

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 5GDL ADAPTADO EN UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA PARA LA AUTOASISTENCIA DE PACIENTES CON PARÁLISIS CEREBRAL ESPÁSTICA

Design and simulation of a robotic arm of 5GDL adapted in an electric wheelchair for self-care of patients with spastic cerebral palsy

Diego A. Rozas Llontop¹
Ricardo J. Palomares Orihuela²

PRESENTACIÓN: 15 DE OCTUBRE DE 2018

APROBACIÓN: 19 DE OCTUBRE DE 2018

RESUMEN

La presente investigación comprende el diseño y simulación de un brazo robótico de 5 grados de libertad (GDL) adaptado a una silla de ruedas eléctrica para la autoasistencia de pacientes con parálisis cerebral espástica, haciendo uso del software de diseño Solidworks.

La idea de este trabajo nace a partir de la alta incidencia de personas discapacitadas, específicamente aquellas que sufren de parálisis cerebral espástica, con el fin de ofrecer nuevas posibilidades de tener una mejor calidad de vida y autonomía.

Palabras clave: parálisis cerebral, espasticidad, grados de libertad, brazo robótico, Solidworks, análisis de elementos finitos.

ABSTRACT

The present investigation includes the design and simulation of a robotic arm of 5 degrees of freedom (GDL) adapted to an electric wheelchair for self-care of patients with spastic cerebral palsy, making use of Solidworks design software.

This work was born from the high incidence of disabled people, specifically those who suffer from spastic cerebral palsy in order to offer new possibilities of having a better quality of life and autonomy.

Key words: Cerebral palsy, spasticity, degrees of freedom, robotic arm, Solidworks, Finite Element Analysis.

- 1 Ingeniero mecatrónico de la Universidad Ricardo Palma, con estudios de maestría en Ingeniería Biomédica. Especialista en diseño asistido por computadora utilizando Solidworks, análisis de elementos finitos, simulación, diseño y fabricación de prototipos. E-mail: drozas@outlook.com
- 2 Magister en Ciencias de la Educación con mención en Docencia Universitaria, maestría en Ciencias de la Electrónica con mención en Ingeniería Biomédica, doctorado en Ciencias de la Educación, Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Nacional de Ingeniería, docente de las asignaturas de Robótica, Inteligencia Artificial, Mecatrónica Médica y Diseño Mecatrónico de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Ricardo Palma. E-mail: rpalomares@ieee.org

1. INTRODUCCIÓN

La parálisis cerebral es un trastorno de tipo neuromotor que se origina por una deficiencia en el sistema nervioso a nivel encefálico, y genera alteraciones en la ejecución de movimientos y mantenimiento postural desde los primeros momentos de la vida. Este mal afecta a dos casos por cada mil nacimientos. En el Perú, según el estudio de la Universidad Cayetano Heredia realizado por Bancalari Ernesto, Campos Patricia y Castañeda Carlos en dos hospitales de Lima, la prevalencia de parálisis cerebral fue de 5,2/1000 nacidos vivos. El tipo de parálisis cerebral más frecuente fue la espástica (60%), seguida por la atetósica (23.3%) y la atáxica (16.7%). El sexo masculino predominó sobre el femenino con 56,6% y 43.4% respectivamente. Asimismo, la principal causa de discapacidad son los problemas de movilidad, con un porcentaje del 6% de la población. Del total de personas con algún tipo de discapacidad, el 74% tiene dificultades para realizar las Actividades Básicas de la Vida Diaria (ABVD) [1].

Por lo tanto, existe una incipiente necesidad de crear y mejorar la aplicación de tecnologías, así como sistemas innovadores que ayuden a las personas con discapacidad a realizar sus actividades básicas de la vida diaria (ABVD). Esa condición, sumada al envejecimiento, plantea, a las sociedades actuales, una serie de necesidades que deben ser cubiertas con soluciones personales y colectivas adecuadas para mantener un mínimo de bienestar. Actualmente, se acepta el papel primordial de la ciencia y la tecnología como pilares para la mejora de las actividades humanas y la autonomía personal. La robótica, en este sentido, desempeña un rol fundamental en las diferentes actividades del hombre relacionadas con la movilidad y la manipulación, tal como se muestra en la Figura 1 [2].



Figura 1. Brazo robótico adaptado una silla de ruedas eléctrica. Elaboración propia.

