



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**“CONSTRUCCIÓN DE UNA ARTICULACIÓN  
MECATRÓNICA DE CODO CON MOVIMIENTOS DE  
FLEXIÓN – EXTENSIÓN Y PRONOSUPINACIÓN DEL  
ANTEBRAZO”**

**INFORME TÉCNICO**

**AUTOR: ANDRÉS RODRIGO MÉNDEZ LUNA**

**DIRECTOR: ING. CARLOS VILLARREAL**

**IBARRA – ECUADOR**

**2016**

# CONSTRUCCIÓN DE UNA ARTICULACIÓN MECATRÓNICA DE CODO CON MOVIMIENTOS DE FLEXIÓN - EXTENSIÓN Y PRONOSUPINACIÓN DEL ANTEBRAZO

A. Méndez, C. Villarreal, I. Iglesias

Ingeniería en Mecatrónica  
Universidad Técnica del Norte  
Ibarra, Ecuador

[armendez@utn.edu.ec](mailto:armendez@utn.edu.ec), [cavillarreal@utn.edu.ec](mailto:cavillarreal@utn.edu.ec), [iiglesias@utn.edu.ec](mailto:iiglesias@utn.edu.ec)

**Resumen.** Este proyecto presenta el diseño y construcción de una articulación de codo, que pueda ser controlada por medio de señales eléctricas de voltaje comprendidas entre 0 a 5 voltios, cuyo valor es proporcional al ángulo de posición que se desee, y sea capaz de simular los movimientos de flexión extensión y pronosupinación del antebrazo.

Con las medidas antropométricas establecidas para su diseño, se realiza la selección de los diferentes actuadores a utilizarse en la articulación de codo. Luego se utiliza un software CAD para realizar un modelo virtual; el cual permite realizar un análisis de esfuerzos de la articulación, para verificar que el diseño sea capaz de soportar las cargas propuestas en el proyecto.

Terminado el proceso de diseño mecánico del prototipo de prótesis de codo, se realiza el diseño e implementación del sistema electrónico de control, para gobernar los movimientos a realizarse. Finalmente se realizan pruebas de funcionamiento, y calibración de cada uno de los diferentes movimientos.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Según censo realizado por el Consejo Nacional de Igualdad de Discapacidades (CONADIS) en septiembre del 2014 en el Ecuador existen cerca de 397.233 personas con discapacidad, de las cuales 193.905 presentan alguna discapacidad física, 4.620 en Imbabura y 2.402 se encuentran en Ibarra[1, 2].

Las amputaciones son unas de las prácticas quirúrgicas e irreversibles más antiguas realizadas por los seres humanos ya sea a causa de enfermedades congénitas, accidentes, malas prácticas laborales, guerras etc.

La amputación de cualquier miembro causa un gran impacto en la vida de una persona, evidenciándose, mediante el aislamiento de la sociedad por miedo de no ser aceptados, llevando a la persona a un estado de profunda depresión y baja auto estima.

Pero no solo afecta en la parte psicológica, también influye en el estado laboral, debido al tiempo de rehabilitación que necesita para recuperarse, perdiendo el

sustento de su familia y haciéndose más dependiente de otros.

Todos estos problemas incentivaron a investigar cómo mejorar la calidad de vida de personas con amputaciones; logrando sustituir en alguna forma las extremidades perdidas, dando lugar a la creación de las prótesis.

Actualmente muchos centros de investigación alrededor del mundo, proponen la creación de diversos tipos de prótesis ya sea mecánicas o mioeléctricas, siendo estas últimas las que están surgiendo con fuerza debido a su gran capacidad para lograr un funcionamiento semejante a los movimientos que realiza el cuerpo humano[3].

A diferencia de las prótesis netamente mecánicas, que necesitan de un arnés para poder ser accionadas, las mioeléctricas solo necesitan la señal mioeléctrica de un músculo, brindando así comodidad además son más estéticas. Con relación a la funcionalidad estas prótesis permiten realizar un mayor rango de movilidad.

