UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

TÍTULO DE LA TESIS

Estudio y Caracterización de un Actuador Lineal y su Implementación en un Robot Manipulador Serial.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

I N G E N I E R O M E C Á N I C O

P R E S E N T A:

Alejandro Tonatiuh Aguilar Salazar

ASESOR:

Dr. Patricio Martínez Zamudio

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México **Junio 2019**

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A dios por brindarme la oportunidad de concluir una etapa de mí vida.

A mi familia por estar a mi lado y apoyarme en cada momento de mi trayectoria académica y personal.

A mi Universidad por darme las herramientas para culminar mi formación académica.

A mi director de tesis el Dr. Patricio Martínez Zamudio que por su paciencia, dedicación y compromiso logre concluir mi trabajo de investigación.

Al Centro Tecnológico Aragón por brindarme el espacio y las herramientas para concluir satisfactoriamente con mi trabajo de investigación.

Agradezco en lo que corresponde a la DGAPA, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIME-PE112319: "Desarrollo de material didáctico y banco de pruebas para el fortalecimiento de la enseñanza en instrumentación y control, aplicando tecnologías IoT y Robótica".

Resumen

En la presente tesis se muestran los resultados de la investigación y recopilación sobre los diferentes tipos de actuadores lineales que son comunes dentro de la industria y actividades de ingeniería que nombramos convencionales, y otros que son poco conocidos los cuales nombramos no convencionales. En la introducción se presentan diferentes tipos de actuadores lineales, los que se utilizan en la robótica blanda y actuadores por cuerda (que su movimiento es inducido por una cuerda), los cuales son actuadores de nueva generación, que funcionan en base a un mecanismo novedoso e inspirado en el molino chino o molino diferencial. Se seleccionaron tres casos de estudio de actuadores no convencionales y se realizó el estudio de cada uno, fabricando dos prototipos, donde se caracterizaron, así como se realizó la implementación del actuador lineal en una articulación de un manipulador como una posible aplicación, teniendo como resultado material de apoyo para el fortalecimiento y comprensión de fenómenos físicos, su relación con los modelos matemáticos y la implementación en casos prácticos.

Índice

1. Capítulo 1 5
1.1 Actuadores 5
1.1.1 Actuadores electrodinámicos 6
1.1.2 Actuadores Piezoeléctricos 6
1.1.3 Actuadores electromagnéticos 7
1.1.4 Actuadores electrostáticos 8
1.1.5 Actuadores electroneumáticos. 8
1.1.6 Actuadores electrohidráulicos. 10
1.2 Robótica Blanda 10
1.2.1 Actuadores blandos (Músculos artificiales) 12
1.2.1.4 Actuadores blandos actuados térmicamente 18
1.3 Ventajas y desventajas de los actuadores 28
1.4 Actuador lineal por cuerda 31
1.4.1 Los actuadores en la robótica. 36
1.4.2 Definición del problema 36
1.4.3 Hipótesis 37
1.4.4 Objetivos 37
1.4.5 Alcances 37
1.4.6 Justificación 38
1.4.7 Metodología 38
2. Capítulo 2 39
2.1 Diseño conceptual 39
2.2 Resumen 39
2.3 Alcances 39
2.4 Caso 1. Diseño conceptual de elastómero dieléctrico 39
2.4.1 Teorías antecedentes del elastómero dieléctrico 40
2.5 Caso 2. Diseño conceptual de músculo artificial de nylon 42
2.5.1 Teoría antecedente del músculo artificial de nylon 43
2.6 Caso 3. Diseño conceptual de actuador lineal con cuerdas 55
2.6.1 Teoría antecedente actuador lineal con cuerdas. 56

3. Capítulo 3 77
3.1 Diseño a Detalle 77
3.2 Resumen 77
3.3 Alcances 77
3.4 Materiales y herramientas para la construcción de los prototipos. 77
3.4.1 Prototipo inicial 77
3.4.2 Prototipo inicial funcional 82
3.4.3 Prototipo en aluminio 84
3.4.4 Prototipo en Aluminio 1 86
3.4.5 Prototipo en Aluminio 2 (final) 89
3.5 Obtención de datos en la implementación del manipulador serial 99
4. Capítulo 4 111
4.1 Resultados 111
4.2 Resumen 111
4.3 Alcances 111
4.3.1 Tablas de parámetros de actuadores 111
4.3.2 Parámetros de la implementación en el eslabón del manipulador serial. 115
4.4 Discusión 118
5. Capítulo 5 119
5.1 Conclusiones 119
6. Bibliografía 120
7. Apendice 1 Arduino……..…….122
8. Apendice 2 Mathematica …….……...124
9. Apendice 3 Planos del Actuador……130
10. Apendice 4 Articulo en congreso SOMIM 2019. ……..……..138

1 Capítulo 1

1.1 Actuadores

Los actuadores son dispositivos mecánicos con la capacidad de transformar un tipo de energía a otro, proporcionando la fuerza para mover o actuar otro dispositivo(2009). Dependiendo de la fuerza de actuación pueden ser de tres tipos: presión neumática, presión hidráulica y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). Dependiendo del origen de la fuerza, el actuador se denomina “neumático”, “hidráulico” o “eléctrico”, los principios físicos de cada uno le darán la energía necesaria dependiendo de su fuente de alimentación. El movimiento generado por los actuadores puede ser. -

- Lineales. - Generan una fuerza en dirección recta o lineal. Ver Figura 1-1

Figura 1-1 Actuador lineal

- Rotatorios. - Generan potencia rotativa como lo haría un motor eléctrico. Ver Figura 1-2.

Figura 1-2 Actuador rotatorio

1.1.1 Actuadores electrodinámicos

Puede ser de movimiento lineal o angular. Su accionamiento es frecuente para aplicaciones hápticas, debido al resultado de la proporción directa entre su valor de salida (fuerza o par) y de sus valores de entrada (la corriente eléctrica). En el caso de las aplicaciones kinestésicas, se utilizan normalmente como fuentes de fuerza controladas en bucle abierto, en aplicaciones táctiles, estos actuadores dinámicos se aplican con frecuencia para excitaciones oscilantes de la piel.

Su principio de funcionabilidad se basa en una fuerza, llamada fuerza de Lorentz, que actúa sobre un conductor sometido en un campo magnético que conduce una corriente (Haus, Kern et al. 2014). En la Figura 1-3 se observa el ejemplo de un actuador electrodinámico y su esquema.

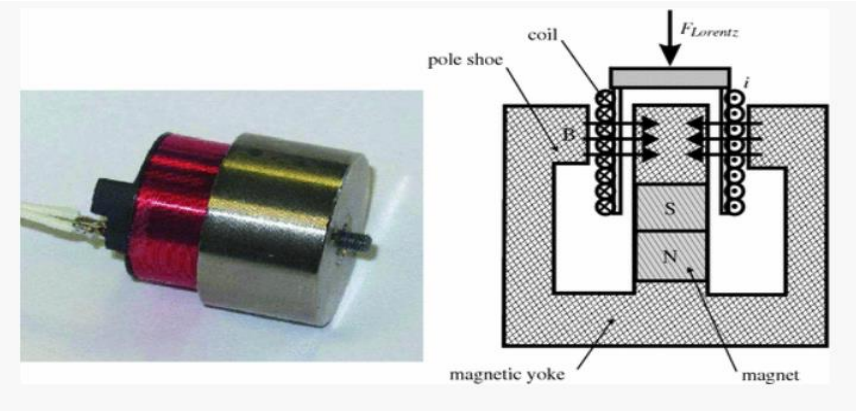


Figura 1-3 Actuadores electrodinámicos

1.1.2 Actuadores Piezoeléctricos

El término se deriva de la palabra griega “piedein – piezo” = “presionar. Estos actuadores junto con los actuadores electro dinámicos se encuentran con mayor frecuencia en maquinarias de precisión (máquinas de test de fatiga y corrosión). En los últimos años este tipo de actuadores son muy comunes para distintos diseños de máquinas de test de fatiga y corrosión. En la Figura 1-4 se ve un ejemplo de un actuador piezoeléctrico.

Sus propiedades dinámicas en el modo de resonancia permiten especialmente una aplicación háptica, que es diferente de la aplicación de posicionamiento común para la que se utilizan. El principio de funcionamiento de los actuadores piezoeléctricos se basa en una fuerza, que actúa sobre la estructura atómica de un cristal y la deforma, como se muestra en la Figura 1-5. (Haus, Kern et al. 2014)

Figura 1-4 Actuador piezoeléctrico

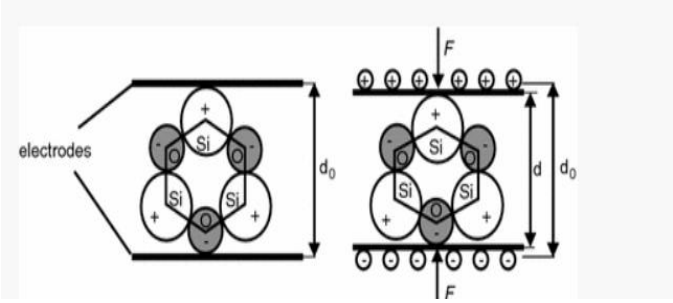


Figura 1-5 Estructura cristalina de cuarzo en estado inicial y bajo presión.

1.1.3 Actuadores electromagnéticos

Los actuadores electromagnéticos son el tipo de actuador utilizado en automatización. Debido a su simple fabricación y montaje, son una cuestión de elección. Además, no necesariamente necesitan un imán permanente, y su robustez contra las influencias exteriores es alta. Se utilizan en máquinas de café, bombas de agua y para redireccionar el flujo de papel dentro de las impresoras de oficina. Sus principales campos de aplicación son los sistemas táctiles. El principio de funcionamiento de los actuadores electro magnéticos es basado en una fuerza, que actúa sobre un circuito magnético para minimizar la energía encerrada.(Haus, Kern et al. 2014)

Figura 1-6 Actuador electromagnético

1.1.4 Actuadores electrostáticos

Los actuadores electrostáticos forman parte del grupo de transformadores eléctricos, como los actuadores piezoeléctricos. Los actuadores de campo electrostático se utilizan debido a su diseño simple y de bajo consumo de energía. Como resultado del progreso técnico de la micro ingeniería, las ventajas de los diseños integrados se aprovechan al máximo. Especialmente para sistemas miniaturizados, los actuadores de campo electrostático ganan mayor importancia en comparación con otros principios de actuadores. Esto es sorprendente ya que su densidad de energía es significativamente menor en los diseños macroscópicos. Sin embargo, durante la miniaturización, el factor de baja eficiencia y la pérdida de potencia y el calor resultantes se convierten en factores limitantes para los actuadores magnéticos. Un importante subgrupo de actuadores de campo electrostático está dado por los actuadores de estado sólido, con un dieléctrico elastomérico. Tiene una alta intensidad de campo de ruptura en comparación con el aire, construye el sustrato de los electrodos y puede proporcionar simultáneamente un alojamiento aislante. Además de los actuadores de campo clásicos mencionados anteriormente, los fluidos electrorreológicos también forman parte de los actuadores electrostáticos. Con estos actuadores, un campo eléctrico de fuente externa arbitraria produce un cambio en las propiedades físicas (reológicas) del fluido. (Haus, Kern et al. 2014) ver Figura 1-7.

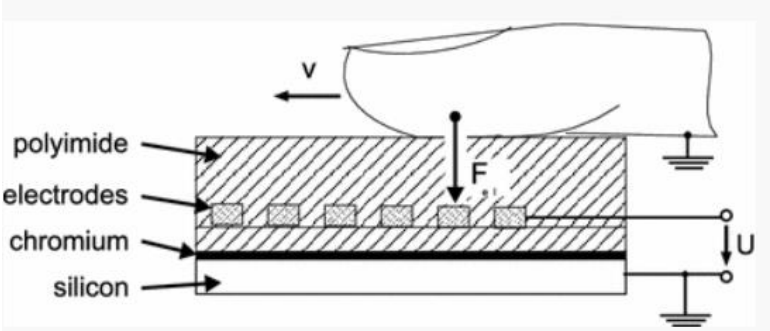


Figura 1-7 Actuador electrostático

1.1.5 Actuadores electroneumáticos.

La palabra “neumático” viene de la palabra en latín “pneumaticus” y del griego “pneumatikos”. Pneumat o Pneuma significa “aire”, “aliento” o “espíritu”. Esta palabra se conoce por primera vez para ser utilizada en el siglo XVII. Los motores neumáticos utilizan el flujo y la energía del aire comprimido para generar una fuerza de movimiento. El sistema neumático consiste en una bomba, un tanque para contener aire comprimido, válvulas reguladoras, redes de tubos para transferir el gas y finalmente efectores finales que a menudo utilizan lubricantes para minimizar la pérdida de energía debido a la fricción y maximizar el tiempo de operación.(Popović 2013). En ellos la fuente de energía es aire a presión entre 5 y 10 bar. En la Figura 1-8 se muestra el esquema de funcionamiento de estos actuadores.

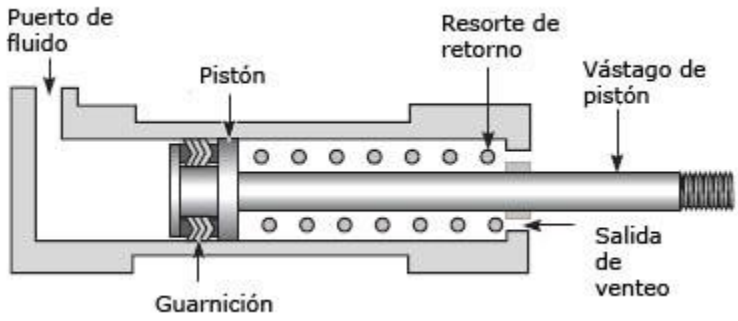


Figura 1-8 Esquema de funcionamiento de un actuador electroneumático

Existen dos tipos de actuadores neumáticos.

a) Cilindros neumáticos.
   Estos consiguen el desplazamiento de un embolo encerrado en un cilindro, como consecuencia de la diferencia de presión a ambos lados. Los cilindros neumáticos pueden ser de:
   1. Simple efecto. - Un embolo se desplaza en un sentido como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mientras que en el otro sentido se desplaza como efecto de un muelle.
   2. Doble efecto. - Los cilindros de doble efecto el aire a presión es el encargado de empujar al embolo en las dos direcciones al poder ser introducido de forma arbitraria en cualquiera de las dos cámaras. (Barrientos 1997). Ver Figura 1-9.

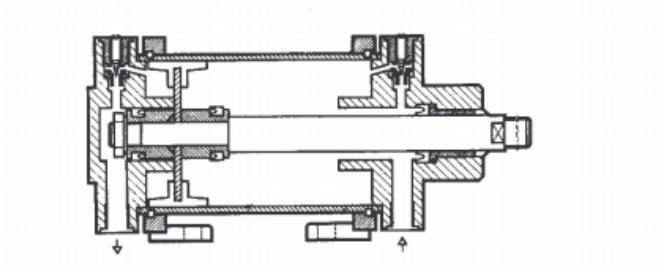


Figura 1-9 Esquema de cilindro neumático con doble efecto

b) Motores neumáticos.

En estos dispositivos se consigue el movimiento de un eje por medio de aire a presión. Los dos tipos de motores neumáticos son:

1. Los motores de aletas rotativas
   Sobre el rotor excéntrico están dispuestas las aletas de longitud variable, al entrar aire a presión en uno de los compartimentos formados por dos aletas y la carcasa, tienden a girar sobre hacia un sentido en el que el compartimento tenga un mayor volumen.

2. Los motores de pistones axiales
   Estos poseen un eje de giro solidario a un tambor que se ve obligado a girar por las fuerzas que ejercen varios cilindros, que se apoyan sobre un plano inclinado.

1.1.6 Actuadores electrohidráulicos.

Los actuadores hidráulicos, que son usuales y de mayor antigüedad en las instalaciones hidráulicas, pueden ser clasificados de acuerdo con la forma de operación, y aprovechan la energía de un circuito o instalación hidráulica de forma mecánica, generando movimientos lineales. Ver Figura 1-10. Los cilindros hidráulicos pueden ser:

- De simple efecto (el fluido hidráulico empuja en un sentido el pistón del cilindro y una fuerza externa (resorte o gravedad) lo retrae en sentido contrario).

- De doble efecto (utiliza la fuerza generada por el fluido hidráulico para mover el pistón en los dos sentidos, mediante una válvula de solenoide).

- Telescópicos (contiene otros de menor diámetro en su interior y se expanden por etapas, muy utilizados en grúas, etc.).

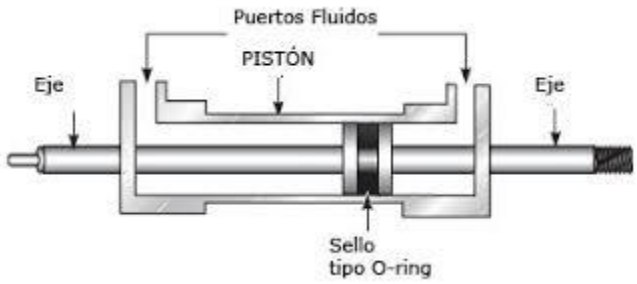


Figura 1-10 Esquema de un actuador electrohidráulico

Los actuadores que se presentan en este apartado, son comúnmente utilizados en su mayoría en la industria, maquinarias, instrumentos de precisión o generalmente en mecanismos que requieren de un movimiento lineal o rotativo, por ello mismos son muy comunes y los denominamos “convencionales”. Sin embargo, existen otros tipos de actuadores que pertenecen a una rama muy reciente que se deriva de la robótica. En el siguiente apartado se hará una recopilación de los actuadores diseñados para esta nueva rama de la robótica llamada robótica blanda o soft robotics que promete sistemas discretos, adaptables y con capacidades que un actuador convencional no es capaz de realizar (flexionarse, estirarse, contraerse, enroscarse y etc.).

1.2 Robótica Blanda

La robótica blanda o también conocida como Soft Robotic, es una nueva rama de la robótica en la cual los componentes están esencialmente hechos de materiales blandos y estructuras activas monolíticas (o continuas), esto permite una mejor interacción en su entorno que los robots que están hechos de materiales rígidos.

La robótica blanda al estar constituida de materiales blandos, causa impacto en las áreas que requieren de materiales sensibles e inteligentes, las aplicaciones médicas, interacción social y la manipulación de objetos frágiles serán de las áreas que la robótica blanda asistirá y tendrá relevancia para realizar tareas que la robótica rígida convencional está limitada. (Campbell 2018).

Varios autores han definido la robótica blanda en diferentes formas, pero todas concuerdan en los elementos blandos y las capacidades de flexión y torsión que poseen, por ejemplo; Rus y Tolley definieron los robots blandos como *"sistemas que son capaces de comportamiento autónomo y que están compuestos principalmente de materiales con módulos en el rango de los materiales biológicos blandos"* (Rus and Tolley 2015, Chen, Yin et al. 2017).

Según Schultz et al., Los robots blandos son *"agentes autónomos donde la deformación significativa del material es una parte integral de la función de los robots"* (Joshua, Yiğit et al. 2016, Chen, Yin et al. 2017).

Wang e Iida cambiaron el nombre de robots blandos por "robots de materia blanda" y definieron la robótica blanda como "*robótica que estudia la generación y control de la deformación de la materia blanda para lograr funciones robóticas*"; se observa que la función robótica en su definición se refiere a las funciones orientadas a la aplicación, tales como agarre, locomoción, etc. (Wang and Iida 2015, Chen, Yin et al. 2017).

Siendo los materiales y componentes flexibles e inteligentes para la configuración de los robots blandos, el desarrollo de sensores y actuadores para la rama de la robótica blanda también ha ido evolucionando, teniendo como resultado mayores capacidades de trabajo y desempeño que los materiales rígidos que constituye la robótica clásica, además de un mayor rango de movilidad dando así la ventaja de trabajos que requieran precisión y sensibilidad. (Gonzalez-Jimenez 2015). La Figura 1-11 se ve un ejemplo de robot suave que están basados en las estructuras de la robótica blanda.

Figura 1-11 Octobot soft robot

1.2.1 Actuadores blandos (Músculos artificiales)

Son dispositivos mecánicos cuya función es proporcionar fuerza para mover o "actuar" otro dispositivo mecánico", los actuadores están compuestos de motores que es una máquina diseñada para convertir energía en movimiento y fuerza mecánica útil, estos tipos de movimientos que puede accionar un motor puede ser lineal o rotatorio.

1.2.1.1 Actuadores blandos actuados eléctricamente.

La esencia de los actuadores blandos sub actuados eléctricamente, es someter un polímero que sirve como dieléctrico entre dos nodos, esto crea un campo magnético entre los dos nodos, haciendo que el dieléctrico por la carga de energía eléctrica sufra una deformación.

1.2.1.1.1 Actuador blando Elastómeros dieléctricos

"Los elastómeros dieléctricos son materiales aislantes blandos. Se deforman por fuerzas eléctricas cuando se usan en un condensador entre dos electrodos mecánicamente compatibles. Los elastómeros dieléctricos son un subgrupo de polímeros electro activos, materiales utilizados en transductores electromecánicos"(Bauer 2014)

La idea de los DEs (dielectric elastomer) surgió a finales del siglo XVIII gracias a los frascos Layden por considerarse sobrecargados y posteriormente se convirtió en un tema de investigación a finales del siglo XIX.

Los elastómeros dieléctricos tienen características sobre salientes comparados a los materiales inteligentes como las aleaciones de memoria de forma, los DEs pueden desarrollar un rango mayor de deformación que van desde 10% a 300% además de poseer baja histéresis a las altas densidades de energía disponible, poseen alta resistencia a la corrosión, su fabricación es relativamente barata, son ligeros, mecánicamente robustos y escalables, sin embargo uno de los mayores inconvenientes que se ha encontrado y ha retrasado el proceso de fabricación de los DEs es que se requiere un campo eléctrico alto aproximadamente de 100 V/µm, para poder inducir la deformación mecánica del material, en la Figura 1-12 se describe el funcionamiento de un elastómero dieléctrico accionado por una carga eléctrica. (Gonzalez-Jimenez 2015)

Se han investigado muchas clases de materiales para este tipo de aplicaciones incluyendo acrilatos, siliconas, uretanos cauchos en estado látex ABS y diferentes co-polímeros. A continuación, se enlistaran los materiales de los cuales están constituidos los elastómeros dieléctricos actuales, la siguiente información fue proporcionada por el artículo "Elastómeros dieléctricos para su uso como actuadores o músculos artificiales" (Gonzalez-Jimenez 2015)

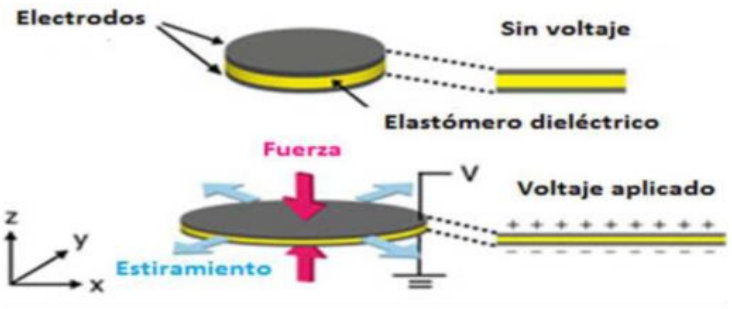


Figura 1-12 Funcionamiento de elastómero

a) **Acrilatos**

Los acrilatos más comunes y usados son los de la serie VHB de 3M corporation, que están hechos de mezclas de acrilato alifático y se basan en la estructura de un ácido carboxílico terminal. La deformación por actuación electromecánica, que puede llegar a ser superior al 380%, y tiene importantes características visco eléctricas, además que son sensibles a la humedad y a la temperatura.

b) **Silicona**

El poli (dimetilsiloxano) su nomenclatura (PDMS), es un polímero orgánico e inorgánico (mixto), ya que se constituye de silicio y oxigeno con un módulo elástico es relativamente bajo, así como también su constante dieléctrica y densidad de energía a comparación de otros acrílicos, por eso su respuesta electro mecánica es modesta, una de sus ventajas es su viscosidad baja ya que proporciona un tiempo de respuesta rápido y con menores perdidas, no son afectados por la humedad ni por la temperatura.

c) **Poliuretanos**

Estos materiales se polimerizan (cuando se agrupan un conjunto de monómeros entre si dando lugar a una molécula de mayor peso llamada polímero) generalmente por la reacción de isocianatos con alcoholes y ofrecen una gran versatilidad en su procesamiento y propiedades finales. El poliuretano a diferencia de otros polímeros estos poseen una constante dieléctrica superior a 7 debido a su naturaleza polar de enlaces uretanos, sin embargo, esto provoca en el material una gran sensibilidad a comparación con otros polímeros.

d) **Elastómeros cristal liquido**

Como su nombre sugiere, estos materiales están constituidos de cristales líquidos con redes elastómeras, ambas con propiedad que complementan el funcionamiento de la otra. Este actuador funciona con cargas relativamente bajas (1,5 - 25 V/µm) a comparación de los demás Elastómeros dieléctricos que necesitan fuentes altas de voltajes para su funcionamiento, sin embargo, las deformaciones que se obtienen de estos son mínimas (>10%).

La información obtenida de los diferentes tipos de elastómeros dieléctricos fue proporcionada por el artículo “elastómeros dieléctricos para su uso como actuadores o músculos artificiales”.

1.2.1.2 Actuadores blandos actuados neumáticamente.

Los actuadores blandos actuados neumáticamente son sistemas de músculos artificiales en desarrollo bajo el entorno a robots blandos en el artículo "**Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly" (Mosadegh, Polygerinos et al. 2014) "Buckling Pneumatic Linear Actuators Inspired by Muscle"** (Yang, Verma et al. 2016) menciona que un sistema de actuador neumático blando son accionados por el inflado de una red neumática de pequeños canales dentro del material elastómero, que producen contracciones y expansiones en los materiales cuando el sistema es sub actuado por los flujos de gases comprimidos. Las limitantes de estos tipos de actuadores indican que su accionamiento es relativamente lento, por lo que se requieren cantidades grandes de aire comprimido para poder accionar todo el sistema y el flujo del gas comprimido pueda llegar a todos los canales de los materiales elastómeros.

1.2.1.2.1 Actuador blando Mc Kibben Artificial muscle.

Los músculos artificiales neumáticos inspirados biológicamente (PAM-Pneumatic Artificial Muscles), fueron desarrollados por primera vez bajo el nombre de McKibben Artificial Muscles en la década de 1950 para su uso en extremidades artificiales. La empresa de caucho Bridgestone (Japón) comercializó la idea en la década de 1980 bajo el nombre de rubbertuators. La fuerza de retracción del (PAM) está limitada por la suma de la resistencia total de las fibras individuales en el armazón del tejido. La distancia de esfuerzo está limitada por la tensión del tejido; un tejido muy holgado permite un mayor abultamiento que además retuerce las fibras individuales en el tejido, esto es un sistema lineal por lo que difícilmente es un control fino.

El principio físico es simple, el PAM posee rigidez en las direcciones longitudinales (a lo largo del eje del músculo) y transversales (perpendicular al eje de músculo) lo que causa diferentes elongaciones en función de la presión. (Popović 2013). La Figura 1-13 muestra el ejemplo de un actuador Mc Kibben.

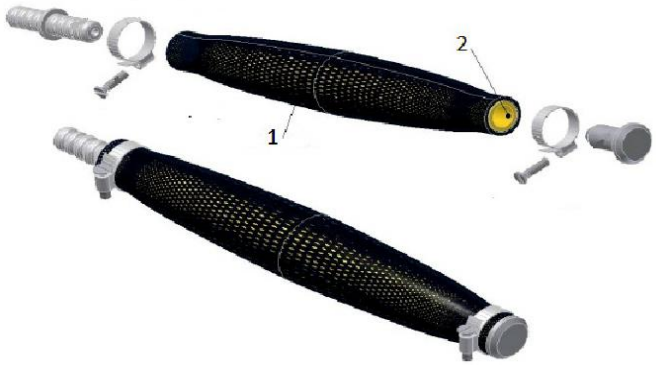


Figura 1-13 Actuador neumático tipo McKibben: 1 - trenza cruzada de poliéster, 2 - núcleo de caucho(Parandyk, Ludwicki et al. 2015*)*

1.2.1.2.2 Actuador blando Pneu – Nets.

Pneumatic Network (Pneu- Nets) "Red neumática", este material de pequeños canales pueden producir movimientos sofisticados, el diseño propuesto en este artículo reduce la cantidad de gas necesario para la inflación de la red de neumáticos y por lo tanto aumenta su

velocidad de accionamiento,(Mosadegh, Polygerinos et al. 2014), las características sobresalientes de este actuador son:

1. El actuador tiene la capacidad de actuar más de un millón de ciclos a una frecuencia de 4 Hz sin ninguna degradación significativa a su rendimiento.
2. Muestra un nuevo modo de actuación. A bajas tasas de inflación, se dobla en aproximadamente un círculo con todas las cámaras inflándose uniformemente; a altas tasas de inflación, se encrespa sobre sí misma con las cámaras en su extremo inflándose primero.

En la Figura 1-14 muestra el actuador blando Pneu – Nets en funcionamiento y la descripción de las configuraciones de este.

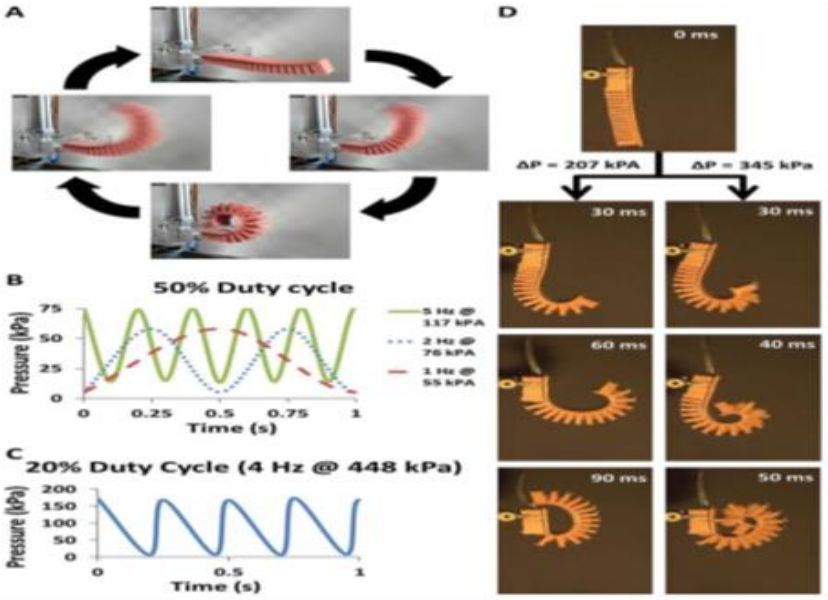


Figura 1-14 Actuación de alta velocidad. A) Imágenes de diferentes posiciones de entre 200 y 500 Hz. Actuador fPN durante un ciclo de actuación completo. B) Perfil de la presión interna del actuador para tres frecuencias con un ciclo de trabajo del 50% a presiones que provocan la flexión completa del actuador. C) Perfil de la presión interna para un ciclo de trabajo del 20% (50 m de presurización, 200 ms de ventilación) a 413 kPa que produce una frecuencia de actuación de 4 Hz. D) Imágenes de lapso de tiempo de videos de alta velocidad del actuador fPN cuando se accionan con dos tasas de presurización diferentes. El actuador se dobla preferentemente en su punta para la tasa más alta y de manera uniforme para la tasa más baja.(Mosadegh, Polygerinos et al. 2014)

1.2.1.2.3 Actuador Blando VAMP.

(Vacuum-actuated muscle inspired pneumatic structures- VAMP) Los actuadores con estructuras neumáticas inspiradas en el músculo con accionamiento al vacío difieren de los demás sistemas de actuadores blandos, ya que usan pandeo de haces elastoméricos para generar movimientos similares a los músculos cuando se les aplica presión negativa. Los VAMPS son sistemas suaves por lo que pueden absorber los impactos e interactúan de tal manera que no afecta su entorno, la similitud de los VAMPS con los músculos bilógicos es tal que su aumento de volumen no se expande en áreas transversales durante la actuación, este tipo de características le permite operar en espacios limitados. Estos pueden generar

movimientos lineales con deformaciones hasta del 45% y pueden soportar tensiones de caga de hasta 65 kPa (Yang, Verma et al. 2016). Así como en la Figura 1-14 donde se menciona la descripción general y características de su actuación en la Figura 1-15 del actuador VAMP.

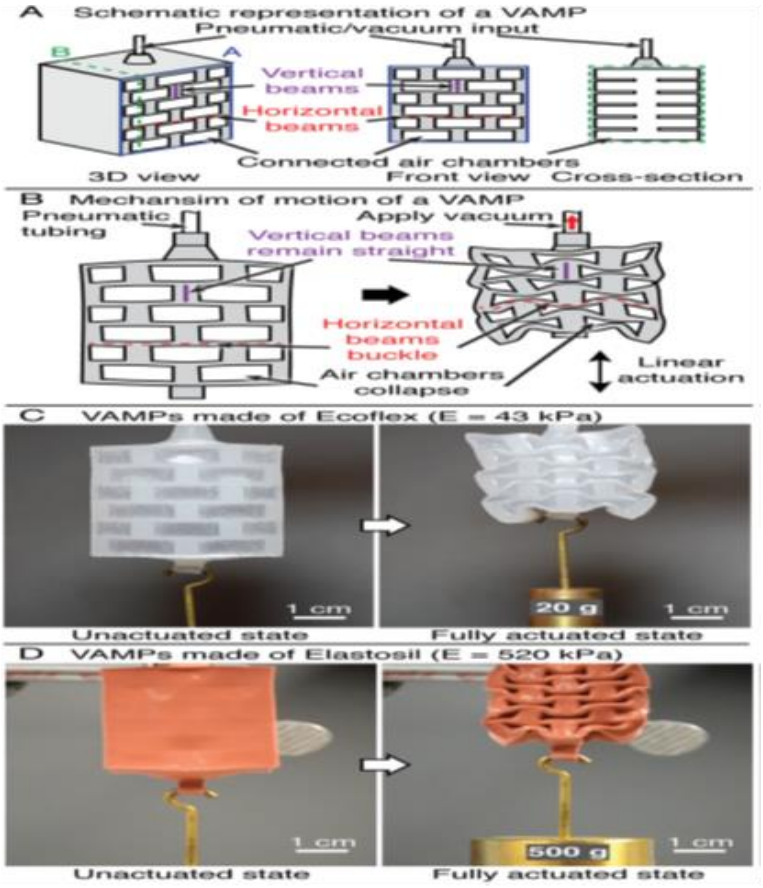


Figura 1-15 Descripción esquemática de VAMPs. A) Un VAMP consiste en una estructura elastomérica de vigas verticales, vigas horizontales más delgadas y cámaras de aire conectadas. El dispositivo se acciona usando un único puerto externo y una fuente de vacío. B) El vacío permite que la presión ambiente comprima la estructura y, por lo tanto, haga que los haces horizontales más delgados se doblen en formas serpentinas, lo que a su vez hace que la estructura se comprima anisotrópica mente. C) Imágenes de un VAMP fabricado con Ecofl ex (E = 43 kPa) que levanta un pequeño peso (20 g) cuando se acciona mediante la aplicación de vacío. El interior de las membranas de la cámara de este VAMP está coloreado con un marcador negro, de modo que los límites de las cámaras son más visibles en el estado activado. D) Un VAMP de la misma geometría que en (C), pero hecho de Elastosil (E = 520 kPa) levanta un peso mucho más alto (500 g). Como Elastosil no es transparente, las cámaras de este VAMP no son visibles en el estado no activado, pero son más visibles en el estado de activación cuando la membrana se dobla hacia adentro. Las barras de escala son de 1 cm. Vea las Películas S1 y S2 (Información de apoyo) para los videos. La Figura S2 y la Película S3 (Información de apoyo) demuestran los VAMP con una resistencia aún mayor. (Yang, Verma et al. 2016)

1.2.1.3 Actuadores blandos actuados hidráulicamente.

Los actuadores sub actuados hidráulicamente poseen una gran cantidad de energía que se transfiere a través de un sistema que conecta con las partes para ejecutar el movimiento del actuador lo que provoca una alta densidad de potencia, dicho sistemas por lo general están acompañados de maquinaria pesada, debido al gran trabajo y energía que estos brindan al accionarse. (Popović 2013)

En la actualidad los actuadores blandos aún representan un desafío dentro de la robótica blanda, ya que persisten los desafíos que llegan a restringir el potencial de la robótica blanda por lo que se buscan sistemas de actuación eficientes, robustos y con alta velocidad de respuesta, el artículo "**Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance" (Acome, Mitchell et al. 2018)** propone un actuador que funciona eléctricamente e hidráulicamente.