2. DISEÑO Y SIMULACIÓN

2.1 Condiciones iniciales del diseño

Para el diseño del brazo robótico, se realizó una lista de las condiciones iniciales que tiene que cumplir el mecanismo. Se consideraron, durante el diseño de este, los siguientes aspectos:

- Capacidad de carga de 1 kg de peso;
- Diseño con morfología de un robot antropomórfico;
- Contar con cinco grados de libertad, más la herramienta del tipo pinza;
- Autonomía de cinco horas de funcionamiento continuo;
- Un mando de control de fácil uso;

- La estructura de un material de bajo peso como el plástico ABS;
- Diseño con capacidad de impresión 3D;
- Capacidad para poder realizar actividades como manipulación de cubiertos, vasos y tazas, y abrir y cerrar tanto puertas como ventanas.

2.2 Diseño mecánico

El diseño mecánico se divide en 4 etapas:

- Diseño del brazo robótico: se presenta el diseño realizado en el software Solidworks.
- Diseño del control de mando: se presenta el bosquejo correspondiente al control de mando realizado en el mismo programa.
- Cálculo de los componentes mecánicos: se utiliza el mencionado software para obtener los valores y características de los componentes que se van a seleccionar.
- Se realiza el análisis de elementos finitos para la validación de la estructura mecánica.

2.2.1 Diseño del brazo robótico

El diseño propuesto del brazo robótico cuenta con diversos componentes mecánicos y electromecánicos, los cuales se pueden apreciar en la tabla 1. Además, el brazo está formado por 6 partes. Entre ellas, se presentan la base, el hombro, el brazo, el antebrazo, la muñeca y la pinza.

TABLA 1. COMPONENTES MECÁNICOS Y ELECTROMECAÑICOS.

| Nº | Descripción | Cantidad |
|----|---|----------|
| 1 | Servomotores marca Turnigy y modelo TGY-20C | 4 |
| 2 | Servomotores marca Turnigy y modelo TGY-213C | 4 |
| 3 | Rodamiento rígido de bolas marca SKF modelo 16007 | 1 |
| 4 | Rodamiento rígido de bolas marca SKF modelo 61804 | 1 |

La base cuenta con 16 piezas e incluye un servomotor que se encarga de la rotación del brazo robótico a lo largo del eje Y, tal como se muestra en la figura 2.

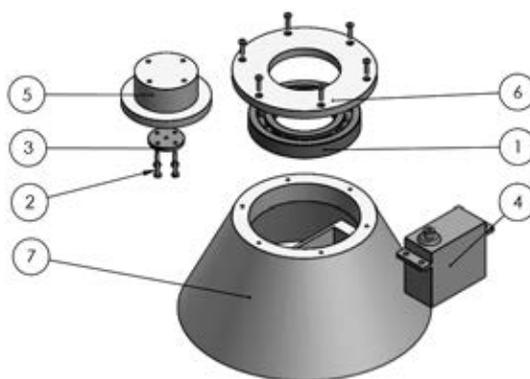


Figura 2. Diseño de la base del brazo robótico. Elaboración propia.

El hombro cuenta con 15 piezas, incluidos dos servomotores opuestos para que distribuyan el torque en las partes superiores del brazo, tal como se muestra en la figura 3.

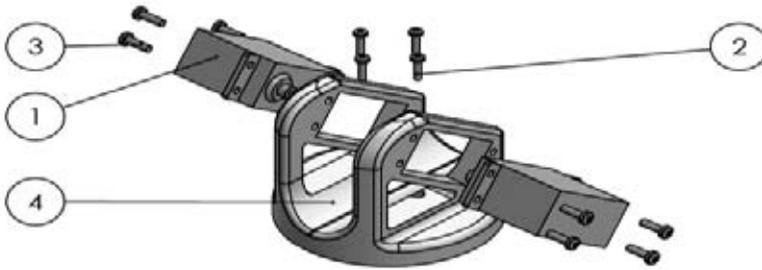


Figura 3. Diseño del hombro del brazo robótico. Elaboración propia.

El brazo cuenta con 21 piezas y comunica el hombro con el antebrazo, que tiene conectores para juntar los servomotores de ambas partes, tal como se muestra en la figura 4.