Por tal motivo se propone la creación de la articulación de codo la cual reproducirá los movimientos del codo, de flexión-extensión y pronosupinación del antebrazo, para en el futuro poder desarrollar una prótesis transhumeral funcional, que integre brazo, codo, antebrazo y mano, con un costo razonable al alcance de todos y de excelente calidad.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. ANTROPOMETRÍA DEL MIEMBRO SUPERIOR

Para el diseño de la articulación de codo fue indispensable el estudio de la antropometría del miembro superior, para esto, se tomó como referencia a personas mayores a 18 años y 70 kg de peso; que presentaron unas medidas antropométricas promedio, que se indica en la tabla1[4].

Tabla 1 Medidas antropométricas

Medidas antropométricas.	
Masa persona	70kg
Longitud antebrazo	0.243m
Ancho del brazo	0.09m
Masa del antebrazo	1.12kg
Masa de la mano	0.49kg

## 2.2. ESPECIFICACIONES

La articulación de codo que se diseñó cumple con las siguientes especificaciones técnicas: el movimiento de flexión - extensión está comprendido entre 0° y 120° con una velocidad de 10 rpm, el movimiento de pronosupinación entre 0° a 180°, y una masa de 1.3 Kilogramos.

## 2.3. SELECCIÓN DE MATERIALES.

El material que se utilizó para la fabricación fue resina de poliéster, que tiene las propiedades mecánicas, que se describen en la tabla 2[5].

Tabla 2 Propiedades de la Resina

Propiedades mecánicas de la Resina de poliéster.		
Densidad	1.2 – 1.3	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción	25 - 50	MPa
Módulo de elasticidad	1171	MPa
Límite de fluencia	44	MPa
Límite elástico	29.6	MPa

## 2.4. SELECCIÓN DE ACTUADORES

La articulación cuenta con dos movimientos diferentes por tal motivo se escogió dos actuadores; un servomotor para la pronosupinación y un motor DC con caja reductora acoplado a un sistema de transmisión de potencia para la flexión- extensión.

### 2.4.1. SELECCIÓN DE SERVOMOTOR

Para determinar del torque necesario para rotación de la mano, se lo realizó mediante el uso de la ecuación 1. Obteniéndose un valor de 0.08 Kgm<sup>2</sup>. Para lo cual fue necesario determinar la inercia de la mano a través del uso de SolidWorks como se indica en la Figura 1, y la aceleración angular, en base a las necesidades de una persona. [6]

Ecuación 1. Ecuación de torque en función de inercia y aceleración angular

$$T = I * \alpha$$

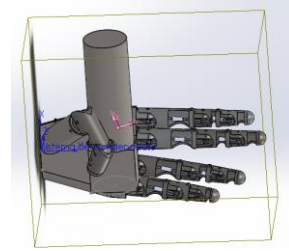


Figura 1. Modelo de mano. Momento de inercia  $I=0.01\text{kgm}^2$ . Aceleración angular  $\alpha=8.4\text{rad/s}^2$

Una vez determinado el Torque necesario para la rotación de la mano se seleccionó un servomotor HITC 311 disponible en el mercado local.

### 2.4.2. SELECCIÓN DEL MOTOR DC

Para la selección del actuador se consideró 90 grados de flexión, debido a que en esta posición se produce el mayor esfuerzo. Estableciéndose el siguiente estado de cargas para este elemento como se indica en la Figura 2.

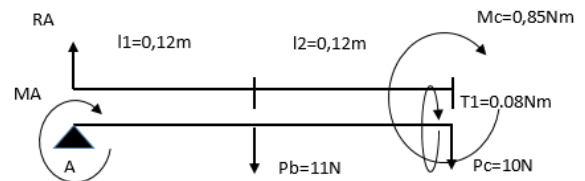


Figura 2 Diagrama de cuerpo libre para el antebrazo.

