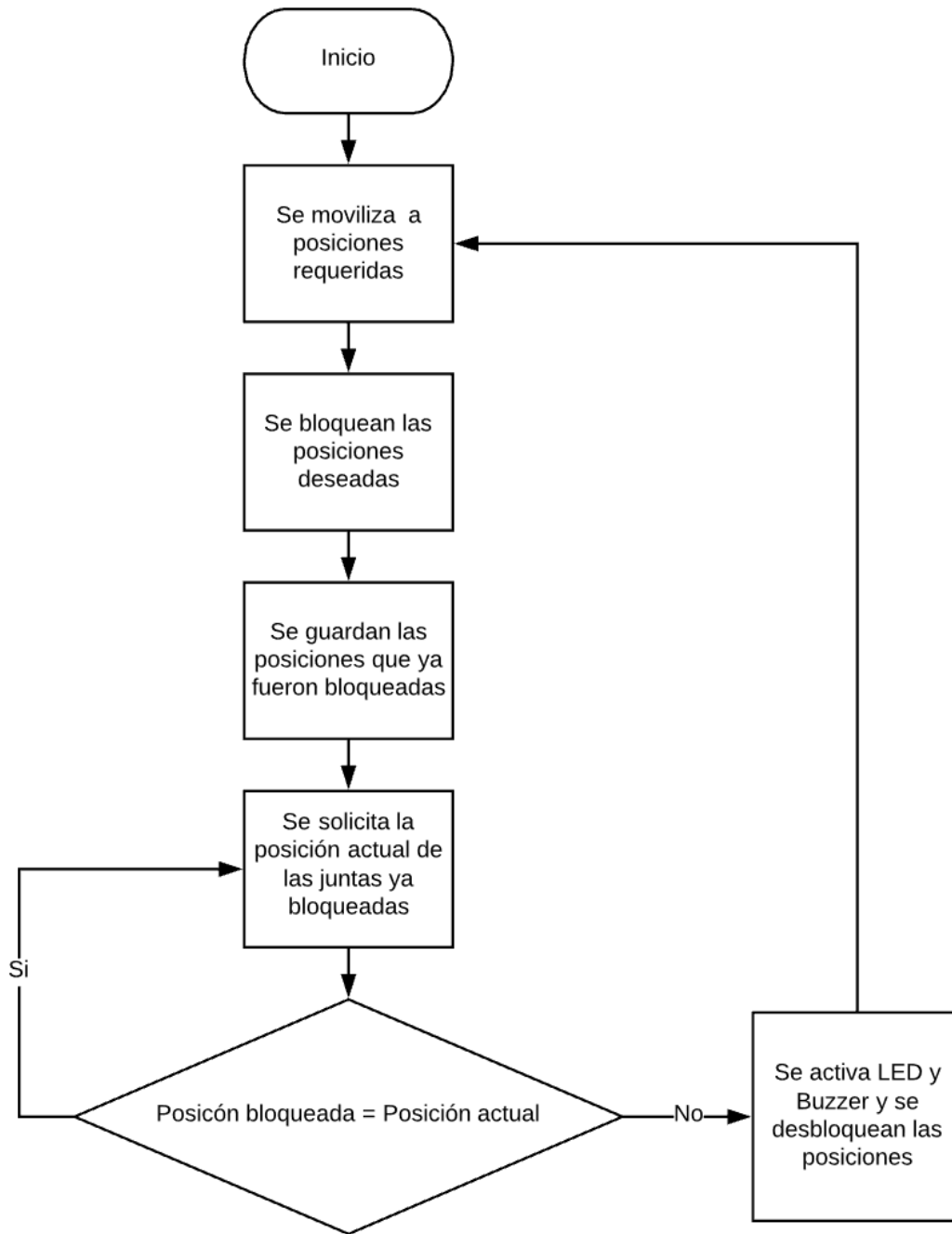


Figura 18: Diagrama de flujo del programa implementado para alarma de posición

B. Temperatura

Por las extensas horas que involucra este procedimiento quirúrgico se pensó en la necesidad de sensar la temperatura de los actuadores. Ya que estos al ser sometidos a torques constantes, es lógico que sufran un calentamiento que afecte su funcionamiento normal. Se implementó, mediante un código en Arduino Figura 19, un sistema de alarmas de cuatro estados. La temperatura de operación para el actuador AX-12A es de $-5-70^{\circ}\text{C}$ y para el actuador MX-106 es de $-5-80^{\circ}\text{C}$. La alarma consiste en 4 LEDs, uno azul por si alguno de los actuadores se encuentra con temperaturas bajas, uno rojo por si algún actuador se encuentra cercano a la temperatura máxima de operación, uno amarillo por si los actuadores se encuentran cercanos a los límites del LED azul y rojo, y por último un LED verde que simboliza un estado completamente seguro.