1.2.1.3.1 Actuador blando HASEL

Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators (HASEL). Actuadores electrostáticos autorregenerables de amplificación hidráulica, utiliza un mecanismo electrohidráulico para activar arquitecturas hidráulicas totalmente blandas combinando la versatilidad de los accionadores fluidicos con el rendimiento muscular y la capacidad de autodetección de los actuadores DE. Estos a diferencia de los actuadores fluidicos blandos donde surgen las ineficiencias y las perdidas surgen del transporte de fluidos a través de sistemas de canales, los actuadores HASEL generan presión hidráulica localmente a través de fuerzas electrostáticas que actúan sobre dieléctricos líquidos distribuidos a lo largo de una estructura blanda. El autor propone un líquido dieléctrico que pose autocuración inmediata de la funcionalidad después de numerosas rupturas dieléctricas. El principio de funcionamiento de este actuador blando describe que posee una cubierta elastomérica que está parcialmente cubierta por un par de electrodos opuestos y llenos de líquido dieléctrico, al aplicar el voltaje induce un campo eléctrico a través del líquido y elastómero dieléctrico, el estrés electrostático resultante de Maxwell presuriza y desplaza el dieléctrico liquido de entre los electrodos hasta el volumen circundante. **(Acome, Mitchell et al. 2018)**

La Figura 1-16 se observa los esquemas de funcionamiento del actuador HASEL y su respectivo prototipo en funcionamiento.

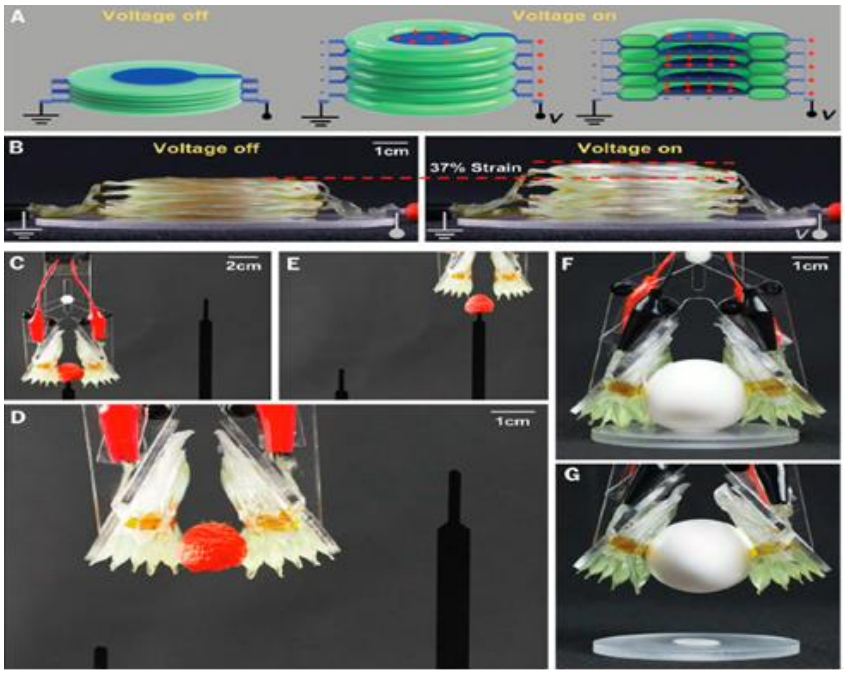


Figura 1-16 Representación esquemática de una pila de cinco actuadores HASEL de rosquilla orientados de modo que los electrodos adyacentes están en el mismo potencial eléctrico (vista de la sección transversal). (B) Demostración de actuación lineal con actuadores HASEL de buje apilado. (C a G) Una pinza suave fabricada a partir de dos pilas modificadas de rosquilla Los actuadores HASEL administraron objetos frágiles como una frambuesa [(C) a (E)] y un huevo crudo [(F) y (G)].

1.2.1.4 Actuadores blandos actuados térmicamente.

Los actuadores accionados térmicamente son uno de los prototipos de músculos artificiales prometedores debido a su simpleza en su funcionamiento y los materiales inteligentes, dentro de los sistemas de actuadores térmicos definimos a un material inteligente que posee memoria de forma al someterse a una diferencia de temperatura, ya que esto le permite al material deformarse y volver a su estado inicial sin dañar su estructura. El nylon posee estas cualidades, las cuales pueden trabajar bajo el estímulo de diferencial de temperatura y estímulos eléctricos mediante el efecto Joule al pasar una determinada corriente que calienta el material (músculos de nylon con pintura de plata), esta técnica junto con otras constituye parte de los actuadores térmicos, los siguientes párrafos se dará detalle de los materiales ya antes mencionados y su aporte como actuadores blandos lineales.

1.2.1.4.1 Actuadores blandos de Nylon.

En el área de los materiales inteligentes, el nylon ha sido estudiado debido a sus propiedades termoplásticas que le permite deformarse gracias a un estímulo externo como el calor, la electricidad o incluso el agua. Las fibras de nylon y polietileno son grandes precursores de las fibras musculares artificiales en la actualidad, ya que permite combinar la contracción que ocasiona la inducción térmica reversible en dirección de la fibra, la gran expansión térmica volumétrica y la gran anisotropía en los cambios dimensionales inducidos térmicamente para proporcionar un mejor golpe muscular. Estas fibras precursoras están

compuestas de cadenas poliméricas flexibles que están altamente orientadas en la dirección de la fibra. La contracción térmica resultante de las fibras de nylon puede llegar a representar un 4% similar a los cables de memoria de forma de los Ni-Ti. Para que las fibras de nylon tuvieran una carrera de tracción la fibra de nylon se sometió a torsión al punto de que convirtiera en un espiral, dándole el aspecto de un pequeño resorte a la fibra de nylon. (Haines 2015). La Figura 1-17 muestra un ejemplo de un músculo de nylon retorcido.

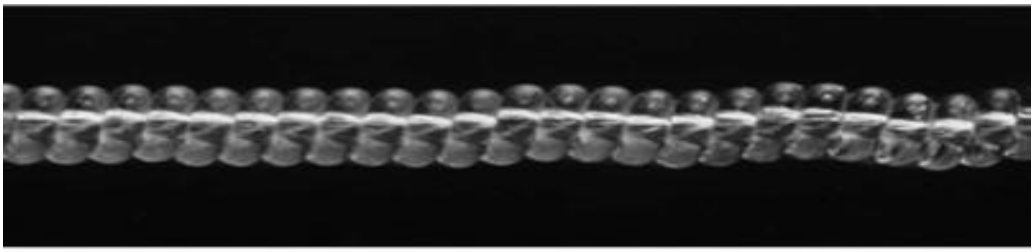


Figura 1-17 Músculo de nylon retorcido

Estos músculos de nylon en la actualidad están accionados a través de 3 sistemas que le permiten activar los músculos (agua, aire caliente, acoplado a un material con memoria de forma y efecto joule, destacados por ser populares actualmente) teniendo gran carrera de recorrido, dichos sistemas consisten en calefacción y enfriamiento, el reto para todos los sistemas que activan el músculo artificial de nylon es someter el material a una temperatura tal que la contracción del músculo se efectué, al tiempo que vuelva a su temperatura inicial cambiando a su estado original del músculo en cuestión de segundos.

1.2.1.4.2 Actuadores blandos sistema accionado por agua

La información obtenida fue de "**Nylon-muscle-actuated robotic finger" (Wu, Andrade et al. 2015),** este explica sobre el sistema de actuación el cual consiste en un resorte y un músculo en espiral dentro de un tubo de silicona compatible, el tubo de silicona proporciona un compartimento estanco y expansible dentro del cual el músculo enrollado se contrae cuando se calienta y se expande cuando se enfría.

Lo que el autor da a conocer referente a su artículo como bien lo sugiere el título, es poder crear una mano robótica de dedos múltiples para mejorar la capacidad de manipulación de los robots humanoides, el diseño del mismo es lo más cercano a una mano biológica, representando cada uno de los eslabones de los dedos la metacarpofalángica (MCP), la interfalángica proximal (PIP) y distal articulaciones interfalángicas (DIP), como se muestra en la Figura 1-18.

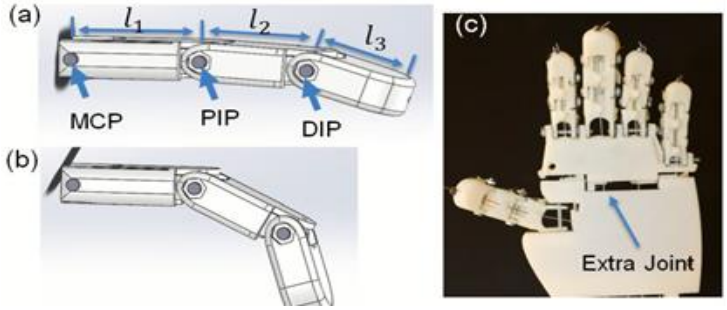


Figura 1-18 (a) Configuración de dedo en estado de reposo nominal, (b) dedo en estado flexionado, (c) prototipo de mano y (d) el sistema de actuación alojado en el brazo y tensores conectados a los dedos. (Wu, De Andrade et al. 2015).

El autor también brinda un diagrama de bloque (Figura 1-19) la cual explica el funcionamiento experimental del músculo utilizada para caracterizar el accionamiento térmico, Un extremo del músculo estaba unido al soporte, mientras que el otro extremo soportaba un peso de 200 g. Se pegó una cinta negra al peso adjunto para rastrear el movimiento muscular utilizando una cámara rápida (Phantom Miro eX2), que se interpretó mediante el procesamiento de imágenes. En este experimento, el músculo en espiral tenía una longitud no cargada de 128 mm y se usó una jeringa para inyectar agua caliente a lo largo del músculo para provocar la activación e inyectar agua fría para revertir la actuación. La actuación se caracterizó después de menos de cinco ciclos de entrenamiento bajo la carga de 200 g.

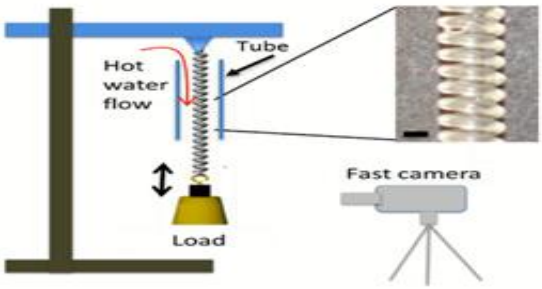


Figura 1-19 Diagrama de bloque del funcionamiento del músculo

El autor menciona en un trabajo previo que la actuación de un SMA (Shape Memory Alloy) en liquido dentro de un tubo compatible permite que el actuador SMA se expanda y contraiga libremente, utilizando esa idea para entrenar el músculo de nylon en espiral, se insertó un resorte en un tubo de silicona lo que proporciono la pretensión sin perder el funcionamiento del mismo. En la Figura 1-20 se puede observar a detalle el sistema que propuso el autor del artículo donde se ilustra el sistema de actuador compuesto por un tubo de silicona con resorte de compresión incrustado, un músculo de línea de pesca en espiral y dos conectores impresos en 3D que se unieron a los dos terminales del tubo de silicona.

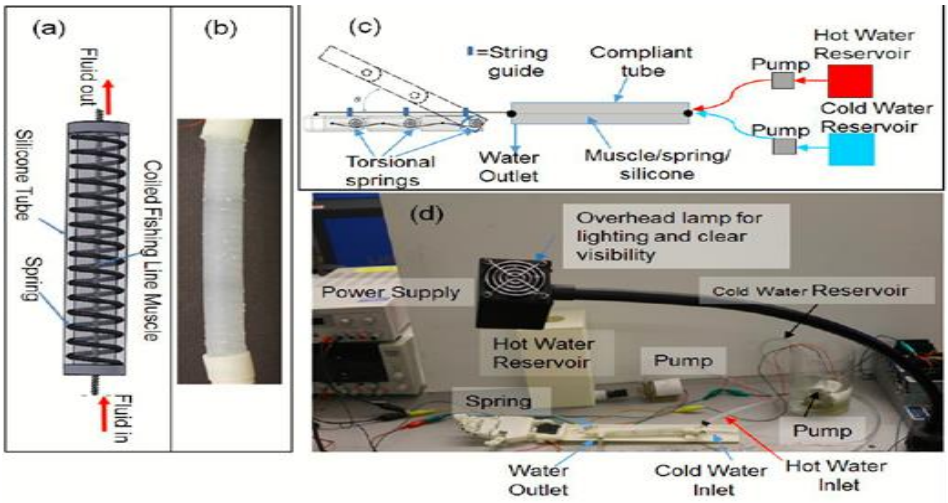


Figura 1-20 (a) Actuador de línea de pesca en espiral, (b) El prototipo, (c) Diagrama esquemático de la configuración experimental utilizada para probar el rendimiento del músculo en espiral en la aplicación de la mano robótica y (d) imagen de la configuración experimental. (Wu, Andrade et al. 2015)

1.2.1.4.3 Actuadores Blandos Sistemas accionados por Aire caliente

En el artículo "**Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread" (Haines 2015)** dicho artículo se centra no solo en el funcionamiento del músculo sometido a aire caliente, sino que también se han dedicado a caracterizar el músculo de nylon de diversas maneras haciendo obteniendo diferentes modelos de músculos de nylon, también han emulado experimentos de otros autores en diferentes sistemas no solo en aire caliente, sin embargo se enfoca sólo en el procedimiento de como realizaron a cabo los experimentos para el sistema por aire caliente.

El autor utilizó un músculo de nylon enrollado hasta formar la espiral que ellos mismos denominan como "escritura", durante el proceso de la experimentación del músculo el autor describe el comportamiento de la siguiente manera, La contracción térmica reversible del monofilamento de nylon 6,6 entre 20 ° y 240 ° C aumentó de 4 a 34% como resultado de la espiral, véase en la Figura 1-21.

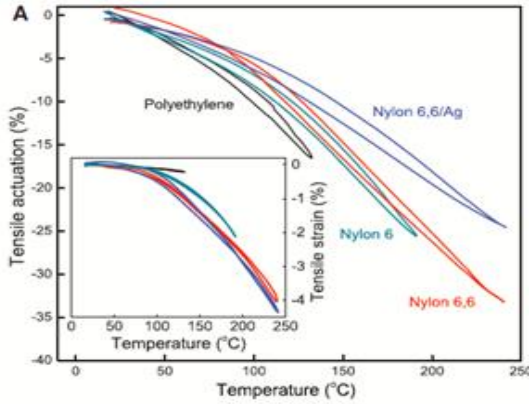


Figura 1-21 (A) Comparación de la expansión térmica negativa de polietileno trenzado, monofilamento de nylon 6, monofilamento de nylon 6,6 y microfibras de nylon recubiertas de plata 6,6 antes de retorcer (recuadro) y después de enrollar mediante inserción de torsión.(Haines 2015).

Cuando las bobinas adyacentes entran en contacto, debido a una carga aplicada insuficiente o un giro excesivo, la expansión térmica de la dirección muscular se vuelve positiva, como en la Figura 1-22. Bajo una baja carga de tracción (7.5 MPa), al contacto de la bobina a ~ 130 ° C, el músculo de nylon 6,6 se expande a una velocidad comparable a la expansión térmica radial de la fibra. Después del contacto entre bobinas, la estructura en espiral se endurece al aumentar la temperatura, produciendo un aumento de 24 veces en el módulo de tracción nominal.

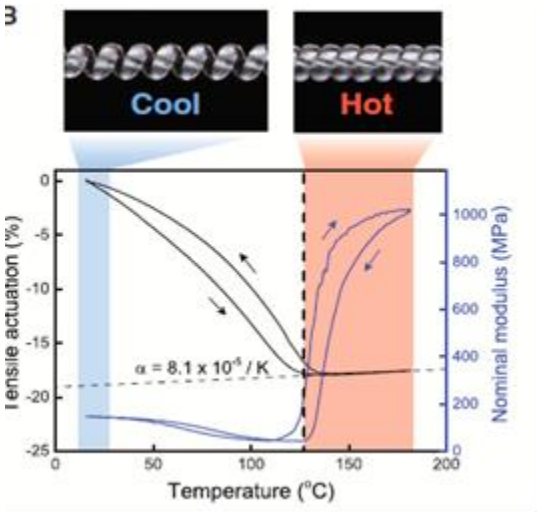


Figura 1-22 Recorrido de tracción y módulo nominal frente a la temperatura para un monofilamento de nailon 6,6 de nailon enrollado de 300 mm de diámetro, con una carga estática de 7,5 MPa y carga dinámica de 0,5 MPa. Durante la contracción, las bobinas vecinas entran en contacto completo a ~ 130 ° C, lo que aumenta drásticamente el módulo elástico nominal y hace que el coeficiente de expansión térmica se vuelva positivo. Se muestran micrografías ópticas (arriba) de las bobinas antes y después del contacto. (Haines 2015)

1.2.1.4.4 Actuadores blandos accionados por MMF (Materiales con memoria de forma)

Para esta parte se consultó el artículo **Fabrication and Properties of Composite Artificial Muscles Based on Nylon and Shape Memory Alloy (Yin, Zhou et al. 2018)** los autores describen que la complejidad del sistema de calefacción y enfriamiento requerido para controlar el músculo de nylon es una desventaja, por lo que se propuso un músculo artificial compuesto para proporcionar un accionamiento directo impulsado por electricidad mediante la integración de nylon y una aleación con memoria de forma (SMA). Los SMA cumplen con la alta potencia, densidad de bajo costo y alta resistencia, siendo este un actuador de estructura blanda compuesta, un músculo, y un actuador de espejo. Sin embargo, tiene una pequeña desventaja de poseer una pequeña deformación de menos del 7% para limitar su rango de aplicación, combinado con las propiedades del nylon antes vistas el autor propone una combinación de SMA de alta resistencia y nylon de gran deformación en espiral como músculos artificiales compuestos.

Los autores del artículo explican el proceso de fabricación de 4 tipos de músculos, unos inspirados en los músculos de (Haines 2015) mientras que los otros son caracterizados de tal

manera que se les integro una fibra de material de SMA, para esto usaron una base, un motor, un controlador de motor, un peso y un convertidor de potencia, donde el motor se utiliza para torcer la línea de nylon. En la Figura 1-23 se puede observar cada uno de los procedimientos para la construcción de cada uno de los músculos que el autor fabrico, se observa que dos prototipos de músculos de nylon (con SMA y sin SMA) utilizó un mandril durante el proceso, con la finalidad de tener un diámetro mayor en la espiral característica de este actuador el músculo tendrá una mayor carrera al inducirle corriente y calor al material, los otros dos fueron a un diámetro normal en la espiral.

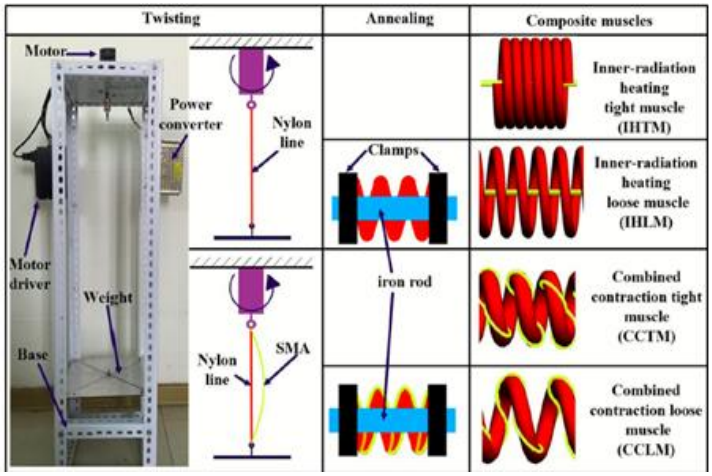


Figura 1-23 Construcción de los músculos de nylon (con y sin SMA), (Yin, Zhou et al. 2018) inner-radiation heating tight muscle (IHTM), Inner radiation heating loose muscle (IHLM), combined contraction tight muscle (CCTM), combined contraction loose muscle (CCLM).

La Figura 1-24 se muestra el resultado de la fabricación de cada uno de los 4 músculos que el autor propuso y posteriormente fabricado para su experimentación.

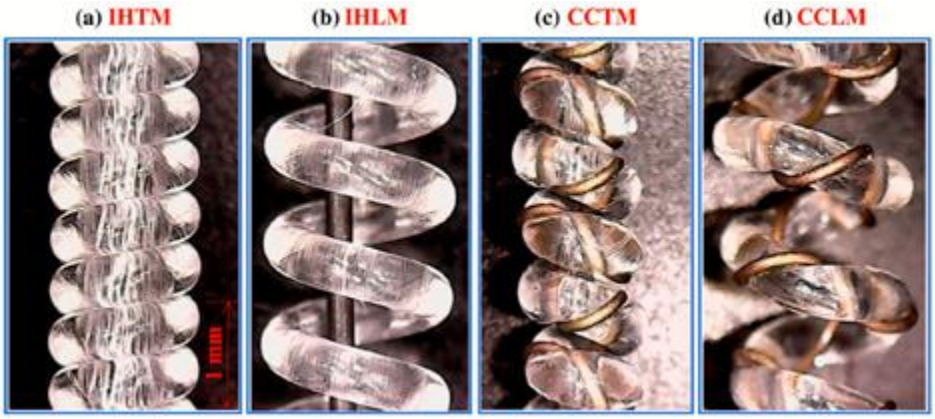


Figura 1-24 Imágenes ópticas de cuatro muestras de músculos compuestos: (a) IHTM fabricado torciendo la línea de nylon de 0.5 mm y siendo calentado por un cable SMA de 0.3 mm, (b) IHLM fabricado retorciendo la línea de nylon de 0.5 mm a los giros críticos y enrollándolo en la varilla de hierro con un diámetro de 1 mm para recocer y calentar con un alambre SMA de 0,3 mm, (c) CCTM fabricada torsionando una línea de nylon de 0,5 mm y alambre SMA de 0,15 mm, (d) CCLM fabricada torsionando una línea de nylon de *0,5 mm y*

0,15 SMA de mil hilos a las espiras críticas y enrollándolas en la varilla de hierro con un diámetro de 1 mm para recocerlas(Yin, Zhou et al. 2018)

En la Tabla1-1 se revela los resultados obtenidos al someter a cada uno de los músculos a las pruebas de las propiedades mecánicas de los músculos (deformación, carga, tiempo de trabajo y poder de densidad.)

Tabla 1-1 Propiedades mecánicas del músculo compuesto.

Propiedades mecánicas del músculo compuesto				
Nombre del prototipo	Deformación $\boldsymbol{\delta}$	Carga G_{MAX} kg	Tiempo T_{Max} S	Densidad de poder P W/m
IHTM	25.6	0.19	33.6	4.86
IHLM	37.5	0.08	13.5	3.00
CCTM	20.7	0.35	10.7	7.25
CCTM	44.1	0.15	22.4	6.62

En conclusión, con el trabajo del autor señala que los resultados muestran que estos músculos artificiales compuestos que integran nylon y SMA proporcionan mejores propiedades mecánicas y producen hasta un 44.1% de deformación y 3.43 N de fuerza motriz. El buen rendimiento y la actuación electro térmica directa hacen que estos músculos compuestos sean ideales para conducir robots en un método similar a los músculos humanos (Yin, Zhou et al. 2018).

1.2.1.4.5 Actuadores blandos Sistema accionado por tinta conductora de plata.

Los músculos de nylon por tinta conductora de plata son investigados y reportados por los dos artículos **"Simple and strong: Twisted silver painted nylon artificial muscle actuated by Joule heating"**. **(Mirvakili, Ravandi et al. 2014) ,"Bending artificial muscle from nylon filaments", (Mirvakili and Hunter 2016)** siendo Seyed M. Mirvakili (PhD, Massachusetts Institute of Technology) el principal autor de ambos documentos.

El funcionamiento del músculo consiste en el calentamiento de Joule, al pasar una corriente a través de un recubrimiento conductor en la superficie del filamento, este método es uno de los más confiables, ya que se puede controlar la entrada de la estimulación del músculo que es la corriente eléctrica que pasa por él, la pintura de plata es usada como el elemento calefactor Joule en la superficie del músculo.
Ambos documentos presentan métodos de fabricación diferentes del músculo, ya que una se dedica a crear una espiral y otro un filamento recto.

"Simple and strong: Twisted silver painted nylon artificial muscle actuated by Joule heating". (Mirvakili, Ravandi et al. 2014)], la cual consiste en tomar un monofilamento de nylon de pesca, y torcer hasta que este quede tenso, antes de formarse la espiral en el

monofilamento de nylon se recubre con una capa de tinta conductora de plata (SPI®, flash seco), ya una vez aplicada la pintura este se volvía a torcer hasta formar la característica espiral, y posteriormente se volvió a recubrir la pintura para tener un músculo completamente cubierto de plata. En la Figura 1-25 se muestra la imagen de un músculo de nylon con tinta conductora de plata

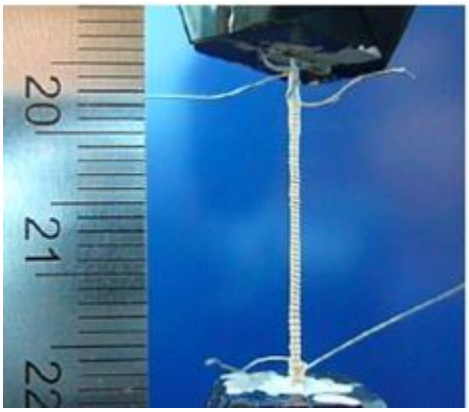


Figura 1-25 Músculo de nylon pintado con tinta conductora de plata.

Primero se entrenó el músculo con una carga de 5.6 N. posteriormente se utilizó una carga de 3.6 N para las mediciones térmicas, para el análisis mecánico se utilizó un Bose, electroforce 3100, con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas del músculo artificial, también se calculó los ciclos de vida del músculo midiendo la carga puesta en el filamento en espiral y su tensión en el tiempo.
Los resultados obtenidos en este músculo muestran que la resistencia obtenida por el recubrimiento de plata era de 100 a 600 Ω por metro de longitud y su distribución térmica casi uniforme en la superficie. Ver Figura 1-26.

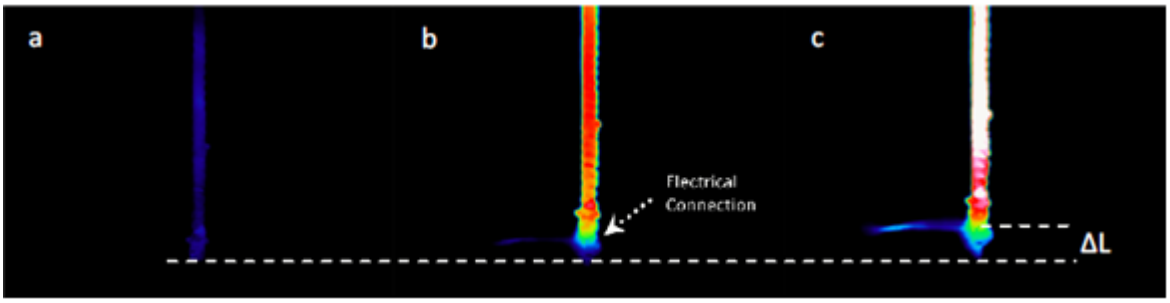


Figura 1-26 Imagen final del actuador de nylon, a) al inicio del calentamiento joule, b) durante la actuación y c) a máxima contracción.

El autor menciona que el actuador obtuvo un 29% de tracción con respecto a la longitud del músculo no estirado y el 10% de deformación con respecto a la longitud del
músculo no estirado, con densidades de energía y potencia que alcanzan 840 kJ m-3 (528 J kg-1) y 1.1 kW kg-1 (operando a 0.1 Hz, 4% de tensión, 1.4 kg de carga). La imagen 1-25 detalla la expansión térmica del material a través de la misma por medio de una cámara que detecta la temperatura.

“Bending artificial muscle from nylon filaments” (Mirvakili and Hunter 2016), este método consiste en un tratamiento térmico sobre un monofilamento de nylon 6,6, como un hilo de nylon (Sufix Superior, 1,40 mm) a 90 ° C durante 45 min. Este proceso es necesario para eliminar cualquier deformación en el filamento y hacerlo lo más recto posible. El filamento con área de sección transversal circular original se aplanó ligeramente con una prensa de rodillo, para formar vigas de nylon. Después de limpiar las vigas de nylon con alcohol etílico, se añadió un elemento de calentamiento Joule como pintura plateada (SPI®, flash seco) o alambre de nicrom (75 µm en el perímetro) a ambos lados del filamento. La Figura 1-27 muestra un pedazo del filamento de nylon caracterizada por un rodillo.

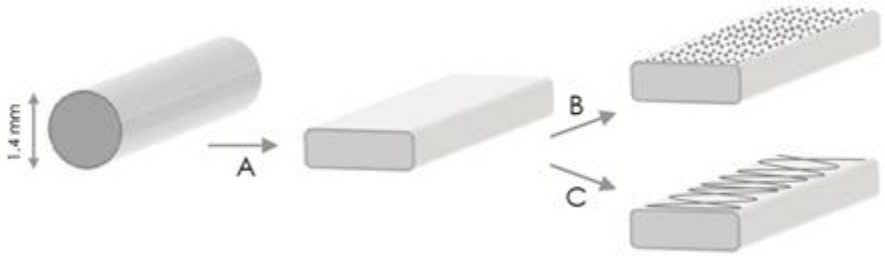


Figura 1-27 (A) Una viga de nylon se forma presionando con el rodillo un filamento de nylon. Después de limpiar la viga con alcohol etílico, se agrega un elemento calefactor Joule a las superficies superior e inferior de la viga. El elemento calefactor Joule puede ser en forma de un compuesto de pintura plateada (B) o alambre de nicrom en configuración de doble zigzag (C)

Los datos obtenidos dentro de este músculo son los siguientes. Con los actuadores de doblez de nylon, logramos un radio de curvatura de alrededor de 0.56 mm-1 en una actuación irreversible y 0.23 mm-1 en una actuación reversible Se logra una amplitud reversible máxima de aproximadamente 110 mm para una muestra con una longitud de 115 mm, un grosor de 1 mm y una anchura de 1,8 mm. Este actuador de flexión se puede modelar como una red de dos resistencias en la que solo se activará una resistencia por vez. Ver Figura 1-28.

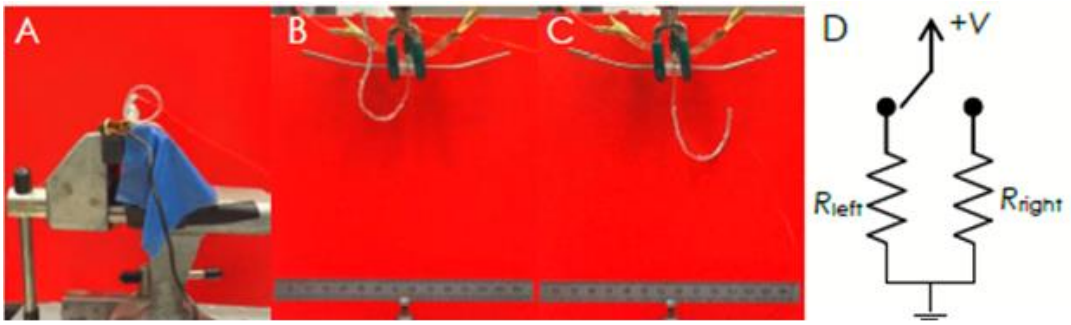


Figura 1-28 (A) El nylon se curvó más de dos veces, lo que da como resultado un radio de curvatura de alrededor de 0,56 mm-1. (B) y (C) muestran un radio de curvatura de alrededor de 0.23 mm-1 para una actuación reversible.

El autor del artículo concluye con lo siguiente: "*El actuador de flexión de nylon podría ejercer una fuerza de alrededor de 2040 mN con un 40% de retención (es decir, estado de retención). La capacidad de fuerza del accionador de doblez de nylon junto con su capacidad para doblarse de forma reversible con un radio de curvatura de 0.23 mm-1 lo convierten en un buen candidato para la aplicación en dispositivos biomédicos*".

Se hizo una recopilación de los actuadores involucrados en la robótica convencional y blanda, mencionando cada una de las características que lo conforman y su funcionamiento comparando las ventajas y desventajas que involucran los sistemas.

1.3 Ventajas y desventajas de los actuadores

Tabla 1-2 Ventajas y desventajas de los actuadores (convencionales y suaves).