En donde:

Pc es el valor del peso a levantarse.

Pb es el peso del antebrazo.

RA es la reacción producida por todas las fuerzas externas.

Mc es el momento resultado de la acción del peso a levantarse Pc.

MA es el momento que se utilizara para determinar el valor del actuador.

Para lo cual se obtiene el valor de  $MA=4.5\text{Nm}$ . Con esto se procedió a seleccionar el actuador necesario para realizar este torque. Un motor DC seleccionado fue de 200 rpm y 3Nm. finalmente se diseña un sistema de transmisión mediante tornillo sin fin y corona para alcanzar los 4.5 Nm como se indica en la Figura 3.

## 2.5. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRASMISIÓN

Se decidió utilizar el mecanismo de tornillo sin fin y corona por la posibilidad de manejar grades razones de torque en poco espacio y principalmente por la propiedad e auto bloqueo.

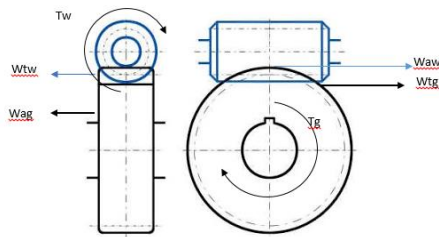


Figura 3 Tornillo sin fin y corona

El tornillo sin fin seleccionado tiene un ángulo de avance de 9 grados y un ángulo de presión de  $\theta=20$  grados.

El diámetro de la corona para producir los 4,5Nm es de 40mm.

Para garantizar que el mecanismo funcione a la velocidad requerida se utiliza la Ecuación 8. Como resultado se obtiene que es necesario que la corona tenga 40 dientes.

Ecuación 2 velocidad de engrane

$$Ng = \frac{Nw * a}{zg}$$

Donde:

$Ng$  = velocidad del engrane

$Nw$  = velocidad del tornillo sin fin

$a$  = número de inicios del tornillo sin fin

$Zg$  = número de dientes del engranaje

Así:

$$zg = \frac{Nw * a}{Ng}$$

$$zg = \frac{200(2)}{10}$$

$$zg = 40$$



Figura 4 Sin fin y corona [10]

## 2.6. DISEÑO DEL EJE DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Los parámetros necesarios para el diseño de este eje son el torque que va a transmitirse para mover la articulación del codo, y las fuerzas presentes por el uso de un engranaje helicoidal, debido a la geometría del tornillo sin fin. El torque a transmitirse es de 4,5Nm previamente calculado en el dimensionamiento del motor. En la figura 6 se indica el modelo de eje.

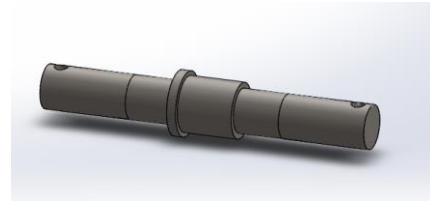


Figura 5 modelo de eje

En los puntos A y E del eje se encuentra localizadas las barras que van a soportar el antebrazo, en estos lugares sale toda la potencia ingresada por el engranaje central. En los puntos B y D se localizan los rodamientos para la sujeción del eje. El punto C es en lugar en donde se encuentra el engranaje central, encargado de transmitir toda la potencia desde el motor. Figura 4.7.

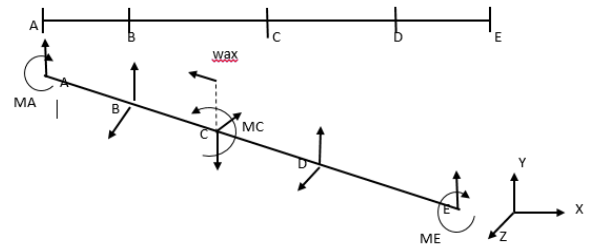


Figura 6 Diagrama de cuerpo libre eje

Realizado del análisis se determina que le momento flector al que está sometido el eje se  $M_B=0.304Nm$  y  $M_C=1.76Nm$  y un torque de 4.57 Nm.