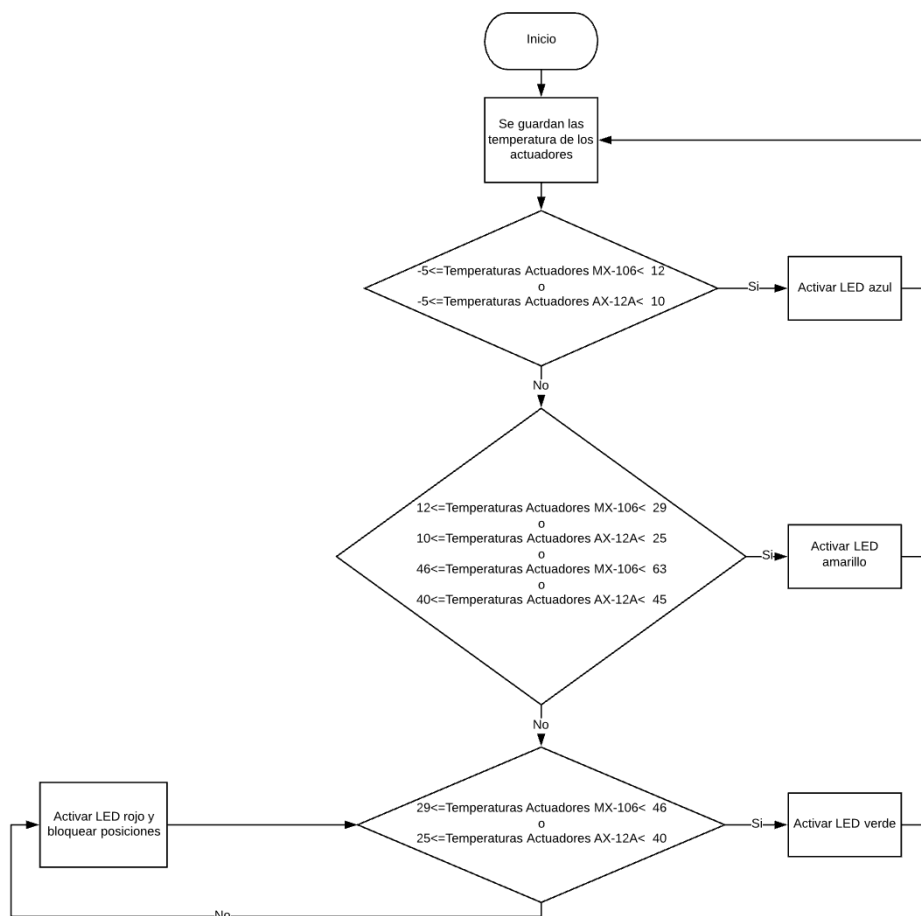


Figura 19: Diagrama de flujo del programa implementado para alarma de temperatura

C. Voltaje

Las fuentes de alimentación tienen una vida útil, luego de ese periodo de tiempo las condiciones específicas de la fuente de alimentación pueden variar, como en el caso del voltaje. Se contempló la posibilidad de que se produzcan variaciones en el voltaje suministrado a los actuadores, por lo que se implementó un sistema de alarma específico que monitoree las alimentación a los actuadores (Figura 20).

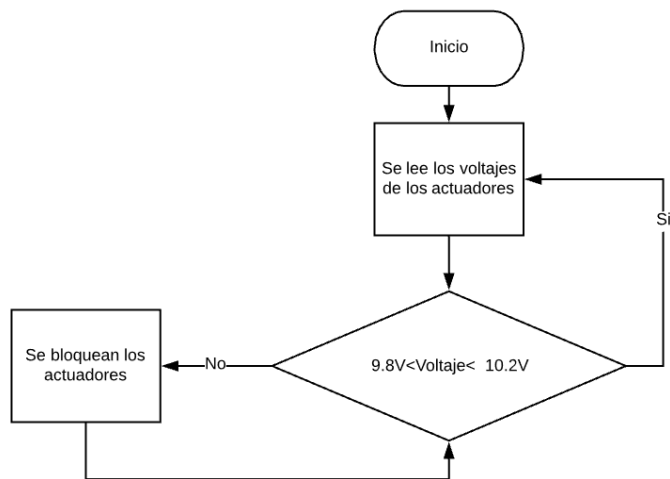


Figura 20: Diagrama de flujo del programa implementado para alarma de voltaje

- Por medio de un buffer tri-estado y la librería Dynamixel Library se logró obtener la retroalimentación de las condiciones internas de los actuadores, tales como voltaje, posición y temperatura.
- Se logró implementar un sistema de alarmas intuitivo capaz de identificar el actuador comprometido por un medio visual.
- El voltaje que tuvo mejores resultados fue el de 10V, siendo este el seleccionado para la alimentación de los actuadores y es necesario una fuente que pueda suministrar 4 amperios
- Para obtener movimientos con la menor cantidad de oscilaciones y movimientos bruscos, se debe de tener una velocidad igual o menor a 170 y un torque menor a 1/5 del torque máximo.

