



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Artículo científico

TEMA:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ESLABÓN Y ARTICULACIÓN DE HOMBRO
PARA EL BRAZO ROBÓTICO UTN**

AUTOR

ALEX DANILO BASTIDAS JÁCOME

DIRECTOR

ING. DIEGO ORTIZ

Ibarra-Ecuador

Septiembre 2017

Diseño y construcción del eslabón y la articulación de hombro para el Brazo Robótico “UTN”

Autores – Alex Danilo BASTIDAS JÁCOME, Ing. Diego Luis ORTIZ MORALES.

Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte, Avenida 17 de Julio 5-21 y José María Córdova, Ibarra, Imbabura

adbastidas@utn.edu.ec, dlortiz@utn.edu.ec

Resumen. *Los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte no cuentan con un manipulador robótico donde los estudiantes puedan la articulación de hombro que es parte del proyecto general “Brazo Robótico UTN”.*

Se realiza el diseño en base a la morfología de brazos robóticos comerciales y con la premisa de que tiene que levantar un kilogramo de peso como carga y el peso de los otros elementos constitutivos. Otra determinante en el diseño es que debe ser adaptable por la parte superior al antebrazo y por la parte inferior a la base.

Después del análisis del diseño estructural y de la transmisión se realiza la comprobación utilizando herramientas de análisis numérico con el fin de validar el diseño. Se realizan los planos de acuerdo a la normativa INEN y se procede a la construcción del prototipo, para que esté disponible para la unión con las demás piezas constitutivas del Brazo Robótico UTN.

Palabras Claves

Brazo Robótico, mecatrónica, diseño, construcción, laboratorios, hombro, Labview.

Abstract. *The laboratories of the Mechatronics Engineering career at the Técnica del Norte university don't have a robotic manipulator where students can put their theoretical knowledge into practice, for that reason, is presented the design and construction of the arm link and the shoulder joint that is part of the "UTN Robotic Arm" project.*

The design is made based on the morphology of commercial robotic arms and with the premise that it must lift one kilogram of weight as load and the weight of the other constituent elements. Another determinant in the design is that it must be adaptable from the upper to the forearm and from the bottom to the base.

After the analysis of the structural design and the transmission, the verification is carried out using numerical analysis tools to validate the design. The planes are made per INEN regulations and the prototype is built, so that it is available for joining with the other constituent parts of the UTN Robotic Arm.

poner en práctica sus conocimientos teóricos, por lo tanto, en el presente trabajo se realiza el diseño y construcción del eslabón del brazo y

Keywords

Robotic arm, Mechatrónica, desing, contruction, laboratories, arm, Labview.

I. INTRODUCCIÓN

La revolución industrial fue dada por la explotación de obreros a los cuales se les obligaba a trabajar en procesos en serie durante largas horas y con salarios muy bajos. Esta violación de derechos dio un giro de 360 grados cuando nació la Robótica y con ella la utilización de los Brazos Robóticos que controlen procesos en cadena durante horas y a velocidades mayores sin la necesidad de salarios, cansancio, enfermedades o vacaciones.

El uso de sistemas robóticos en la industria, para cumplir funciones que requieren extrema precisión ha ido en ascenso en las últimas décadas. El desarrollo de estos sistemas se ha enfocado en mejorar ciertos aspectos como resistencia para trabajar en diferentes condiciones, precisión con la que se realizan movimientos, multifuncionalidad (manipulación, corte, perforación, etc.), adaptabilidad en diferentes entornos de trabajo y la independencia en su funcionamiento, es decir que tenga la capacidad de tomar decisiones respecto a su actuación. [1]

Considerando lo anteriormente expuesto es fundamental que las universidades capaciten a sus ingenieros (especializados en la industria) en sistemas de brazos robóticos. Lastimosamente en la actualidad la carrera de Ingeniería en Mecatrónica no cuenta con un Brazo Robótico experimental que permita al estudiante y docente poner en práctica la teoría de su funcionamiento.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Brazo Robótico

La definición de mayor acogida es la propuesta por la Asociación de Industrias de Robótica (RIA - Robotic Industry

Association,1980), según la cual: "Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas".