Los diámetros a calcularse corresponden a los puntos B, D lugar donde se colocan rodamientos y C donde se coloca el engranaje. Se utiliza la teoría de falla por fatiga mediante el criterio de la Energía de la distorsión. Ecuación 9.

- Material ASTM A 36  $S_u = 400MPa$ ,  $S_y = 248MPa$  [11]
- Factor de seguridad de  $N=3$ . Sugerido en el libro de diseño de máquinas. [11]
- El valor de concentración de esfuerzos  $kt = 3$ , debido a que se va a realizar perforaciones transversales en el eje, para sujetar los diferentes elementos a colocarse.[11]
- 

Ecuación 3 Cálculo de diámetro

$$d = 3 \sqrt{\frac{32n}{\pi} \sqrt{\left(\frac{ktM}{Sn'}\right)^2 + \frac{3}{4} * \left(\frac{T}{S_y}\right)^2}}$$

Donde

$d$  = diámetro a calcular

$n$  = factor de seguridad

$kt$  = concentración de esfuerzo

$M$  = mometo flector  
 $Sn'$  = resistencia a la fatiga real  
 $T$  = torsión  
 $Sy$  = límite de fluencia (44MPa)  
 Así:

$$d_B = d_D = 0.007m$$

$$dc = 0.010m$$

El puntos A y E se pone pernos Allen de 4mm de diámetro, estos serán los encargados de sujetar las barras de soporte del antebrazo. Además se usó rodamientos de agujas en los soportes. Figura 7. [12]

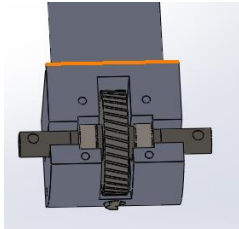


Figura 7 soporte, eje y corona

### 2.7. CÁLCULO DEL ESPESOR ANTEBRAZO.

El elemento crítico de diseño en la articulación de codo es el antebrazo, el cual está sometido a las diferentes cargas externas que se indica en la Figura 8, se diseñó el espesor usando el criterio de juntas por aplastamiento.

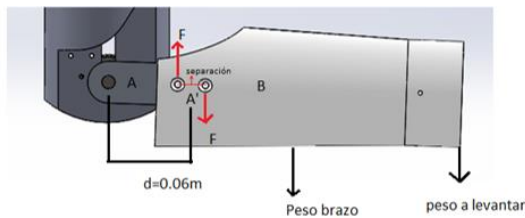


Figura 8. Modelo de articulación.

Se determinó la fuerza  $F$  a la que está sometida la junta empernada, utilizando el diagrama de cuerpo libre de la Figura 9.

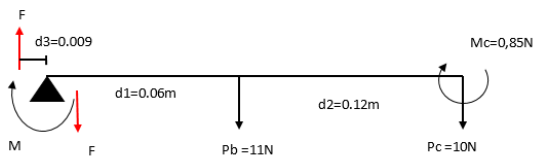
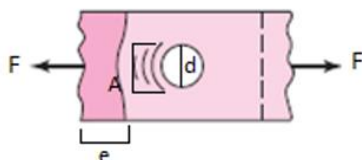


Figura 9 diagrama de cuerpo libre antebrazo,  $F=368N$

Posteriormente se determina el área de aplastamiento que puede sufrir la resina utilizada como material de base para la elaboración del antebrazo, como se indica en la Figura 10.



Así,

Ecuación 4. Perímetro de aplastamiento

$$P = \pi * \frac{d}{2}$$

$$P = \pi * \frac{3,9mm}{2} = 6,1mm$$

Figura 10. Sujeciones y cargas externas

Donde:

$d$ =diámetro del agujero.

$P$ =semi-perímetro del agujero.