- Para complementar el sistema de alarmas implementado, se recomienda la adquisición de un microcontrolador esclavo para contar con la cantidad de salidas suficientes que posibiliten el despliegue de alarmas de manera individual para cada actuador y para cada variable a controlar, tales como la posición, la temperatura y el voltaje de operación.
- Evaluar con los médicos la implementación de un dispositivo sonoro para las alarmas.
- Analizar las pruebas de voltaje y torque utilizando el software Kinovea para evaluar la necesidad de pagar un software más sofisticado.
- Se recomiendan nuevos actuadores, tales como el RSF supermini que es comúnmente utilizado en la industria de robótica médica. El modelo RSF-14B mini posee un torque máximo instantáneo de 28 Nm. El Meca 500 es un brazo robótico utilizado en la industria médica y farmacéutica y es conocido como el brazo más compacto y preciso, dicho brazo utiliza los servo-actuadores RSF.

-
- [1] *Tecnología ROSA™ - Stanford Children's Health*, [Online; accessed 1. Jun. 2019], jun. de 2019. dirección: <https://www.stanfordchildrens.org/es/service/neurosurgery/rosa>.
 - [2] *Zimmer Biomet Buys Medtech for Rosa Surgical Robot - Robotics Business Review*, [Online; accessed 1. Jun. 2019], ene. de 2017. dirección: <https://www.roboticsbusinessreview.com/health-medical/zimmer-biomet-buys-medtech-rosa-surgical-robot>.
 - [3] F. Ringel, D. Ingerl, S. Ott y B. Meyer, “VARIORGUIDE: A NEW FRAMELESS IMAGE-GUIDED STEREOTACTIC SYSTEM—ACCURACY STUDY AND CLINICAL ASSESSMENT”, *Operative Neurosurgery*, vol. 64, n.º suppl_5, ons365-ons373, 2009.
 - [4] *HUMANA*, [Online; accessed 1. Jun. 2019], dic. de 2018. dirección: <https://www.humanagt.org>.
 - [5] *Epilepsia - Sintomas y causas - Mayo Clinic*, [Online; accessed 1. Jun. 2019], mar. de 2019. dirección: <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/epilepsy/symptoms-causes/syc-20350093>.
 - [6] . Quiñones, “Breve Historia de la Neurocirugía.”, *1.*, vol. 27, n.º 2, págs. 112-121, jun. de 2005, ISSN: 2389-8356. dirección: <https://revistamedicina.net/ojsanm/index.php/Medicina/article/view/69-6>.
 - [7] M. A. Mikulski y T. Szkodny, “Remote control and monitoring of AX-12 robotic arm based on windows communication foundation”, en *Man-Machine Interactions 2*, Springer, 2011, págs. 77-83.
 - [8] Administrador, “Puerto Serial - protocolo y su teoría - HETPRO/TUTORIALES”, *HETPRO/TUTORIALES*, mar. de 2019. dirección: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/puerto-serial>.
 - [9] *Asynchronous serial communication explained (including TTL, UART, and RS232)*, [Online; accessed 1. Jun. 2019], jun. de 2019. dirección: <https://www.microcontrollertips.com/asynchronous-serial-communication-explained-including-ttl-uart-rs232>.

- [10] *DYNAMIXEL - AX Series - ROBOTIS*, [Online; accessed 19. Oct. 2019], oct. de 2019. dirección: <http://www.robotis.us/ax-series>.
- [11] *DYNAMIXEL MX-106T*, [Online; accessed 19. Oct. 2019], oct. de 2019. dirección: <http://www.robotis.us/dynamixel-mx-106t>.
- [12] *DYNAMIXEL MX-106T*, [Online; accessed 21. Oct. 2019], oct. de 2019. dirección: <http://www.robotis.us/dynamixel-mx-106t>.
- [13] *Arduino Mega 2560*, [Online; accessed 21. Oct. 2019], oct. de 2019. dirección: <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com/p/arduino-mega-2560.html>.
- [14] *Arduino y Biblioteca Dynamixel AX-12A*, [Online; accessed 21. Oct. 2019], ago. de 2019. dirección: <https://www.savageelectronics.com/blog/arduino-biblioteca-dynamixel>.
- [15] *Dynamixel MX28T Robot Servo (TTL) , from Robotis for €221.74*, [Online; accessed 21. Oct. 2019], oct. de 2019. dirección: <https://www.robot-italy.com/en/dynamixel-mx28-robot-servo.html>.
- [16] M. Tutorial, “Using Dynamixel AX-12A Servo with Arduino”, *Blogger*, ene. de 2018. dirección: <http://www.arduinotutorialonline.com/2018/01/using-dynamixel-ax-12a-servo-with.html>.
- [17] jumejume1, *AX-12A-servo-library*, [Online; accessed 21. Oct. 2019], oct. de 2019. dirección: <https://github.com/jumejume1/AX-12A-servo-library/blob/master/library.properties>.
- [18] *PLX-DAQ | Parallax Inc*, [Online; accessed 21. Oct. 2019], oct. de 2019. dirección: <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>.