La ISO (Organización Internacional de Estándares) bajo la norma ISO 8373:1994 adopta definición de la RIA y la modifica; proponiendo: "Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas". [2]

B. Parámetros del Brazo Robótico "UTN"

La Tabla I muestra las características y parámetros de funcionamiento y necesarios para el diseño y la construcción del B. R. "UTN".

Tabla I.
Características y parámetros del B.R "UTN"

Parámetro	Selección	Descripción
Generación	Primera	Responde a tareas programadas.
Área de aplicación	Investigación	Será usado en el Laboratorio de Robótica de la UTN.
Tipo de actuadores	Eléctricos	Aportan mayor precisión en el control automático.
Configuración	Esférica	Para alcanzar un mayor volumen de trabajo.
Grados de libertad	Seis	Uno por cada articulación.
Tipos de articulaciones	Rotacionales	Proporcionan un GDL y movimientos angulares.
Capacidad de carga	1 [Kg]	Carga máxima y recomendada.

1) Capacidad de Carga

Es el peso que transporta el elemento terminal del manipulador, sin considerar el peso del mismo robot. Es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un manipulador. El brazo robótico "UTN" tiene una capacidad de carga máxima de 1 [Kg].

C. Actuador

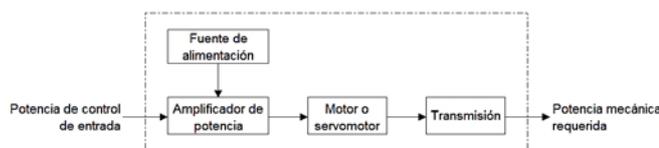


Fig. 1. Sistema de actuador. Fuente: [3]

La función de un actuador es transformar algún tipo de energía en otro tipo de energía deseado; en robótica la energía deseada a obtener generalmente es la mecánica. Es común confundir al motor como actuador, cuando en realidad el motor forma parte de este y es su componente principal; junto

con la transmisión, amplificación, alimentación y/u otros accesorios componen el sistema actuador (Fig. 1).

2) Motores de pasos

Los motores de pasos (...) no tienen escobillas ni conmutador mecánico. En lugar de ello, la acción de conmutación necesaria para que funcione el motor se logra con transistores externos. Además, el rotor no tiene devanado de armadura. Solo es un conjunto de imanes permanentes de polos salientes... [4]

Los motores paso a paso requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de sus bobinas en la secuencia apropiada. Este proceso se lleva a cabo mediante la configuración electrónica de puente H capaz de direccionar el flujo bidireccional de corriente. Es necesario utilizar un puente H para cada bobina del motor PAP. La secuencia y temporización de pulsos se realiza mediante un microcontrolador. [5]

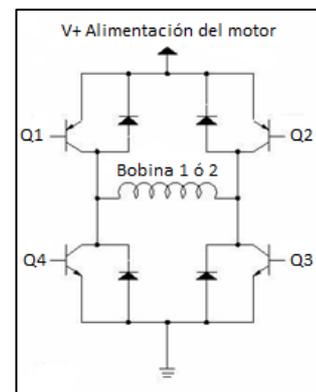


Fig. 2. Puente H.

D. Adquisición de datos

"Arduino Mega es una tarjeta de desarrollo open-source construida con un microcontrolador modelo Atmega2560 que posee pines de entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales"[6]. Posee las siguientes características:

- Microcontrolador ATmega2560.
- Voltaje de entrada de - 7-12 [V].
- 54 pines digitales de Entrada/Salida (14 de ellos son salidas PWM).
- 16 entradas análogas.
- 256k de memoria flash.
- Velocidad de reloj de 16 [Mhz].

E. Sistema de control

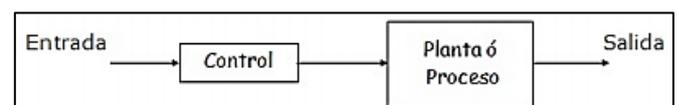


Fig. 3. Diagrama de bloques de un sistema de control abierto. Fuente: [7]

Los sistemas de control en lazo abierto son aquellos donde la salida no tiene efecto sobre la acción de control (Fig. 3). La salida no se mide ni se realimenta para compararla con la entrada.