Para su análisis se consideró un perno de 3,9mm de diámetro, por lo tanto, se utiliza la Ecuación 7 para determinar el área de aplastamiento.

Ecuación 5 Área de aplastamiento

$$A = P * e$$

Para determinar este espesor ( $e$ ) fue necesario conocer la resistencia a la compresión de la resina y finalmente se utilizó la teoría de falla por compresión, se llega a establecer un espesor de 2,4mm, utilizando la Ecuación 10 y 11.

Ecuación 10 Energía de distorsión

$$\sigma = \frac{Sy}{fs}$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo

$Sy$ = resistencia a la fluencia de la resina

$fs$ = factor de seguridad

Ecuación 11 Esfuerzo en perforaciones

$$\frac{F}{nA} = \frac{Sy}{fs}$$

$$e1 = \frac{F * fs}{n * Sy * P}$$

$$e1 = 2.4mm$$

### 2.8. ANÁLISIS DEL MODELO DE ARTICULACIÓN DE CODO.

Para hacer el análisis de esfuerzos se utilizó SOLIDWORKS 2016, que permite validar los cálculos establecidos anteriormente, mediante un análisis de esfuerzos por elementos finitos; así se simula considerando que: el antebrazo estará constituido de una resina de poliéster, el eje de transmisión de un acero ASTM A36 y los soportes de los actuadores de nylon.

### 2.8.1. RESTRICCIONES.

Se restringe los movimientos de la articulación colocando la sujeción de geometría fija, las cargas del antebrazo y la carga a levantarse como se indica en la Figura 11.

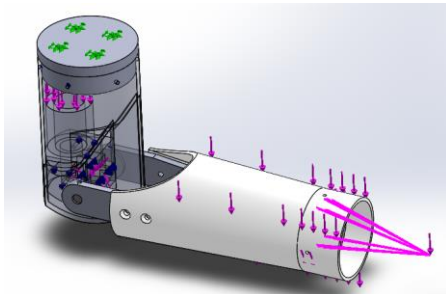


Figura 11. Restricciones establecidas para el análisis de esfuerzos.

### 2.8.2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS.

Como resultado del análisis del modelo en base al criterio de falla de Von Mises, se obtuvo la siguiente distribución de esfuerzos, como se indica en la Figura 12.

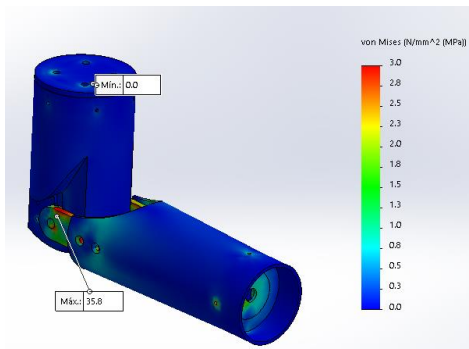


Figura 12 Esfuerzo de Von Mises

### 2.1.1. ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS.

La distribución de desplazamientos se muestra en la Figura.13, llegándose a determinar un desplazamiento máximo de 1.08mm.

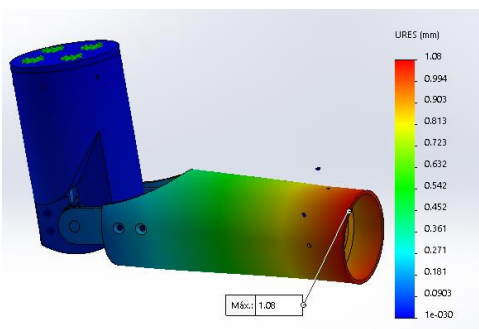


Figura 13 Desplazamiento

### 2.8.3. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD.

Finalmente, se obtuvo el factor de seguridad con un valor mínimo de 5.75 es las sujeciones del antebrazo como se indica en la Figura 14.