A. Gráficas

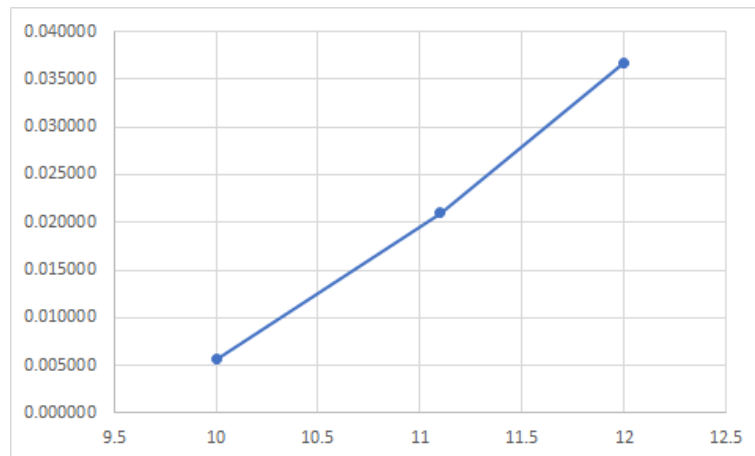


Figura 21: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 250g y velocidad de 511

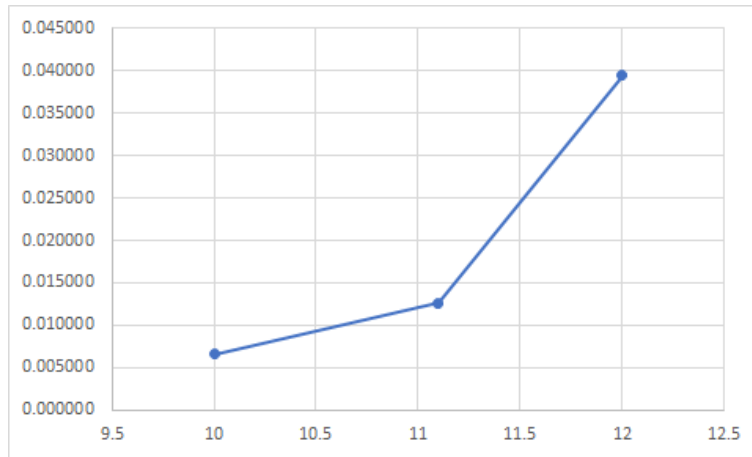


Figura 22: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 250g y velocidad de 852

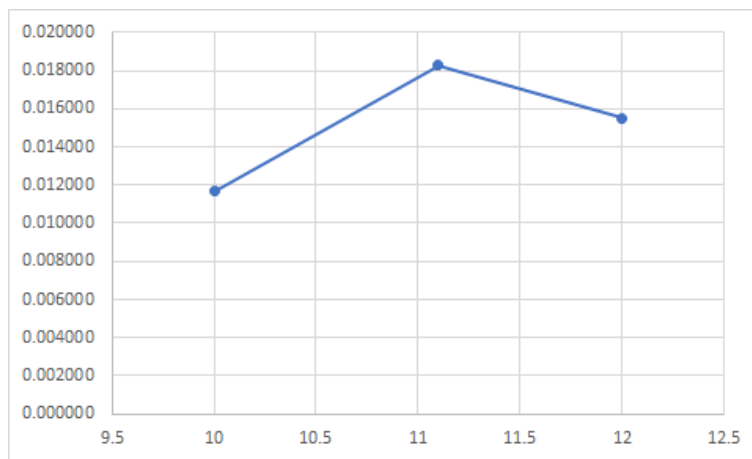


Figura 23: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 750g y velocidad de 170

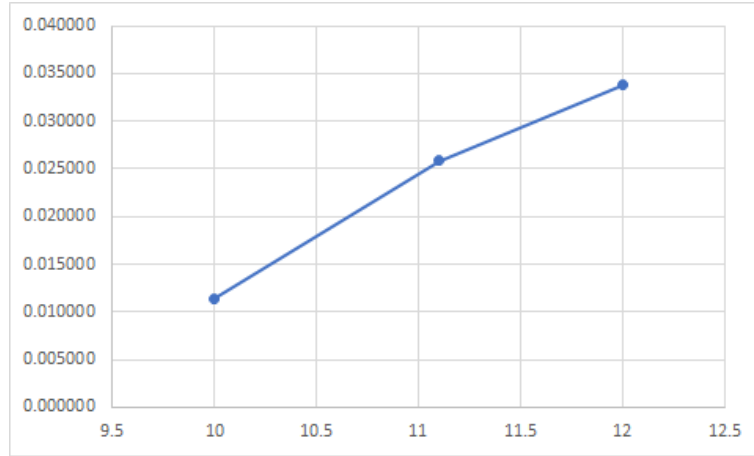


Figura 24: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 750g y velocidad de 511