Se utilizan en sistemas donde las entradas son conocidas previamente y en los que no hay perturbaciones o

es despreciable su afectación a la salida del proceso. Este proyecto por ejemplo utiliza un lazo abierto por la ventaja que ofrecen los motores de pasos al ingresar cierto número de pasos y devolver un número de grados. La única información que se le ofrece al sistema es un final de carrera para dar inicio al conteo de pasos pero que no es considerado como retroalimentación.

III. METODOLOGÍA

En la siguiente figura se muestra la metodología empleada en el proceso de diseño y construcción del eslabón y articulación de hombro.

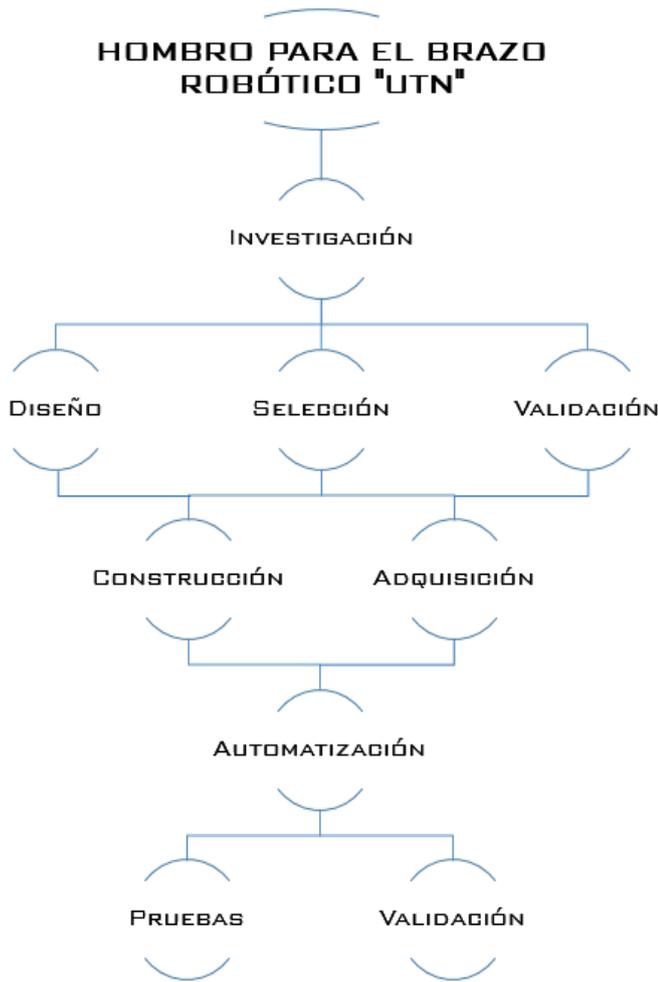


Fig. 4. Metodología

A. Diseño

1) Análisis estático

El hombro está sujeto a varias cargas en forma de fuerzas y momentos ocasionados por el peso de eslabones y motores principalmente. Las dimensiones de los eslabones también influyen en el aumento del par, entonces, para poder disminuir la magnitud de las cargas se debe tratar de aligerar los eslabones sin afectar su longitud y preferentemente tampoco su rigidez para evitar excesivas deformaciones. [8]

La Fig. 5 representa un bosquejo en una vista lateral del brazo robótico con sus miembros en posición extendida y en

la Tabla II se presentan las definiciones de los símbolos usados.

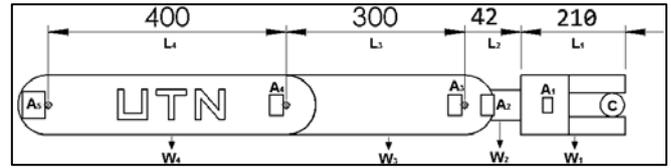


Fig. 5. Diagrama de los miembros superiores.

Tabla II. Descripción de los elementos de la Fig. 5.