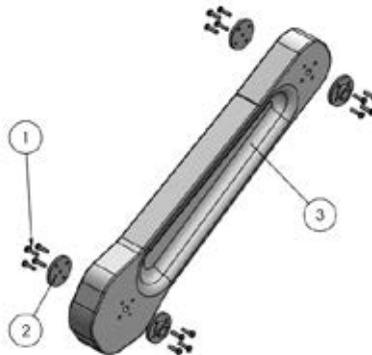


Figura 4. Diseño del brazo del brazo robótico. Elaboración propia.

En el antebrazo, cuenta con 18 piezas, incluidos tres servomotores, dos de los cuales se conectan con el brazo y otro con la muñeca, tal como se muestra en la figura 5.

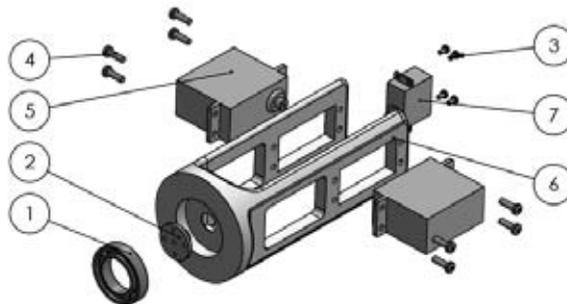


Figura 5. Diseño del antebrazo del brazo robótico. Elaboración propia.

En la muñeca, cuenta con 12 piezas, y se conecta con el cuarto servo, que rota la pinza, tal como se muestra en la figura 6.

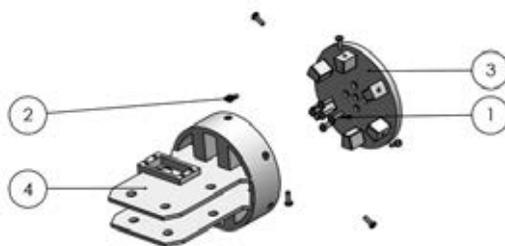


Figura 6. Diseño de la muñeca del brazo robótico. Elaboración propia.

La pinza cuenta con 24 piezas, incluido un servomotor que permite la apertura y cierre de la pinza, tal como se muestra en la figura 7.

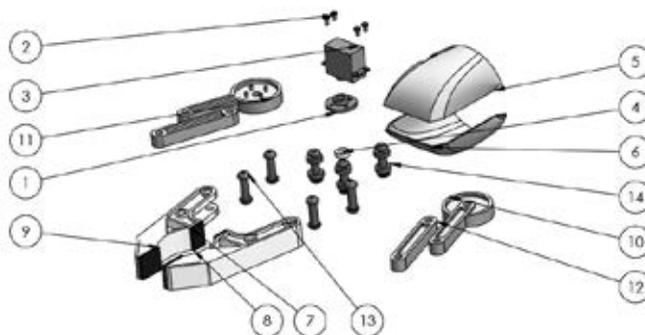


Figura 7. Diseño de la pinza del brazo robótico. Elaboración propia.

2.2.2 Diseño del control de mando

Debido a que el brazo robótico es usado por pacientes con movilidad limitada, el control de mando del mecanismo tiene que ser fácil de usar. Esto nos limita a diseñar un control con pocos accionadores y que permita realizar varios movimientos. Por ello, el diseño propuesto cuenta con un joystick ofrece distintas posibilidades en los ejes X e Y, además de dos pulsadores que permiten conmutar aquellas que estén preprogramadas en el brazo robótico, tal como se muestra en la figura 8.

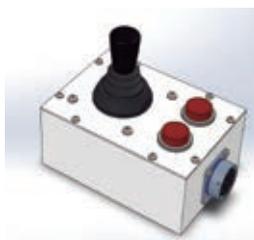


Figura 8. Diseño del mando de control. Elaboración propia.

2.2.3 Cálculo de los componentes mecánicos

Para estimar los torques y consumos eléctricos de cada servomotor, se procedió a utilizar la herramienta que presenta el software Solidworks. Se procedió a realizar los siguientes pasos:

- Se ensambló completamente el brazo robótico.
- Se asignaron las propiedades del material a cada parte.
- Se realizó una secuencia de movimientos donde se asignó un motor para cada grado de libertad con su respectivo ángulo de movimiento en un tiempo específico.
- Se ejecutó el programa.
- Se generaron gráficas que muestran el torque utilizado para mover el brazo durante el desarrollo de movimiento del brazo robótico.