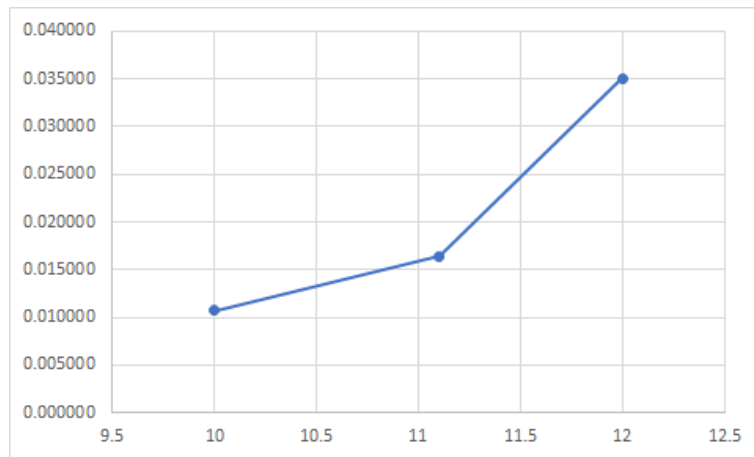


Figura 25: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 750g y velocidad de 852

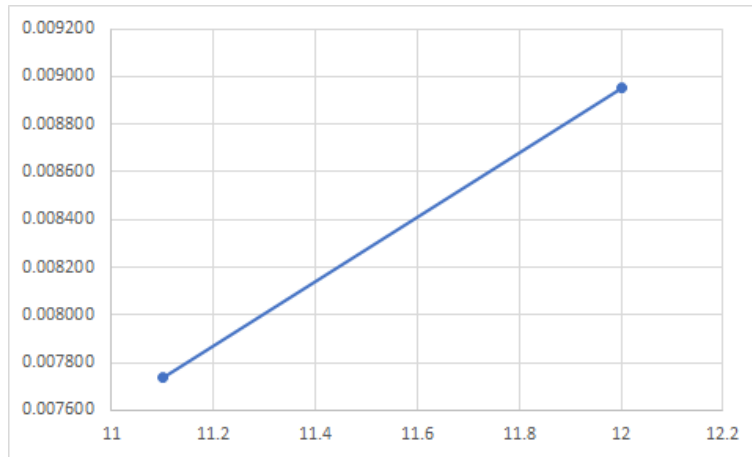


Figura 26: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador MX-106 con un peso de 1250g y velocidad de 170

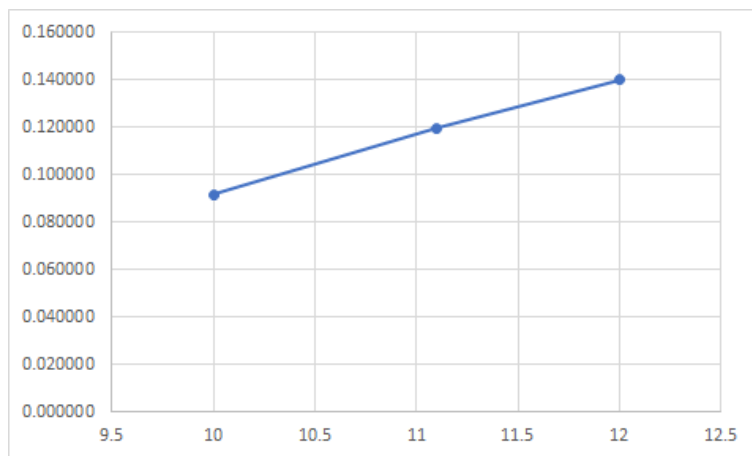


Figura 27: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 100g y velocidad de 511

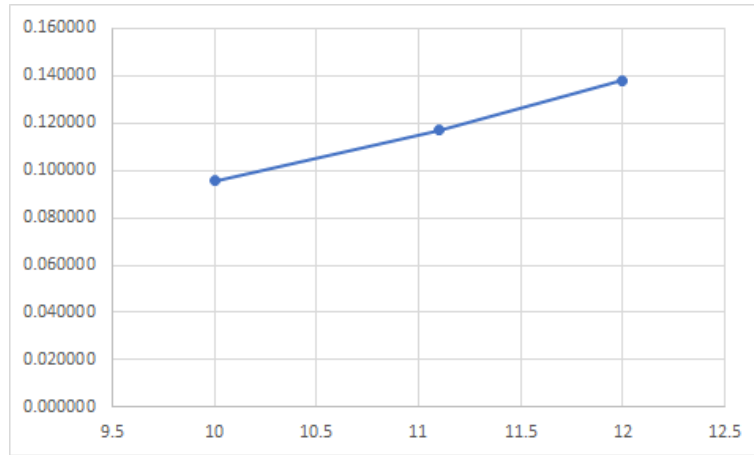


Figura 28: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 100g y velocidad de 852