Sistemas de actuadores convencionales	Ventajas	Desventajas	Que hace falta
Eléctricos	Señal de transmisión rápida Mejor control operativo Precisión y sensibilidad relativamente altas Instalación sencilla	Estructura relativamente compleja Pequeño empuje Mantenimiento Sobrecalentamiento al motor Mayor desgaste en los engranajes	Mayor fuerza de empuje sin afectar motores Disminución en el desgaste de los motores y sobrecalentamiento Disminuir el mantenimiento
Neumáticos	Flujo abundante de aire para su accionamiento Menor riesgo de contaminación Mayor velocidad en aplicaciones de montaje Las fuerzas y velocidades pueden regularse Soporta sobre carga	Tratamiento en las impurezas del aire y humedades La obtención del aire comprimido es costosa Niveles de ruido elevados No se obtienen velocidades uniformemente	Componentes que purifiquen el aire con mayor rapidez Disminuir los costos de mantenimiento y de carga del aire comprimido. Aislar el ruido al descargar el aire utilizado a la atmosfera

	La energía neumática se puede almacenar pudiendo emplearse en caso de fallo eléctrico.		
Hidráulicos	Las fuerzas pueden regularse de manera continua Pueden soportar sobrecargas sin riesgo o sin sobrecalentarse Simplicidad en la actuación	Velocidades bajas en los actuadores La limpieza en los dispositivos y tuberías Buen mantenimiento Costos de bombas, válvulas motores y etc.	Mayor velocidad en su accionamiento Disminuir el mantenimiento y limpieza de dispositivo Disminuir los costos de mantenimiento y otros elementos
Sistemas de actuadores blandos	Ventajas	Desventajas	Que hace falta
Eléctricos	Fácil medición de la carga eléctrica entrante. Respuesta rápida de acción.	Altas cargas de voltaje para accionar el actuador. Materiales de fabricación. Periodos cortos de vida del material.	Mejorar la resistencia del material. Mejor control en el campo eléctrico. En el caso de los elastómeros dieléctricos requieren un electrolito, un contra electrodo y un sistema de contención.
Neumáticos	Pueden absorber impactos sin sufrir daño. Interacción con su entorno de forma no destructiva.	Baja respuesta de acción. Cantidades relativamente altas de aire comprimido.	Control en la presión del aire. Mejor precisión de agarre y fuerza

	Livianos Económicos y fáciles de hacer.	Cambio de volumen del material significativamente. (se debe caracterizar de acuerdo con el área de trabajo deseado de lo contrario el punto 2 en ventajas no tiene relevancia). Entorno de operación deficiente debido a los altos niveles de ruido	
Hidráulicos	Facilidad de construcción. Recuperación del músculo ante rupturas dieléctricas.	Perdida de energía a través de los canales internos del actuador. Costos	Generar altas tensiones para alcanzar campos eléctricos lo suficientemente grandes como para actuar. Construcción capaz dieléctrica delgada con mayor permisividad.
Térmicos	Buena carrera de tracción del músculo. Soporta cargar mayores a un músculo biológico Mayor tiempo de vida y funcionamiento.	Sistema de calefacción y enfriamiento Caros e histéresis, difícil control (nano tubo de carbón y Ni-Ti).	Control de la resistencia del material a los cambios de temperatura.

Los actuadores blandos son dispositivos mecánicos compuestos de estructuras blandas capaces de deformase e inducir un movimiento lineal o rotativo como se muestra en este apartado. El estudio y desarrollo de estos actuadores es relativamente nuevo, por lo que las aplicaciones en sistemas mecánicos aún no son fiables.
Existen otro tipo de actuadores que su configuración es muy distinta a las mostradas en los actuadores suaves y convencionales, estos en palabras de sus autores señalan las cualidades que posee en el desempeño de sus actividades supera en mayor medida a los actuadores convencionales gracias a que su mecanismo trabaja con un molino diferencial, la cual reparte y distribuye la carga a través de la tensión de una cuerda la cual esta guiada por un husillo cónico.

1.4 Actuador lineal por cuerda

Los actuadores lineales por cuerda son de los actuadores de nueva generación que funcionan en base a un mecanismo novedoso e inspirado en el molino chino, los cuales funcionan a partir de un accionamiento cónico diferencial propuesto por la empresa *RISE ROBOTICS* quienes nombran este actuador como “Cyclone Muscle” la Figura 1-29 muestra un ejemplo del actuador.

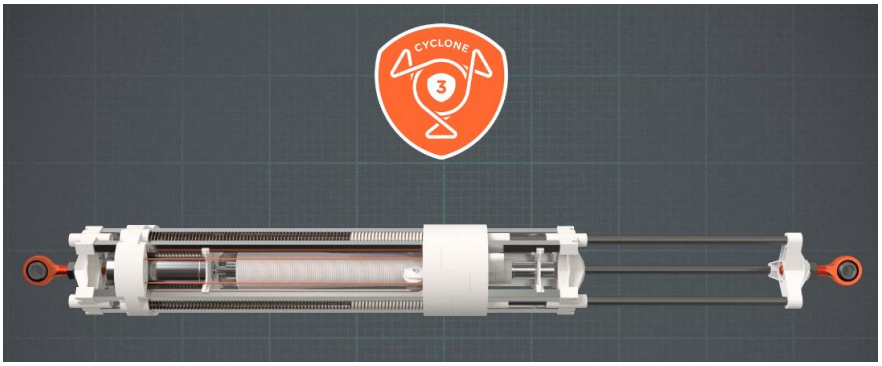


Figura 1-29 Cyclone muscle

Esta propuesta de actuador trabaja bajo los principios del Molino Diferencial o también conocido como Molino Chino, este consiste en un molinete horizontal simple, con una manivela en un extremo, el molinete esta hecho en forma cónica, siendo grande de un extremo que en el otro, la fuerza aplicada al molinete se notara a momento de soportar la carga ya que la fuerza del molinete se multiplicara por la forma de la misma, el poder de elevación proviene de la forma en que el cable se enrolla alrededor de dos tambores de diámetros ligeramente diferentes en el mismo eje. Cuando se gira la manija para levantar la carga, la cuerda del tambor pequeño y se coloca en el grande. Ejemplo de molino chino Figura 1-30.

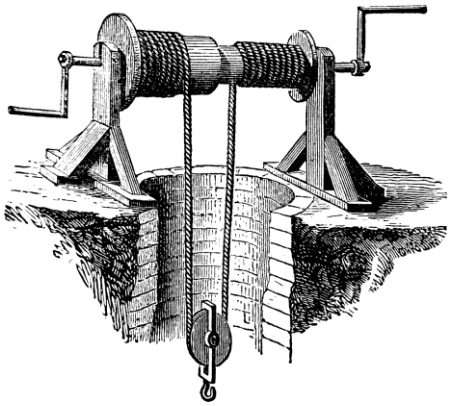


Figura 1-30 Molino chino

El cyclone muscle posee las características de un actuador lineal industrial con la diferencia de que posee un poder de motor mucho mayor que un actuador industrial en comparación, dándole la ventaja de movimiento rápido y soportar las cargas que un robot industrial está diseñado a trabajar. En la siguiente imagen se observa como el autor ilustra el desempeño y poder del motor que es constante en comparación con el actuador del manipulador industrial convencional. Véase en la Figura 1-31.

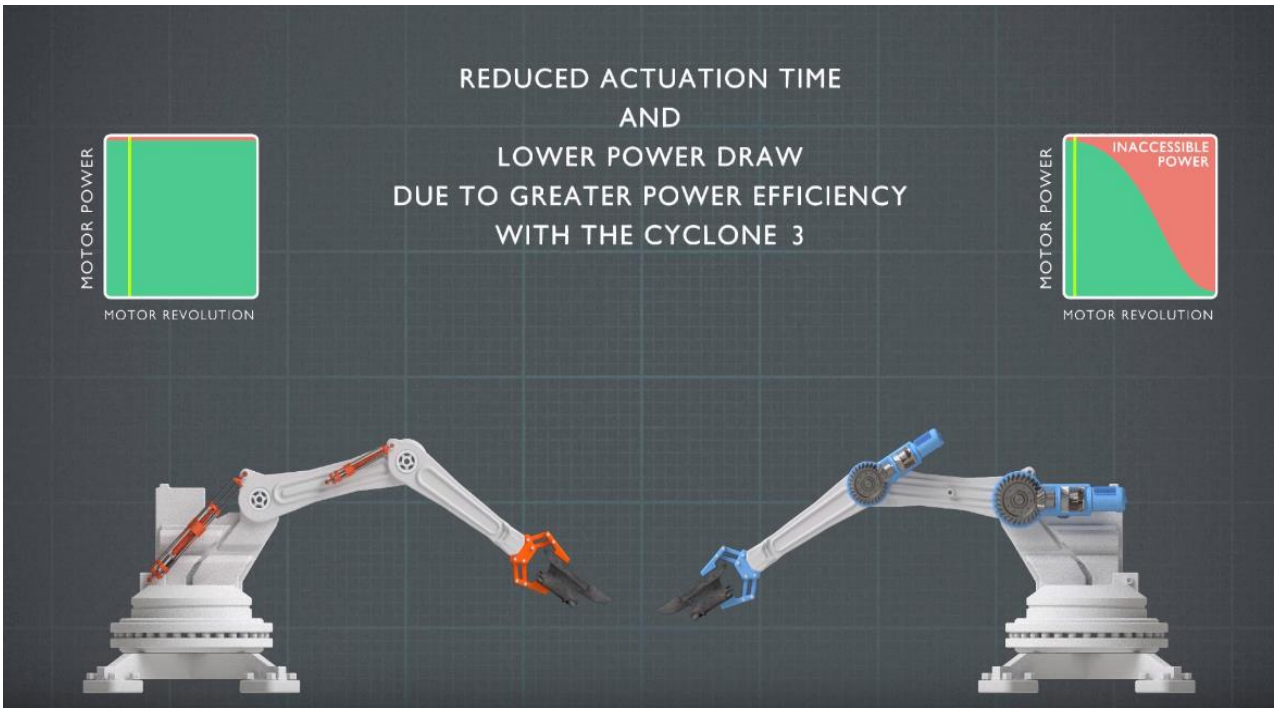


Figura 1-31 Comparación de la eficiencia de poder del actuador cyclone con respecto a un actuador rotatorio industrial.

Las características que distingue a Cyclone Muscle es su estructura compuesta de poleas y un husillo, las cuales permiten la transmisión del movimiento de la cuerda inducida por el

motor, esto elimina de la necesidad de engranajes el cual podría significar un equipo mucho rápido, fuerte y liviano que consume significativamente menor energía que el engranaje típico, tornillo de bola neumático, hidráulico y sin la necesidad de introducir metales de alta tolerancia (el cual disminuiría un costo significativo en el mantenimiento de estos actuadores).

Como parte del diseño de esta gama de actuadores de la empresa *RISE ROBOTICS*, se tiene que, dependiendo del criterio y la configuración de los actuadores, estos tendrán movimientos lineales, pero con otras características, En las siguientes figuras se muestran los diferentes tipos de husillos utilizados por la Empresa *Rise Robotics*, para esta tesis se basó en el modelo de la Figura 1-34 para el caso de estudio.

El modelo de la Figura 1-32 se observa la configuración del husillo que se conforma de una cabeza cónica con un cuerpo cilíndrico, esta configuración permite al actuador tener un desplazamiento constante con una velocidad variable al llegar al final de la carrera del husillo.

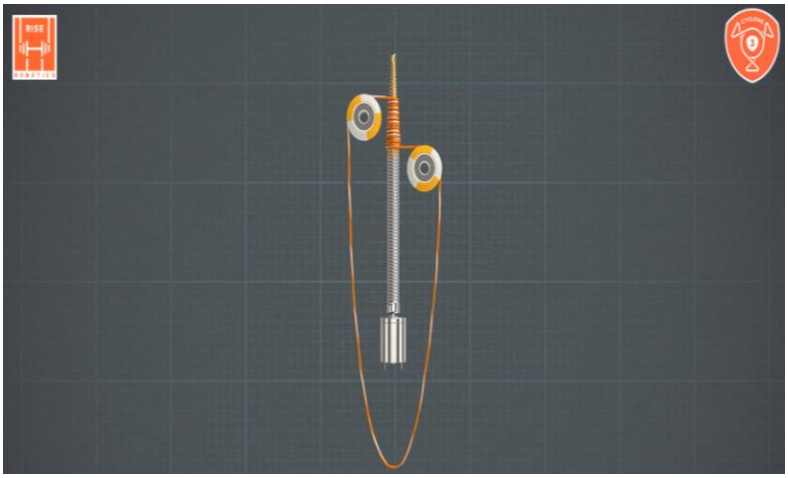


Figura 1-32 Husillo cónico y cilíndrico

El siguiente modelo muestra un husillo completamente cónico el cual brinda al actuador una velocidad variable en toda la carrera del actuador, esto permite ejecutar los movimientos del actuador con mayor fluidez y velocidad. Ver Figura 1-33.

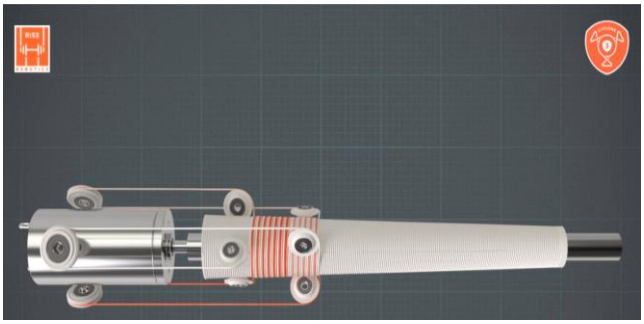


Figura 1-33 Husillo cónico

Este modelo de husillo es completamente cilíndrico, esto permite tener al actuador una velocidad de carrera constante a diferencia de los demás modelos mostrados. El modelo de la Figura 1-34 fue elegido para su estudio en un manipulador serial, comprobando su desempeño en la aplicación de la robótica como parte de un banco de pruebas para material didáctico en la materia de instrumentación y control.

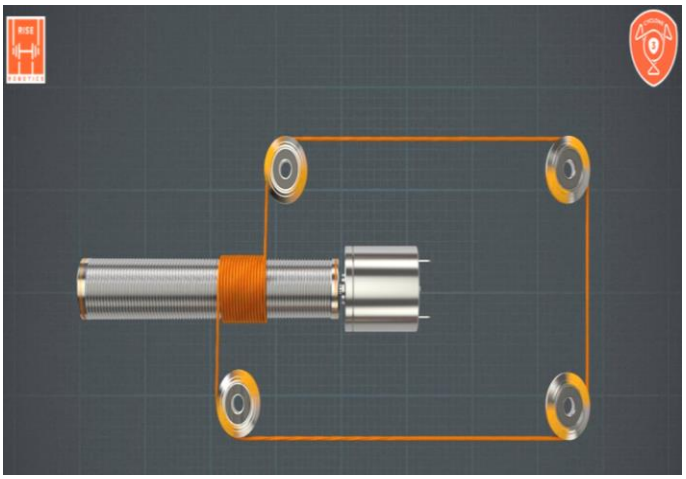


Figura 1-34 Husillo cilíndrico

Este modelo de husillo presenta una combinación de dos extremos cilíndricos siendo la parte media del husillo cónica, con una diferencia de diámetros notable este actuador tiene una ejecución de movimiento complemente diferente a los modelos anteriores, el autor no presenta los nombres de los modelos por lo que se le nombro husillo diferencia debido al movimiento que produce durante la carrera del actuador. Ver Figura 1-35.

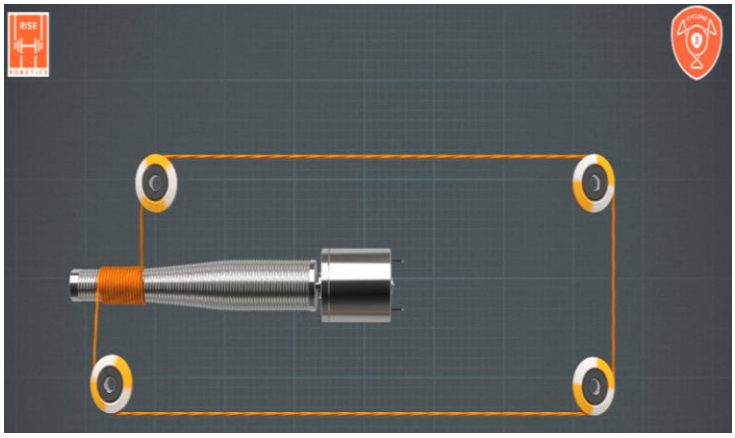


Figura 1-35 Husillo diferencial

Este modelo como el anterior se caracteriza por tener un husillo con una configuración singular, teniendo de dos de los extremos una forma cónica, el movimiento y la velocidad ejecutada en la carrera del actuador es muy variable, por lo que este actuador como el de la Figura 1-34 se le denomina husillo diferencial 2. Ver Figura 1-36.

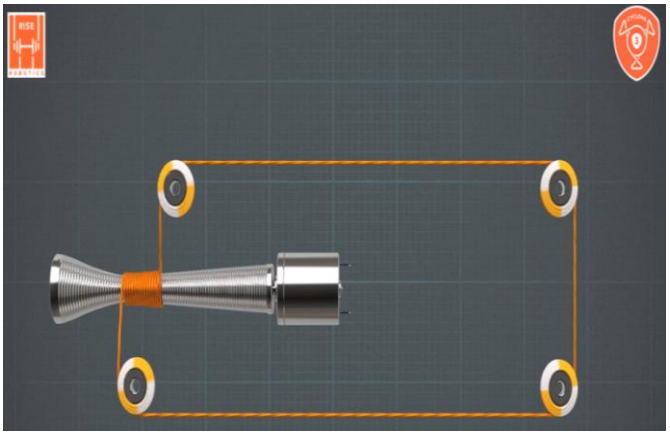


Figura 1-36 husillo diferencial 2

Este modelo de actuador a diferencia de los anteriores su movimiento es ejecutado a través de dos husillos con formas cónicas, al cual le permite tener un movimiento similar al del actuador de la Figura 1-33, lo único que cambia es la configuración del husillo en donde la ejecución del movimiento es paralela a la posición del husillo permitiendo el desplazamiento lineal del mismo. Ver Figura 1-37.

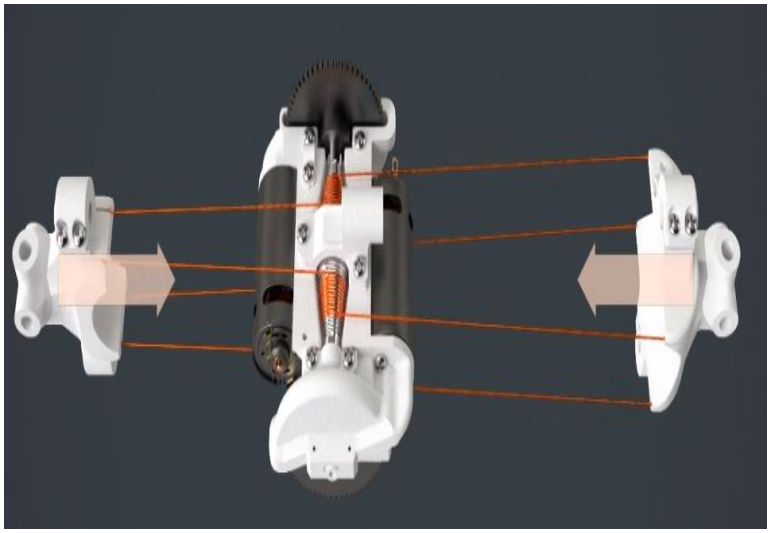


Figura 1-37 Husillo con dos extremos cónicos

La recopilación de los distintos modelos de actuadores propuestos por la empresa *Rise Robotics* ayuda en el estudio de nuevos actuadores con características y configuraciones diferentes a las que se pueden encontrar en los actuadores convencionales y suaves, permitiendo estos ser capaces de actuar con mayor fluidez y velocidad, la recopilación de todos los antecedes de actuadores permite en el presente trabajo encontrar las deficiencias en los distintos tipos de configuraciones, con ello se pretende estudiar los modelos propuestos de actuadores suaves y por cuerdas encontrados a través de los artículos publicados para su análisis como bancos de pruebas en un manipulador serial.

En el siguiente apartado se enfocará en la relación de los actuadores con la robótica, pasando a la problemática que rodean a los actuadores y su aplicación.

1.4.1 Los actuadores en la robótica.

La robótica ha tenido varias definiciones a lo largo de los años, desde su etimología el término de robótica es derivado del término "robota", el cual significa "trabajo propio" (tipo de esclavitud), "trabajo penoso", o "trabajo duro" en la moderna lengua checa, hasta definiciones que engloban los elementos esenciales que la componen, así como también sus funciones. Por ejemplo *"La robótica es la rama de la ciencia, la tecnología y el arte que trata con robots, es decir, "organismos" artificiales que transmiten vida como apariencia mediante acciones físicas y realizan tareas de forma autónoma utilizando un sistema de control sensorial activo, o con orientación típicamente por tele operación, en ese caso, algunas de las funciones de un sistema de control sensorial activo son asumidas por el operador"(Popović 2013).*

Los actuadores que han estado presentes en la robótica son aquellos que esencialmente sus estructuras están compuestas de materiales rígidos y de motores potentes capaces de generar movimientos lineales o giratorios.

Los actuadores son los elementos importantes para generar el movimiento de las articulaciones de los cuales constituyen los manipuladores modernos (robots seriales, robots paralelos, robots híbridos, robots por cables y robots suaves).

La evolución de la robótica en sus distintas disciplinas y áreas, han ampliado un abanico de actuadores Se enfocan en el principio de actuación electrodinámica, electromagnética, electrostática, piezoeléctrica, electroneumático y electrohidráulicos. Con capacidades que efectúan la actuación de los manipuladores, el funcionamiento de dichos actuadores está estructurado en función de su principio físico (Haus, Kern et al. 2014).

En los últimos años ha habido un cambio en las estructuras y enfoques que se les han dado a los manipuladores industriales, dándoles una dirección a diversas áreas, como la educación, medicina, primeros auxilios y rescate, simulación (aeronáutica, automotriz, marítimo) y etc. lo cual permite combinar y desarrollar mejor las capacidades de actuadores para su funcionamiento en cualquier entorno.

1.4.2 Definición del problema

Los actuadores son dispositivos que están diseñados para convertir energía en movimiento y en fuerzas mecánicas que son útiles para el movimiento, estos tipos de movimientos pueden ser lineales y rotatorios, estos funcionan a través de estímulos externos (como es la electricidad, neumática, hidráulica, etc) que convierten la energía almacenada en mecánica causando un efecto ya sea lineal o rotatorio (Popović 2013).

La aplicación de los actuadores es esencial para la movilidad y desempeño para mecanismos de trabajo, maquinas, CNC u otro tipo de herramienta que requiera de su actuación para la realización de trabajo de precisión, presión, fuerza, velocidad y etc. Por esta razón se optaron

por tres casos para el estudio de actuadores no convencionales (elastómero dieléctrico, músculo de nylon y actuador lineal por cuerdas), y su aplicación en la actuación de una articulación de un robot manipulador. Con el fin de permitir observar el funcionamiento de estos actuadores comprobando su desempeño y efectividad en la aplicación de los actuadores en un banco de pruebas para la enseñanza de la materia de instrumentación y control.

La necesidad de caracterizar estos actuadores para el estudio y enseñanza de la materia de instrumentación y control, permite a los alumnos que, tengan el acercamiento de forma física, práctica y teórica en el funcionamiento de los actuadores, comparar los resultados prácticos junto con los teóricos para un mejor análisis y comprensión de los fenómenos físicos que ocurren en la actuación de los mecanismos.

1.4.3 Hipótesis

- ¿La implementación de actuadores no convencionales en un manipulador serial ayudará en la enseñanza en la rama de la robótica?
- ¿Podrá un actuador no convencional (lineal de cuerdas, un actuador elastómero dieléctrico y un músculo de nylon) superar las características y desempeño de los actuadores convencionales?
- ¿Las características que posee los actuadores no convencionales podrá sustituir algún día a los actuadores convencionales?

1.4.4 Objetivos

Caracterizar un actuador lineal no convencional para su análisis e implementación en una articulación de un manipulador serial, con el fin de generar material didáctico en la materia de instrumentación y control, robótica, en estudiantes de Ingeniería de la FES Aragón.

1.4.4.1 Objetivos particulares

- Recopilar información antecedente.
- Investigar y desarrollar los tres casos de estudio de actuadores no convencionales.
- Comprobar la vialidad de los 3 casos de actuadores para su aplicación en un manipulador.
- Caracterizar a los actuadores.
- Seleccionar un actuador que formará parte de un banco de pruebas.
- Diseñar e instrumentar un banco de pruebas.
- Estudiar el movimiento y la fuerza que ejerce el actuador.

1.4.5 Alcances

Comprobar la efectividad de los actuadores lineales por cuerda, dentro de un robot manipulador serial y su desarrollo como material didáctico, como parte de la enseñanza en la formación profesional.

1.4.6 Justificación

El estudio de estos actuadores beneficiará en la enseñanza en el área instrumentación y control, robótica, generando material didáctico y un banco de pruebas para la formación profesional de estudiantes de ingeniería. En la industria el impacto es en el desarrollo de sistemas ligeros y con mayor capacidad de trabajo.

En el campo de la instrumentación y robótica los sistemas y los elementos que la integran cada vez tienen que ser adaptables y capaces de realizar tareas, trabajos o ejercicios donde la demanda de tareas exige mayor precisión y fluidez, optimizando el tiempo de trabajo y la menor pérdida de energía por parte de los dispositivos (actuador).

La idea de integrar diseños innovadores y ligeros con la misma capacidad de trabajo, es atractivo, un caso práctico es en la aplicación en manipuladores seriales, paralelos y robots por cables, ya que estos permitirán desempeñar las mismas actividades que desempeñan los actuadores convencionales, con la ventaja de un diseño capas de trabajar en menor tiempo y de manera fluida.

1.4.7 Metodología

- Recopilación e información del estado del arte.
- Selección de un actuador no convencional.
- Diseño del prototipo de actuador.
- Fabricación y caracterización de prototipo.
- Análisis de movimientos y comparación con un servo.
- Análisis cinemático del manipulador y comparación.
- Resultados.

2 Capítulo 2

2.1 Diseño conceptual

En este capítulo se reporta el trabajo desarrollado de dos actuadores lineales que forman parte de la robótica blanda y de un actuador lineal con cuerda, de los cuales se encontraron dificultades en los procesos de fabricación, obtención de materiales, resultados y aplicaciones, se mostrará el respaldo teórico de cada una de ellas y el motivo por el cual no fueron opciones para la aplicación como actuadores lineales. Así como también se resaltan los conceptos teóricos. El proceso de diseño para llegar a la configuración final del actuador lineal con cuerda y su implementación en una articulación de un manipulador serial para generar material didáctico y de fortalecer la enseñanza en la asignatura de Instrumentación y control, y robótica. Los actuadores lineales son elementos esenciales para la movilidad y funcionamiento.

2.2 Resumen

El presente capítulo introducirá los conceptos de actuadores lineales (suaves y rígidos) como se menciona en el capítulo 1, así como su teoría antecedente la cual respalda la parte teórica de los materiales y su principio de funcionamiento físico.

2.3 Alcances

Se obtendrán las ecuaciones del comportamiento físico del mecanismo y las propiedades del material, para su estudio previo, posteriormente estas fórmulas ayudan a establecer los parámetros de los actuadores, estos parámetros serán comparados para su implementación en los manipuladores seriales.

2.4 Caso 1. Diseño conceptual de elastómero dieléctrico

Los elastómeros dieléctricos son actuadores lineales y su estructura está conformada de un material elástico (elastómero) conectado a dos electrodos compatibles, al aplicar un voltaje se crea un campo eléctrico, teniendo como consecuencia que se encoja el espesor y el área del polímero.

En la Figura 2-1 se puede observar el esquema del funcionamiento de los elastómeros dieléctricos cuando se conecta a una fuente de voltaje encendida y apagada.

La respuesta a estos estímulos es causada principalmente por la interacción entre la carga electrostática en los electrodos.(Chiba 2014)

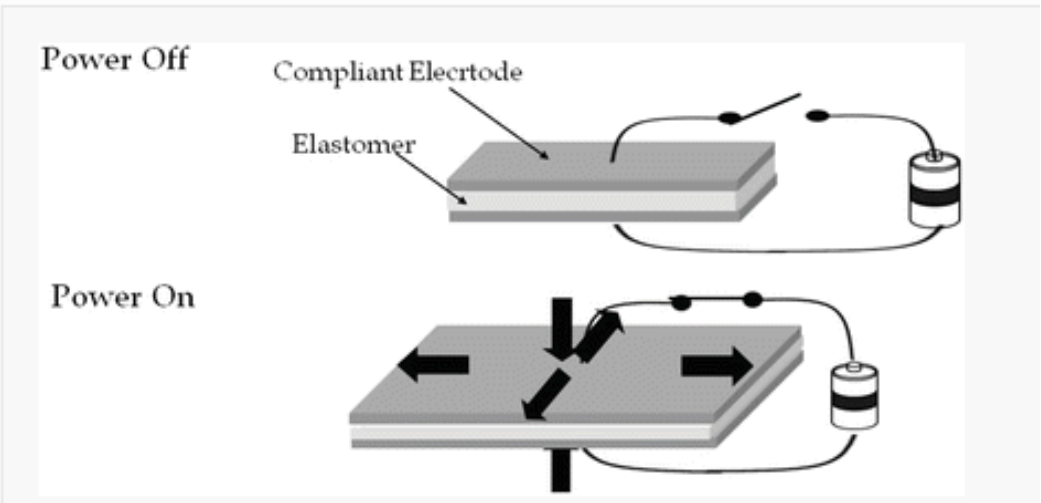


Figura 2-1 Esquema del funcionamiento del elastómero dieléctrico

2.4.1 Teorías antecedentes del elastómero dieléctrico

Para el estudio de los elastómeros dieléctricos se apoyan de teorías basadas en la electroestática, electromagnetismo y propiedades de los materiales, los cuales permiten conocer los parámetros de trabajo del actuador y ser comparados con los trabajos encontrados en la literatura existente, para su aplicación. El estudio de estos actuadores abarca desde la presión aplicada por los electrodos, tensión de Maxwell y propiedades de los materiales.

2.4.1.1 La presión efectiva

Este tipo de presiones son transmitidas a través de contacto entre dos cuerpos, la magnitud de la presión entre estos dos cuerpos en contacto depende entre el área de un corte cualquiera y el área que aquellos ocupan.

Esta presión es provocada por los electrodos en la película del elastómero sometido a la tensión aplicada. (Chiba 2014)

$$P = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \varepsilon\varepsilon_0 (\frac{v}{t})^2 \quad (2.1)$$

ε_0= es la permitividad del espacio libre (8.85 x 10^{-12} F/m)

ε= es la permitividad relativa (contacto dieléctrico) del polímero

E= es el campo eléctrico aplicado en V / m

V= es el voltaje aplicado

t= es el espesor de la película

La respuesta del polímero es funcionalmente similar al de los polímeros electroactivos, ya que la respuesta está relacionada con el cuadrado del campo eléctrico aplicado.

2.4.1.2 Tensión Maxwell

El tensor de tensión Maxwell (llamado así por James Clerk Maxwell) es un tensor de segundo orden, utilizado en el electromagnetismo clásico para representar la interacción entre las fuerzas electromagnéticas y el momento mecánico. En situaciones simples, como una carga puntual que se mueve libremente en un campo magnético homogéneo, es fácil de calcular las fuerzas en la carga de la ley de fuerza de Lorentz.

2.4.1.3 Propiedades de los materiales utilizados para los elastómeros dieléctricos

De los materiales candidatos que han sido estudiados y con mejor desempeño son los cauchos de silicona y elastómero acrílico, la Tabla2-1 muestra las características sobresalientes de estos materiales como excelentes candidatos para actuadores blandos.

Tabla 2-1 propiedades de los elastómeros.

Parámetro	Acrilatos	Siliconas
Tensión de actuación máxima (%)	380	120
Presión máxima de actuación (MPa)	7.2	3.0
Máxima densidad de energía especifica en actuación (MJ/ m^3)	3.4	0.75
Respuesta de frecuencia máxima (Hz)	>50,000	>50,000
Campo eléctrico Máximo (MV/m)	440	350
Constante dieléctrica relativa	4.8	2.5-3.0
Factor de perdida dieléctrica	0.005	<0.005
Módulo de elasticidad promedio (MPa)	2.0-3.0	0.1-2.0
Factor de perdida mecánica	0.18	0.05
Acoplamiento electromecánico máximo, k^2	0.9	0.8
Máxima eficiencia global	>80	>80
Durabilidad (ciclos)	>10,000,000	>10,000,000
Rango de operación (ºC)	-10 a 90	-100 a 260

Estos actuadores tienen muy buenas características como el control, durabilidad, respuesta y frecuencia. Haciéndolos excelentes candidatos para la robótica blanda. Sin embargo, estos requieren un campo eléctrico muy grande capaz de generar aproximadamente de 100 V/µm para poder inducir la deformación mecánica del material por tal motivo se descartó la investigación de estos actuadores, por los siguientes inconvenientes: la adquisición del material sólo es en grandes volúmenes de 10 toneladas aproximadamente (ácido acrilato), contar con un laboratorio y el equipo especializado necesario para los tratamientos como la Producción de membrana de silicona, Liberación y Prestación de Membranas Elastoméricas, colocación de los electrodos, las conexiones a la fuente y la escalabilidad, teniendo estas limitaciones en el estudio de este actuador y su efectividad como actuador lineal blando y si la posibilidad de obtener los datos que se puedan comparar con los estudios previos de este material. El Instituto encargado del desarrollo de estos actuadores está localizado en Japón Tokio en el Instituto de Ciencias de Chiba.

2.5 Caso 2. Diseño conceptual de músculo artificial de nylon

Los músculos artificiales de nylon son los actuadores que han tenido mayor auge en los últimos años, ya que las propiedades mecánicas del nylon y la configuración en espiral de este, lo hacen un excelente candidato para la implementación en robots blandos. Ver Figura 2-2.

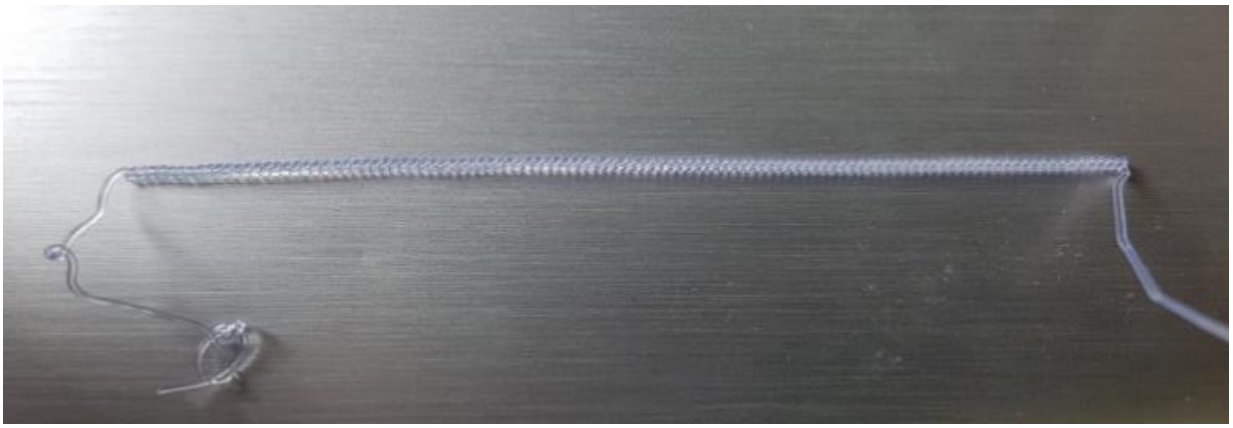


Figura 2-2 Músculo artificial de nylon

Sin embargo, los sistemas de control para estos músculos aún están en etapas de desarrollo, ya que controlar las temperaturas de contracción y flexión del músculo es un reto, los tiempos en que el músculo absorbe la temperatura alta y obtiene su expansión anisotrópica, tarda alrededor de 10 segundos a una temperatura de 300° grados Celsius aproximadamente para su total contracción y alrededor de 2 minutos para que su temperatura de equilibrio la flexione. Estas pruebas se hicieron con el apoyo de un soporte universal y unas pesas. En la Figura 2-3. Se observa el músculo sometido a diferentes cargas y en la Tabla2-2. Se muestran los resultados de las cargas medidas en Newton y el alargamiento del músculo de nylon con respecto al peso colocado.