Este proceso permite evaluar el modelo con todos los parámetros antes mencionados. Una vez usado Solidworks para el cálculo, podemos obtener los resultados correspondientes de cada servomotor. En la figura 9 se puede observar una gráfica de torques y de consumo de uno de los servomotores.

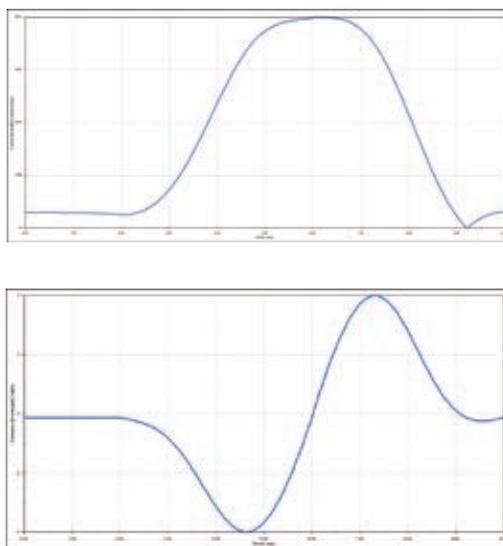


Figura 9. Gráfica de torque y consumo de uno de los servomotores del hombro. Elaboración propia.

En la tabla 2, se pueden observar todos los torques encontrados mediante la utilización de las gráficas generadas por Solidworks.

TABLA 2. TABLA DE TORQUES DE SERVOMOTORES.

| N° | Servo | Cantidad | Torque total (Kg-cm) | |
|----|---------|----------|----------------------|------------|
| | | | Calculado | Redondeado |
| 1 | Servo 1 | 1 | 0.23 | 1 |
| 2 | Servo 2 | 2 | 59.32 | 60 |
| 3 | Servo 3 | 2 | 30.09 | 31 |
| 4 | Servo 4 | 1 | 0.071 | 1 |
| 5 | Servo 5 | 1 | 1.16 | 1.5 |

2.2.4 Análisis de elementos finitos de la estructura mecánica

Para analizar si el diseño propuesto soporta las cargas a las que se someterá, se realiza un análisis utilizando el método de elementos finitos. Para ello, se procedió a desarrollar los siguientes pasos:

- Se otorga, al brazo robótico, una trayectoria específica. Se usará la herramienta de animación y simulación de Solidworks, llamada Solidworks Motion. Esta nos permite realizar una animación realista, la cual toma en cuenta la gravedad, la masa de los componentes, y las propiedades físicas mecánicas otorgadas a todo el ensamble. La animación dura, en total, diez segundos y la estructura del brazo robótico se analizará en el sexto, ya que es en ese momento en que se obtiene la máxima carga, cuando el brazo robótico se encuentra totalmente estirado.
- Se genera el análisis de cada una de las partes principales de la estructura del brazo robótico.
- Se obtienen y analizan los resultados obtenidos usando el software mencionado. Entre ellos se encuentran los abajo descritos.
 - Von Mises: con la ayuda de este tipo de análisis, se obtienen las tensiones máximas y mínimas de la pieza o conjunto de piezas analizadas. Esto nos ayuda a conocer a cuanta tensión está sometido el modelo.
 - Deformación unitaria: se puede definir como la relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento. Ello permite determinar la deformación de los elementos sometidos a esfuerzos de tensión o compresión axial.
 - Factor de seguridad: es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido. Por este motivo, es un número mayor que uno, que indica la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos.

De este modo, se garantiza que la estructura propuesta funcione correctamente. En la figura 10, se muestra el resultado de deformación unitaria ejecutado al brazo del mecanismo robótico.

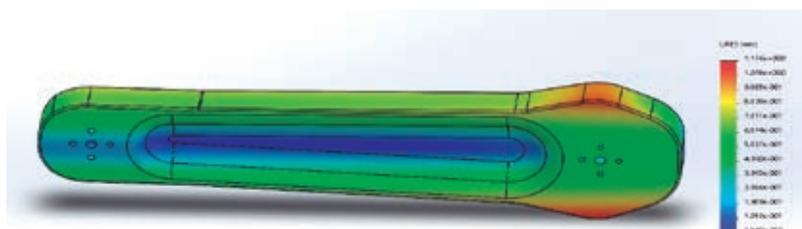


Figura 10. Deformación unitaria del brazo. Elaboración propia.