Símbolo	Masa [kg]	Descripción
A ₁	0.153	Actuador del gripper
A ₂	0.5	Actuador de la muñeca (giro)
A ₃	0.5	Actuador de la muñeca (eje y)
A ₄	0.5	Actuador del codo
A ₅	2.1	Actuador del hombro
W ₁	0.45	Masa del gripper
W ₂	0.1	Masa de la muñeca
W ₃	1.4	Masa del antebrazo
W ₄	1.5	Masa del brazo
C	1	Carga a levantar

El torque requerido por el motor está dado por la sumatoria de los productos entre la distancia y la fuerza de los elementos a soportar. Para cada eslabón teóricamente se considera que el peso está en centro de gravedad e idealmente este debería encontrarse en la mitad de la longitud, por ello se dividirá para dos.” [9]

$$X_1 = (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \cdot C + \left(\frac{L_1}{2} + L_2 + L_3 + L_4\right) \cdot W_1 + (L_2 + L_3 + L_4) \cdot A_1$$

$$X_2 = \left(\frac{L_2}{2} + L_3 + L_4\right) \cdot W_2 + (L_3 + L_4) \cdot A_2 + \left(\frac{L_3}{2} + L_4\right) \cdot W_3 + L_4 \cdot A_3 + \frac{L_4}{2} \cdot W_4$$

$$T_{A4} \cdot g = 33.233 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El valor de T_{A4} representa el momento máximo generado en el eje del hombro en un análisis estático.

2) Diseño del eje

La Fig. 6 representa un primer diseño del eje a construirse desde el plano XZ. Desde el punto A ingresa el torque del motor hacia el eje por medio de Catarinas. Los puntos B y E son apoyos que incluyen cojinetes. Los puntos C y D representan a los eslabones de brazo.

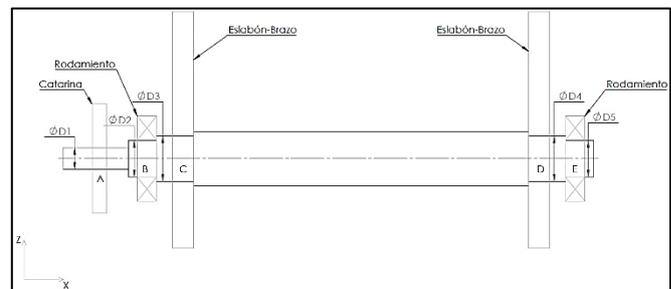


Fig. 6. Diseño del eje

B. Selección

3) Selección de materiales

En la Tabla III se observa que las relaciones van en forma descendente mientras más bajo sea el número más conveniente es el material para los fines de este proyecto. Por lo tanto, el elegido es el aluminio que, aunque la maquinabilidad de la madera sea mejor, su relación entre densidad, límite elástico y precio es aceptable.

Tabla III.
Comparativa de materiales

Material	Dureza [HV]	Densidad [kg/m ³]	Relación densidad - límite elástico	Relación densidad - precio	Maquinabilidad
Madera	4-8	660-800	4	4	1
Poliamida de nailon	25.8-28.4	1120-1140	3	2	2
Fibra de vidrio	10.8-21.5	1750-1970	2	3	3-4
Aleaciones de Aluminio	12-151	2500-2900	1	1	3
Acero de baja aleación	140-693	7800-7900	6	5	5-6
Acero inoxidable	130-570	7600-8100	5	6	5-6

En el Ecuador el aluminio tipo ASTM1200 es el más utilizado en la industria metalmeccánica y su distribución se lo hace en forma de chapa metálica en variadas dimensiones como presenta la empresa DIPAC en su hoja de datos. De esta manera se elige a este aluminio como material principal de la estructura de hombro y brazo.

Como material del eje para hombro se elige al de mayor dureza y densidad para que sea capaz de soportar el esfuerzo cortante provocado por el brazo. El acero AISI 4340 que DIPAC ofrece para ejes y ejes de transmisión es el elegido.

El material para porta rodamientos es segundo con mejores características en resistencia y maquinabilidad, la poliamida de nailon (PA6).

4) Selección del motor de pasos

En la Tabla IV se observa que el NEMA 34 ofrece más torque que los demás sin embargo es pesado y consume más corriente que se ve reflejado como inconveniente al combinar el brazo y hombro con los otros proyectos para formar el Brazo Robótico "UTN" pues se usa una sola fuente para alimentar a 6 motores con el resto de circuito electrónico y de control. El NEMA 17 es pequeño y liviano pero el torque que ofrece es demasiado bajo.