Tabla2-2 Alargamiento y fuerza colocada en el músculo artificial de nylon.

Alargamiento (cm)	Fuerza (N)
8.5	0
8.7	0.667
9	1.334
9.5	1.978
9.7	2.002
10.5	2.669
11.3	3.337
12	3.957
14.3	5.935
15.5	7.914
16.4	9.893

-

Figura 2-3 Músculo artificial de nylon sometido a cargas.

2.5.1 Teoría antecedente del músculo artificial de nylon

Para el estudio de los músculos de nylon se analizan sus propiedades mecánicas para conocer su comportamiento y aprovechar al máximo las características, estos se destacan por sus capacidades de carga altas en proporción a su tamaño e histéresis, sin embargo emplearemos teorías mecánicas para comprobar la versatilidad del músculo comparándolo con los autores mencionados previamente en el estado del arte con el fin de hacer una comparativa y ver su fiabilidad como futuros actuadores blandos dentro de la robótica blanda.

2.5.1.1 Ley de Hooke

La ley de Hooke establece que el alargamiento de un muelle es directamente proporcional al módulo de la fuerza que se le aplique (Ver Figura2-4), siempre y cuando no se deforme permanentemente dicho muelle. Esta se expresa de la siguiente forma:

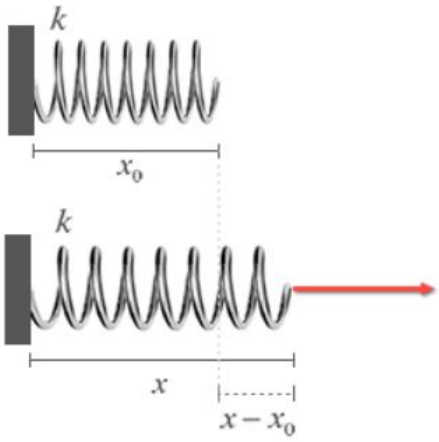


Figura 2-4 Ley de Hooke aplicado a un resorte.

$$F = -k * (x - x_o) \tag{2.2}$$

- F es el módulo de la fuerza que se aplica sobre el muelle. [N]
- k es la constante elástica del muelle, que relaciona fuerza y alargamiento[N*m]. Cuanto mayor es su valor, más trabajo costará estirar el muelle. Depende del muelle, de tal forma que cada uno tendrá la suya propia. Aunque no se estableció explícitamente la dirección de la fuerza, habitualmente se le pone un signo negativo, Esto es para indicar la *fuerza de restauración* debida al resorte en dirección opuesta a la fuerza que causó el desplazamiento.
- x_0 es la longitud del muelle sin aplicar la fuerza. [m]
- x es la longitud del muelle con la fuerza aplicada. [m]

2.5.1.2 Módulo de Young

Los materiales tienen comportamientos diferentes ya que sus propiedades mecánicas son diferentes, dando a cada uno de ellos características principales para la elaboración de herramientas, soportes, piezas, etc. Estas características son medibles, tan resistente puede ser un material y a donde puede llegar a fallar (fracturar), a través de una gráfica de esfuerzo y deformación (Ver Figura 2-5), la cual indica la capacidad que tiene un material al someterlo a un esfuerzo y este volver a su estado original (elástico), cambiar su estructura y forma (plástico) o en su defecto la falla (fractura).

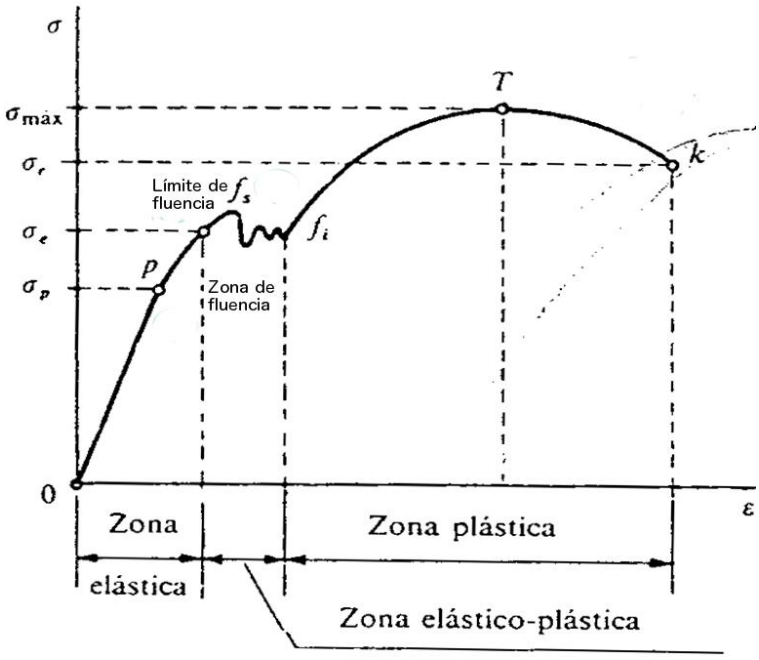


Figura 2-5 Grafica esfuerzo deformación

Existe otro elemento que es la fluencia que sirve para conocer el punto que la deformación que es irrecuperable del material.

Para trazar la gráfica esfuerzo deformación, se hace una prueba de tracción del material sometido a una carga determinada, anotando los puntos en los que el material pierde su forma original hasta tomar dimensiones completamente distintas. Para la zona donde el material aún conserva su forma (elástica) alguna de ellas presenta linealidad como se muestra en la Figura 2-6, esto quiere decir que la relación entre la tensión y la deformación forman una línea.

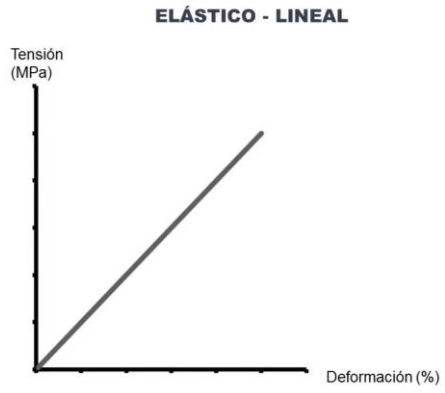


Figura 2-6 Grafica del módulo elástico lineal

Sin embargo, no todos los materiales son lineales, por lo general estas curvas pertenecen a estructuras como músculos, tejidos, tendones, gomas, ligas, etc. Ver Figura 2-7

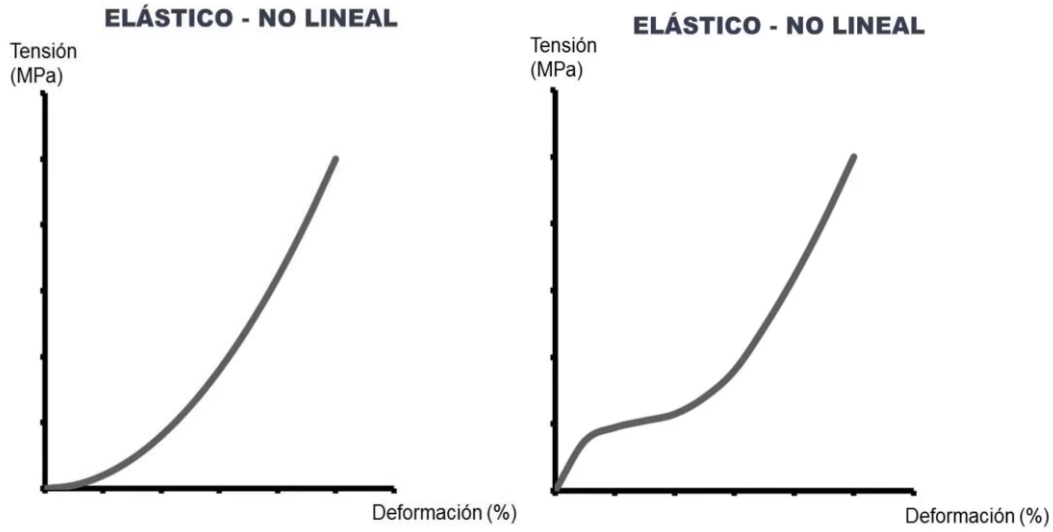


Figura 2-7 Gráficas del módulo elástico no lineales

El módulo de Young o modulo elástico longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en que se aplica una fuerza. El módulo de Young es un número que mide la resistencia de un material a ser deformado elásticamente. Se nombró en honor al físico del siglo XVII, Thomas Young. Mientras más rígido es un material, más grande es su módulo de Young.

$$E = \frac{Esfuerzo}{Deformacion\ Unitaria} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2.3}$$

$$E = \frac{P/A}{\delta/l}$$

$$E = \frac{Pl}{A\delta} \tag{2.4}$$

E= Módulo de elasticidad de un material. [Kg/m^2]

P= Fuerza aplicada. [Kg]

$\boldsymbol{\sigma}$=esfuerzo del miembro. [Kg/m^2]

A= área de la sección trasversal del miembro. [m^2]

l= longitud del miembro. [m]

δ= Deformación total. [m]

ε=Deformación Unitaria. [m/m]

2.5.1.3 Potencia

La potencia se define como la cantidad de trabajo efectuado sobre una unidad de tiempo.

$$P = \frac{W}{t} \tag{2.5}$$

P= Potencia desarrollada por la fuerza que realiza el trabajo. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el Vatio (W).

t: Tiempo durante el cual se desarrolla el trabajo. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el segundo (s).

W: Trabajo. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el Joules (J).

2.5.1.4 Trabajo

Se puede definir al trabajo como el producto de una fuerza aplicada en una dirección en un desplazamiento dado.

El Joule es la unidad del sistema internacional para energía, trabajo y calor, viene siendo la fuerza desplazada a una distancia y se expresa como

$$W = F * d \text{ (joule)} \tag{2.6}$$

F = fuerza. [N]

d= distancia. [m]

2.5.1.5 Energía cinética

Es la energía que posee un cuerpo a causa de un movimiento.

$$E_c = \frac{1}{2} m\, V^2 \tag{2.7}$$

m= masa. [Kg]

V= velocidad. $[\frac{m}{s}]$

2.5.1.6 Energía potencial

La energía potencial es la energía que se relaciona con la posición relativa de los objetos, los objetos pueden tener la capacidad de realizar trabajo como consecuencia de su posición en un campo gravitacional.

$$E_P = mgh \tag{2.8}$$

m = masa. [Kg]

g= gravedad. [$\frac{m}{s^2}$]

h= altura. [m]

2.5.1.7 Energía potencial elástica

Se le llama así a la energía ganada por un sistema de (masa – resorte) al deformar un resorte (estirándolo o comprimiéndolo), La energía queda almacenada hasta que se quita la fuerza y el objeto elástico regresa a su forma original, haciendo un trabajo en el proceso. La deformación puede implicar comprimir, estirar o retorcer el objeto.

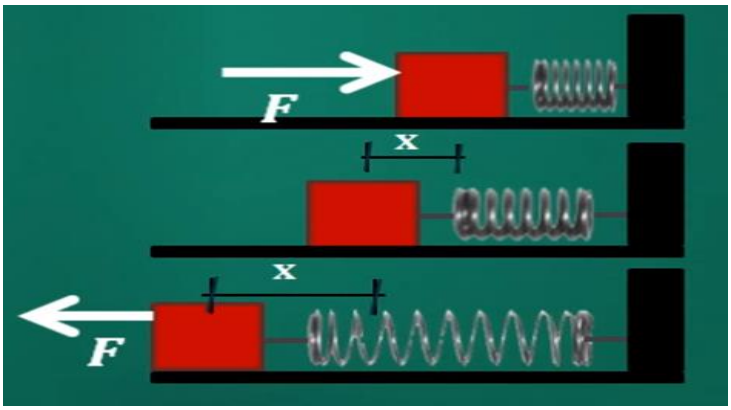


Figura 2-8 Ley de Hooke aplicado a un resorte

Se parte de la ley de Hooke se tiene que la ecuación (2.1)

Se puede sacar una gráfica del comportamiento de la fuerza con respecto al desplazamiento del resorte.

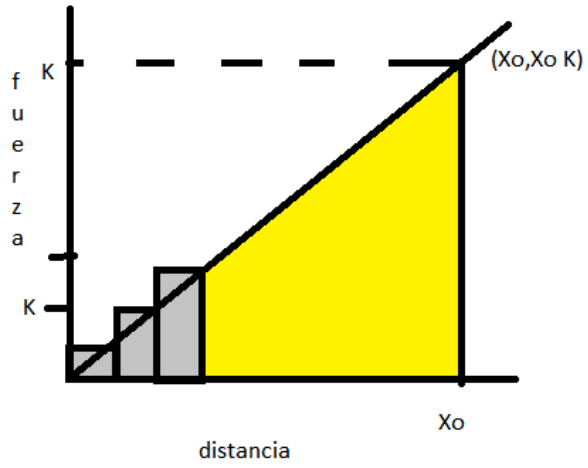


Figura 2-9 Grafica del área de la energía potencial elástica

Observa en la gráfica (Figura 2-9), que el comportamiento lineal de un resorte con respecto a la fuerza y el desplazamiento es proporcional, se deduce que para la sacar la energía del mismo se utiliza la ecuación de trabajo (que en la gráfica están manifestadas como los rectángulos grises), tomando el valor por cada cacho de la distancia y fuerza de aplicada al resorte. A este resultado se define como U.

Se utiliza la ecuación (2.6)

De esta manera se integra la gráfica de la siguiente manera

$$U = \int kx\, dx \tag{2.9}$$

Obtenido la siguiente ecuación

$$U = \frac{kx^2}{2} \tag{2.10}$$

$$U = \frac{1}{2}kx^2 \tag{2.11}$$

Otra manera para deducir la ecuación es tomar la Figura 2-11 que es la gráfica resultante, esta forma un triángulo por que se utiliza la ecuación del área del triángulo.

$$A = \frac{b\,h}{2} \tag{2.12}$$

Se considera la coordenada de los puntos finales de la Figura 2-9 se obtiene que

$$U = \frac{1}{2} x_0 * x_0 k \tag{2.13}$$

Obteniendo la ecuación (2.11).

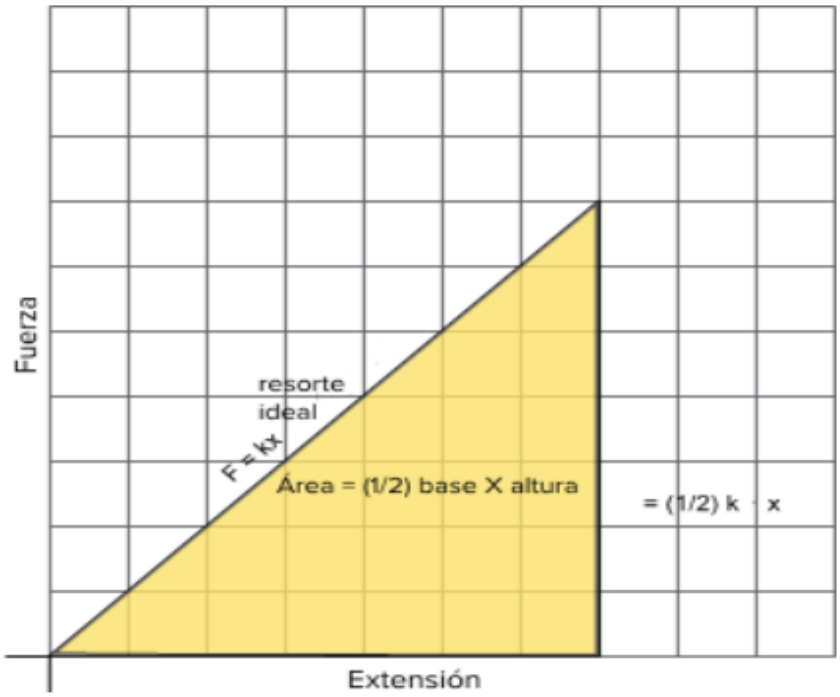


Figura 2-10 Grafica relación fuerza y alargamiento

2.5.1.8 Conservación de la energía en resortes

Cuando se tiene un resorte unido a una masa M en posición vertical y horizontal se utilizan la relación de igualdad de la energía potencial elástica y la energía cinética, esto debido a las energías adquiridas por el resorte al momento de mover la masa en las direcciones contrarias a la dirección del resorte, generando la potencia elástica y cinética. Ver Figura 2-11.

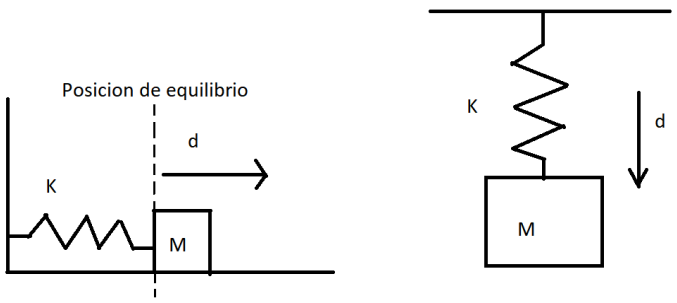


Figura 2-11 Esquema de Masa - resorte horizontal y vertical

$$U = E_C \tag{2.14}$$

$$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}m\,V^2 \tag{2.15}$$

En ambas relaciones se omite la energía potencial gravitatoria, esto debido a que en el caso del resorte en vertical cuando se le agrega una masa pierde el valor de la energía potencial gravitatoria, comportándose igual a un resorte en horizontal. Se va a describir por que la potencia gravitatoria se omite en la conservación de la energía de un resorte en suspensión.

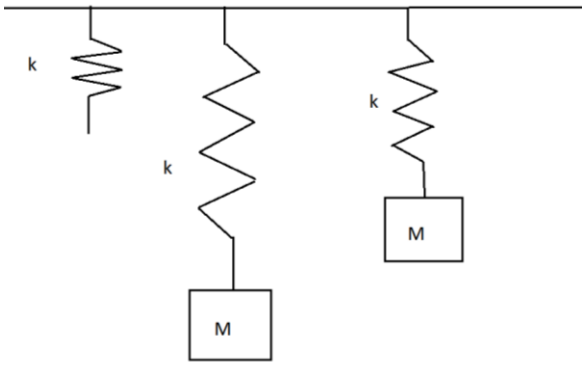


Figura 2-12 Esquema de masa - resorte (sin masa, masa agregada, masa equilibrada)

Como se observa en la Figura 2-12 se tiene un resorte sin peso y posteriormente agregándole un peso el cual será su elongación máxima hasta llegar al punto de equilibrio del peso ya agregado. En la Figura 2-13 se observa mejor esta relación.

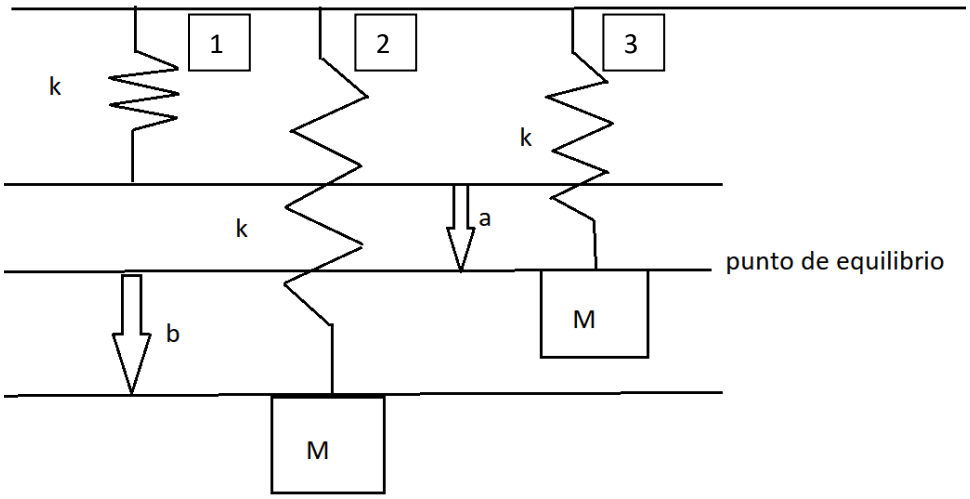


Figura 2-13 Esquema de masa - resorte (sin masa, masa agregada, masa equilibrada)

En esta ocasión la posición de equilibrio está posicionada una longitud “a” alejada del punto de equilibrio natural del resorte, ya que está equilibrando la fuerza de gravedad con la masa.

$$kX - mg = 0 \tag{2.16}$$

Esto es para que la masa con el resorte pueda quedar en equilibrio siendo “kX” la distancia del resorte hacia arriba, X siendo la distancia que se ha estirado el resorte queda que

$$X = \frac{mg}{k} = a \tag{2.17}$$

Si se toma la masa y se jala como se muestra en el resorte 2 (Figura 2-13) las fuerzas no estarán en equilibrio, la fuerza del resorte será mayor que la fuerza de gravedad soltando la masa el resorte volverá a la posición del resorte 3 con cierta velocidad. Para conocer los parámetros, como la velocidad en la que regresa a su posición de equilibrio una vez suelta la masa se puede utilizar la conservación de la energía.

$$E_i = E_f \tag{2.18}$$

Energía inicial = Ei

Energía final = Ef

Con la cual se puede decir que la posición inicial de la energía es el recorrido “a” y “b” del resorte y la final la distancia “a” como se muestra en la Figura 2-14, que es donde se quiere conocer la velocidad de esa masa en ese desplazamiento.

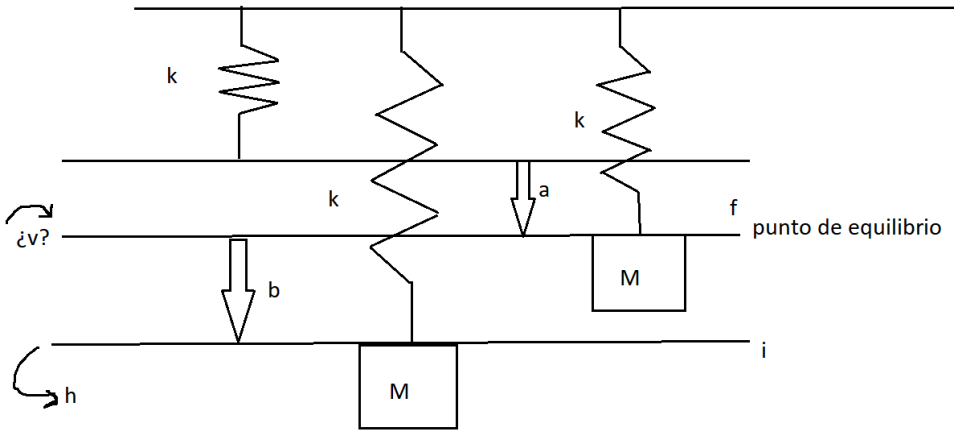


Figura 2-14 Esquema de masa - resorte (sin masa, masa agregada, masa equilibrada)

La posición inicial no tiene movimiento porque es el punto donde vamos a partir para el análisis, entonces la energía cinética en este punto es nula por lo que se tendrá solamente la energía potencial elástica del resorte.

$$E_i = \frac{1}{2} k\,(a+b)^2 \tag{2.19}$$

Para la energía gravitacional del sistema se puede elegir un punto de referencia y para conveniencia del análisis escogemos el punto inicial el cual será **h=0,** el cual todas las alturas se medirán a partir de h y esto se puede hacer ya que sólo estamos interesados en medir las diferencias de la energía potencial gravitacional. Entonces siendo **h=0** en la posición inicial de nuestro análisis s puede decir que la energía potencial gravitacional es igual a 0:

$$M * g * h = 0 \tag{2.20}$$

Para la energía final del sistema, la energía potencial elástica aún se encuentra en el resorte a pesar de encontrarse en el punto de equilibrio, ya que ese punto de equilibrio se encuentra desplazada por la longitud natural del resorte a una distancia “a”, también se observa en la Figura 2-14, que pasando de la posición inicial a la final se encuentra una velocidad de desplazamiento por lo que existe energía cinética. Además, también se obtiene la energía potencial gravitacional ya que la distancia que recorrió la masa es “b” para llegar al punto final (punto de equilibrio) por lo que en este caso **h=b.** Entonces la expresión:

$$E_i = E_f \tag{2.21}$$

Se simplifica la ecuación,

$$\frac{1}{2}k\,(a+b)^2 = \frac{1}{2}k\,(a)^2 + \frac{1}{2}M\,V^2 + MGb \tag{2.22}$$

Se desarrolla el binomio

$$\frac{1}{2}k\,(a^2 + 2ab + b^2) = \frac{1}{2}k\,(a)^2 + \frac{1}{2}M\,V^2 + MGb \tag{2.23}$$

$$\frac{1}{2}k\,a^2 + \frac{1}{2}k\,2ab + \frac{1}{2}k\,b^2 = \frac{1}{2}k\,(a)^2 + \frac{1}{2}M\,V^2 + Mgb \tag{2.24}$$

Se eliminarán los términos semejantes

$$k\,ab + \frac{1}{2}k\,b^2 = \frac{1}{2}M\,V^2 + Mgb \tag{2.25}$$

Recordando la ecuación (2.17), la cual representa la posición de equilibrio.

Se despeja “ka” de la ecuación se obtiene que

$$ka = Mg \tag{2.26}$$

Se sustituye “ka” en la ecuación (2.19).

$$Mgb + \frac{1}{2}k\,b^2 = \frac{1}{2}M\,V^2 + Mgb \tag{2.27}$$

Se eliminarán “M g b” por ser términos semejantes por lo que tenemos.

$$\frac{1}{2}k\,b^2 = \frac{1}{2}M\,V^2 \tag{2.28}$$

se obtiene la ecuación (2.14)

Como se observa se tiene la ecuación (2.14) del principio, gracias a la deducción, esto se traduce como la gravedad es sólo el desplazamiento de la posición de equilibrio.

2.5.1.9 Índice de muelles helicoidales

El índice de muelles helicoidales es una característica importante de los músculos artificiales de nylon enrollados, ya que permite saber por medio del valor obtenido de este la capacidad de carga y rigidez del material. Estos valores al ser menores representan mayor rigidez en el músculo de nylon mientras que un número sea mayor este significará que su elasticidad aumentará. (Haines, Lima et al. 2014)

$$C = \frac{D}{d} \tag{2.29}$$

C= Índice del resorte [m/m]

D= El diámetro del promedio de la bobina [m]

d= El diámetro promedio del filamento [m]

Tabla 2-3 Tabla de resultados de los parámetros del músculo de nylon

Músculo Artificial de Nylon	
Ley de Hooke	$197.8 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$
Módulo de Young	$173.55 \ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}$
Potencia	0.0049465 w
Energía cinética	0.009893 [N ∗ m]
Energía potencial	No hay energía potencial se sustituye por la energía potencial elástica
Energía potencial elástica	0.00989 [N ∗ m]
Índice de muelles helicoidales	3

No obstante, en la aplicación de este músculo se observa que aún no podía ser actuado debido a que el control de estos varía de acuerdo con la temperatura para el accionamiento del músculo. Además, la fuerza requerida para mover una articulación del manipulador no fue suficiente, por lo que se descartó este actuador para su implementación en el prototipo del manipulador.

2.6 Caso 3. Diseño conceptual de actuador lineal con cuerdas

Los actuadores lineales con cuerda se presentan como un nuevo diseño de actuadores lineales capaces de generar movimientos potentes gracias a su estructura basada en poleas y un husillo inspirado en el principio de molino diferencial o chino. Ver Figura 2-15.

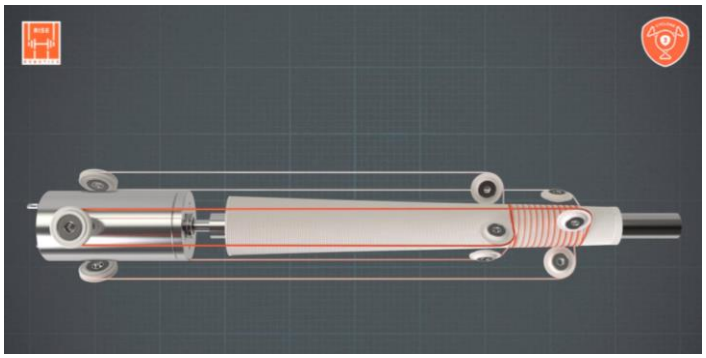


Figura 2-15 Actuador cyclone muscle de Rise Robotics

Estos actuadores de la Empresa *Rise robotics* presumen de poseer una cualidad de trabajar a las mismas condiciones de actuadores lineales industriales, aprovechando mayor la capacidad del poder del motor siendo este constante y sin mayor pérdida de energía que puede trabajar de manera eficiente y fluida. Como se muestra en la Figura 2-15. A partir de este diseño, se estudió el actuador lineal de cuerdas que se presenta en este trabajo de tesis, tomando partes importantes del actuador de la empresa *Rise Robotics* para generar un actuador que pueda cumplir con las mismas características de un actuador convencional y demostrando la efectividad del mismo. Se optó por el eje cilíndrico sin ningún tipo de ángulo de inclinación como el que se muestra en la siguiente Figura (1.34).

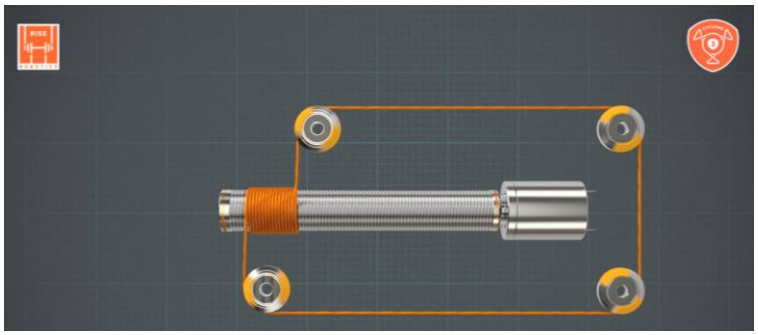


Figura 1-34 Husillo cilíndrico

2.6.1 Teoría antecedente actuador lineal con cuerdas.

Para el estudio de estos actuadores se toman en cuenta los parámetros de velocidad angular, torque, fuerza.

2.6.1.1 Tensión

Para los actuadores de cuerda se denomina tensión, a la acción de fuerzas que se encuentran opuestas, al que un cuerpo se encuentra sometido.

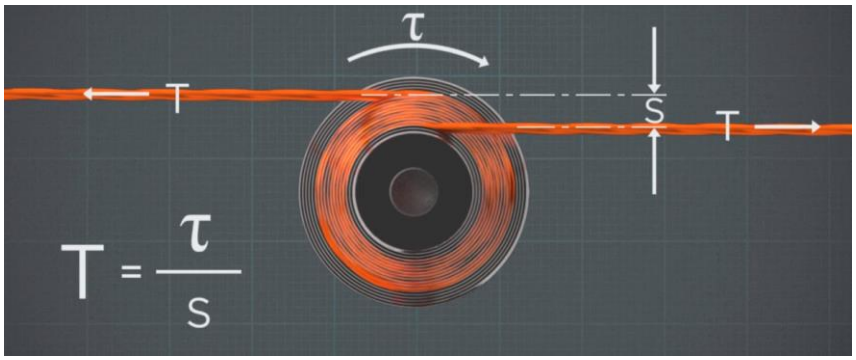


Figura 2-16 Esquema de tensión de la cuerda para los actuadores *Rise Robotics*

$$T = \frac{\tau}{s} \tag{2.30}$$

$$\tau = T * S \tag{2.31}$$

T= tensión [N]

τ = Torque [N*m]

s= desplazamiento [m], en el caso del husillo no tiene un ángulo por lo que s es contante.

2.6.1.2 Torque

El momento de un par es el producto de la magnitud de una de las fuerzas y la distancia perpendicular entre las líneas de acción de las mismas {, 1992 #28}. Este también es conocido como momento o par. Este también es conocido como momento o par. Ver Figura 2-17.

$$\tau = F * R \tag{2.32}$$

F= Fuerza [N]

R= La distancia al centro de giro [m]

Al poseer dirección y sentido las dos variables se multiplicarán por un producto cruz.

$$\tau = F \, x \, R$$

El producto cruz de las dos variables da un escalar.

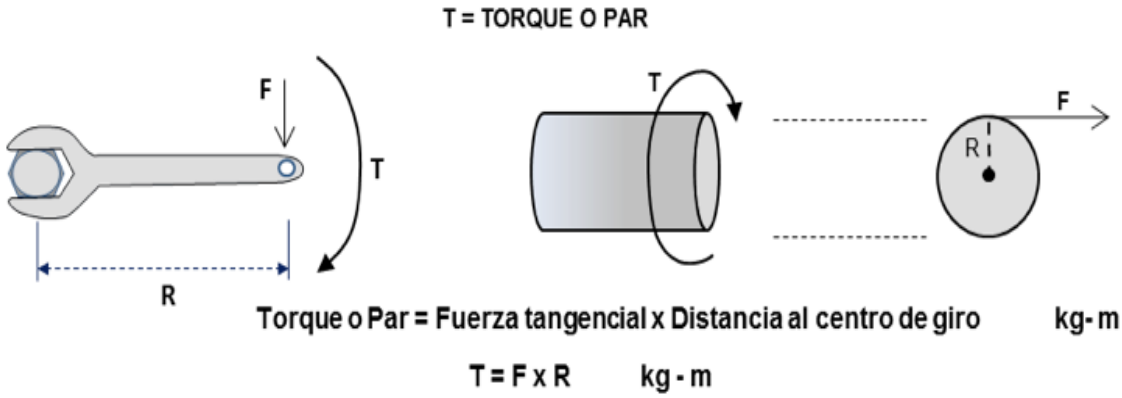


Figura 2-17 Esquema de torque

2.6.1.3 Velocidad

Es la razón entre el desplazamiento de un cuerpo y el intervalo de tiempo en que sucedió dicho desplazamiento.

$$v = \frac{d}{t} \tag{2.33}$$

v = velocidad $[\frac{m}{s}]$

d= desplazamiento [m]

t= tiempo [s]

2.6.1.4 Velocidad angular

En un movimiento circular la velocidad angular es la magnitud en la cual se caracteriza la rapidez con el que varía el ángulo de barrido por la línea que une la partícula que gira con el centro de rotación, en la Figura 2-18 se aprecia el movimiento de un cuerpo en una trayectoria circular.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \ [\frac{rad}{t}] \tag{2.34}$$

Se considera también como

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \ [\frac{rad}{t}] \tag{2.35}$$

La cual es la diferencial del ángulo con respecto al tiempo

θ= Desplazamiento angular [rad]

t= tiempo [s]

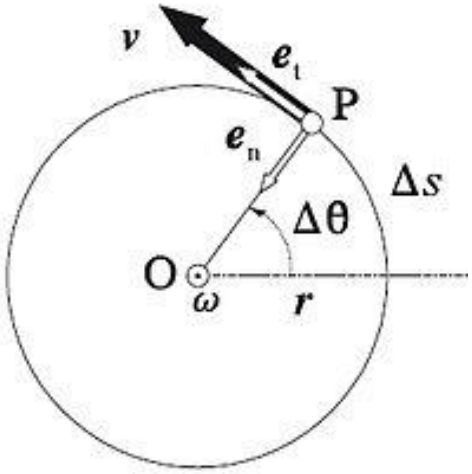


Figura 2-18 Velocidad angular

La velocidad angular y la rapidez suelen ser confundidas, pero son diferentes y a la vez están relacionadas muy estrechamente siendo que la rapidez es la distancia recorrida por el objeto y el desplazamiento por tiempo es la velocidad.