2.3 DISEÑO ELECTRÓNICO

Para el diseño y desarrollo de la placa, se utilizó un *software* especializado y de fácil uso para placas electrónicas, que se llama Fritzing. Con la ayuda de este, se logró diseñar la tarjeta electrónica en la que están todos los conectores de los pulsadores del joystick, de los servomotores y de la alimentación, además de los pines para conectar el Arduino Micro. El circuito PCB estará ubicado en el mando de control, debido a que cuenta con el espacio idóneo para su ubicación. En la figura 11, se puede observar el diseño.

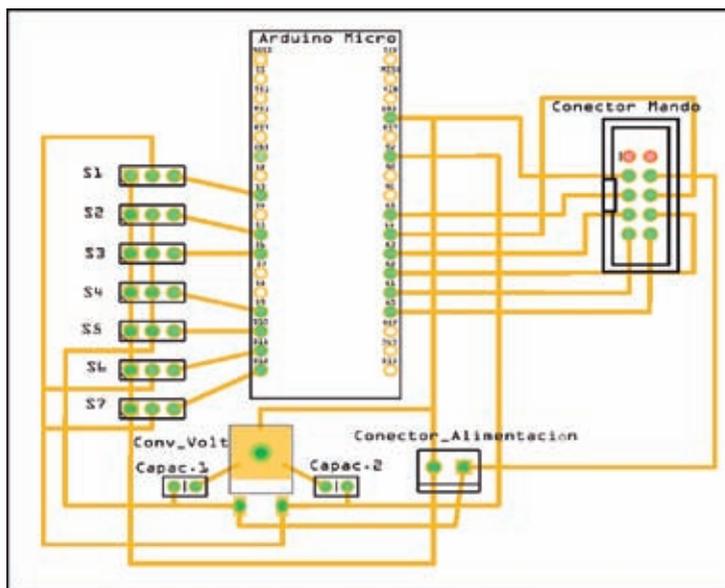


Figura 11. Circuito PCB. Elaboración propia.

Los componentes utilizados para el diseño de este circuito PCB y el mando de control se pueden apreciar en la tabla 3.

TABLA 3. TABLA DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS.

| N° | Descripción | Cantidad |
|----|------------------------------------|----------|
| 1 | Joystick marca APEM modelo 1000 | 1 |
| 2 | Pulsadores de diámetro de 15 mm | 2 |
| 3 | Arduino Micro | 1 |
| 4 | Convertor de voltaje 7805 | 1 |
| 5 | Conector shrouded header 2x4 | 1 |
| 6 | Conectores header male de 3 pines | 7 |
| 7 | Terminal block PCB de 2 pines | 1 |
| 8 | Capacitores de 0.1 uF | 2 |
| 9 | Conectores header male de 17 pines | 2 |

2.4 CÁLCULO DEL CONSUMO DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS

Una vez seleccionados todos los componentes electrónicos y electromecánicos, se procedió a realizar el cálculo de consumo de todo el sistema. Para este cálculo, se utilizaron las especificaciones técnicas. En el caso de los servomotores, esto se realizó con la herramienta de simulación de Solidworks, que genera gráficas del gasto de cada servomotor durante una secuencia de movimiento (para el cálculo de consumo se consideraron los valores máximos). En la tabla 4, se puede observar esta variable.

TABLA 4. LISTA DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS Y ELECTROMECAÑICOS.

| Nº | Descripción | Cant. | Consumo Total (Watts) | Consumo mA | Consumo por 5 Horas (Watts) |
|-------|--------------------|-------|-----------------------|------------|-----------------------------|
| 1 | Servo 1 | 1 | 0.006 | 1.2 | 0.03 |
| 2 | Servo 2 | 2 | 5 | 680 | 25 |
| 3 | Servo 3 | 2 | 3 | 410 | 15 |
| 4 | Servo 4 | 1 | 0.0018 | 0.4 | 0.009 |
| 5 | Servo 5 | 1 | 0.02 | 4 | 0.1 |
| 6 | Arduino Micro | 1 | 0.075 | 15 | 0.375 |
| 7 | Joystick APEM 1000 | 1 | 0.20 | 40 | 1 |
| 8 | Componentes varios | - | 0.10 | 20 | 0.5 |
| Total | | | 8.4 watts | 1170.6 mA | 42.014 watts |

Para el correcto funcionamiento y dimensionamiento de la batería, se multiplicó lo calculado por un factor de 1.6, debido a que no es recomendable descargar completamente la batería. En la tabla 5, se muestran los valores finales del cálculo de la batería para la alimentación de todo el sistema.