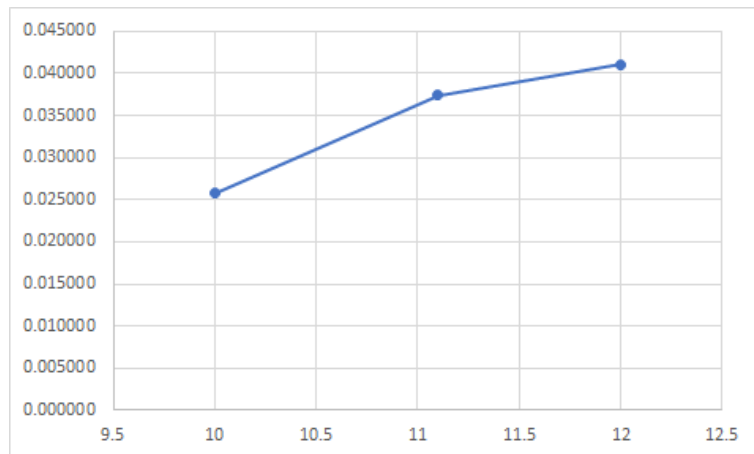


Figura 29: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 200g y velocidad de 170

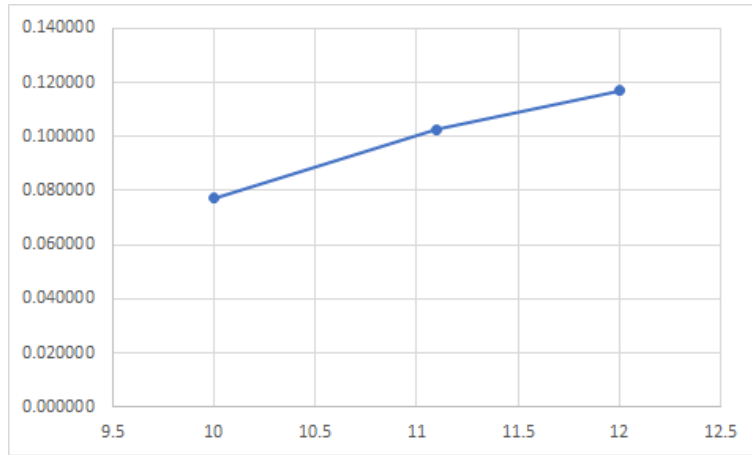


Figura 30: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 200g y velocidad de 511

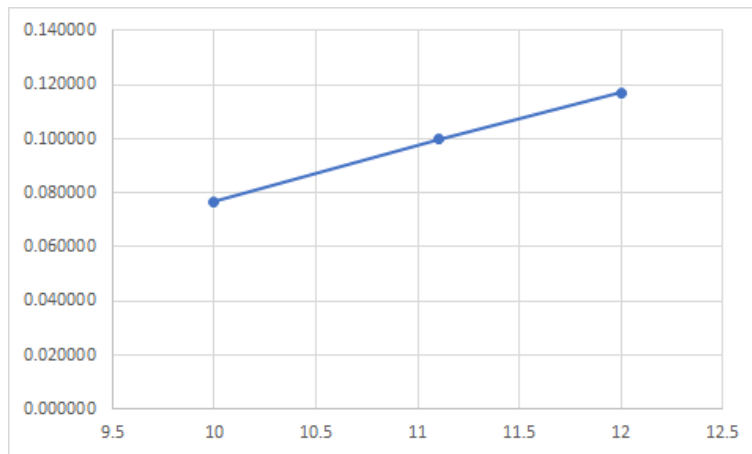


Figura 31: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 200g y velocidad de 852

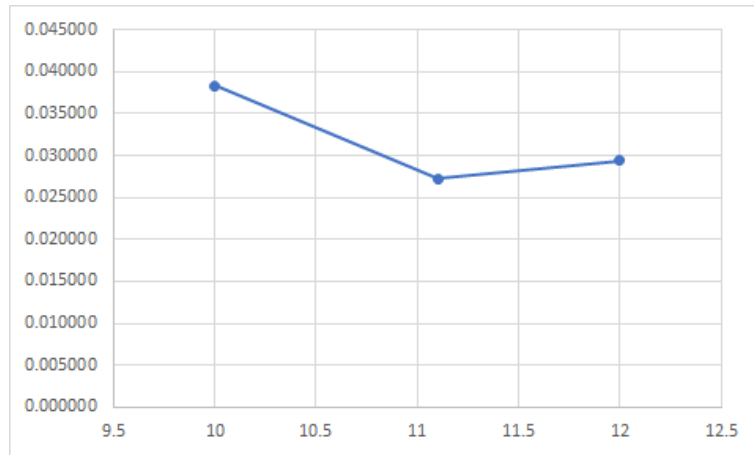


Figura 32: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 300g y velocidad de 170