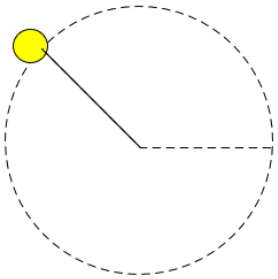


Figura 2-19 Trayectoria circular de un objeto

Para encontrar la relación de estos dos parámetros se traza una trayectoria circular de un objeto rotando sobre un centro como se muestra en la Figura 2-19. El ángulo de la trayectoria que recorrió dicho objeto es el desplazamiento angular y se denomina como ΔΘ. ver Figura 2-20

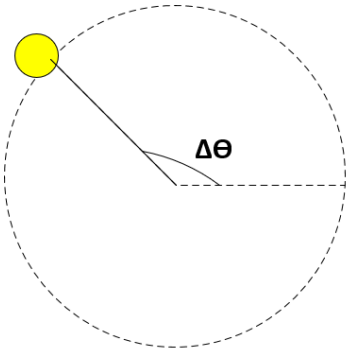


Figura 2-20 Angulo de la trayectoria

La cantidad útil para conocer este desplazamiento de forma certera es la longitud de arco la cual esta denominada con la letra S. Para encontrarla se necesita R que es el radio de la trayectoria del círculo. Estas medidas serán calculadas en radianes, ya que se define como el ángulo en el que se viaja la distancia del arco de tal manera que sea igual al radio del círculo.

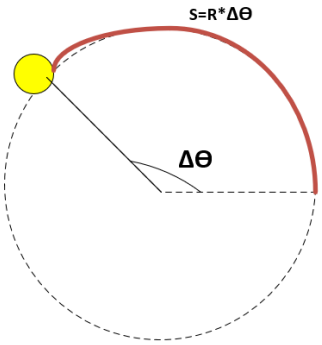


Figura 2-21 desplazamiento circular

$$\mathbf{S = R * \Delta\theta} \tag{2.36}$$

La velocidad angular se define como el desplazamiento angular o ángulo de giro por una unidad de tiempo, y entre mayor sea la velocidad angular mayor será la rapidez del objeto que está rotando sobre un círculo. Para encontrar la relación entre la velocidad angular y la rapidez se debe multiplicar el Radio "R" la cual las unidades pueden variar dependiendo del objeto (metros, centímetros milímetros y etc.) con el fin obtener $\left(\frac{m}{t}\right)$ que son las unidades de la rapidez, en lugar de $\left(\frac{rad}{t}\right)$ que es la velocidad angular. Ver Figura 2-21.

$$(\mathrm{R})\omega = \frac{(R)\Delta\theta}{\Delta t} \tag{2.37}$$

Al multiplicar el radio por el ángulo de giro que es delta theta se obtiene la longitud de arco, se expresa de la siguiente manera.

$$\mathrm{R}\ \omega = \frac{S}{\Delta t}\ [\frac{m}{t}] \tag{2.38}$$

la rapidez es igual a

$$v = \frac{S}{\Delta t}\ [\frac{m}{t}] \tag{2.39}$$

O también

$$v = \mathrm{R}\ \omega\ [\frac{m}{t}] \tag{2.40}$$

Esta ecuación (2.37) indica cuantos metros por segundo ha trazado la trayectoria de un objeto.

Se toma la ecuación (2.37) y despejando v se obtiene la velocidad angular :

$$\omega = \frac{v}{R} \tag{2.41}$$

2.6.1.5 Sistemas de poleas

Las poleas son elementos mecánicos simples su función es transmitir una fuerza menor de carga a un objeto sostenido a un extremo del mismo.

Existen tres tipos de sistemas de poleas

a) Polea fija

Una polea está sujeta a una base fija, su función es la de cambiar la dirección de fuerza y con ella no se gana fuerza, sin embargo, ayuda a redirigir la fuerza utilizando contrapesos o el mismo peso de una persona para cargar un objeto sostenido del otro extremo de la polea. (ver Figura 2-22).

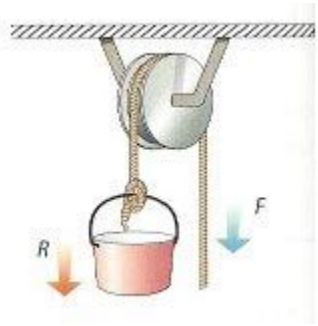


Figura 2-22 Relación de R y F en polea

b) Polea móvil

Están compuestas comúnmente de dos poleas, una de estas está en una base fija mientras que la otra es móvil, la ventaja que se adquiere de estos sistemas de poleas es que el esfuerzo que se efectúa para elevar la carga será la mitad del que haría si se emplease una polea fija.

c) Sistemas de poleas compuestas (Polipasto)

En estos sistemas existen un mayor número de poleas con el fin de obtener una ventaja mecánica elevando grandes pesos con un bajo esfuerzo. Estos tipos de sistemas son diversos, sin embargo, poseen una característica en común la cual es integrar sistemas fijos y móviles para facilitar el esfuerzo para cargar un peso.

2.6.1.6 Motores C.C. (corriente continua)

Los motores de corriente directa son dispositivos que están compuestos de un rotor, electroimanes, colector, escobillas, etc. La Figura 2-23 muestra un esquema de cómo se compone un motor de corriente continua.

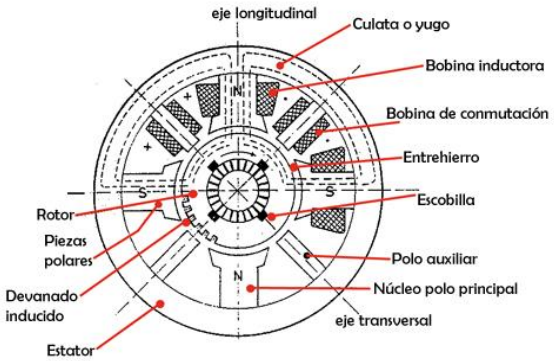


Figura 2-23 Esquema de un motor DC

El funcionamiento de estos dispositivos consiste en que el estator suministra un campo magnético constante y la armadura siendo la parte rotatoria del motor es una bobina, esta estará conectada a una fuente de energía continua a través de un par de anillos de conmutación, cuando la corriente fluye a través de la bobina una fuerza electromagnética es

inducida a través de esta, la fuerza que adquiere este fenómeno se le denomina Fuerza Lorentz.

2.6.1.6.1 Fuerza Lorentz

La Fuerza Lorentz o la Ley Lorentz es un fenómeno que ocurre al someter una carga en una dirección perpendicular a la dirección de un campo magnético, haciendo que las partículas cargadas tomen una dirección normal a la dirección de la corriente y el campo magnético. Ver Figura 2-24.

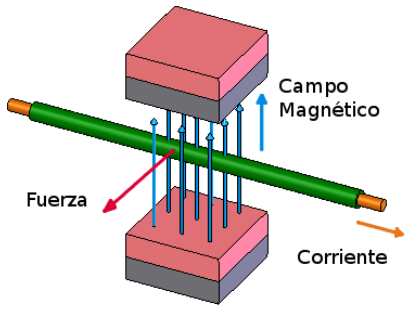


Figura 2-24 Trayectoria de la fuerza Lorentz a través de una corriente sobre un imán

La trayectoria que describe el fenómeno o Fuerza Lorentz es similar a una trayectoria helicoidal, existen dos componentes que describen la trayectoria de las partículas cargadas, la componente tangencial será paralela al campo magnético mientras que la componente normal será perpendicular al mismo. La componente normal de la velocidad de la particular proyecta un círculo mientras que la componente tangencial desplazara el circulo trazado por la normal en la dirección y sentido del campo magnético, estas trayectorias son trazadas en los planos paralelos A X o Z que a su vez están desplazadas por la dirección del campo magnético a una velocidad constante. Ver Figura 2-25.

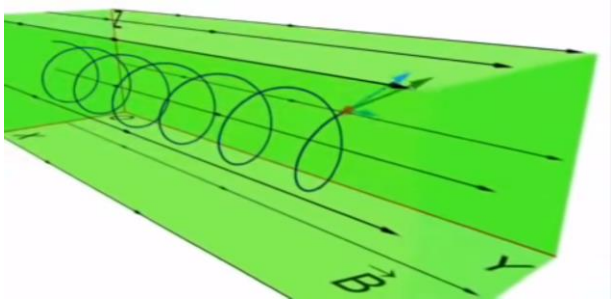


Figura 2-25 Trayectoria helicoidal de la fuerza Lorentz

Los motores de corriente continua son muy utilizados debido a su potencia y flexibilidad en los mecanismos o dispositivos mecánicos que requieran una torsión considerable, se utilizan en muchos equipos como son en ventiladores, licuadoras, arrancadores eléctricos y etc.

2.6.1.7 Encoder

El encoder o también conocido como codificador o generador de pulsos es un dispositivo electromecánico que permite codificar el movimiento mecánico en distintos tipos de impulsos eléctricos: digitales binarias, analógicos en función de una onda y etc. El encoder es el encargado de crear una interfaz capaz de comunicar un dispositivo mecánico a un controlador.

Existen dos tipos de funcionamiento para encoders

a) Los lineales
   Estos tipos de encoders se componen de un módulo fijo y uno móvil, la parte móvil contiene al sensor y a la electrónica para detectar y medir el movimiento, el cual se convierte en impulsos eléctricos inteligibles.

Figura 2-26 Encoder lineal

b) Los rotatorios
   Estos dispositivos cuentan con un disco el cual está encargado de la lectura del movimiento mecánico rotatorio, la cara del disco contiene la codificación que permite discernir la posición angular los cuales pueden ser incrementales o absolutos. En esta categoría de encoders pertenecen a cuatro tipos: los incrementales, absolutos, ópticos y magnéticos.

   1) Encoders incrementales
      Para este tipo de encoders se requieren al menos dos pares de emisor/receptor, los cuales deberán estar desfasados un cierto número de ranuras más un cuarto de ranura; así cuando el eje comienza a girar en sentido horario, la señal generada por el primer par receptor/emisor estará adelantada un cuarto con respecto a la señal del segundo par receptor/emisor; por el contrario cuando el eje gira en sentido anti horario, la señal del segundo par receptor/emisor estará adelantada con respecto a la primera tres cuartos. (Ramírez, Jiménez et al. 2014). Ver Figura 2-27.

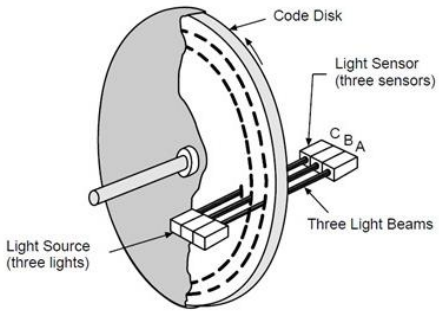


Figura 2-27 Esquema de encoder incremental

2) Encoders absolutos

Los encoders absolutos cuentan con un disco que tiene varias bandas dispuestas de forma concéntrica, codificadas en código Gray; en este caso, a cada banda le corresponde un par receptor/emisor. De acuerdo con la posición que tenga el disco en ese instante, los pares receptores/emisor estarán frente a un sector opaco o transparente, lo que dará un código a la salida; así la forma que tenga este código determinará la posición del disco. (Ramírez, Jiménez et al. 2014). Ver Figura 2-28.

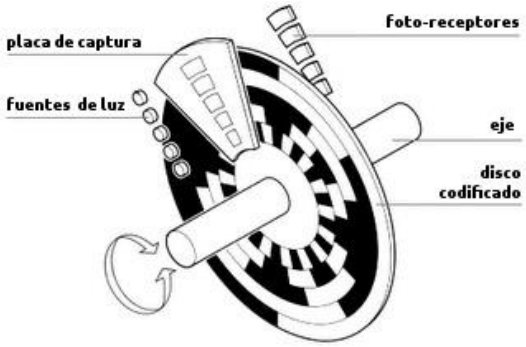


Figura 2-28 Esquema de Encoder Absoluto

En la actualidad los encoders son en su gran mayoría ópticos o magnéticos, ya que los encoders mecánicos se consideran obsoletos debido a que son muy susceptibles a fallas por desalineación mecánica, además de tener un tiempo de vida corto comparado con los encoders ópticos o magnéticos.

3) Encoders ópticos

Los encoders ópticos se componen de un par de dispositivos optoelectrónicos, uno de los cuales constituye el emisor o fuente de luz y el otro es el receptor; de manera simple se utilizan un par de fotodiodos y fototransistor. Entre el fotodiodo y el fototransistor del encoder se coloca un disco ranurado, acoplado mecánicamente al eje, compuesto por n ranuras trasparentes. De esta manera, cuando el disco gira a través del par emisor/receptor se produce una

señal alternante entre el receptor y el emisor, la frecuencia registrada por esta señal determina la velocidad del eje; así a mayor frecuencia de la señal de salida, mayor la velocidad del eje. (Ramírez, Jiménez et al. 2014). Ver Figura 2-29.

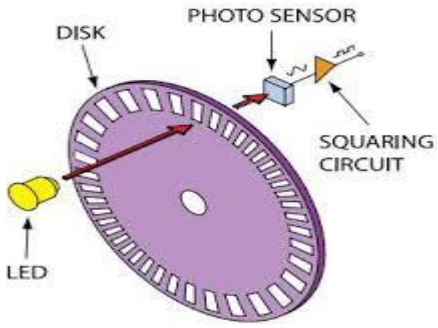


Figura 2-29 Esquema de Encoder óptico

4) Encoders magnéticos

   El funcionamiento de los encoders magnéticos se basa en utilizar un disco magnético de 6 polos colocado en el eje del motor, junto a ello dos sensores de efecto hall. A medida que el motor gira, el disco gira más allá de los sensores. Cada vez que un polo magnético pasa por un sensor el codificador emite un pulso digital, también llamado "tic". Ver Figura 2-30.

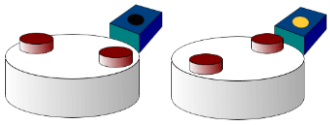


Figura 2-30 esquema de Encoder magnético

Para conocer el funcionamiento del encoder magnético, se explica el efecto Hall.

2.6.1.7.1 Efecto Hall

El principio de funcionamiento del efecto Hall consiste en un material conductor el cual se le aplica un voltaje en el extremo del mismo, de manera que la corriente empezará a fluir en el material, este se coloca un imán provocando una fuerza Lorentz en la corriente del material desviando las cargas positivas y negativas en distintas direcciones, esto es conocido como el efecto Hall. Ver Figura 2-31.

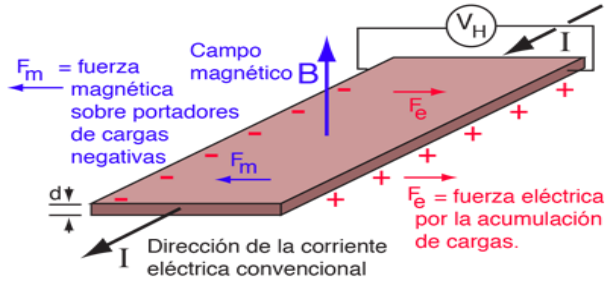


Figura 2-31 Esquema de funcionamiento efecto Hall

2.6.1.8 Diseño CAD del prototipo del actuador lineal

Se realizó un diseño previo del actuador lineal con cuerdas en un CAD asistido por el programa SolidWorks, este diseño pretende ser un prototipo del actuador lineal de cuerdas el cual servirá para la realización de la investigación de los actuadores de cuerda y su desempeño en la implementación de un robot manipulador serial.

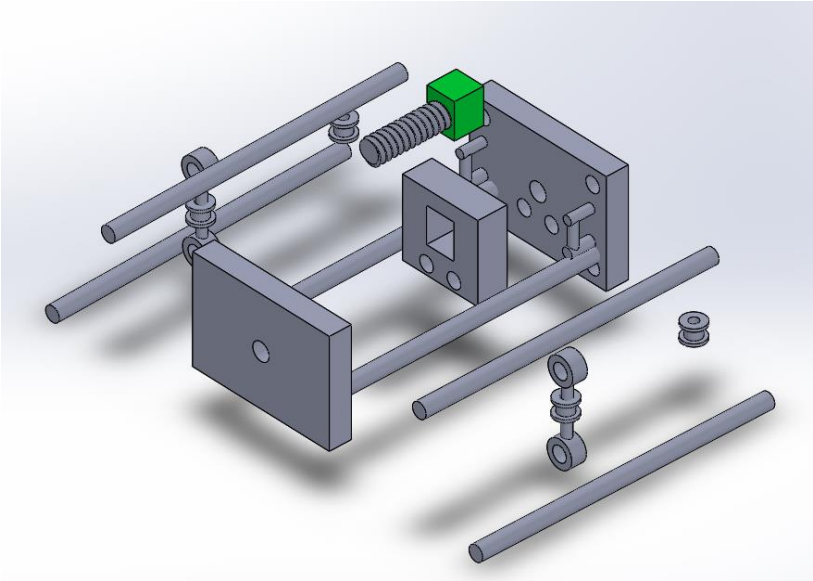


Figura 2-32 Prototipo piloto de actuador por cuerdas

La Figura 2-32 se observa el actuador lineal, lo componen un husillo, este permitirá el movimiento lineal del motor apoyado sobre el eje con el diámetro de paso dándole un movimiento lineal constante, también se observa un sistema con poleas para la transmisión del movimiento a través de una cuerda la cual permitirá un menor esfuerzo por parte del motor para moverse sobre el eje y aminorar la carga de transmisión de la cuerda. Este diseño pretende ser sencillo para comprender el principio de funcionamiento de la cuerda de transmisión del movimiento lineal y la fuerza de transmisión como un actuador lineal.

La siguientes Figuras muestran los elementos que componen el prototipo piloto del actuador por cuerdas.

Los elementos que se utilizaron para la fabricación del actuador por cuerdas son los siguientes:

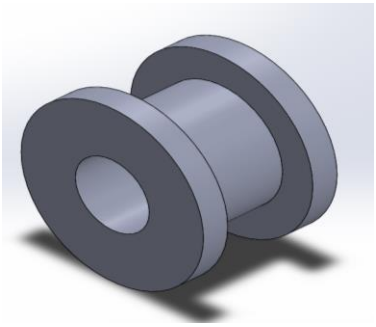


Figura 2-33 Poleas

En la Figura 2-32 Se utilizaron cuatro poleas para el sistema de cuerda para el actuador lineal, estarán encargadas de la transmisión del movimiento por cuerda. Ver Figura 2-33.

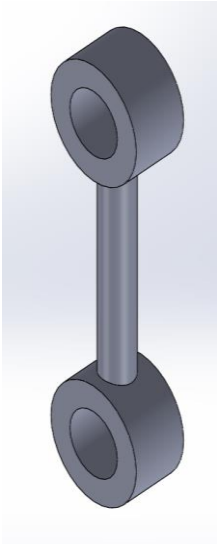


Figura 2-34 Seguros para poleas

Para el actuador de la Figura 2-32 se utilizan seguros los cuales sostendrán dos de las poleas, en la Figura 2-34 se puede apreciar el diseño inicial de estos seguros.

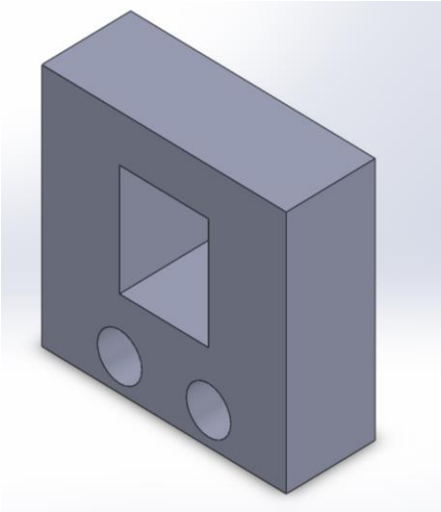


Figura 2-35 Soporte del motor

Uno de los elementos vistos en la Figura 2-32 es el soporte móvil el cual será el encargado del motor, este a su vez estará guiado de dos varillas las cuales le servirá como ejes lineales. Ver figura 2-35

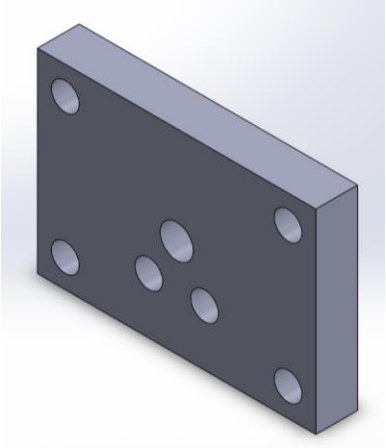


Figura 2-36 Base del actuador 1

La base 1 para el actuador contará con un orificio céntrico para la salida de husillo, dos abajo para las guías de los ejes del soporte del motor y cuatro en cada esquina para mantener el diseño asegurado y ensamblado. Ver Figura 2-36

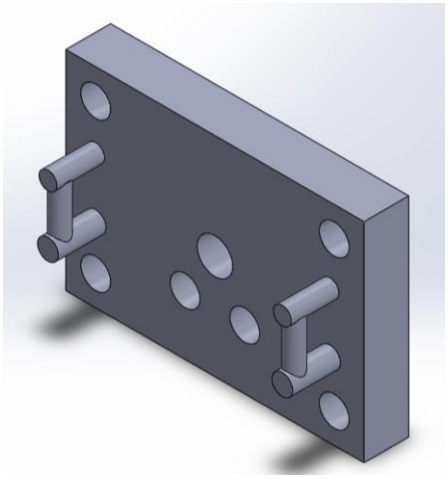


Figura 2-37 Base del actuador 2

La base 2 del actuador lineal tiene las mismas características de la base del actuador 1, cuenta con un orificio céntrico como la base 1 para cualquier tipo de cableado que requiera el motor y el codificador (encoder magnético) y sobresalen dos postes los cuales servirán para sostener las poleas. Ver Figura 2-37

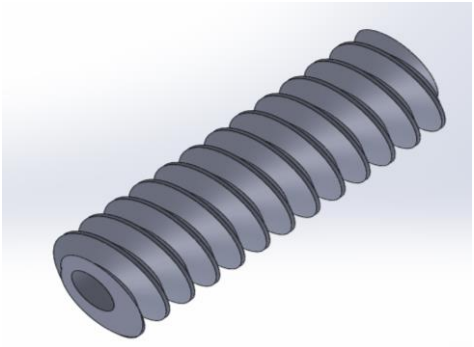


Figura 2-38 Husillo

Este elemento parecido a un tornillo (husillo) es el elemento de movimiento giratorio del actuador el cual inducirá un movimiento lineal, este elemento es importante ya que su configuración dependerá del movimiento que el actuador ejecute por medio de las cuerdas que pasen sobre él. Ver Figura 2-38. La Figura 2-39 se muestran las varillas de soporte y para el eje.

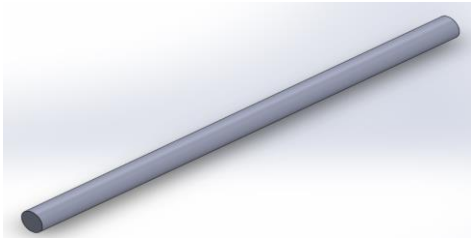


Figura 2-39 Varillas de soporte

Por último, se puede apreciar el ensamblado del actuador. Ver Figura 2-40, este diseño se fue modificando para los prototipos posteriores, por los que en el apéndice 3 se encontrara los planos de diseño.

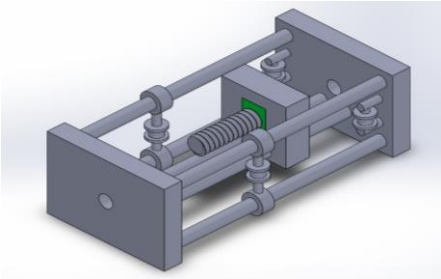


Figura 2-40 Modelo del Actuador en CAD

2.6.1.9 Cinemática directa e inversa de manipuladores

La cinemática de robots manipuladores estudia el movimiento del efector final respecto a un sistema de referencia inercial, sin considerar las fuerzas que la intervienen. Así la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares. (Barrientos 1997)

Para problemas de la cinemática se conocen dos métodos en los cuales pueden ser resueltos con diferentes condiciones.

2.6.1.9.1 Cinemática directa.

Consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de la articulación y los parámetros geométricos de los elementos de los robots.(Barrientos 1997)

2.6.1.9.2 Cinemática inversa

Resuelve la configuración que debe adoptar el robot en una posición y orientación del extremo conocida.(Barrientos 1997). Ver Figura 2-41.

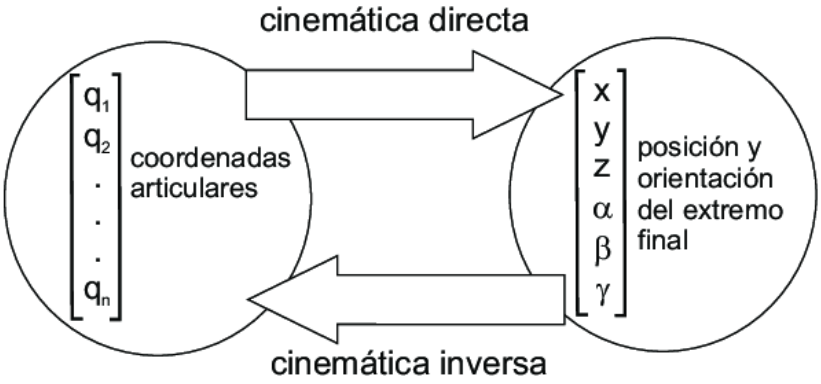


Figura 2-41 Relación de cinemática directa e Inversa

De los métodos que se utilizan para la determinación de la cinemática son diversos para cada una de las condiciones que se requiera resolver, por ejemplo, para la cinemática directa se utiliza el método Denavit Hartenberg y matrices homogéneas.

1. Denavit Hartenberg

D-H1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.

D-H2. Numerar los eslabones comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n.

D-H3. Localizar el eje de cada articulación. Si está rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

D-H4. Para i de 0 a n-1 situar el eje z1 sobre el eje de la articulación i+1.

D-H5. Situar el origen del sistema de la base en cualquier punto del eje z0. Los ejes x0 y y0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z0.

D-H6. Para i de 1 a n-1, situar el sistema (soldado al eslabón i) en la intersección del eje z1 con la línea normal común a zi-1 y zi. Si ambos ejes se cortasen se situaría en el punto de corte. Si Fuesen paralelos se situaría en la articulación i+1.

D-H7. Situar xi en la línea normal común a zi-1 y zi.

D-H8. Situar yi de modo que forme un sistema dextrógiro con xi y zi.

D-H9. Situar el sistema {Sn} en el extremo del robot de modo que zn coincida con la dirección de zn-1 y xn sea normal a zn-1 y zn.

D-H10. Obtener θi como el ángulo que hay que girar en torno a zi-1 para que xi-1y xi queden paralelos.

D-H11. Obtener di como la distancia, medida a lo largo de zi-1 que habría de desplazar {Si-1} para que xi y xi-1quedasen alineados.

D-H12. Obtener ai como la distancia medida a lo largo de xi (que ahora coincidirá con xi-1) que habría que desplazar al nuevo {Si-1} para que su origen coincidiese con {Si}.

D-H13. Obtener αi como el ángulo que habría que girar en torno a xi (que ahora coincidiría con xi-1), para que el nuevo {Si-1} coincida totalmente con {SI}

D-H14. Obtener las matrices de transformación i-1Ai.

D-H15. Obtener la matriz de transformación que relaciona al sistema de la base con el extremo del robot T= 0A1,1ª2...n-1An

D-H 16. La matriz define la orientación (sub matriz de rotación) y posición (sub matriz de traslación) del extremo referido a la base en función de la n coordenadas articulares.

Los cuatro parámetros de D-H ($\Theta_{i,\ di}$, $a_{i,\ \alpha i)}$ depende únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que la unen con el anterior y siguiente.

Θ_i Es el Angulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1}, utilizando la regla de la mano derecha. Se trata de un parámetro variable en articulaciones giratorias.

di Es la distancia a lo largo del eje Zi-1 desde el origen del sistema de coordenadas (i-1)-esimo hasta la intersección del eje Zi-1 con el eje Xi. Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.

ai Es a la distancia a lo largo del eje Xi que va desde la intersección del eje Zi-1 con el eje Xi hasta el origen del sistema i-esimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia corta entre los ejes Zi-1 y Zi.

αi Es el ángulo de separación del eje Zi-1 y el eje Zi, medido en un plano perpendicular al eje Xi, utilizando la regla de la mano derecha. Para robots paralelos se utilizan normalmente matrices de transformación homogéneas.
{Barrientos, 1997 #37}

2. Matrices de transformación homogéneas.

Los sistemas de referencia son normalmente definidos mediante ejes perpendiculares entre si con un origen definido. Estos se denominan como sistemas cartesianos. Ver Figura 2-42.

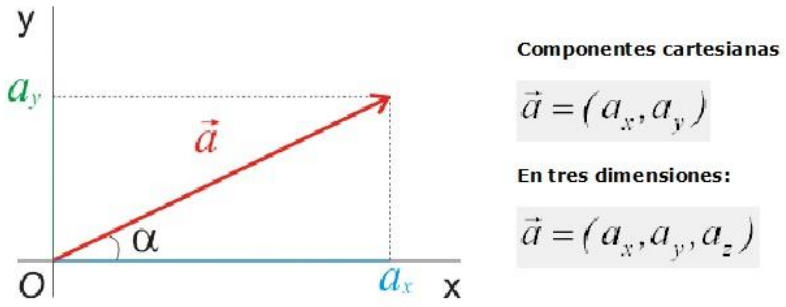


Figura 2-42 Componentes cartesianas

Las matrices de rotación permiten el uso del álgebra matricial, por lo que son el método más extendido para la descripción de orientaciones. Supóngase que en el plano se tienen dos sistemas de referencia OXY y OUV, ambos con un mismo origen O, siendo OXY el sistema de referencia fijo (inercial) y el sistema OUV el móvil solidario al objeto. Los vectores unitarios de los ejes coordenados del sistema OXY son ix, jy, y los del sistema OUV son iu, jv. {Boche Lucio, 2017 #39}

Un vector del plano se puede representar en ambos sistemas como:

$$P_{xy} = (p_x, p_y)^T = p_x * i_x + p_y * j_y \tag{2.42}$$

$$P_{uv} = (p_u, p_v)^T = p_u * i_u + p_v * j_v \tag{2.43}$$

La Figura 2-43 muestra la rotación del sistema visto en el eje Z.

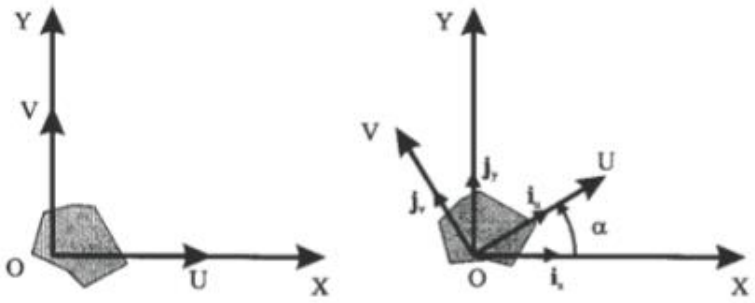


Figura 2-16 Sistema en rotación sobre Z

Se puede llegar a la siguiente equivalencia

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} p_u \\ p_v \end{pmatrix} \tag{2.44}$$

Donde

$$R = \begin{pmatrix} i_x i_u & i_x i_v \\ i_y i_u & i_y i_v \end{pmatrix} \tag{2.45}$$

R, es conocida como matriz de rotación, y defina la orientación del sistema OUV con respecto al sistema OXY, permite transformar las coordenadas de un vector de un sistema a las del otro. Para comprobar que se trata de una matriz ortonormal R-1=RT.

Si se considera la posición relativa del sistema OUV girado un ángulo sobre el OXY, la matriz R será de la forma:

$$R = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\text{sen}\alpha \\ \text{sen}\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \tag{2.46}$$

{Boche Lucio, 2017 #39}

Para la cinemática inversa también se puede usar las matrices de transformación homogéneas, excepto Denavit Hartenberg, los siguientes métodos son aplicables para la solución de la cinemática inversa.

1. Geométrico

El procedimiento se basa en encontrar las relaciones geométricas que se encuentran dentro de las coordenadas del extremo del manipulador que vendrían siendo sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus eslabones.