Tabla IV.

Características de tres motores de pasos bipolares

Motor	Designación	Fases	Ángulo de paso [°]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia por fase [Ω]	Torque [Nm]	Peso [Kg]
NEMA 17	17HS4401	2	1.8	2.55	1.7	1.5	0.4	0.24
NEMA 23	23HS7628	2	1.8	3.2	2.8	1.13	1.8	1
NEMA 34	34HS1456	2	1.8	3	5.6	0.55	8.5	3.8

A pesar de que ninguno de los tres motores ofrece los 30 [N*m] necesarios para mover el brazo, se selecciona el motor de pasos bipolar de imán permanente NEMA 23 23HS7628 y acoplado a una caja reductora y a la transmisión catarina – cadena se obtiene el par deseado.

C. Programación

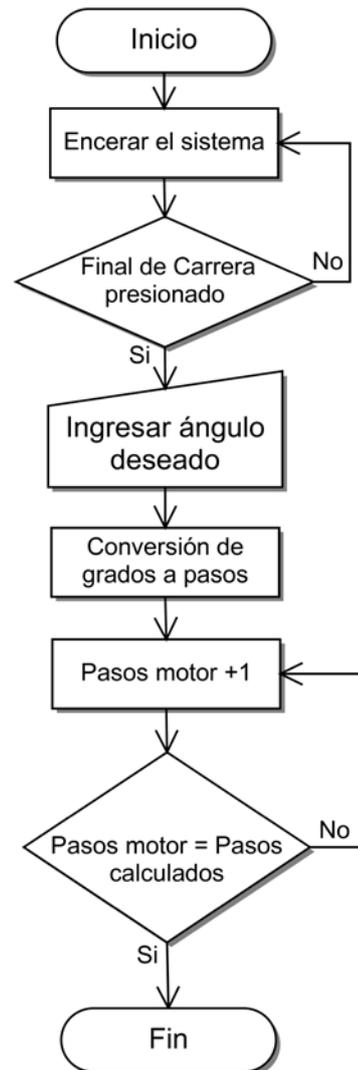


Fig. 7. Flujoograma de control de hombro.

El hombro es controlado por medio de un software de programación gráfica. En este se hace uso de subprogramas para que se facilite la unión con los demás proyectos del BRUTN.

La Fig. 7 muestra el flujoograma de procesos donde muestra en forma sistemática la lógica empleada en el objetivo de controlar al hombro. A partir de este esquema se traduce a lenguaje de programación.

IV. RESULTADOS.

En la Figura 37 se presenta una vista isométrica del modelo 3D del prototipo completamente diseñado.

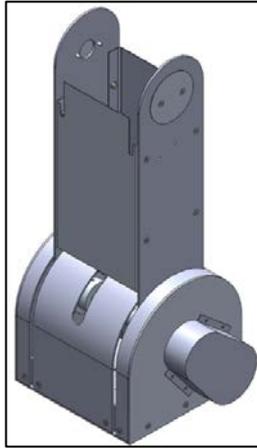


Fig. 8. Modelo 3D del hombro para el B.R. "UTN".

A. Análisis de elementos finitos

Mediante el análisis numérico computacional se determinaron los esfuerzos combinados de Von Mises, el desplazamiento y el factor de seguridad mínimo. Como primer paso se colocan las condiciones de borde y para asegurar la convergencia del modelo se realiza el análisis en función del esfuerzo de von mises y el número de elementos.

1) Factor de seguridad

En este análisis el software considera las resistencias de los materiales empleados con los esfuerzos admisibles y obtiene un factor de seguridad de 3.5.

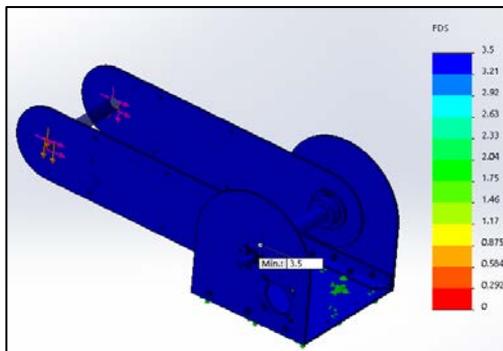


Fig. 9. Factor de seguridad

2) Desplazamiento

En la Fig. 10 se muestra que el punto de mayor desplazamiento es de 0.057 [mm] asegurando la confiabilidad del sistema después de varias repeticiones y horas de trabajo y la selección del material es la correcta.