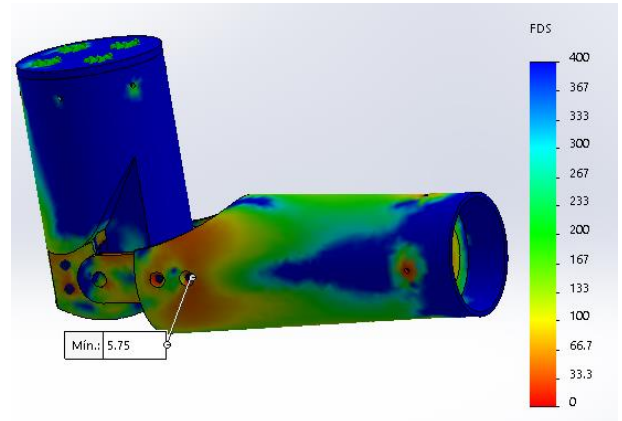


Figura 14 Factor de seguridad

## 2.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

El control a utilizado en el codo es un sistema de lazo cerrado como se indica en la Figura 15.

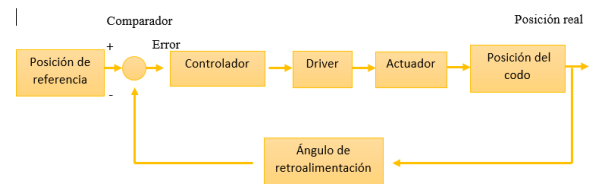


Figura 15 diagrama de bloques del sistema de control

### 2.2.1. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE CONTROL.

El modelo matemático se realiza del conjunto motor – potenciómetro, con lo que aplicando una señal escalón en la planta se logra su caracterización en ecuaciones en el dominio del tiempo, se transforma al dominio de Laplace, obteniendo la función de transferencia, y así diseñar el tipo de control a implementar.

La ecuación característica ideal corresponde a una señal rampa de la siguiente forma.

$$y \approx mt$$

Aplicada la transformada de Laplace se obtiene la señal en el dominio (s)

$$y \approx \frac{m}{s^2}$$

La señal de entada corresponde a una señal escalón, con amplitud igual voltaje en corriente directa así:

$$u(t) \approx v$$

$$U(s) \approx \frac{V}{s}$$



La función de transferencia del sistema

$$G(s) \approx \frac{Y(s)}{U(s)} \approx \frac{m/s^2}{\frac{V}{s}}$$

$$G(s) \approx \frac{m}{V} \frac{1}{s}$$

### 2.2.2. MODELO MATEMÁTICO REAL

La caracterización del modelo matemático de la articulación se lo realiza aplicando diferentes valores de voltaje al motor y midiendo el ángulo de desplazamiento. La figura 16 indica el comportamiento de la planta.

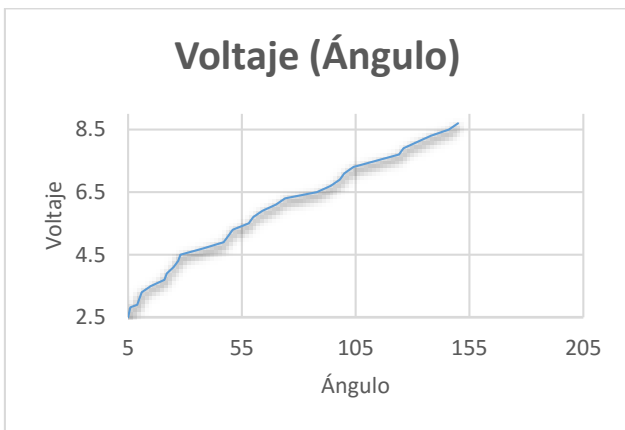
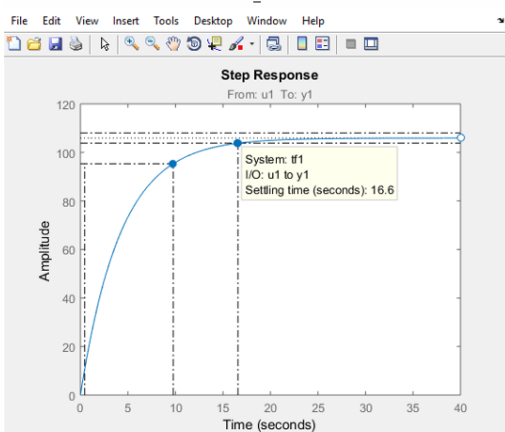