2. Algebraico

En principio es posible tratar de obtener el modelo cinemático inverso de un robot a partir del conocimiento de su modelo directo, es decir, suponiendo conocidas las relaciones que expresan el valor de la posición en función de sus coordenadas articulares, obtener por manipulación de aquellas las relaciones inversas. {Boche Lucio, 2017 #39}

3. Sustitución polinomial

Parte del hecho de que las ecuaciones trascendentales son normalmente difíciles de resolver, debido a la aparición de $\text{sen}\theta$ y $\cos\theta$. Por lo cual se hacen sustituciones en términos de una sola variable. {Boche Lucio, 2017 #39}

$$u = \tan\frac{\theta}{2} \tag{2.47}$$

$$\text{Cos}\theta = \frac{1 - u^2}{1 + u^2} \tag{2.48}$$

$$\text{Sen}\theta = \frac{2u}{1+u^2} \tag{2.49}$$

2.6.1.10 Obtención cinemática directa utilizando Denavit Hartemberg

Las matrices que constan a Denavit Hartenberg es la matriz homogénea T

$$T = \begin{pmatrix} nx, ox, ax, Px \\ ny, oy, ay, Py \\ nz, oz, az, Pz \\ 0,0,0,1 \end{pmatrix} \tag{2.50}$$

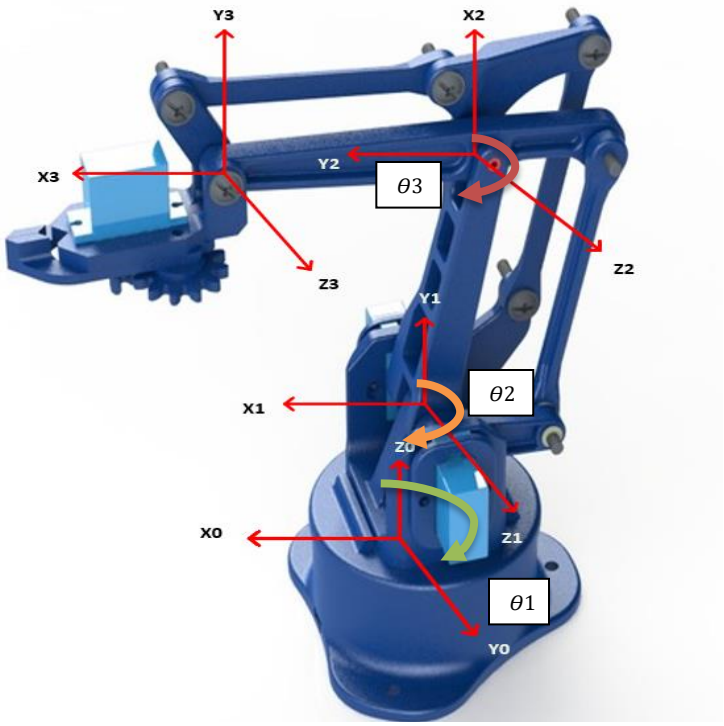


Figura 2-17 Prototipo de Manipulador Serial

Tabla2-4 Tabla Denavit Hartenberg del manipulador

${}^{i-1}A_i$	i	Θ	d	a	α
${}^{0}A_1$	1	Θ_1	L_1	0	-90º
${}^{1}A_2$	2	Θ_2	0	e1	0
${}^{2}A_3$	3	Θ_3	0	e2	0

3 Capítulo 3

3.1 Diseño a Detalle

En este capítulo se describen las herramientas, la aplicación del marco teórico y materiales que se necesitaron para la fabricación de los prototipos, se definen los parámetros a partir de las ecuaciones proporcionadas en el capítulo 2, así mismo se muestran los prototipos fabricados a partir de los materiales que se mencionan en los siguientes apartados y sus respectivos parámetros en tablas que en este capítulo se obtendrán y serán comparadas para su análisis.

3.2 Resumen

Se hace mención sobre la fabricación de los prototipos del actuador lineal, de acuerdo a los materiales y a los criterios de manufactura disponibles, aplicar los conceptos del marco teórico (antecedente teórico) de los actuadores lineales y establecerlos parámetros de los prototipos fabricados.

3.3 Alcances

Reportar rangos de carrera, desempeño y carga considerables de los actuadores con cuerdas y su desempeño en la implementación en un manipulador serial, para su aplicación en la enseñanza y fortalecimiento en la materia de instrumentación y control.

3.4 Materiales y herramientas para la construcción de los prototipos.

Los materiales para la construcción del prototipo de actuador lineal con cuerdas fueron cambiando de acuerdo a como el prototipo avanzaba, se parte de un prototipo inicial primitivo que fue fabricado por manufactura aditiva hasta la fabricación de un prototipo en aluminio.

3.4.1 Prototipo inicial

El prototipo inicial de nuestro actuador por cuerdas permite visualizar el fenómeno físico del actuador, por medio de un husillo, su función permite la transmisión de la tensión de la cuerda a través de un sistema de poleas, que permiten transmitir la tensión de la misma cuerda inducida por un motor en movimiento giratorio.

3.4.1.1 Impresora 3D

Para la fabricación de un prototipo de actuador utilizamos el proceso de manufactura aditiva también conocida como impresión 3D, de esta manera se obtendría un modelo rápido del actuador. De la misma manera se utilizó la impresión en 3D para construir el modelo del manipulador serial el cual implementaríamos el actuador posteriormente.

El modelo de impresora 3D utilizado para el desarrollo de los modelos propuestos inicialmente fue la **Creator Pro**. Ver Figura 3-1.

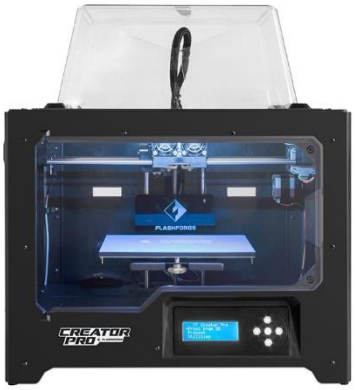


Figura 3-1 Impresora 3D Creator Pro

3.4.1.2 PLA

El PLA o poli (ácido láctico) es un biopolímero termoplástico, este material es altamente versátil que se puede obtener de recursos 100% renovables, las aplicaciones que tiene este polímero se incluyen en la industria textil, en la industria médica y en el área de empaquetado.

El PLA que se utiliza fue adquirido de la empresa Luktec, la información mencionada puede ser consultada en el sitio web de la misma.

Figura 3-2 Filamento PLA (Luktec)

Tabla3-1 Propiedades del PLA

Fiche técnica del PLA	
Material	PLA
Diámetro	1.75 mm
Color	Turquesa
Temperatura de impresión	190°C – 230°C
Temperatura de cama	50° C – 65°C
Densidad	1.24 g/cm^3

3.4.1.3 Hilo de nylon

Se utilizó una cuerda de nylon para la transmisión del movimiento del motor a las poleas. Ver Figura 3-3.

Figura 3-3 Hilo de nylon

Las características del nylon se presentan en la siguiente Tabla3-2. {, 1992 #28}

Tabla3-2 Propiedades del Nylon

Concepto	Nylon
Propiedades clave	Tenacidad, bajo coeficiente de tensión, maquinalidad.
Usos principales	Engranes, cojinetes, bisagras, fibras.
Densidad (g/cm^3)	1.09 – 1.14
Resistencia a la tracción ($lb/pulg^2$)	7000 – 12000
Módulo de tracción ($lb/pulg^2 \times 10^{-5}$)	2.6 – 4.0
Temperatura Máxima en uso continuo ºF	270 – 300
Temperatura de moldeo ºF	470 – 720
Resistencia dieléctrica (volt/mil)	340 – 410
Constante dieléctrica 1000 Hz	4.0 – 4.5
Factor de disipación 1000 Hz	0.01 – 0.04
Absorción de agua en 24 hrs (%)	0.4 – 1.5

La cuerda de nylon al ser colocada en el actuador se le realizo un nudo cirujano, este nudo pose la cualidad de tener suma resistencia a las tensiones y muy difícilmente se llega deshacer el nudo. En la siguiente imagen se muestra cómo se puede realizar el nudo. Ver Figura 3-4

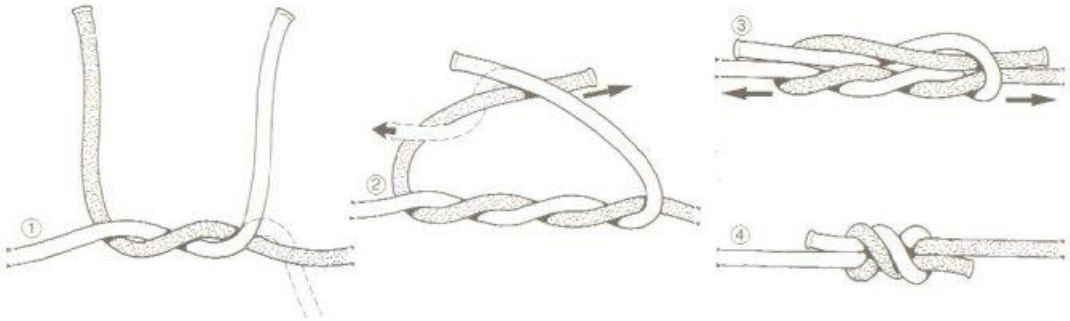


Figura 3-4 Esquema nudo cirujano

3.4.1.4 **Varillas de madera**

Las varillas de madera servirán para el soporte del prototipo inicial del actuador por cuerdas. Ver Figura 3-5.

Figura 3-5 Varilla de madera

3.4.1.5 Poleas

Las poleas como mencionamos antes, son elementos mecánicos simples que su función es transmitir una fuerza menor de carga a un objeto sostenido a un extremo del mismo.

Este elemento permitirá transmitir el movimiento del motor al tornillo trasmitiéndolo a todo el mecanismo del actuador empujando el soporte donde se ubica el motor en dirección del eje lineal del actuador. Ver Figura 3-6.

Figura 3-6 Polea

3.4.1.6 Motorreductor

El motorreductor utilizado para el prototipo inicial es de 120:1 con un motor de DC cepillado tiene un motor de baja corriente y proporciona potencia y velocidad que es comparable a un servo RC. A 6 V, tiene una velocidad de marcha libre de 85 RPM y un par de torsión de aproximadamente 75 onzas-pulgadas ó 0.05 kgf *m Ver Figura 3-7.

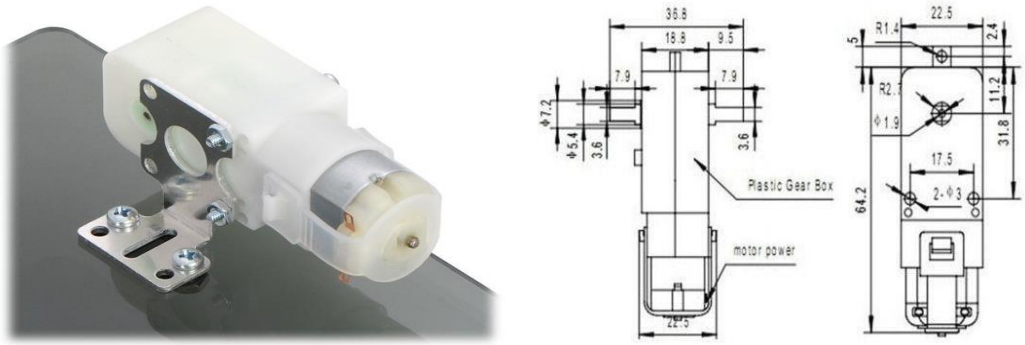


Figura 3-7 Motorreductor y su esquema

Con el prototipo se obtienen los principios físicos del movimiento circular de la cuerda conectada al motor sobre la influencia de un movimiento lineal sobre el eje del actuador. Ver Figura 3-8.

Para conocer la velocidad de movimiento del prototipo inicial lo sometimos a una prueba de desplazamiento por tiempo, utilizando la ecuación (2-33), los resultados de las pruebas tomadas para el parámetro de velocidad que se encuentran en la Tabla 3-3.

3.4.2 Prototipo inicial funcional

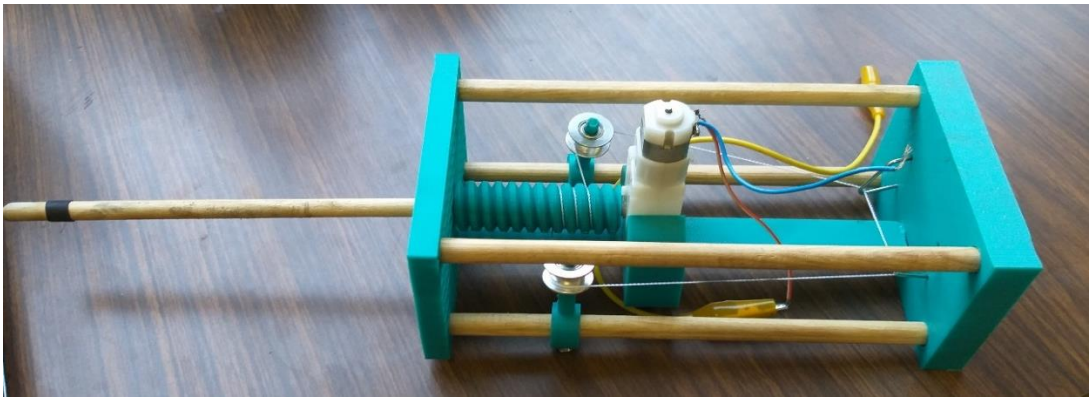


Figura 3-8 Prototipo actuador lineal inicial.

Tabla3-3 Velocidades de acción de carrera del prototipo inicial

# Pruebas	distancia (m)	tiempo(s)	velocidad (m/s)
1	0.038	12.3	0.00308943
2	0.038	11.9	0.00319328
3	0.038	12.2	0.00311475
4	0.038	12.1	0.0031405
5	0.038	11.9	0.00319328
6	0.038	12	0.00316667
7	0.038	12.2	0.00311475
8	0.038	11.8	0.00322034
9	0.038	12.1	0.0031405
10	0.038	12.2	0.00311475
		12.07	0.00314882

Para calcular la tensión de la cuerda se utilizó la ecuación (2.30)

Sustituyendo valores de τ=0.054 kgf . m, , 1kgf =9.807 N, s=0.01 m en la ecuación (2.30) se tiene:

$$T = \frac{0.054 \text{ kgf} \,.\, \text{m}}{0.01\, m}$$

Una vez obtenido el T=5.4 kgf, se aplica la siguiente equivalencia donde 1kgf =9.807 N por lo tanto el resultado es T=52.95 N

Para el trabajo del actuador

se aplica la ecuación (2.6)

Se tiene como dato que 1 kgf.cm es equivalente **9.807 N** se multiplica 1 cm

$$1kgf.cm = 9.807\ N * (1x10^{-2}) = \mathbf{0.098\ Joules}$$

Se hace la siguiente equivalencia

1 kgf.cm=0.098 Joules

5.4 kgf.cm =?

Se aplica una regla de 3

$$W = \frac{5.4\ (0.098)}{1} = 0.5292$$

5.4 kgf.cm=0.5292joule

Para la potencia del actuador

Se aplica la ecuación (2.5)

Se tienen los siguientes valores

W = 0.5292 Joule

t = 12.07s

Se sustituyen los valores de W y t en la ecuación (2.5)

$$P = \frac{0.5292}{12.07} = 0.0438 \text{ watts}$$

Los parámetros marcados en la Tabla3-4 son los que se obtuvieron del prototipo inicial visto en la Figura 3-8.

Tabla 3-4 Parámetros del actuador inicial

Parámetros	Actuador lineal por cuerdas (prototipo inicial)
Longitud del husillo	0.10 m
Diámetro del husillo	0.02 m
Carrera del husillo	0.038 m
Velocidad promedio del actuador	$0.00314882\frac{m}{s}$
Velocidad angular del husillo	85 RPM
Tensión de la cuerda	52.95 N
Fuerza axial máxima del actuador	0.5 N
Torque máximo del actuador	5.4kgf-cm 0.054 kgf -m
Trabajo del actuador	0.5292 Joule
Potencia del actuador	$0.0438\ watts$
Consumo de energía del actuador	6 V

3.4.3 Prototipo en aluminio

El propósito de manufacturar el prototipo del actuador lineal por cuerdas en aluminio fue el proporcionar al actuador lineal mayor rigidez y fuerza, en comparación al primer prototipo de actuador lineal fabricado por manufactura aditiva, permitiendo así mejores parámetros que el prototipo inicial. Para la medición de este actuador, se utilizó herramientas de medición para caracterizar el dispositivo.

El aluminio es un elemento químico con el numero atómico 13 y peso atómico 26.98. En ambientes ácidos. En la naturaleza, el Al no se presenta como metal libre, sino principalmente en forma de óxidos y silicatos ligeramente solubles. (Poschenrieder and Barceló 2013)

El aluminio es uno de los materiales utilizados por excelencia de la industria y esto se debe en gran parte a sus características que sobresalen del resto de los metales. Ver Figura 3-9.

- Resistencia a la corrosión
- Peso ligero
- Económico
- Resistente
- Conductor eléctrico
- No es magnético
- Reciclable

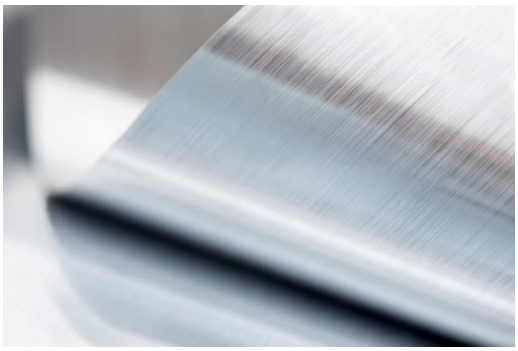


Figura 3-9 Aluminio

Al utilizar aluminio para la fabricación del actuador tendrá beneficios como mayor rigidez y fuerza en comparación con el anterior.

3.4.3.1 Motorreductor

El motor que se utilizó para el prototipo en aluminio fue el micro motor reductor HP. Este tipo de motores a diferencia de los motores CC convencionales, están compuestos de un sistema de engranaje que le permite reducir considerablemente la velocidad producida por el motor, haciendo que máquinas industriales tengan mejor desempeño y puedan presentar menores errores o carencias en su funcionamiento (ruidos y recalentamientos). Ver Figura 3.10

Figura 3-10 Motor reductor HP con eje extendido

Este motor trabaja a 6 V y brinda 3000 RPM, proporciona un torque de 0.3 kg-cm y su relación de engranaje es de 10:1. Los planos del diseño del motorreductor se puede apreciar en la Figura 3-11.

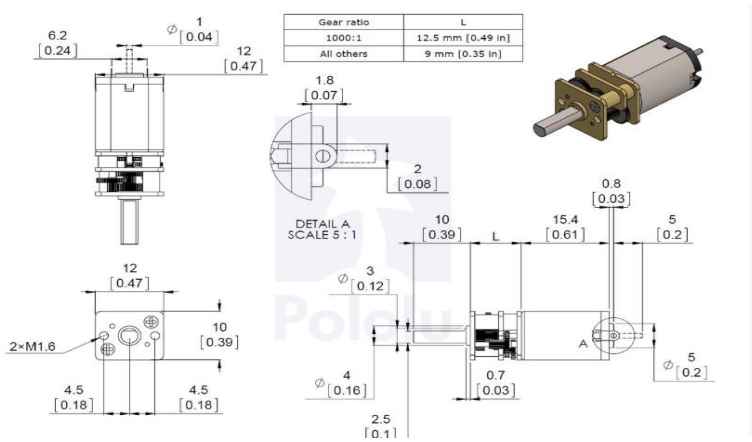


Figura 3-11 Esquema de diseño del motorreductor

3.4.3.2 Tacómetro digital

Tacómetro óptico laser para la medición de revoluciones con puerto USB para la descarga y almacenamiento de datos. Ver Figura 3-12

Figura 3-12 Tacómetro digital

3.4.4 Prototipo en Aluminio 1

Para este prototipo de aluminio 1 se puede notar que el desplazamiento es mucho menor al prototipo inicial y con un motorreductor de 10:1 el movimiento del actuador tiene complicaciones. Ver Figura 3-13

Figura 3-13 Prototipo 1 de actuador lineal de aluminio

En la siguiente Tablase muestran los valores de velocidad del actuador con la ecuación (2.15.1) de cual se obtiene la Tabla3-5.

Tabla 3-5 Velocidades de acción de carrera del prototipo aluminio 1

Velocidad del actuador			
# Pruebas	distancia (m)	tiempo(s)	velocidad (m/s)
1	0.01	10.69	0.00093545
2	0.01	9.26	0.00107991
3	0.01	9.93	0.00100705
4	0.01	10.36	0.00096525
5	0.01	9.31	0.00107411
6	0.01	10.24	0.00097656
7	0.01	9.38	0.0010661
8	0.01	9.28	0.00107759
9	0.01	9.4	0.00106383
10	0.01	10.04	0.00099602
		9.789	0.01024187

La tensión de la cuerda de actuador

Se utilizó la ecuación (2.30) para la obtención de la tensión.

Se tienen los valores equivalen a

τ=0.003kgf -m

1kgf =1 kg x f= 1 kg x 9.807 m/s^2 = 9.807 N

s=0.005 m

se sustituyen estos valores en la ecuación (2.30)

$$T = \frac{0.003 \text{ kgf. m}}{0.005\ m} = 0.6 \text{ kgf}$$

Una vez obtenido el T=0.6 kgf, se aplica la siguiente equivalencia donde 1kgf =9.807 N por lo tanto el resultado es T=5.88 N

T=0.6 kgf

T=5.88 N

Para el trabajo del actuador

Se tiene como dato que 1 kgf.cm es equivalente **9.807 N** se multiplica 1 cm se aplica la ecuación (2.6)

$1kgf.cm$ = 9.807 N *(1x10^{-2}) =**0.098 Joules**

Se hace la siguiente equivalencia

1 kgf.cm=0.098 Joules

0.3 kgf.cm =?

Se aplica una regla de 3

$$W = \frac{0.3\ (0.098)}{1} = 0.0294$$

0.3 kgf.cm=0.0294 joule

Para la potencia del actuador

Se aplica la ecuación (2.5)

Se tienen los siguientes valores

W= 0.0294 Joule

T=9.789 s

Se sustituyen estos valores por la ecuación (2.5)

$$W = \frac{0.0294 \text{ joule}}{9.789\ s}$$

$$W = 0.003\ Watt$$

Tabla 3-6 Parámetro de actuador aluminio 1

Parámetros	Actuador lineal por cuerdas (prototipo aluminio inicial)
Longitud del husillo	0.15 m
Diámetro del husillo	0.01 m
Carrera del husillo	0.01 m
Velocidad promedio del actuador	$0.01024187 \frac{m}{s}$
Velocidad angular nominal del actuador	3000 RPM
Tensión de la cuerda	5.88 N
Fuerza axial máxima del actuador	1 N
Torque máximo del motor	0.3 kgf-cm 0.003 kgf-m
Trabajo del actuador	0.0294 Joule
Potencia del actuador	0.003 Watt
Consumo de energía del actuador	6-12 Volts, 1.6 A

3.4.5 Prototipo en Aluminio 2 (final)

Posteriormente el diseño del actuador de aluminio1 fue modificado, el husillo que está colocado en el motor fue cambiado por otro que mantiene su forma cilíndrica constante y con diferentes dimensiones al anterior, el motor fue cambiado con una relación de 1000: 1 en el engranado. Los cambios se llevaron a cabo para mejorar resultados del anterior prototipo, obteniendo el prototipo que se muestra en la Figura 3-14.

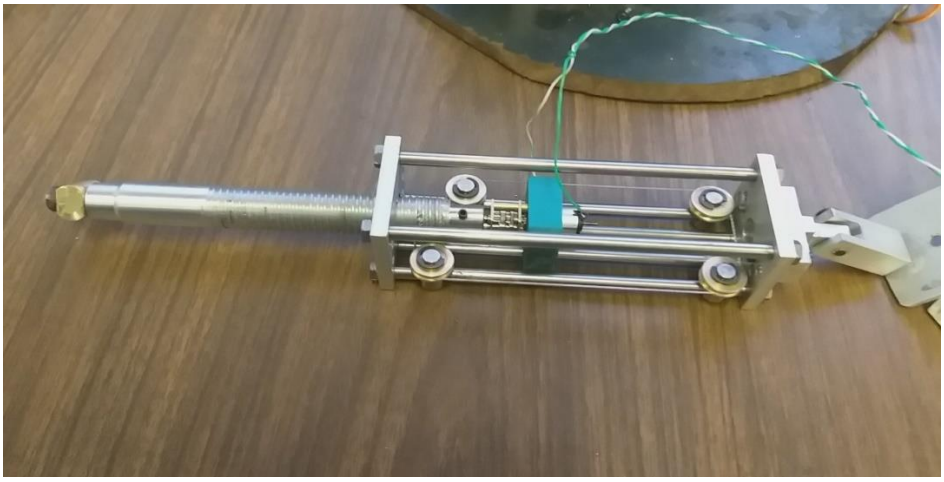


Figura 3-14 Prototipo final actuador lineal de aluminio

Para el siguiente prototipo de actuador se sometió a dos pruebas de velocidad a diferentes voltajes, con el fin de comprobar su velocidad promedio con respecto a cada una de ellas.

Tabla 3-7 Velocidades de acción de carrera del prototipo aluminio (final) con 12 volts

velocidad del actuador (12 volts)			
# Pruebas	distancia (m)	tiempo(s)	velocidad (m/s)
1	0.045	23.7	0.00189873
2	0.045	22.9	0.00196507
3	0.045	23.5	0.00191489
4	0.045	23.4	0.00192308
5	0.045	22.8	0.00197368
6	0.045	23.1	0.00194805
7	0.045	22.9	0.00196507
8	0.045	23.3	0.00193133
9	0.045	23.1	0.00194805
10	0.045	23.3	0.00193133
		23.2	0.01939928

Tabla 3-8 Velocidades de acción de carrera del prototipo aluminio (final) con 5 volts

velocidad del actuador (5 volts)			
# Pruebas	distancia (m)	tiempo(s)	velocidad (m/s)
1	0.045	51.42	0.00087515
2	0.045	51.24	0.00087822
3	0.045	50.46	0.0008918
4	0.045	51.38	0.00087583
5	0.045	50.12	0.00089785
6	0.045	52	0.00086538
7	0.045	53.17	0.00084634
8	0.045	51.96	0.00086605
9	0.045	51.72	0.00087007
10	0.045	51.26	0.00087788
		51.47	0.00087446

Se obtuvo las revoluciones por minuto del actuador a través de un tacómetro óptico digital.

Este dispositivo arrojo una revolución nominal a 30 RPM. Ver Figura 3-15.

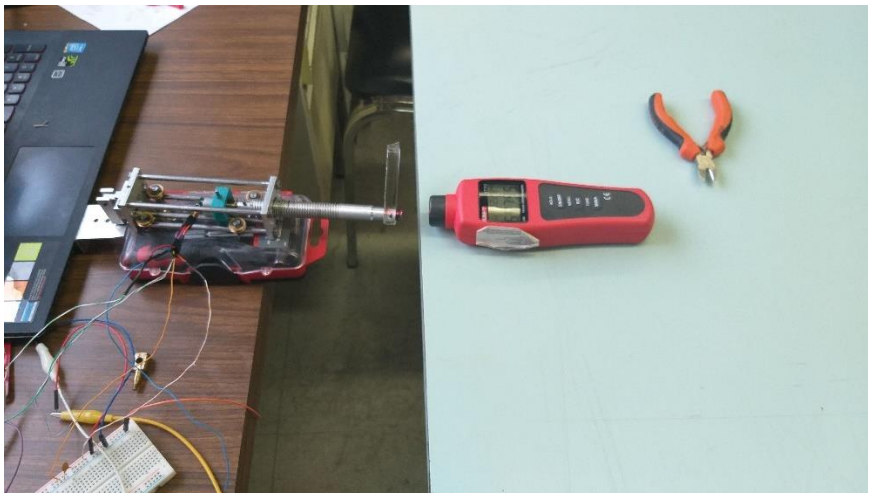


Figura 3-15 Medición de los RPM del actuador lineal

Como los anteriores prototipos, Se obtiene la tensión de la cuerda del actuador por la ecuación (2.30)

Se tienen los siguientes datos

τ=0.09 kgf-m

s=0.00725 m

Se sustituyen en la ecuación (2.30)

$$T = \frac{0.09 \text{ kgf} - \text{m}}{0.00725\ m} = 12.41$$

T=12.41 kgf

Se tiene la siguiente equivalencia 1kgf =9.807 N por lo que tenemos.

T=121.70 N

Para el trabajo del actuador

Se tiene como dato que 1 kgf.cm es equivalente **9.807 N** se multiplica 1 cm se aplica la ecuación (2.6)

Se tiene la siguiente equivalencia $1kgf.cm$ = 9.807 N *(1x10^{-2}) =**0.098 Joules**

$$W = \frac{9\ (0.098)}{1} = 0.882$$

9 kgf-cm = 0.882 joule

Para la potencia del actuador

Se aplica la ecuación (2.5)

Se tienen los siguientes valores para un voltaje de 12 volts.

W=0.882

t= 23.2 s

se sustituyen en la ecuación (2.5)

$$W = \frac{0.882 \text{ joule}}{23.2}$$

$$W = 0.038 Watt$$

Para un voltaje de 5 volts se tiene los siguientes datos

W=0.882 joule

t=51.47 s

$$W = \frac{0.882 \text{ joule}}{51.47 s}$$

$$W = 0.017 Watt$$

3.4.5.1 Diagrama de bloquesIntegracion de un Encoder

El siguiente bloque muestra el proceso de la entrada de datos y por los cuales pasa la señal y la convierte en datos digitales. Ver Figura 3-16.

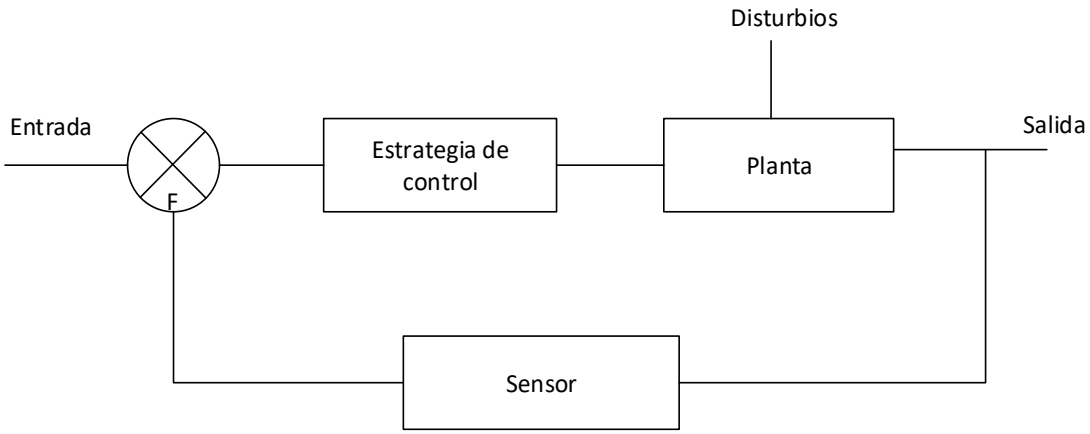


Figura 3-16 Bloque de control cerrado

3.4.5.1.1 Arduino UNO

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra, los que permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables DuPont). Ver Figura 3-17

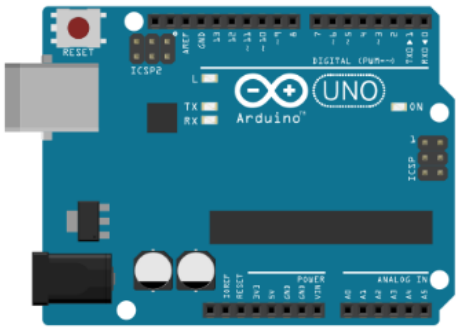


Figura 3-17 Placa arduino

3.4.5.1.2 Controlador de motor L298N

También conocido como doble puente H driver L298N, tiene la capacidad de controlar dos motores de corriente continua, un motor paso a paso o bipolar, estos dispositivos están capacitados para aguantar cargas de 5 y 35 Voltios y 2 Amperios como máximo. Se puede utilizar con cualquier micro controlador. Ver Figura 3-18.

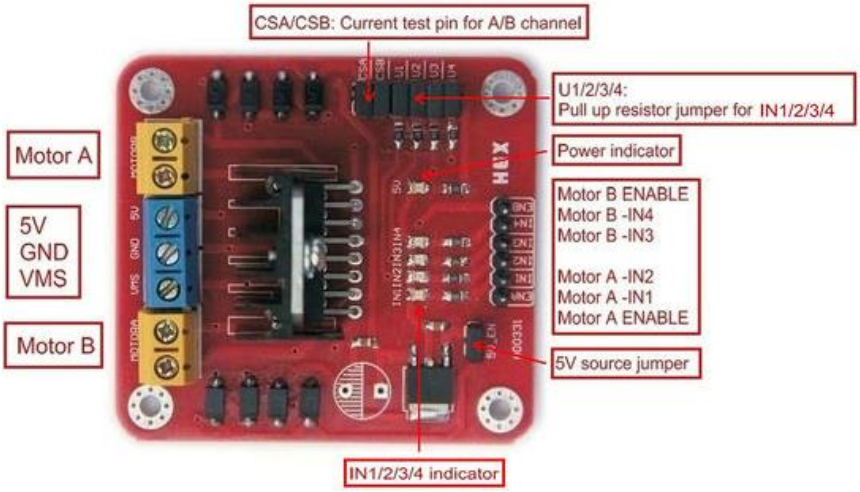


Figura 3-18 Controlador de motor L 298N

3.4.5.1.3 Fuente de voltaje

Se utilizó una fuente de voltaje "blazar power supply" con capacidad de generar voltajes de 5 a 12 volts falta los amperes. Ver Figura 3-19.

Figura 3-19 Fuente de Voltaje

3.4.5.1.4 Encoders

El encoder magnético fue seleccionado por sus cualidades de ser una interfaz amigable ya que su salida es una onda cuadrada digital fácil de leer, además de que se puede utilizar Arduino para su fácil control, los codificadores ópticos son complejos ya que es susceptible a la interferencia de la luz brillante. Ver Figura 3-20.

El encoder utilizado para este prototipo fue el Encoder Magnético Para Micromotores Con Eje Extendido.

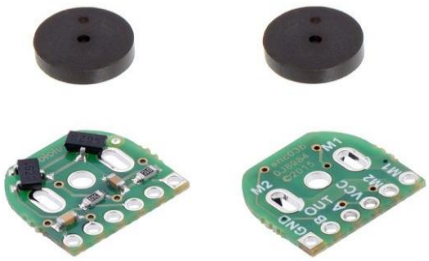


Figura 3-20 Placa encoder magnético

Las especificaciones de este encoder son las siguientes: provee 12 pulsos por revolución del eje del motor, estos codificadores funcionan desde 2.7 V a 18 V y proporciona salidas digitales que se pueden conectar directamente a un microcontrolador u otro circuito digital.

En la página del proveedor proporciona el siguiente esquema para las conexiones del encoder agregando resistencias y capacitores para el ruido de la salida de datos. Ve Figura 3-21.

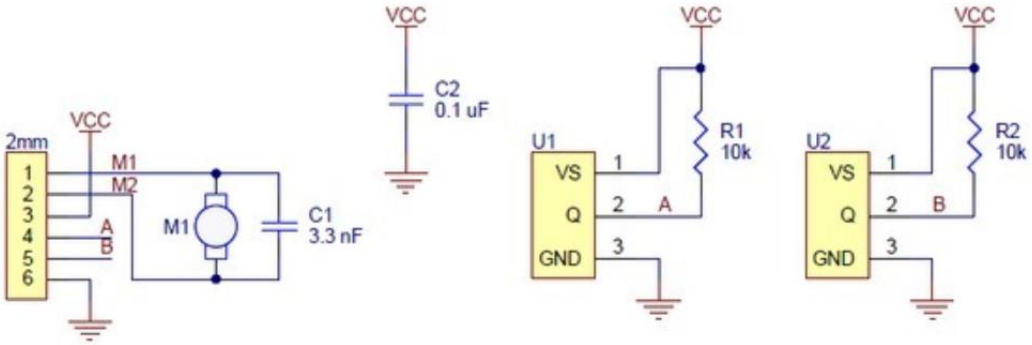


Figura 3-21 Diagrama de encoder

Para comprender mejor la Figura 3-16, en la siguiente Figura 3-22 se muestra los elementos y componentes que se utilizan para el conteo de las revoluciones se colocan de manera ilustrativa estos elementos, al momento de probar el enconder con el motor.