TABLA 5: ESPECIFICACIONES DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.

| Descripción | Voltaje (V) | Intensidad (AH) | Watts |
|-----------------|-------------|-----------------|-------|
| Pack de batería | 7.4 | 10 | 74 |

Obtenidos los datos anteriores, se seleccionó como mejor opción la que presentaba a las baterías de ion de litio, ya que son más compactas y de bajo riesgo de accidente con respecto a las de polímero de litio. En la figura 12, se observa el *pack* de baterías escogido para la alimentación de todo el sistema.



Figura 12. Pack de baterías de Li-ion de 7.4 V a 10Ah. Adaptado de «7,4 V 10Ah batería de ión litio 18650 Pack 2s4p», por Made-in-China.com, en <https://goo.gl/Gi1wQ1>.

2.5 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

Para la realización del código de programación, se consideraron los siguientes aspectos:

- El movimiento del brazo es un fluido y se realiza a una velocidad constante.
- Mantendrá su posición aun cuando el joystick regrese a su posición inicial.

- Presionando una vez el botón B1, se alternan dos modos de funcionamiento del brazo robótico. De esa manera, se manipula el brazo robótico teniendo únicamente un solo joystick.
 - En el primer modo: el eje X del joystick se mueve proporcionalmente a la segunda y tercera articulación del brazo robótico. El Y controla la rotación de la primera. La cuarta mantiene la posición de la pinza, que fue posicionada previamente.
 - En el segundo modo: el eje X del joystick mueve la tercera articulación y el Y rota la cuarta.
- Para abrir y cerrar la pinza, se presiona una vez el botón B2.
- Presionando dos veces ese botón, el brazo robótico regresa a una posición inicial preestablecida manteniendo la última posición de la pinza y de la cuarta articulación.
- Presionando dos veces el botón B1, el brazo robótico se estira completamente manteniendo la última posición establecida de la pinza y la cuarta articulación.