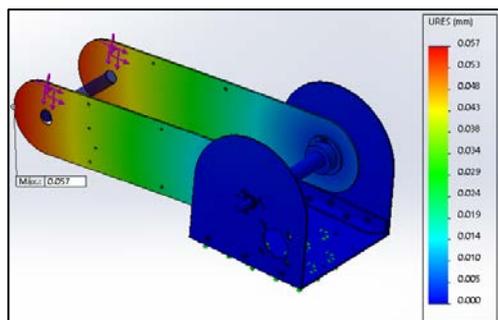


Fig. 10. Desplazamiento del modelo

3) Esfuerzo máximo de Von Mises

Se observa en la Fig. 11 que la zona de máximo esfuerzo se encuentra en la sección de apoyo para los rodamientos en el eje. Sin embargo, el esfuerzo máximo no supera al esfuerzo admisible del eje.

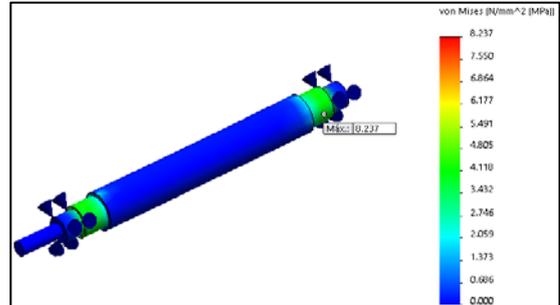


Fig. 11. Esfuerzo máximo

B. Construcción y ensamblaje

La construcción y ensamblaje de todas las partes constitutivas se las realizó en un taller metal mecánico a partir de los planos de construcción bajo normas INEN. A continuación, se presentan imágenes del proceso de construcción, ensamblaje y el prototipo final.



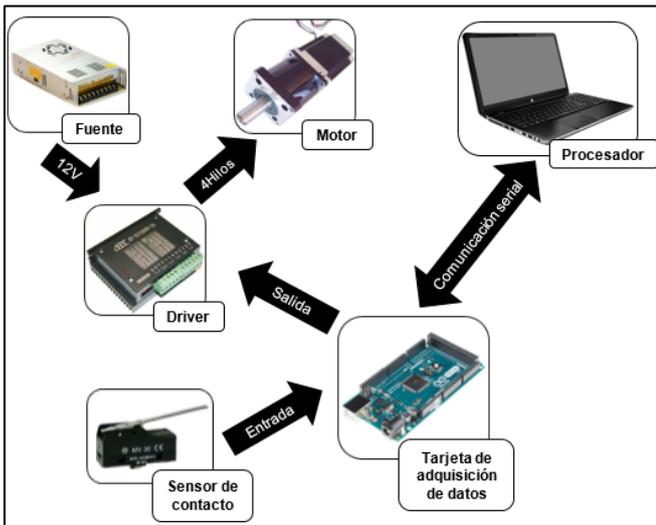
Fig. 12. Ensamblaje del brazo y hombro con el BRUTN



Fig. 13. Brazo robótico UTN

C. Sistema de control

En la elaboración del sistema de control para el hombro se recuerda su utilidad que es girar de 0° a 90°. El motor de pasos no almacena su posición al desconectar la fuente de alimentación o de control y para ello se usa un sensor de posición final de carrera para indicar al sistema que es la posición cero (home) del motor. Todas las variables a controlar son digitales tanto entradas como salidas. El sistema electrónico del hombro se representa en el siguiente gráfico:



D. Pruebas

4) Repetitividad

Con el prototipo completamente ensamblado es necesario conocer la repetitibilidad del hombro. Para esto se tomó datos del brazo en una posición y se ejecutó una secuencia de 20 repeticiones con el objetivo de saber si el brazo va a llegar al mismo punto de partida y fin. Se obtuvo los siguientes datos:

Tabla V.
Pruebas de repetitividad.