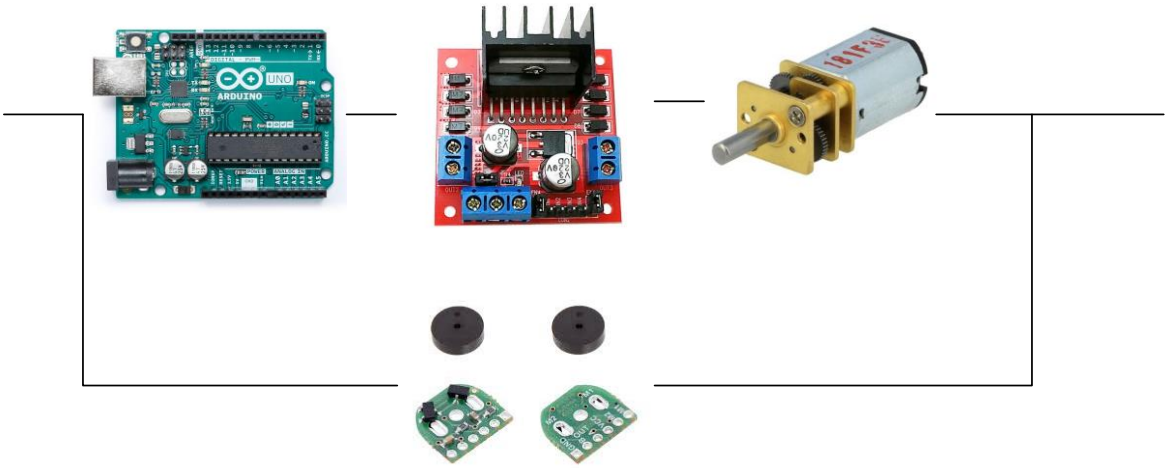


Figura 3-22 Diagrama de bloque cerrado con los componentes electrónicos

Para las conexiones del sensor se muestra la Figura 3-23

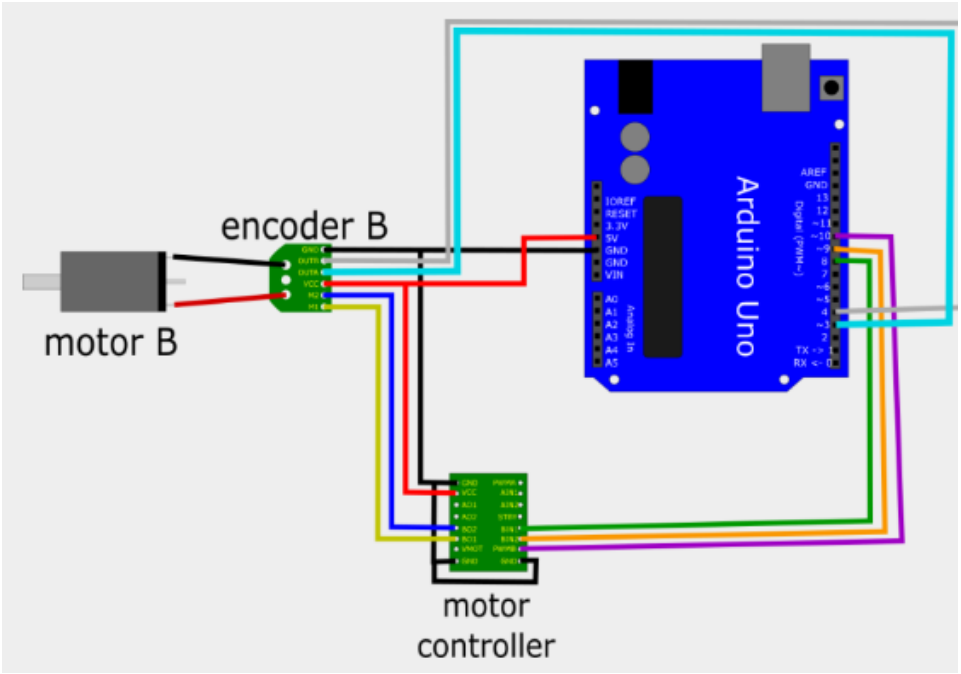


Figura 3-23 Diagrama de conexiones del encoder

Una vez colocado el enconder en el motor se conectó a un osciloscopio de la marca Tektronix modelo TBS1152B-EDU (Figura 3-24), para comprobar el tipo de señal saliente que está obteniendo.

Figura 3-24 Osciloscopio TBS 1152B-EDU

Al principio la señal obtenida fue un ruido, esto debido a una mala soldadura por parte de los pines de salida del encoder. Ver Figura 3-25

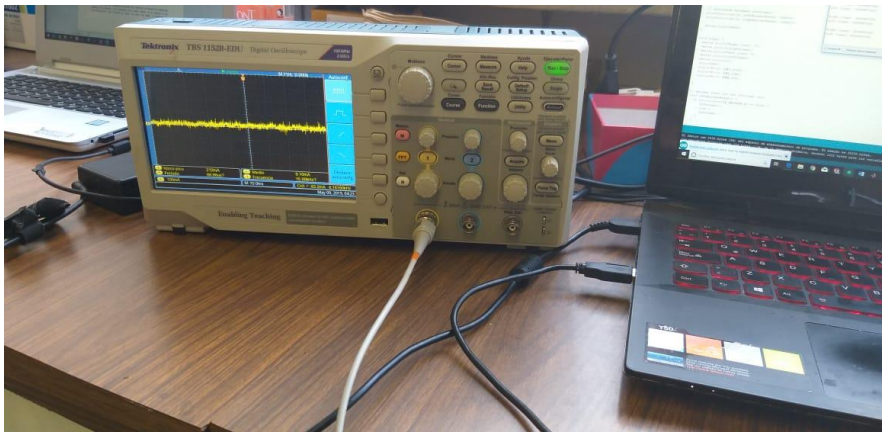


Figura 3-25 Señal de ruido del encoder magnético medido con un Osciloscopio

Arreglado el problema se volvió a tomar lectura del encoder obteniendo la característica onda de cuadratura que proporcionan el encoder magnético. Ver Figura 3-26.

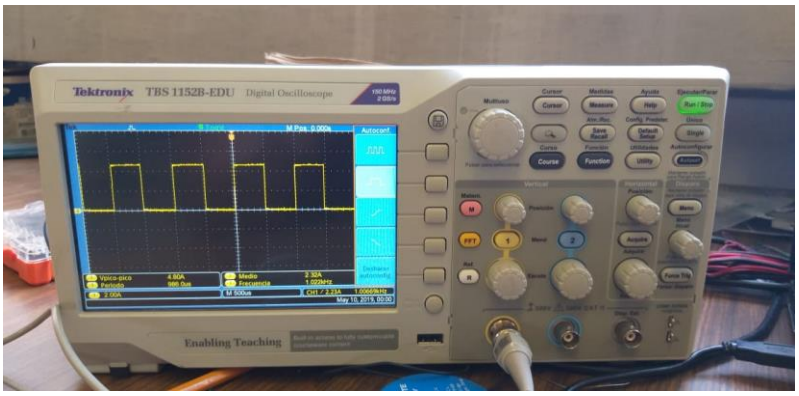


Figura 3-26 Señal en cuadratura del encoder magnético medido por un osciloscopio

Existen dos maneras de obtener las RPM por medio del encoder, una es por medio del osciloscopio y la otra es generar un código en Arduino para la conversión de los datos obtenidos por los sensores Hall.

Para el osciloscopio se tiene que la frecuencia y el periodo, que son dos parámetros que este instrumento proporciona al momento de sacar la onda cuadrada. Para eso servirán la siguiente ecuación.

$$RPM = 2\pi * frecuencia \tag{3.1}$$

Se tiene una frecuencia de 1022 Hz y como vimos en la Figura 2-30 esta cantidad la se divide en 2 teniendo 511 Hz

$$RPM = 2\pi * 511$$

RPM=30,660

Como el motor tiene una relación de 1000:1 se tiene que por cada 1000 giros en el eje del motor la revolución resultante será uno.

RPM= 30.6 RPM

Paso del husillo

Al momento de fabricar el husillo, el paso que se le dio a este fue de 10 hilos por pulgada que esto se traduce a 2.54 mm. Para la obtención del paso del husillo se necesita tener los siguientes parámetros

$$Ph = \frac{velocidad\ max.\ *\ longitud\ de\ carrera * \ segundos}{revoluciones\ por\ minuto} \tag{3.2}$$

$$Ph = \frac{(0.01939)(70\ )(60)}{32} = 2.545\ mm$$

Tabla 3-9 Parámetros del actuador aluminio final

Parámetros	**Actuador línea con cuerdas (prototipo aluminio final)**
Longitud del husillo	0.07 m
Diámetro del husillo	0.0145 m
Carrera del husillo	0.045 m
Velocidad promedio del actuador	$0.01939928\ \frac{m}{s}$ y $0.00087446\ \frac{m}{s}$
Velocidad angular del motor	32 RPM
Velocidad angular del husillo (Tacómetro)	30 RPM
Velocidad angular obtenida por encoder	30.6 RPM
Paso del Husillo	2.54 mm
Tensión de la cuerda	121.70 N
Fuerza axial máxima del actuador	1.8 N
Torque máximo del actuador	9 kgf-cm 0.09 kgf-m
Trabajo del motor	0.882 joule
Potencia del motor	0.038 $Watt$ Y 0.017$Watt$
Consumo de energía del actuador	6-12 Volts, 1.6 A

3.5 Obtención de datos en la implementación del manipulador serial

Para el estudio del actuador de cuerda implementado en el manipulador serial, se colocó el actuador a un extremo del eslabón de manipulador serial. Se muestra en las Figura 3-27 y 3-28 los perfiles del manipulador con el actuador ya implementado.

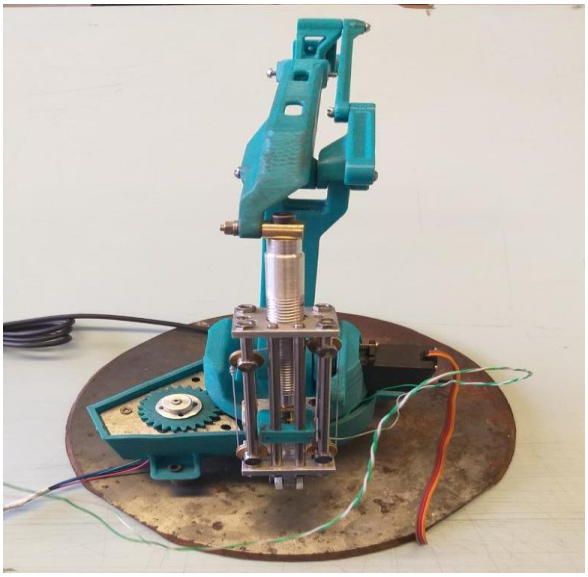


Figura 3-27 Perfil frontal del actuador lineal implementado en el brazo del manipulador

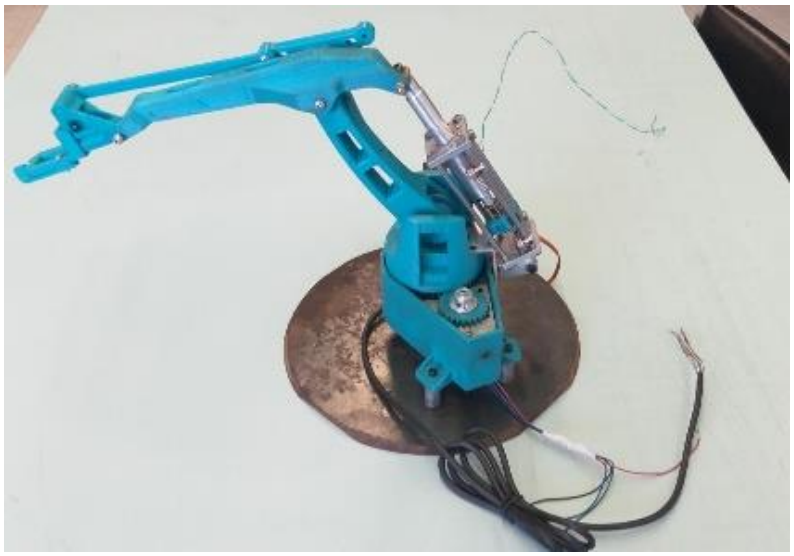


Figura 3-28 Perfil Lateral del actuador lineal por cuerda implementado en el brazo del manipulador

Posteriormente se procedió con las pruebas del actuador en el movimiento del manipulador serial, el actuador fue conectado a una fuente de voltaje ya mencionada, la cual se le suministro dos tipos de voltajes, uno de 5 volts y otro de 12 volts. Las posiciones adquiridas por el desplazamiento del actuador en el manipulador fueron las siguientes.

En la Figura 3-29 se puede apreciar el manipulador con un desplazamiento de 0°

Figura 3-29 Angulo inicial del brazo del manipulador con el actuador implementado

En la Figura 3-30 se observa el desplazamiento angular total del manipulador con el actuador en su máxima carrera.

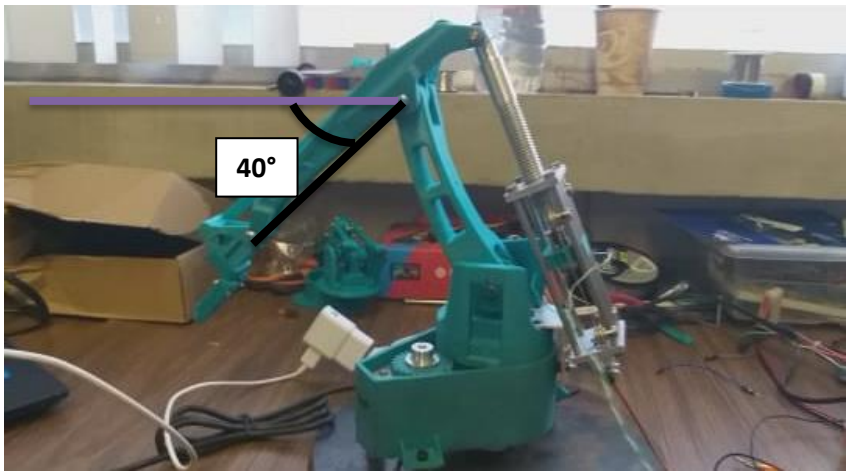


Figura 3-30 Angulo final del brazo del manipulador con el actuador implementado

Como se observa el ángulo de desplazamiento total entre las distancias de recorrido del actuador es de 40°, el cual se pudo observar un avance de 10° en sentido positivo o anti horario por cada centímetro de desplazamiento del actuador. Al suministrar 5 volts en el motor el tiempo que le tomo al manipulador tener la posición de la imagen 2 fue aproximadamente de 51 segundos, mientras que, suministrando un voltaje de 12 volts, el tiempo de redujo a la mitad en un tiempo de 26 segundos.

La Tabla 3-10 corresponde a los datos obtenidos del desplazamiento angular del eslabón del manipulador.

Tabla 3-10 Movimiento del brazo inducido por la carrera del actuador lineal con cuerdas

Tabla de movimiento del brazo accionado por el actuador		
	Carrera del Actuador	Desplazamiento angular del brazo del Manipulador
Carrera centímetro de desplazamiento lineal por movimiento angular.	1 cm	10°
	2 cm	20°
	3 cm	30°
Carrera total centímetro de desplazamiento lineal por movimiento angular.	4 cm	40°
Velocidad de actuación suministrando 5 Volts.	$0.08744\ \frac{cm}{s}$	
Velocidad de actuación suministrando 12 Volts	$1.9399\ \frac{cm}{s}$	

3.5.1.1 Modelado cinemático inverso de la articulación tres y la relación con el actuador por cable

Las matrices que constan a Denavit Hartenberg es la matriz homogénea T, la Figura 3-31 se muestra el manipulador como banco de pruebas con los ejes marcados en cada articulación.

$$T = \begin{pmatrix} nx, ox, ax, Px \\ ny, oy, ay, Py \\ nz, oz, az, Pz \\ 0,0,0,1 \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

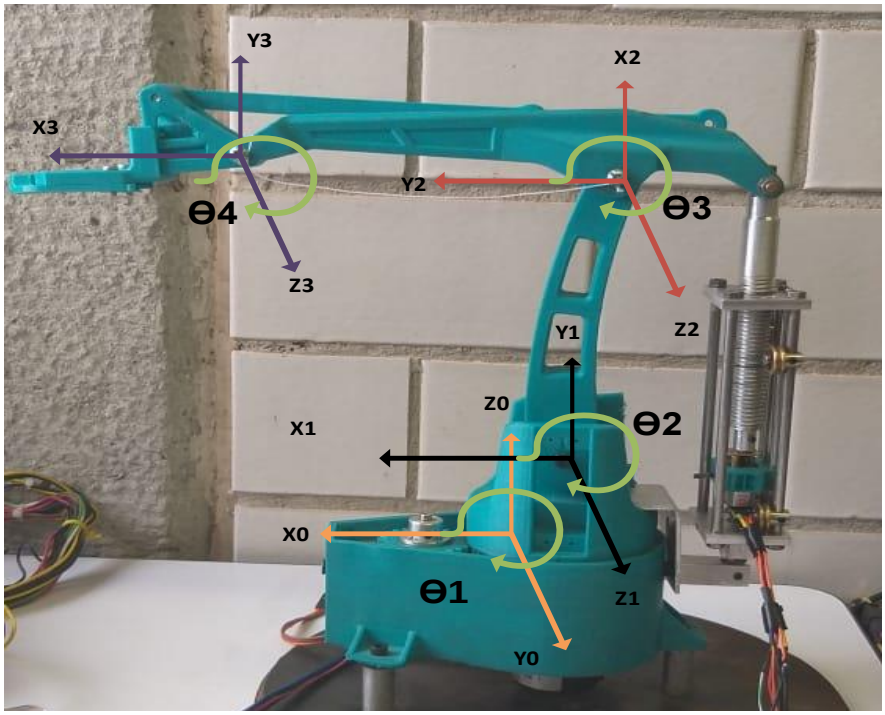


Figura 3-31 Manipulador serial banco de pruebas

Tabla 3-11 Tabla Denavit Hartenberg del manipulador

${}^{i-1}A_i$	i	Θ	d	a	α
${}^{0}A_1$	1	Θ_1	L_1	0	-90º
${}^{1}A_2$	2	Θ_2	0	e1	0
${}^{2}A_3$	3	Θ_3	0	e2	0

Una vez obtenida la Tabla 3-11 Denavit Hartenberg del manipulador, se procede a sacar la matriz total del sistema.

Se definen los parametros de la Tablacorrespondiente a los movimientos del manipulador y posteriormente se multliplicaran las matrices para obtener la matriz total de pocision del manipulador (El producto total de las Matrices fueron resueltas por medio del programa Mathematica).

θi = Rotacion en Z / di= Traslacion en Z / ai= Traslacion en X / αi=Rotación en X

$$ {}^{i-1}_{.}A_i = \begin{pmatrix} Cos(\theta_i) & -Sen(\theta_i) & 0 & 0 \\ Sen(\theta_i) & Cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & Cos(\alpha_i) & -Sen(\alpha_i) & 0 \\ 0 & Sen(\alpha_i) & Cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2) $$

$$ {}^{i-1}_{.}A_i = \begin{pmatrix} Cos(\theta_i) & -Cos(\alpha_i)Sen(\theta_i) & Sen(\alpha_i)Sn(\theta_i) & a_iCos(\theta_i) \\ Sin(\theta_i) & Cos(\alpha_i)Cos(\theta_i) - Sen(\alpha_i)Cos(\theta_i) & a_iSen(\theta_i) \\ 0 & Sen(\alpha_i) & Cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3) $$

Se aplicara la multiplicacion de matrices (θi = Rotacion en Z / di= Traslacion en Z / ai= Traslacion en X / αi=Rotación en X) para los parametro s que se encuentran dentro del manipulador serial en cada sistema. Figura 2-35

$$ {}^{0}_{.}A_1 = \begin{pmatrix} Cos(\Theta 1) & -Sen(\Theta 1) & 0 & 0 \\ Sen(\Theta 1) & Cos(\Theta 1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & Cos(-90º) & -Sen(-90º) & 0 \\ 0 & Sen(-90º) & Cos(-90º) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4) $$

$$ {}^{0}_{.}A_1 = \begin{pmatrix} Cos(\Theta 1) & -Cos(-90º)Sen(\Theta 1) & Sen(-90º)Sen(\Theta 1) & 0Cos(\Theta 1) \\ Sen(\Theta 1) & Cos(-90º)Cos(\Theta 1) - Sen(-90º)Cos(\Theta 1) & 0Sen(\Theta 1) \\ 0 & Sen(-90º) & Cos(-90º) & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5) $$

$$ {}^{1}_{.}A_2 = \begin{pmatrix} Cos(\Theta 2) & -Sen(\Theta 2) & 0 & 0 \\ Sen(\Theta 2) & Cos(\Theta 2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & e1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & Cos(0) & -Sen(0) & 0 \\ 0 & Sen(0) & Cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6) $$

$$ {}^{1}_{.}A_2 = \begin{pmatrix} Cos(\Theta 2) & -Cos(0)Sen(\Theta 2) & Sen(0)Sen(\Theta 2) & e1Cos(\Theta 2) \\ Sen(\Theta 2) & Cos(0)Cos(\Theta 2) - Sen(0)Cos(\Theta 2) & e1Sen(\Theta 2) \\ 0 & Sen(0) & Cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.7) $$

$$ {}^{2}_{.}A_3 = \begin{pmatrix} Cos(\Theta 3) & -Sen(\Theta 3) & 0 & 0 \\ Sen(\Theta 3) & Cos(\Theta 3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & e2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & Cos(0) & -Sen(0) & 0 \\ 0 & Sen(0) & Cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.8) $$

$$ {}^{2}_{.}A_3 = \begin{pmatrix} Cos(\Theta 3) & -Cos(0)Sen(\Theta 3) & Sen(0)Sen(\Theta 3) & e2Cos(\Theta 3) \\ Sen(\Theta 3) & Cos(0)Cos(\Theta 3) - Sen(0)Cos(\Theta 3) & e2Sen(\Theta 3) \\ 0 & Sen(0) & Cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.9) $$

Posteriormente se aplica la multiplicacion de las matrices para obtener la matriz total.

$$ {}^{0}_{.}A_3 = {}^{0}_{.}A_1 * {}^{1}_{.}A_2 * {}^{2}_{.}A_3 \quad (3.10) $$

Obteniendo la siguiente Matriz la cual represente la posicion total de todo el sistema. $({}^{0}_{.}A_3)$

$$ {}^{0}_{.}A_3 = \begin{pmatrix} \mathrm{Cos}(\theta 1)\mathrm{Cos}(\theta 2+\theta 3) & -\mathrm{Cos}(\theta 1)\mathrm{Sen}(\theta 2+\theta 3) & -\mathrm{Sen}(\theta 1) & \mathrm{Cos}(\theta 1)(e1\mathrm{Cos}(\theta 2)+e2\mathrm{Cos}(\theta 2+\theta 3)) \\ \mathrm{Cos}(\theta 2+\theta 3)\mathrm{Sen}(\theta 1) & -\mathrm{Sen}(\theta 1)\mathrm{Sen}(\theta 2+\theta 3) & \mathrm{Cos}(\theta 1) & (e1\mathrm{Cos}(\theta 2)+e2\mathrm{Cos}(\theta 2+\theta 3))\mathrm{Sen}(\theta 1) \\ -\mathrm{Sen}(\theta 2+\theta 3) & -\mathrm{Cos}(\theta 2+\theta 3) & 0 & l1-e1\mathrm{Sen}(\theta 2)-e2\mathrm{Sen}(\theta 2+\theta 3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} $$

(3.11)

3.5.1.1.1 Cinemática inversa

Para el estudio de la cinemática inversa del manipulador serial se utilizó el método algebraico para la obtención de las variables que proporcionaran los ángulos de desplazamiento de las articulaciones del manipulador.

De la matriz T $({}^{0}_{.}A_3)$de Denavit Hartenberg se encuentra las Ecuaciones de la cinemática directa, para posicionar al efector final del manipulador en un punto X, Y, Z

$$ X = \mathrm{Cos}(\theta 1)\big(e1\mathrm{Cos}(\theta 2)+e2\mathrm{Cos}(\theta 2+\theta 3)\big) \quad (3.12) $$

$$ Y = \big(e1\mathrm{Cos}(\theta 2)+e2\mathrm{Cos}(\theta 2+\theta 3)\big)\mathrm{Sen}(\theta 1) \quad (3.13) $$

$$ Z = l1-e1\mathrm{Sen}(\theta 2)-e2\mathrm{Sen}(\theta 2+\theta 3) \quad (3.14) $$

Se despeja la variable θ1, este ángulo se encuentra en la base del manipulador sobre los ejes de X y Y respectivamente. Ver Figura 2-36.

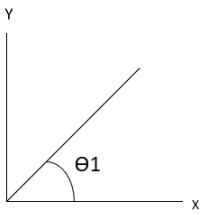


Figura 3-32 Proyección del manipulador vito en X y Y

Para el ángulo θ1 en relación a la dirección de X y la Y

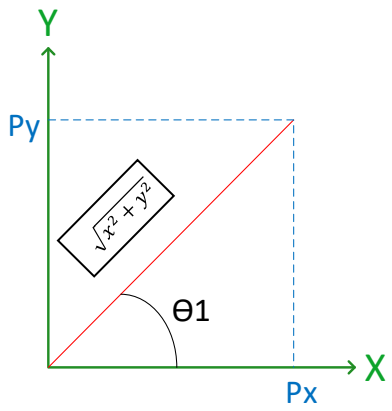


Figura 3-33Parametros de la Proyección del manipulador sobre los ejes X y Y

Se tiene

Otra manera de verlo

$$Cos\ \boldsymbol{\theta}1 = \frac{C.A.}{H} \tag{3.15}$$

$$Cos\ \boldsymbol{\theta}1 = \frac{Px}{\sqrt{Px^2 + Py^2}} \tag{3.16}$$

$$Sen\ \boldsymbol{\theta}1 = \frac{C.O.}{H} \tag{3.17}$$

$$Sen\ \boldsymbol{\theta}1 = \frac{Py}{\sqrt{Px^2 + Py^2}} \tag{3.18}$$

$$\boldsymbol{\theta}1 = \text{ArcTan2}\left[\frac{Py}{Px}\right] \tag{3.19}$$

Una vez obtenido los Cos $\boldsymbol{\theta}1$ y Sen $\boldsymbol{\theta}1$ se procede a encontrar el $\boldsymbol{\theta}2$

Se tiene la expresión

$$^{0}_{.}A_3 = {}^{0}_{.}A_1 * {}^{1}_{.}A_2 * {}^{2}_{.}A_3 \tag{3.10}$$

La cual se multiplica la inversa de $({}^{0}_{.}A_1)^{-1} = {}^{1}_{.}A_0$ de los dos lados para obtener ${}^{1}_{.}A_3$ de la siguiente manera.

$$ {}^{1}_{.}A_0 * {}^{0}_{.}A_3 = ({}^{1}_{.}A_0 * {}^{0}_{.}A_1) * {}^{1}_{.}A_2 * {}^{2}_{.}A_3 \tag{3.20} $$

$$ {}^{1}_{.}A_3 = {}^{1}_{.}A_2 * {}^{2}_{.}A_3 \tag{3.21} $$

Para obtener los valores de un vector homogeneo del lado derecho de la matriz, se multiplica por el vector n= $(0,0,0,1)$,para obtener los parametros del vector homogeneo de la matriz

$$ {}^{1}_{.}A_3 * n \tag{3.22} $$

De esta forma se obtiene el siguiente vector homogeneo

$$ {}^{1}_{.}A_3 * \ n = \begin{pmatrix} \mathrm{e1Cos}(\theta 2) + \mathrm{e2Cos}(\theta 2 + \theta 3) \\ \mathrm{e1Sen}(\theta 2) + \mathrm{e2Sen}(\theta 2 + \theta 3) \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} $$

Se trabaja del lado izquierdo de la ecuacion matricial ${}^{1}_{.}A_3 = {}^{1}_{.}A_0 * {}^{0}_{.}A_3$ se tiene :

$$ {}^{0}_{.}A_3 = T = \begin{pmatrix} \mathrm{nx, ox, ax, Px} \\ \mathrm{ny, oy, ay, Py} \\ \mathrm{nz, oz, az, Pz} \\ \mathrm{0,0,0,1} \end{pmatrix} \tag{3.23} $$

$$ {}^{1}_{.}A_0 * {}^{0}_{.}A_3 = \begin{pmatrix} \mathrm{PxCos}(\theta 1) + \mathrm{PySen}(\theta 1) \\ -\mathrm{Pz} + \mathrm{L1} \\ \mathrm{PyCos}(\theta 1) - \mathrm{PxSen}(\theta 1) \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.24} $$

La cual la inversa de $({}^{0}_{.}A_1 * {}^{1}_{.}A_2)^{-1}$ de los dos lados para obtener ${}^{2}_{.}A_3$ de la siguiente manera.

$$ ({}^{0}_{.}A_1 * {}^{1}_{.}A_2)^{-1} * {}^{0}_{.}A_3 = \ (({}^{0}_{.}A_1 * {}^{1}_{.}A_2)^{-1} * {}^{0}_{.}A_1 * {}^{1}_{.}A_2) \ * {}^{2}_{.}A_3 \tag{3.25} $$

$$ ({}^{0}_{.}A_1 * {}^{1}_{.}A_2)^{-1} * T * n = {}^{2}_{.}A_3 * n \tag{3.26} $$

$$ \begin{pmatrix} -\mathrm{e1} + \mathrm{PxCos}(\theta 1)\mathrm{Cos}(\theta 2) + \mathrm{PyCos}(\theta 2)\mathrm{Sen}(\theta 1) + (-\mathrm{Pz} + \mathrm{e1})\mathrm{Sen}(\theta 2) \\ (-\mathrm{Pz} + \mathrm{e1})\mathrm{Cos}(\theta 2) - (\mathrm{PxCos}(\theta 1) + \mathrm{PySen}(\theta 1)\mathrm{Sen}(\theta 2) \\ \mathrm{PyCos}(\theta 1) - \mathrm{PxSen}(\theta 1) \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathrm{e2Cos}(\theta 3) \\ \mathrm{e2Sen}(\theta 3) \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.27} $$

Siendo la matriz ${}^{2}_{.}A_3$ quien contiene al angulo de $\boldsymbol{\theta}3$ lo se despeja del lado derecho de la ecuacion, multiplicandolo por n

$$ {}^{2}_{.}A_{3*\ n} \tag{3.28} $$

$$ \begin{pmatrix} \mathrm{e2Cos}(\theta 3) \\ \mathrm{e2Sen}(\theta 3) \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} $$

Despues del lado izquierdo ${}^{0}_{.}A_{1} * {}^{1}_{.}A_{2}$ al despejar estas matrices se obtienen las inversas de las mismas las cuales se denominaran ${}^{2}_{.}A_{0}$ la cual sera el inverso del producto de esas matrices, posteriormente se multiplicara por $T * n$.

$$ {}^{2}_{.}A_{0} * T * n \tag{3.29} $$

$$ \begin{pmatrix} -\mathrm{e1} + \mathrm{PxCos}(\theta 1)\mathrm{Cos}(\theta 2) + \mathrm{PyCos}(\theta 2)\mathrm{Sen}(\theta 1) + (-\mathrm{Pz} + \mathrm{L1})\mathrm{Sen}(\theta 2) \\ (-\mathrm{Pz} + \mathrm{L1})\mathrm{Cos}(\theta 2) - (\mathrm{PxCos}(\theta 1) + \mathrm{PySen}(\theta 1))\mathrm{Sen}(\theta 2) \\ \mathrm{PyCos}(\theta 1) - \mathrm{PxSen}(\theta 1) \\ 1 \end{pmatrix} $$

Para el elemento 1 de los vectores que representa a X le sumaremos $\ell 2$ ya que esta variable estorba en la parte izquierda de la igualdad.