El código de programación propuesto cuenta con dos partes y cinco subrutinas, las cuales se pueden observar en la figura 13.

```

void loop() {
  b1=digitalRead(A0);b2=digitalRead(A1);//lee estado de botones 1 y 2
  //====rutina para alternar entre modo 1 y modo 2 presionando b1
  if (b1==HIGH){delay(200);var=0;b1=1;// boton 1 presionado una vez
  while (var<500)// condicion para reconocer si se presiona dos veces el boton b1 y estirar completa
  {b1=digitalRead(A0);if (b1==HIGH){b1=2; var=2000;} // boton 1 presionado dos veces
  var++;delay(1);}if (b1==1){// si boton 1 se presiona una sola vez alterna los modos
  if (modo==0){modo=1;}if (modo==1){modo=0;}if (b1==2){ eje2=0;eje3=0;}}//si boton 1 se presiona c
  //====rutina b2=====
  if (b2==HIGH) // boton 2 presionado una vez
  {delay(200);var=0;b2=1; while (var<500)// condicion para reconocer si se presiona dos veces el bot
  {b2=digitalRead(A1);if (b2==HIGH){b2=2;var=2000;} // boton 1 presionado dos veces
  var++;delay(1);}if (b2==1) // si boton 1 se presiona una sola vez alterna los modos
  {if (cerrar==0) // si la pinza se encuentra abierta se cierra
  {cerrar=1;pinza=180;}if (cerrar==1)// si la pinza se encuentra cerrada se abre
  {cerrar=0;}if (b2==2) //si boton 1 se presiona dos veces se estira completamente el robot
  { eje1=pos1;eje2=pos2;eje3=pos3;}}//posicion establecida eje1,2,3
  //====rutina modo 1=====
  if (modo==0)
  { X1=digitalRead(A2);X2=digitalRead(A3);//lee estado de X+,X-
  Y1=digitalRead(A4);Y2=digitalRead(A5);//lee estado de Y+,Y-
  if (X1==HIGH) //movimiento de los ejes 2 y 3 proporcionalmente con X+
  { eje2=eje2+1;eje3=eje3+1;}if (X2==HIGH)//movimiento de los ejes 2 y 3 proporcionalmente con X-
  { eje2=eje2-1;eje3=eje3-1;}if (Y1==HIGH)//movimiento del eje 1 proporcionalmente con Y+
  {eje1=eje1+1;}if (Y2==HIGH) //movimiento del eje 1 proporcionalmente con Y-
  {eje1=eje1-1;}}
  //====rutina modo 2=====
  if (modo==1)
  { X1=digitalRead(A2);X2=digitalRead(A3);//lee estado de X+, X-
  Y1=digitalRead(A4);Y2=digitalRead(A5);//lee estado de Y+, Y-
  if (X1==HIGH) //movimiento del eje 3 proporcionalmente con X+
  { eje3=eje3+1;}if (X2==HIGH) //movimiento del eje 3 proporcionalmente con X-
  { eje3=eje3-1;}if (Y1==HIGH) //movimiento del eje 4 proporcionalmente con Y+
  { eje4=eje4+1;}if (Y2==HIGH) //movimiento del eje 4 proporcionalmente con Y-
  { eje4=eje4-1;}}
  //Rutina para asegurar que los angulos se encuentren dentro de los 180 grados
  if (eje1>180){eje1=180;}if (eje2>180){eje2=180;}if (eje3>180){eje3=180;}if (eje4>180){eje4=180;}
  if (eje1<0){eje1=0;}if (eje2<0){eje2=0;}if (eje3<0){eje3=0;}if (eje4<0){eje4=0;}
  //====escritura de angulos en los servomotores=====
  servo1.write(eje1); servo2.write(eje2); // set eje1 Y 2 0° grados
  servo3.write(eje3);servo4.write(eje4); // set eje3 Y 4 0° grados
  servo5.write(pinza); delay(100);} // set eje5 cerrado
}

```

Figura 13. Código de programación. Elaboración propia.

2.6 SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Para la simulación del sistema, se realizaron cuatro pruebas, que consisten en distintas simulaciones con la ayuda del software Solidworks, en el que se observa el funcionamiento del brazo robótico para las tareas planteadas.

- **Prueba 1:** consiste en una simulación para verificar todos los movimientos que puede realizar el brazo robótico. En esta prueba se observa la capacidad que tiene la pinza del mecanismo para poder manipular diferentes objetos con distintas formas, tal como se muestra en la figura 14.



Figura 14. Interacción del brazo robótico con objetos geométricos. Elaboración propia.

- **Prueba 2:** consiste en una simulación en la que el brazo robótico agarra y manipula una cuchara. Lo que se trata de conseguir es que este tenga la capacidad y destreza de manipular el utensilio, recoger el alimento y acercarse al paciente, tal como se muestra en la figura 15.



Figura 15. Interacción del brazo robótico con una cuchara. Elaboración propia.

- **Prueba 3:** consiste en una simulación en la que el brazo robótico agarra y manipula una taza. Se busca que este tenga la capacidad y destreza de sujetar la taza, acercarla al paciente y darle de beber, tal como se muestra en la figura 16.



Figura 16. Interacción del brazo robótico con una taza. Elaboración propia.

- **Prueba 4:** en esta simulación, el brazo robótico, montado en la silla de ruedas, abre y cierra una puerta. Se trata de conseguir que el mecanismo manipule la perilla de la puerta y, con la ayuda de la silla de ruedas, el paciente debe atravesar la puerta, tal como se muestra en la figura 17.



Figura 17. Interacción del brazo robótico con la perilla de una puerta. Elaboración propia.

3. RESULTADOS

Considerando que la simulación fue realizada mediante secuencias de movimientos otorgados al brazo robótico haciendo uso del programa Solidworks, se logró realizar satisfactoriamente todas las pruebas planteadas. Cabe mencionar que las simulaciones fueron exclusivamente del brazo robótico y las interacciones con objetos como cucharas y tazas.