Número de repetición	Grado inicial [°]	Grado final [°]
1	0	45
2	0	45
5	0	45
10	1	46
20	2	47

Ecuación 1. Error porcentual.

$$e\% = \frac{|V_T - V_e|}{V_T} * 100$$

Utilizando la Ecuación 1 se obtiene el error porcentual que el hombro de brazo robótico posee al ejercer operaciones repetitivas. El error máximo es del 2% después de varias repeticiones

5) Pruebas de precisión

Usando los datos de varias pruebas usando peso y sin peso se hace una comparación para demostrar que el sistema responde de manera similar con o sin carga. La precisión llega a tener un error porcentual de hasta el 5% por lo cual se

recomienda mejorar la transmisión para evitar pérdidas y obtener un sistema más robusto.

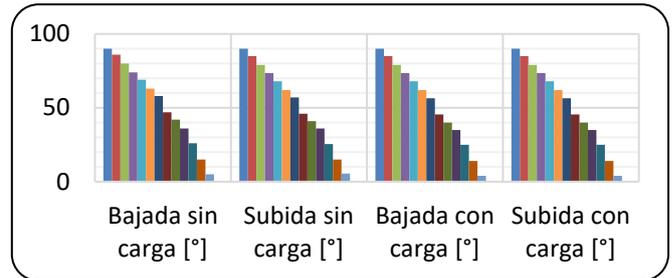


Fig. 14. Datos obtenidos de las pruebas de precisión

V. CONCLUSIONES

Se diseñó y se construyó con éxito el eslabón y la articulación de hombro para el prototipo de brazo robótico para el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte siguiendo los parámetros.

El mecanismo de hombro cumple con el parámetro de movimiento de 0[°] a 90[°], el parámetro de peso a levantar que es de 1 [kg] y de ser acoplable con el resto de elementos del brazo robótico "UTN".

Se realizó el diseño de los componentes mecánicos y de la estructura del hombro para el Brazo Robótico "UTN" y se verificó su veracidad haciendo uso de herramientas computacionales basadas en elementos finitos donde se obtuvo un factor de seguridad de 3.5 y un desplazamiento 0.057. Con esto se verificó la correcta selección del material el aluminio ASTM 1200 para tapas y laterales y el acero AISI 4340 para el eje.

Se obtuvo la cinemática directa e inversa del sistema y se implementó en el hombro para conocer las trayectorias como posiciones que debe cumplir en su rango máximo de operación de 0 [°] a 90 [°] y de 40 [cm] desde su base.

Se construyó y ensambló todos los elementos mecánicos para el eslabón y hombro del Brazo Robótico "UTN" con una tolerancia de +- 0.2 usando los planos creados a partir del diseño CAD bajo el diseño propuesto por el INEN.

Se realizó el diseño del sistema de control de la articulación de hombro para que pueda fusionarse perfectamente con las demás partes constitutivas del Brazo Robótico "UTN"

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Alonzo, "Diseño, construcción y control de un brazo robótico," 2014.
- [2] I. Standard, "8373: 1994," *Manipulating Industrial Robots-Vocabulary*.
- [3] S. K. Saha, McGraw-Hill, Ed. *Introducción a la Robótica*, Primera en español ed. México: McGraw-Hill, 2010, p. 403.
- [4] T. J. Maloney, *Electrónica industrial moderna*. Pearson Educación, 2006.

- [5] I. I. Hernández Bello and C. Ochoa Luna, "Control difuso y construcción de un mecanismo capaz de golpear con distintos efectos una bola de billar," Ingeniería en Electrónica y Computadoras, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de las Américas Puebla, Puebla, 2004.
- [6] Arduino.com. (2014). *Arduino Mega 2560 R3 ~ Arduino.cl*. Available: <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>
- [7] C. Pendino and M. Crespo, "21505-16 TECNOLOGÍA DE CONTROL Dinámica de los Sistemas Físicos," 2016.
- [8] L. Apostolovich and L. Felipe, "Modelación y simulación dinámica de un brazo robótico de 4 grados de libertad para tareas sobre un plano horizontal," 2011.
- [9] P. Tituaña, I. Verónica, and G. F. Jacho Jami, "Diseño y construcción de un robot para entrega de hojas volantes publicitarias en centros comerciales," 2010.