Figura 16 comportamiento real del sistema

Los datos obtenidos en la figura se los procesa en Matlab y mediante el uso de la herramienta Ident se obtiene el modelo real con un porcentaje de estimación de 94%.

Así:

$$G(s) = \frac{24.99}{s + 0.236}$$



Status:  
Estimated using TFEST on time domain data "motor1".  
Fit to estimation data: 94.03% (simulation focus) |

Figura 17 modelo en lazo abierto

El modelo obtenido corresponde a un sistema de control de primer orden.

Así:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

$$G(s) = \frac{105.8}{4.16s + 1}$$

Al ser un sistema de tipo 1 el modelo matemático contiene un término integrador, por lo tanto no es necesario aplicar la parte integral. Además con solo modificar la ganancia proporcional se puede variar la velocidad de respuesta del sistema, por ende no es necesario la parte derivativa.

El sistema de control a implementar es el indicado en la figura 18.



Figura 18 Sistema de control

El error en estado estacionario con un  $K_c=2$  produce una amplitud de 0.995 y con tiempo de respuesta alrededor de 70 ms con un error de 0.0046, indicado en la figura 19.

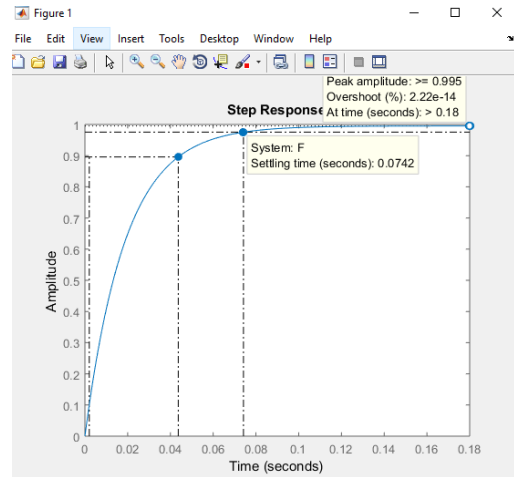


Figura 19 Sistema de control lazo cerrado

En un control proporcional la salida depende directamente del error, el cual es igual a la diferencia entre la señal de referencia o setpoint con el valor medido de las variables a controlar.

$$e = Sp - V_r$$

Donde:

$e = error$

$Sp = set\ point$

$V_r = valor\ medido$

Entonces:

$$U_p = kc * e$$

Donde:

$U_p =$  señal de control proporcional

$K_c =$  ganancia proporcional

$e =$  error proporcional

Se sustituye el valor de  $K_c = 2$ , obtenido anteriormente.

$$U_p = 2(e)$$

### 3. RESULTADOS

Se obtuvo un modelo de articulación de codo de acuerdo a medidas antropométricas y que cumple con las especificaciones del proyecto.

El prototipo de articulación de codo realiza el movimiento de flexión- extensión entre 0 y 120 grados y la pronosupinación con ángulos de 0 a 180 grados. Además soporta una carga de 0.5Kg sin comprometer la integridad eléctrica como física.

Con relación a la parte mecánica la implementación del mecanismo de tornillo sin fin y corona, fue la mejor opción ya que permitió manejar grandes razones de potencia y desenergizar la fuente de alimentación, una vez concluido el movimiento.

La resina como material utilizado para la parte estructural resultó ser una alternativa económica y útil al momento de realizar el prototipo, sin embargo para realizar modelos comerciales no es conveniente debido que no resiste fuertes impactos y el proceso de manufacturado lleva mucho tiempo.