En la prueba número uno, se pudo verificar la sujeción de la pinza frente a diferentes objetos de diferentes formas y se encontraron ciertas deficiencias al sujetar objetos de forma piramidal. En la prueba número 2, hubo cierta dificultad para sujetar la cuchara, por lo que, para una mejor interacción del brazo robótico con cubiertos, estos deberán poseer un mango adecuado para mejorar la sujeción. De preferencia, tendrán que contar con uno plano, rígido y no tan delgado.

La prueba número 3 se realizó satisfactoriamente, puesto que se pudo levantar y manipular la taza. En la prueba número 4, también se obtuvieron resultados positivos, aunque con cierta limitación para manipular la manija de la puerta, por lo que esta debería ser acondicionada.

4. CONCLUSIONES

De la presente investigación, se pueden citar las siguientes conclusiones:

- Ha sido posible identificar y seleccionar las actividades básicas de la vida diaria (ABVD) más importantes al conseguir simular cada una de ellas.
- Ha sido posible identificar y seleccionar el material para la estructura y los actuadores para que el brazo robótico. De esa manera, se ha logrado que sea de bajo peso, alta eficiencia y funcionalidad gracias los siguientes criterios: una fabricación posible, material altamente resistente, y actuadores ligeros, pequeños y de fácil manipulación.
- Ha sido posible diseñar un mando de fácil operación que permita realizar los movimientos del brazo robótico analizando y evaluando las limitaciones de pacientes. Para ello, se utilizó un joystick y dos pulsadores.
- Ha sido posible identificar y seleccionar la fuente de energía que permita brindar un apropiado tiempo de autonomía diario para el brazo robótico, mediante la selección de un pack de baterías de Li-Ion.
- Ha sido posible diseñar y elaborar un código de programación que ejecute, secuencialmente, los movimientos del brazo robótico. Para lograrlo, se asignaron movimientos proporcionales de cada articulación según el modo seleccionado.

5. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Se pueden incluir sensores en el brazo robótico, con el fin de lograr movimientos autónomos intuitivos y facilitar su manipulación a los pacientes con parálisis cerebral espástica, tanto durante su alimentación como en la manipulación de diferentes objetos.
- Se recomienda proponer otros dispositivos de manipulación de acuerdo al tipo de paciente con parálisis cerebral espástica, ya sea utilizando el iris de los ojos o control mental, complementados con una técnica de control clásica o inteligente.
- Dado que el diseño del brazo robótico cuenta con una autonomía continua de cinco horas, se aconseja aumentar la capacidad para personas con mayor actividad diaria.
- Para aumentar la capacidad de carga del brazo robótico, se sugiere aumentar el torque de los servos ubicados en el hombro y en el brazo.
- Se recomienda diseñar una pinza con mayor capacidad de agarre para diferentes objetos y considerar el acondicionamiento de utensilios de uso continuo para un agarre mejor y más seguro.

6. REFERENCIAS

- [1] E. M. Bancalari, «Parálisis cerebral: correlato clínico-etiológico», tesis de Especialista en Neurología Clínica, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, 1993.
- [2] A. M. Lojkasek y G. B. Von Willei, «Tecnología Adaptativa. Apuntes de la cátedra UBA», *Calameo*, 1995. [En línea]. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/000007586809a209c6ec1>. [Accedido: 15-dic-2018]
- [3] «Tipos de parálisis cerebral», *Aitken Aitken Cohn*, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://espanol.aitkenlaw.com/paralisis-cerebral/tipos/>. [Accedido: 15-dic-2018]

- [4] C. R. Batz Saquimum, « Diseño y construcción de un brazo robótico», tesis de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005 [En línea]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0286_CS.pdf. [Accedido: 15-dic-2018]
- [5] A. Barrientos, L. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil, *Fundamentos de la robótica*. España: McGraw-Hill, 2007.
- [6] J. R. Guzmán Quijada, «Diseño de prototipo de actuador robótico para alimentación de pacientes con discapacidad neuromuscular motora», *tesis de título*, Universidad Simón Bolívar de Sarenejas, 2004 [En línea]. Disponible en: <http://159.90.80.55/tesis/000130313.pdf>. [Accedido: 15-dic-2018]
- [7] «Arduino - Environment», *Arduino*, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>. [Accedido: 15-dic-2018]
- [8] «Fritzing Fritzing» *Fritzing*, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://fritzing.org/home/>. [Accedido: 20-ene-2017]