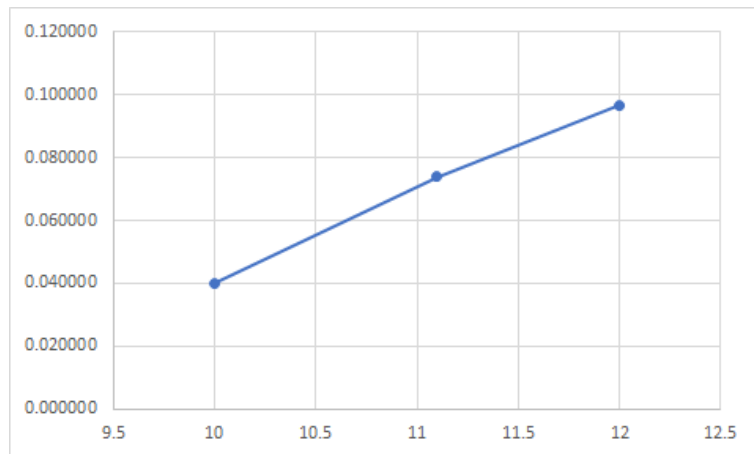


Figura 33: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 300g y velocidad de 511

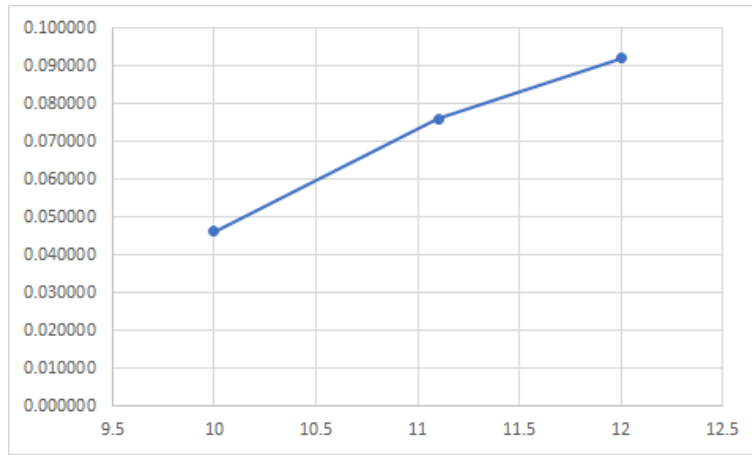


Figura 34: Correlación entre voltaje de alimentación y PS/PDMS del actuador AX-12A con un peso de 300g y velocidad de 852

B. Cuadros

Masa (g)	Velocidad (0-1023)	Voltaje (V)	RMS Subida	RMS Bajada
250	170	10	0.003467	0.016020
		11.1	0.003367	0.018180
		12	0.006225	0.022190
	511	10	0.003223	0.007416
		11.1	0.003884	0.007252
		12	0.004187	0.011220
	852	10	0.002556	0.002925
		11.1	0.003857	0.011070
		12	0.003538	0.009827
750	170	10	0.010080	0.012770
		11.1	0.004120	0.011390
		12	0.005666	0.011220
	511	10	0.007944	0.002540
		11.1	0.006042	0.004188
		12	0.005613	0.015260
	852	10	0.012740	0.005991
		11.1	0.004406	0.006990
		12	0.005189	0.006332
1250	170	11.1	0.007891	0.009405
		12	0.010620	0.009999

Cuadro 3: Comportamiento en tramo de elevación y descenso del actuador MX-106

Masa (g)	Velocidad (0-1023)	Voltaje (V)	PI (rad)	PF (rad)	PS (rad)
250	170	10	-0.000822	0.001815	0.780563
		11.1	0.001024	0.003548	0.785821
		12	-0.000026	0.022521	0.815589
	511	10	0.000343	0.007900	0.807357
		11.1	-0.000710	-0.022426	0.796335
		12	0.001079	-0.027905	0.787657
	852	10	-0.000645	-0.029598	0.762264
		11.1	-0.000705	-0.037499	0.776605
		12	0.000817	-0.021379	0.792787
750	170	10	-0.000269	-0.023808	0.780293
		11.1	-0.000232	-0.001212	0.811356
		12	0.001576	-0.018019	0.793827
	511	10	0.000145	-0.073256	0.786482
		11.1	0.000363	0.006280	0.811134
		12	-0.019704	-0.031361	0.761512
	852	10	-0.017943	-0.067683	0.774334
		11.1	-0.015987	-0.055376	0.757847
		12	-0.018882	-0.038657	0.771246
1250	170	11.1	-0.018936	-0.038639	0.741937
		12	-0.017173	-0.017070	0.758640

Cuadro 4: Promedio de las regiones estables en las pruebas del actuador MX-106. Promedio Inicial (PI), Promedio Superior (PS) y Promedio Final (PF)

Masa (g)	Velocidad (0-1023)	Voltaje (V)	PDMS (rad)	PDMB (rad)
250	170	10	0.785577	-0.001644
		11.1	0.776723	0.004990
		12	0.804755	0.018584
	511	10	0.813015	-0.012514
		11.1	0.817303	-0.047571
		12	0.824443	-0.055464
	852	10	0.768869	-0.044365
		11.1	0.789189	-0.067306
		12	0.832239	-0.048586
750	170	10	0.768619	-0.035212
		11.1	0.829610	-0.015420
		12	0.778321	-0.031994
	511	10	0.797917	-0.121305
		11.1	0.837005	-0.091096
		12	0.795292	-0.140064
	852	10	0.785080	-0.148649
		11.1	0.774251	-0.133198
		12	0.806296	-0.151455
1250	170	11.1	0.749674	-0.085545
		12	0.767591	-0.052836