### 4. CONCLUSIONES

De la información bibliográfica recopilada los parámetros importantes para el diseño de la articulación de codo son la longitud del antebrazo incluido la medida de la mano, además de la masa del antebrazo y mano.

El mecanismo tornillo sin fin y corona es la mejor opción debido a la posibilidad de manejar grandes razones de torque y principalmente por la propiedad de auto bloqueo, la cual permite dejar de energizar al actuador y que este conserve su posición a menos que el controlador de una orden de cambio, ahorrando así energía.

La resina como material para un prototipo es útil, sin embargo para realizar modelos comerciales, no es el adecuado ya que no soporta golpes y con espesores pequeños se rompería fácilmente.

El diseño de un control proporcional permitió posicionar la articulación de codo, logando ángulos con un error promedio de 2.37 grados y una respuesta del sistema de 74ms.

Realizadas las pruebas de funcionamiento de la articulación de codo se observó que el consumo de corriente y voltaje en los actuadores es similar analizando con el dispositivo sin carga y con una carga máxima de 0.5 kg en la mano.

### 5. RECOMENDACIONES

Verificar con que voltaje de alimentación se energiza el puente H para que se encuentre acorde al voltaje especificado por el fabricante para evitar daños en el mismo y en el actuador

La fuente de alimentación para la parte de potencia debe ser diferente a la de control debido a que cuando los actuadores entran en funcionamiento estos adsorben mucha energía y producen un mal funcionamiento de los elementos de control.

Evitar que las baterías de descarguen en su totalidad ya que perderían la posibilidad de cargarse de nuevo y quedarían inservibles.

Utilizar otro tipo de sensor que detecte la posición de la articulación, debido a que el utilizado, al ser un dispositivo mecánico tiende a deteriorarse, provocando fallos al momento de controlar las movimientos.

### 6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los señores, Carlos Villarreal e Iván Iglesias decentes de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte.

### 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CONADIS, «CONADIS,» 10 01 2014. [En línea]. Available: [www.CONADIS.gov.ec](http://www.CONADIS.gov.ec).
- [2] «Discapacidad y tecnología,» 13 07 2012. [En línea]. Available: <http://www.discapacidadonline.com/tag/discapacidad-y-tecnologia/page/3>.
- [3] R. Chaurand Ávila, Dimensiones antropométricas de población latinoamericana, México, 2001.
- [4] J. Ramos, «Comportamiento Mecánico de compuestod en Matriz con Resina Epóxica y Resina Poliester Reforzados con Fibra de Carbono Unidireccional,» CONAMET, Cali, 2008.
- [5] M. Nordin y V. H. Frankel, Biomecánica basica del sistema músculo esqueletico, España: Fareso S.A., 2001.
- [6] F. Gómez, «GRABCAD,» 25 01 2016. [En línea]. Available: <https://grabcad.com/library/protesis-de-mano>.
- [7] P. Vallejo y J. Zambrano, Física Vectorial, Ecuador: RODIN, 2009.
- [8] R. G. Budynas y N. Keintt, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, México: McGraw-Hill, 2008.





- [9] H. Gears, «Worms & Wheels,» 30 06 2015. [En línea]. Available: [http://www.hpcgears.com/n/products/4.worms\\_wheels/worms\\_wheels.php](http://www.hpcgears.com/n/products/4.worms_wheels/worms_wheels.php).
- [10] R. Mott, Diseño de elementos de máquinas, Cuarta ed., México: PEARSON EDUCATION, 2006.
- [11] NSK, Rodamientos de Agujas, USA: NSK, 2015.

**Méndez A., Autor**



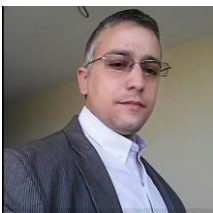
**Estudiante de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte**

**Villarreal C., Autor**



**Docente de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte**

**Iglesias I., Autor**



**Docente de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte.**