Cuadro 5: Puntos de desviación máxima en subida y bajada en las pruebas del actuador MX-106. Punto de desviación máxima en subida (PDMS) y punto de desviación máxima en bajada (PDMB)

Masa (g)	Velocidad (0-1023)	Voltaje (V)	RMS Subida	RMS Bajada
100	170	10	0.008229	0.007645
		11.1	0.007660	0.008531
		12	0.010660	0.008151
	511	10	0.007838	0.004423
		11.1	0.008586	0.002597
		12	0.006885	0.001869
	852	10	0.008839	0.003929
		11.1	0.008137	0.002626
		12	0.008237	0.002365
200	170	10	0.013630	0.012330
		11.1	0.011320	0.013990
		12	0.011380	0.018350
	511	10	0.007204	0.006975
		11.1	0.008347	0.007075
		12	0.007114	0.005623
	852	10	0.007374	0.007502
		11.1	0.007563	0.006057
		12	0.007410	0.004850
300	170	10	0.006240	0.029690
		11.1	0.004497	0.029030
		12	0.021370	0.035890
	511	10	0.006196	0.006195
		11.1	0.007771	0.010760
		12	0.008267	0.006196
	852	10	0.006921	0.008497
		11.1	0.007139	0.007113
		12	0.008090	0.003315

Cuadro 6: Comportamiento en tramo de elevación y descenso del actuador AX-12A

Masa (g)	Velocidad (0-1023)	Voltaje (V)	PI (rad)	PF (rad)	PS (rad)
100	170	10	0.009793	-0.016631	0.834074
		11.1	0.011924	-0.007028	0.820856
		12	0.014257	0.002951	0.835998
	511	10	-0.016827	-0.016999	0.782718
		11.1	-0.032083	-0.032132	0.760617
		12	-0.023998	-0.027473	0.773013
	852	10	-0.021847	-0.025700	0.776892
		11.1	-0.021033	-0.024651	0.769260
		12	-0.021515	-0.025287	0.768153
200	170	10	-0.041711	-0.070953	0.776209
		11.1	-0.058978	-0.076989	0.770446
		12	-0.063435	-0.078354	0.761169
	511	10	-0.060906	-0.060906	0.758455
		11.1	-0.068610	-0.075655	0.736999
		12	-0.067389	-0.062292	0.748962
	852	10	-0.055265	-0.067056	0.756484
		11.1	-0.057813	-0.064244	0.752080
		12	-0.068725	-0.071680	0.749152
300	170	10	-0.092775	-0.129756	0.730232
		11.1	-0.097737	-0.119293	0.729794
		12	-0.098656	-0.106059	0.731421
	511	10	-0.110542	-0.141059	0.719960
		11.1	-0.110367	-0.138890	0.714291
		12	-0.103502	-0.110819	0.716009
	852	10	-0.108568	-0.122947	0.716319
		11.1	-0.102140	-0.135541	0.722720
		12	-0.100662	-0.107860	0.721031

Cuadro 7: Promedio de las regiones estables en las pruebas del actuador AX-12A. Promedio Inicial (PI), Promedio Superior (PS) y Promedio Final (PF)

Masa (g)	Velocidad (0-1023)	Voltaje (V)	PDMS (rad)	PDMB (rad)
100	170	10	0.845382	-0.028557
		11.1	0.837964	-0.022600
		12	0.859281	-0.012597
	511	10	0.874351	-0.194073
		11.1	0.880346	-0.239586
		12	0.912996	-0.263755
	852	10	0.872458	-0.207004
		11.1	0.886105	-0.234399
		12	0.906139	-0.263193
200	170	10	0.801923	-0.083547
		11.1	0.807880	-0.088370
		12	0.802276	-0.089514
	511	10	0.835617	-0.303406
		11.1	0.839656	-0.337751
		12	0.865843	-0.289458
	852	10	0.833320	-0.308123
		11.1	0.851790	-0.335726
		12	0.866305	-0.288872
300	170	10	0.768504	-0.147051
		11.1	0.757035	-0.108410
		12	0.760860	-0.099091
	511	10	0.760071	-0.384630
		11.1	0.788100	-0.356301
		12	0.812667	-0.367566
	852	10	0.762460	-0.381283
		11.1	0.798827	-0.358963
		12	0.813065	-0.366545

Cuadro 8: Puntos de desviación máxima en subida y bajada en las pruebas del actuador AX-12A. Punto de desviación máxima en subida (PDMS) y punto de desviación máxima en bajada (PDMB)

C. Github

Para mayor información y distintas gráficas consultar a repositorio ubicado en el siguiente URL:

<https://github.com/Galos96/Trabajo-de-Graduaci-n-.git>