Para el lado derecho

$$ \begin{pmatrix} \mathrm{e1} + \mathrm{e2Cos}(\theta 3) \\ \mathrm{e2Sen}(\theta 3) \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.30} $$

Para el lado izquierdo

$$ \begin{pmatrix} \mathrm{PxCos}(\theta 1)\mathrm{Cos}(\theta 2) + \mathrm{PyCos}(\theta 2)\mathrm{Sen}(\theta 1) + (-\mathrm{Pz} + \mathrm{L1})\mathrm{Sen}(\theta 2) \\ (-\mathrm{Pz} + \mathrm{L1})\mathrm{Cos}(\theta 2) - \big(\mathrm{PxCos}(\theta 1) + \mathrm{PySen}(\theta 1)\big)\mathrm{Sen}(\theta 2) \\ \mathrm{Cos}([\theta 1]) - \mathrm{PxSen}([\theta 1]) \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.31} $$

Donde:

$$ \mathrm{X}_{\mathrm{D}} = \mathrm{e1} + \mathrm{e2Cos}(\theta 3) \tag{3.32} $$

$$ \mathrm{Y}_{D} = \mathrm{e2Sen}(\theta 3) \tag{3.33} $$

$$ \mathrm{Z}_{\mathrm{D}} = 0 \tag{3.34} $$

$$ \mathrm{X}_{I} = \mathrm{PxCos}(\theta 1)\mathrm{Cos}(\theta 2) + \mathrm{PyCos}(\theta 2)\mathrm{Sen}(\theta 1) + (-\mathrm{Pz} + \mathrm{L1})\mathrm{Sen}(\theta 2) \tag{3.35} $$

$$Y_I = (-Pz + L1)Cos(\theta 2) - \big(PxCos(\theta 1) + PySen(\theta 1)\big)Sen(\theta 2) \quad (3.36)$$

$$Z_I = Cos(\theta 1) - PxSen(\theta 1) \quad (3.37)$$

Posteriormete para cada uno de los lados se sumaran los cuadrados de X y Y

$$LD = Xd^2 + LDy^2 \quad (3.38)$$

$$e1^2 + e2^2 + 2e1e2Cos(\theta 3)$$

$$LI = LIx^2 + LIy^2 \quad (3.39)$$

$$(Pz - L1)^2 + (PxCos(\theta 1) + PySen(\theta 1))$$

Una vez obtenidad las expresiones de ambas partes de la igualdad

$$LD = LI$$

Se despeja el $Cos[\theta 3]$

$$Cos(\theta 3) = \frac{(Pz - L1)^2 - e1^2 - e2^2 + (PxCos(\theta 1) + PySen(\theta 1))^2}{2e1e2}$$

Una vez obtenida la expresion del $Cos[\theta 3]$ por medio de esta sacaremos el $Sen[\theta 3]$ se parte de la expresion

$$Cos^2 + Sen^2 = 1 \quad (3.40)$$

Se despeja al Sen y queda que

$$Sen = \sqrt{1 - Cos^2} \quad (3.41)$$

$$Sen(\theta 3) = \sqrt{1 - \frac{((Pz - L1)^2 - e1^2 - e2^2 + (PxCos(\theta 1) + PySin(\theta 1))^2)^2}{4e1^2e2^2}} \quad (3.42)$$

Por ultimo el valor
de $\theta 3$ sera dado por el Arcotangente2 en funcion de $Cos(\theta 3)$ y $Sen(\theta 3)$

$$\theta 3 = ArcTan2(Sen(\theta 3), Cos(\theta 3)) \quad (3.43)$$

$$Cos\ \boldsymbol{\theta}1 = \frac{Px}{\sqrt{Px^2 + Py^2}} \quad (3.16)$$

$$Sen\ \boldsymbol{\theta}1 = \frac{Py}{\sqrt{Px^2 + Py^2}} \tag{3.18}$$

$$\theta 3 = \text{ArcTan2}\left(\frac{(\frac{Px^2}{\sqrt{Px^2+Py^2}} + \frac{Py^2}{\sqrt{Px^2+Py^2}})^2 + (Pz - L1)^2 - e1^2 - e2^2}{2\ e1\ e2}, \sqrt{1 - \frac{((\frac{Px^2}{\sqrt{Px^2+Py^2}} + \frac{Py^2}{\sqrt{Px^2+Py^2}})^2 + (Pz - L1)^2 - e1^2 - e2^2)^2}{4\ e1^2\ e2^2}}\right) \tag{3.44}$$

Para conocer la distancia que tiene que recorrer el actuador lineal dentro del eslabon para obtener el desplazamiento deseado de $\theta 3$ se tiene la siguiente relacion.

$$\theta 3 = f(d) \tag{3.45}$$

Donde

d = Es la carrera de desplazamiento necesaria del husillo para llegar al angulo $\theta 3$

ℓ_T = Longitud de carrera del tornillo

$\Psi =$ *Angulo de desplazamiento total*

$$d = \frac{\theta_3\ \ell_T}{\Psi} \tag{3.46}$$

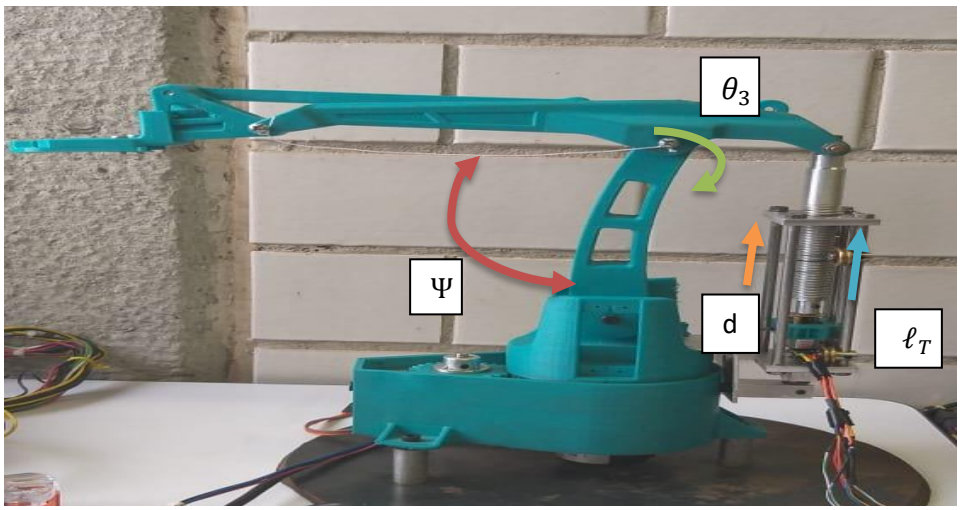


Figura 3-34 Representación de las variables de la ecuación 3.46 en el manipulador

Para comparar teoricamente estos resultados, se utilizó la cinematica donde se hizo la deducción de la ecuacion la cual brindo los parametros . Se utiliza la ecuacion (3.46) para obtener la Tabla 3-12.

$$d = \frac{\theta_3\ \ell_T}{\Psi} \tag{3.47}$$

Se calculan los parámetros de la cinemática inversa utilizando la ecuación (3.46)

Se tiene los siguientes parámetros

ℓ_T =0.04m

Ψ= 40°

Si se quiere que el desplazamiento angular de la articulación θ_3 sea 10°, se sustituyen las variables en la ecuación (3.46):

$$d = \frac{10° \ (0.04)}{40°}$$

d= 1 cm

La distancia que tiene que recorrer el actuador para que el desplazamiento angular de θ_3 sea 10° debe de ser de 1 cm

Tabla 3-12 Cinemática inversa del manipulador

Cinemática inversa	Carrera del actuador	Desplazamiento angular del brazo del manipulador
	1 cm	10°
	2 cm	20°
	3 cm	30°
	4 cm	40°

En la Tabla 3-13 se observa una comparación de los datos obtenidos por la teoría de la cinematica inversa y las mediciones realizadas al angulo de desplazamiento del brazo del robot por cada centimetro de carrera del actuador.

Tabla 3-13 Comparación de los datos obtenidos de la Cinemática inversa y el actuador lineal

Cinematica Inversa	Cinematica Inversa	Actuador	Actuador
1 cm	10 °	1 cm	10°
2 cm	20°	2 cm	20°
3 cm	30°	3 cm	30°
4 cm	40°	4 cm	40°

Como se puede notar el desplazamiento angular es similar a la teoria de la cinematica inversa al momento de medir la carrera del actuador que esta implementado en el manipulador serial.

4 Capítulo 4

4.1 Resultados

En este capítulo se reportan los datos obtenidos a partir de las pruebas realizadas a los prototipos de actuador lineal por cuerda, las tablas generadas del capítulo 3 muestran las características que mejoradas a partir del prototipo inicial del actuador por cuerdas, la implementación del prototipo final dentro de una articulación de un manipulador serial también se reporta y se documenta en tablas las cuales fueron comparadas con los conceptos de la cinemática inversa la cual servirá como un punto de comparación y saber cuánto diverge los resultados de la teoría con respecto al de la práctica.

4.2 Resumen

En este capítulo se reportan los resultados obtenidos aplicando los conceptos teóricos y las mediciones realizadas a los actuadores por cuerda y su desempeño en la aplicación de una articulación de un manipulador serial.

4.3 Alcances

A partir que los datos obtenidos del capítulo 3 se puede generar una Tabla comparativa de los parámetros a partir del prototipo inicial. El Prototipo aluminio1 y el prototipo final, así como los movimientos generados en el eslabón del manipulador con respecto a la implementación del prototipo final del actuador por cuerdas.

En el siguiente apartado se mostrarán las tablas obtenidas de los parámetros a partir de las mediciones de los actuadores

4.3.1 Tablas de parámetros de actuadores

En el capítulo 3 se obtuvieron los parámetros medidos por instrumentos de precisión (tacómetro, encoder, dinamómetro) y otros por medio de los conceptos del marco teórico de los actuadores, cada prototipo fue evaluado por individual, pasando por tres etapas, la primera consta de un actuador lineal por cuerda impreso por manufactura aditiva, otro manufacturado en aluminio que posteriormente se modificó para obtener el prototipo final, cada uno basados con la misma configuración de husillo propuesto por la empresa *Rise Robotics*. Se muestran las tablas con los respectivos prototipos.

4.3.1.1 Prototipo inicial actuador lineal por cuerda.

El diseño inicial del prototipo de actuador por cuerdas permitió conocer el movimiento generado por el movimiento rotatorio del actuador induciendo un movimiento lineal y validar el principio físico.

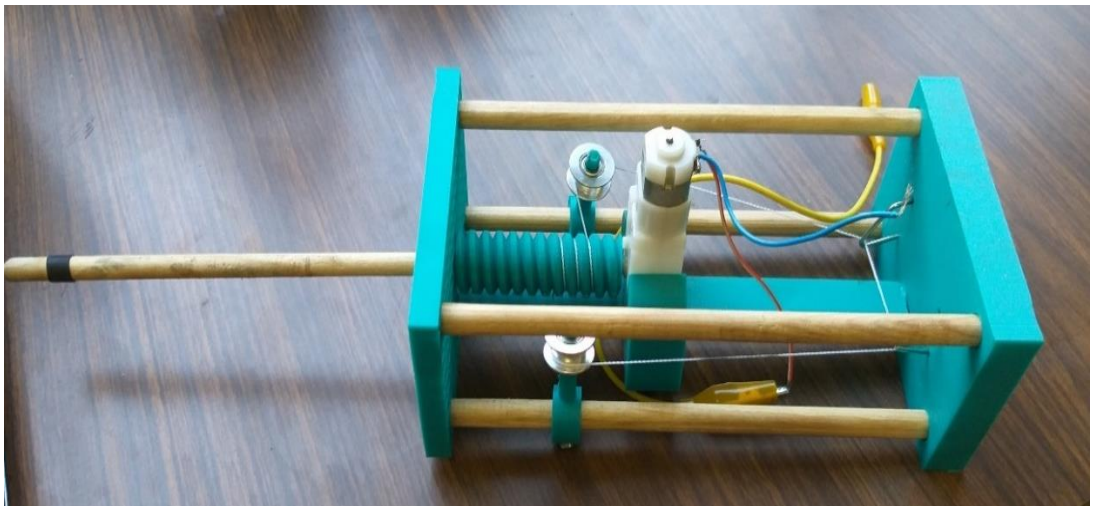


Figura 3-8 Prototipo actuador lineal inicial.

La Tabla3-4 presenta los parámetros obtenidos del prototipo inicial, estos valores permiten tener una perspectiva del funcionamiento del actuador para estudiar el funcionamiento físico del husillo induciendo el movimiento lineal del actuador.

Tabla 3-4 Tabla de parámetros del actuador inicial

Parámetros	**Actuador lineal por cuerdas (prototipo inicial)**
Longitud del husillo	0.01 m
Diámetro del husillo	0.02 m
Carrera del husillo	0.038 m
Velocidad promedio del actuador	$0.00314882\frac{m}{s}$
Velocidad angular del husillo	85 RPM
Tensión de la cuerda	52.95 N
Fuerza axial máxima del actuador	0.5 N
Torque máximo del actuador	5.4kgf-cm 0.054 kgf -m
Trabajo del actuador	0.5292 Joule
Potencia del actuador	$0.0438\ watts$
Consumo de energía del actuador	6 V

4.3.1.2 Prototipo aluminio 1

El diseño del prototipo de aluminio 1 fue manufacturado bajo el mismo diseño del prototipo inicial, cambiando las medidas del actuador para tener un actuador pequeño y fuerte que de su antecesor.

Figura 3-13 Prototipo 1 de actuador lineal de aluminio

Los datos obtenidos en la Tabla 3-6 muestran los parámetros como el torque, la potencia y el trabajo, por lo que estos parámetros sirven como una base para el diseño de futuros actuadores lineales por cuerda.

Tabla 3-6 Tabla de Parámetro de actuador aluminio 1

Parámetros	**Actuador lineal por cuerdas (prototipo aluminio inicial)**
Longitud del husillo	0.015 m
Diámetro del husillo	0.02 m
Carrera del husillo	0.01 m
Velocidad promedio del actuador	$0.01024187 \frac{m}{s}$
Velocidad angular nominal del actuador	3000 RPM
Tensión de la cuerda	5.88 N
Fuerza axial máxima del actuador	1 N
Torque máximo del motor	0.3 kgf-cm, 0.003 kgf-m
Trabajo del actuador	0.0294 Joule
Potencia del actuador	0.003 Watt
Consumo de energía del actuador	6-12 Volts, 1.6 A

4.3.1.3 Prototipo final del actuador

En la figura 3-14 se muestra el actuador donde se cambió el diámetro del husillo para mejorar la carrera, la relación de engranaje para mejorar la torsión del motor y el diseño de las poleas.

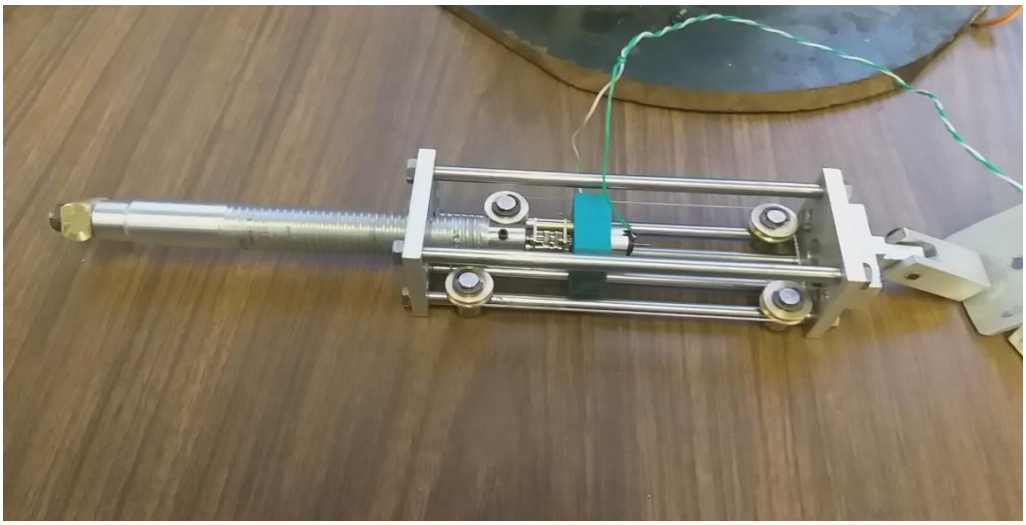


Figura 3-14 Prototipo final actuador lineal de aluminio

En la Tabla3-9 se pueden observar las características a diferentes velocidades consecuencia del voltaje de alimentación.

Tabla 3-9 Parámetros del actuador aluminio final

Parámetros	**Actuador línea con cuerdas (prototipo aluminio final)**
Longitud del husillo	0.07 m
Diámetro del husillo	0.0145 m
Carrera del husillo	0.045 m
Velocidad promedio del actuador	0.01939928 $\frac{m}{s}$ y 0.00087446 $\frac{m}{s}$
Velocidad angular del motor	32 RPM
Velocidad angular del motor con husillo (Tacómetro)	30 RPM
Velocidad angular del motor con husillo (encoder)	30.6 RPM
Paso del husillo	2.54 mm
Tensión de la cuerda	121.70 N
Fuerza axial máxima del actuador	1.8 N
Torque máximo del actuador	9 kgf-cm 0.09 kgf-m
Trabajo del motor	0.882 joule
Potencia del motor	$0.038 Watt$ Y $0.017 Watt$
Consumo de energía del actuador	6-12 Volts, 1.6 A

Los parámetros obtenidos en las tablas (3-4, 3-6, 3-9) indican las características que tiene cada actuador con respecto al desempeño mecánico que poseen. La fuerza a las carga en este primer

actuador es de 200 gr, y se observa que los motores tienden a perder fuerza debido a la tensión de la cuerda.

La Tabla 4-1 se puede apreciar los datos obtenidos de los actuadores y sus prototipos (en algunas casillas se marca “no aplica” debido a que las pruebas para esos prototipos eran innecesarios en la precisión del dato sé que obtiene).

Tabla 4-1 Tabla de parámetros de los actuadores por cables.

Parámetros	Prototipo inicial	Prototipo aluminio 1	Prototipo final
Longitud del husillo	0.01 m	0.015 m	0.07 m
Diámetro del husillo	0.02 m	0.02 m	0.0145 m
Carrera del husillo	0.038 m	0.01 m	0.045 m
Velocidad promedio del actuador	$0.00314882\frac{m}{s}$	$0.01024187\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	$0.01939928\ \frac{m}{s}$ y $0.00087446\ \frac{m}{s}$
Velocidad angular del motor	32 RPM	32 RPM	32 RPM
Velocidad angular del motor con husillo (Tacómetro)	No aplica	No aplica	30 RPM
Velocidad angular del motor con husillo (encoder)	No aplica	No aplica	30.6 RPM
Paso del husillo	No aplica	No aplica	2.54 mm
Tensión de la cuerda	52.95 N	5.88 N	121.70 N
Fuerza axial máxima del actuador	0.5 N	1 N	1.8 N
Torque máximo del actuador	5.4kgf-cm 0.054 kgf -m	0.3 kgf-cm, 0.003 kgf-m	9 kgf-cm 0.09 kgf-m
Trabajo del motor	0.5292 Joule	0.0294 Joule	0.882 joule
Potencia del motor	0.0438 $watts$	0.003 Watt	$0.038Watt$ Y $0.017Watt$
Consumo de energía del actuador	6-12 Volts, 1.6 A	6-12 Volts, 1.6 A	6-12 Volts, 1.6 A

4.3.2 Parámetros de la implementación en el eslabón del manipulador serial.

Una vez obtenidos los parámetros del actuador lineal por cuerda se implementó en la articulación del manipulador serial, se puso a prueba el desempeño del actuador en el movimiento del eslabón del manipulador serial.

Figura 4-1 Angulo inicial del brazo del manipulador con el actuador implementado

En la Figura 4-1 se aprecia el desplazamiento angular total del manipulador al término de la carrera del actuador lineal por cuerdas.

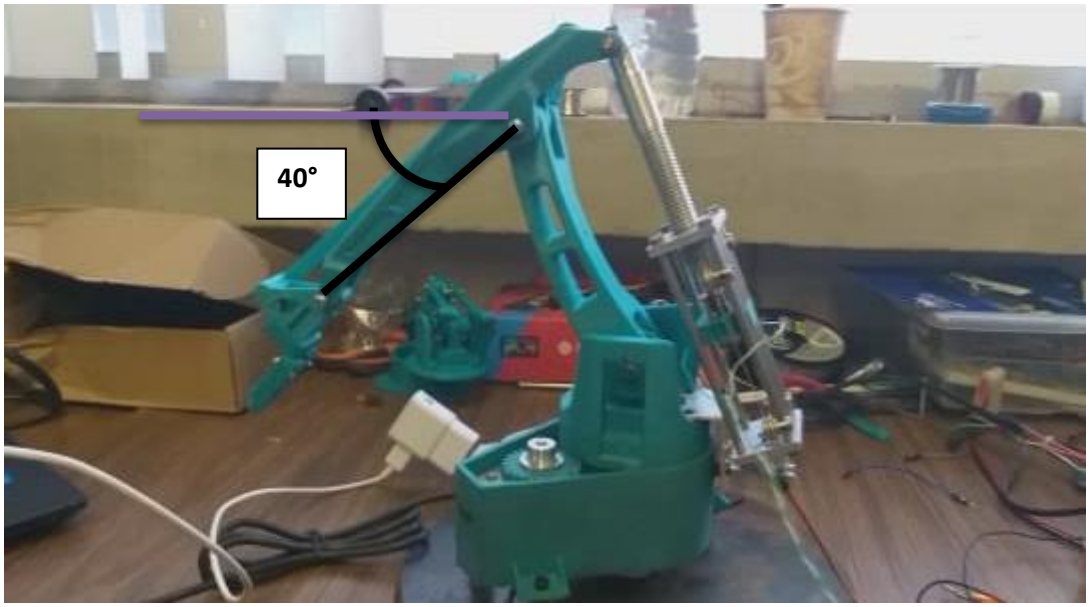


Figura 4-2 Angulo Final del brazo del manipulador con el actuador implementado

En la Tabla3-10 se puede comparar la distancia recorrida del actuador y la influencia que tiene en el desplazamiento angular del robot manipulador.

Tabla 3-10 Movimiento del brazo inducido por la carrera del actuador lineal con cuerdas

Tablade movimiento del brazo accionado por el actuador		
	Carrera del Actuador	Desplazamiento angular del brazo del Manipulador
Carrera centímetro de desplazamiento lineal por movimiento angular.	1 cm	10°
	2 cm	20°
	3 cm	30°
Carrera total centímetro de desplazamiento lineal por movimiento angular.	4 cm	40°
Velocidad de actuación suministrando 5 Volts.	$0.08744\ \frac{cm}{s}$	
Velocidad de actuación suministrando 12 Volts	$1.9399\ \frac{cm}{s}$	

En la Tabla3-12 se escriben los datos obtenidos a partir de aplicar los conceptos teóricos de la cinemática inversa del manipulador con respecto a lo grados desplazados y movimiento lineal (medido en centímetros) la carrera que tiene que dar el actuador lineal para mover el eslabón del manipulador. La ecuación (3.46) fue utilizada para la obtención de la Tabla 3-12.

Tabla 3-12 Cinemática inversa del manipulador

Cinemática inversa	Carrera del actuador	Desplazamiento angular del brazo del manipulador
	1 cm	10°
	2 cm	20°
	3 cm	30°
	4 cm	40°

La Tabla3-12 muestra la comparativa de los resultados a partir de la cinemática inversa y las mediciones de la carrera del actuador y el desplazamiento angular del eslabón.

Tabla 3-13 Comparación de los datos obtenidos de la Cinemática inversa y el actuador lineal

Cinematica Inversa	Cinematica Inversa	Actuador	Actuador
1 cm	10 °	1 cm	10°
2 cm	20°	2 cm	20°
3 cm	30°	3 cm	30°
4 cm	40°	4 cm	40°

4.4 Discusión

El estudio y análisis de los actuadores lineales por cuerdas ayudan a visualizar el comportamiento de diferentes configuraciones de actuadores lineales para el movimiento de sistemas mecánicos. El banco de pruebas presentado en este trabajo de tesis, ha servido para observar y analizar el desempeño de los actuadores lineales por cuerda en la implementación de un manipulador serial.

Este trabajo ha permitido observar el desempeño que tiene un actuador no convencional con una configuración distinta a los actuadores convencionales, obteniendo parámetros (fuerza, velocidad, trabajo, potencia, tensión en la cuerda).

Al tener un primer acercamiento al prototipo de actuador por cuerdas e implementarlo en un manipulador que está orientado a ser un banco de pruebas para la enseñanza de la materia de instrumentación, control y robótica, los parámetros obtenidos del actuador lineal por cuerdas fueron satisfactorios al poder comprobar que el movimiento inducido por el actuador podía desplazar angularmente la articulación del eslabón.

Los rangos de movimiento de actuadores induciendo un desplazamiento angular en uno de los eslabones del manipulador fueron medidos y posteriormente se compararon con los resultados obtenidos por la cinemática inversa teniendo una similitud en los resultados de la práctica y la teoría.

Cabe resaltar que la fuerza obtenida de los prototipos de actuadores lineales por cuerda fabricados para el presente trabajo, tienen la capacidad de soportar pesos de hasta 200 gr s. Sin embargo, ya que por el diseño del actuador se encuentra una descompensación en la tensión de la cuerda perdiendo parte de la fuerza del motor. Este tipo de observaciones permite evaluar y mejorar del diseño del actuador, permitiendo optimizar y actualizar los diseños con el fin de superar a los actuadores convencionales. Para trabajos futuros se espera rediseñar la configuración del sistema de poleas para una mejor transmisión de la tensión de la cuerda, utilizar motores de mayor torque, para tener mayor fuerza en el husillo y su implementación en un manipulador con dimensiones mayores a las del banco de pruebas , para practicas dirigidas a proyectos de industria 4.0

5 Capítulo 5

5.1 Conclusiones

El presente trabajo de investigación se enfocó en la caracterización de un actuador lineal no convencional y su implementación en un manipulador serial que servirá de banco de pruebas para la aplicación de la enseñanza de la materia de instrumentación y control en la carrera de Ingeniería Mecánica e Industrial en FES Aragón.

Los actuadores no convencionales fortalecen el aprendizaje en la materia de instrumentación y control, robótica, ya que la configuración del actuador está bajo un principio físico diferente a los vistos en los actuadores convencionales permitiendo estudiar, desarrollar y aplicar dispositivos actuadores nuevos y diferentes a los convencionales.

La meta de la investigación presente es comprobar la efectividad de estos actuadores midiendo cada uno de sus parámetros y aplicándolos en un banco de pruebas para observar su comportamiento como un actuador lineal, al ser este un primer acercamiento en la configuración de los actuadores por cuerda, el desempeño obtenido del actuador desarrollado para el presente trabajo permite ejecutar un desplazamiento angular en el eslabón del manipulador que esta influenciado por el movimiento lineal del actuador por cuerdas, se observa que por cada centímetro de carrera del actuador se obtiene 10° de desplazamiento angular del eslabón y la carga máxima permitida por este modelo 200 gr.

Se espera para trabajos futuros cambiar la configuración de las poleas y el husillo, obteniendo nuevos modelos de actuadores por cuerdas que posteriormente desempeñen una mayor capacidad de trabajo y que sirva para aplicaciones que puedan beneficiar no solo a la enseñanza de la materia de instrumentación, control y robótica, si no para aplicaciones en automatización y aplicaciones orientadas a la industria 4.0.

6 Bibliografía

Poschenrieder, C. and J. Barceló (2013). Aluminum in Plants. Encyclopedia of Metalloproteins. R. H. Kretsinger, V. N. Uversky and E. A. Permyakov. New York, NY, Springer New York**:** 34-38.

Ramírez, L. G. C., G. S. A. Jiménez and J. M. Carreño (2014). Sensores y Actuadores, Grupo Editorial Patria.

Barrientos, A. (1997). Fundamentos de robótica, McGraw-Hill.

Chiba, S. (2014). Dielectric Elastomers. Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives. K. Asaka and H. Okuzaki. Tokyo, Springer Japan**:** 183-195.

Haines, C. S. (2015). Artificial muscles from fishing line and sewing thread, ProQuest LLC.

Haines, C. S., M. D. Lima, N. Li, G. M. Spinks, J. Foroughi, J. D. W. Madden, S. H. Kim, S. Fang, M. J. De Andrade, F. Goktepe, O. Goktepe, S. M. Mirvakili, S. Naficy, X. Lepro, J. Oh, M. E. Kozlov, S. J. Kim, X. Xu, B. J. Swedlove, G. G. Wallace and R. H. Baughman (2014). "Artificial muscles from fishing line and sewing thread." Science **343**(6173): 868-872.

(2009). Actuator. Encyclopedia of Neuroscience. M. D. Binder, N. Hirokawa and U. Windhorst. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 53-53.

Acome, E., S. K. Mitchell, T. G. Morrissey, M. B. Emmett, C. Benjamin, M. King, M. Radakovitz and C. Keplinger (2018). "Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance." Science 359(6371): 61-65.

Barrientos, A. (1997). Fundamentos de robótica, McGraw-Hill.

Bauer, S. (2014). Dielectric Elastomers. Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials. S. Kobayashi and K. Müllen. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 1-9.

Campbell, S. (2018). "The Robotics Revolution Will Be Soft: Soft Robotics Proliferate-Along with Their Sources of Inspiration." IEEE Pulse 9(3): 19-24.

Chen, A., R. Yin, L. Cao, C. Yuan, H. K. Ding and W. J. Zhang (2017). Soft robotics: Definition and research issues. 2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP).

Chiba, S. (2014). Dielectric Elastomers. Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives. K. Asaka and H. Okuzaki. Tokyo, Springer Japan: 183-195.

Gonzalez-Jimenez, A. R. (2015). Elastómeros dieléctricos para su uso como actuadores o músculos artificiales. Plásticos Modernos. Vol. 109.: 14-17.

Haines, C. S. (2015). Artificial muscles from fishing line and sewing thread, ProQuest LLC.

Haines, C. S., M. D. Lima, N. Li, G. M. Spinks, J. Foroughi, J. D. W. Madden, S. H. Kim, S. Fang, M. J. De Andrade, F. Goktepe, O. Goktepe, S. M. Mirvakili, S. Naficy, X. Lepro, J. Oh, M. E. Kozlov, S. J. Kim, X. Xu, B. J. Swedlove, G. G. Wallace and R. H. Baughman (2014). "Artificial muscles from fishing line and sewing thread." Science 343(6173): 868-872.

Haus, H., T. A. Kern, M. Matysek and S. Sindlinger (2014). Actuator Design. Engineering Haptic Devices: A Beginner's Guide. C. Hatzfeld and T. A. Kern. London, Springer London: 253-371.

Joshua, S., M. Yiğit, T. Michael and V. Bram (2016). "What Is the Path Ahead for Soft Robotics?" Soft Robotics 3(4): 159-160.
Mirvakili, S. M. and I. W. Hunter (2016). Bending artificial muscle from nylon filaments. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2016, March 21, 2016 - March 24, 2016, Las Vegas, NV, United states, SPIE.
Mirvakili, S. M., A. R. Ravandi, I. W. Hunter, C. S. Haines, N. Li, J. Foroughi, S. Naficy, G. M. Spinks, R. H. Baughman and J. D. W. Madden (2014). Simple and strong: Twisted silver painted nylon artificial muscle actuated by Joule heating. Electroactive Polymer Actuators and Devices, EAPAD 2014, March 10, 2014 - March 13, 2014, San Diego, CA, United states, SPIE.
Mosadegh, B., P. Polygerinos, C. Keplinger, S. Wennstedt, R. F. Shepherd, U. Gupta, J. Shim, K. Bertoldi, C. J. Walsh and G. M. Whitesides (2014). "Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly." Advanced Functional Materials 24(15): 2163-2170.
Popović, M. B. (2013). Biomechanics and robotics, Pan Stanford.
Ramírez, L. G. C., G. S. A. Jiménez and J. M. Carreño (2014). Sensores y Actuadores, Grupo Editorial Patria.
Rus, D. and M. T. Tolley (2015). "Design, fabrication and control of soft robots." Nature 521: 467.
Wang, L. and F. Iida (2015). "Deformation in soft-matter robotics: A categorization and quantitative characterization." IEEE Robotics & Automation Magazine 22(3): 125-139.
Wu, L., M. J. d. Andrade, R. S. Rome, C. Haines, M. D. Lima, R. H. Baughman and Y. Tadesse (2015). Nylon-muscle-actuated robotic finger. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, SPIE.
Wu, L., M. J. De Andrade, R. S. Rome, C. Haines, M. D. Lima, R. H. Baughman and Y. Tadesse (2015). Nylon-muscle-actuated robotic finger. Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2015, March 9, 2015 - March 12, 2015, San Diego, CA, United states, SPIE.
Yang, D., M. S. Verma, J.-H. So, B. Mosadegh, C. Keplinger, B. Lee, F. Khashai, E. Lossner, Z. Suo and G. M. Whitesides (2016). "Buckling Pneumatic Linear Actuators Inspired by Muscle." Advanced Materials Technologies 1(3): 1600055.
Yin, H., J. Zhou, J. Li and V. S. Joseph (2018). "Fabrication and Properties of Composite Artificial Muscles Based on Nylon and a Shape Memory Alloy." Journal of Materials Engineering and Performance 27(7): 3581-3589.

Apéndice 1 Arduino

Código para el sensor de velocidad y control del driver del motor

```
const int sensor=2;

int estado=0;

int contador=0;

int IN1=8;

int IN2=7;

int ENA=9;

int estado2;


void setup() {

  // put your setup code here, to run once:

  Serial.begin(9600);

  pinMode(sensor,INPUT);

 pinMode (IN1, OUTPUT);

 pinMode (IN2, OUTPUT);

 pinMode (ENA, OUTPUT);

}


void loop() {

  // put your main code here, to run repeatedly:

  estado=digitalRead(sensor);

  Serial.println (estado);

  if(estado==LOW){

     digitalWrite(IN1, LOW);

  digitalWrite(IN2, HIGH);

  analogWrite (ENA, 255);

  }

  if(estado==HIGH){
```

```
  digitalWrite(IN1, HIGH);
  digitalWrite(IN2, LOW);
  analogWrite (ENA, 255);
    }
   }
```

Código para el conteo de RPM por interrupción

```
volatile int contador =0;
int IN1=8;
int IN2=7;
int ENA=9;

 void setup()
 {
 Serial.begin (57600);
attachInterrupt(0,interrupcion0,RISING);
 pinMode (IN1, OUTPUT);
 pinMode (IN2, OUTPUT);
 pinMode (ENA, OUTPUT);
 }

void loop ()
{
delay(999);

  Serial.print(contador*30);
  Serial.println(" RPM");
  contador=0;

void  interrupcion0()
  {
 contador++;
```

Apendice 2 Mathematica

Código Mathematica para cinemática directa

Funciones

```
Tx[x_]:=
 {
  {1,0,0,x},
  {0,1,0,0},
  {0,0,1,0},
  {0,0,0,1}
  }

Ty[y_]:=
 {
  {1,0,0,0},
  {0,1,0,y},
  {0,0,1,0},
  {0,0,0,1}
  }

Tz[z_]:=
 {
  {1,0,0,0},
  {0,1,0,0},
  {0,0,1,z},
  {0,0,0,1}
  }

Qz[θz_]:=
 {
  {Cos[θz],-Sin[θz],0,0},
  {Sin[θz],Cos[θz],0,0},
  {0,0,1,0},
  {0,0,0,1}
  }

Qy[θy_]:=
 {
  {Cos[θy],0,Sin[θy],0},
  {0,1,0,0},
  {-Sin[θy],0,Cos[θy],0},
  {0,0,0,1}
```

```
 }
Qx[θx_]:=
 {
  {1,0,0,0},
  {0,Cos[θx],-Sin[θx],0},
  {0,Sin[θx],Cos[θx],0},
  {0,0,0,1}
  }

n={0,0,0,1};
T3D[P_]:={P[[1]],P[[2]],P[[3]]}
Q[θ_,d_,a_, α_]:=Qz[θ].Tz[d].Tx[a].Qx[α]
```

$$Q[\theta, d, a, \alpha]//\text{MatrixForm}$$

$$\begin{pmatrix} \text{Cos}[\theta] & -\text{Cos}[\alpha]\text{Sin}[\theta] & \text{Sin}[\alpha]\text{Sin}[\theta] & a\text{Cos}[\theta] \\ \text{Sin}[\theta] & \text{Cos}[\alpha]\text{Cos}[\theta] & -\text{Cos}[\theta]\text{Sin}[\alpha] & a\text{Sin}[\theta] \\ 0 & \text{Sin}[\alpha] & \text{Cos}[\alpha] & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Cinemática Directa

$$\overset{0}{a}_{1} = Q[\theta 1, \ell 1, 0, -90°];$$

$$\overset{1}{a}_{2} = Q[\theta 2, 0, \ell 2, 0];$$

$$\overset{2}{a}_{3} = Q[\theta 3, 0, \ell 3, 0];$$

$$\overset{0}{a}_{2} = \overset{0}{a}_{1}.\overset{1}{a}_{2} \,//\, \text{FullSimplify}$$ simplifica completamente ;

$$\overset{0}{a}_{3} = \overset{0}{a}_{2}.\overset{2}{a}_{3} \,//\, \text{FullSimplify}$$ simplifica completamente ;

$$\overset{0}{a}_{3}.n$$ //MatrixForm

$$\begin{pmatrix} \text{Cos}[\theta 1](\ell 2\text{Cos}[\theta 2] + \ell 3\text{Cos}[\theta 2 + \theta 3]) \\ (\ell 2\text{Cos}[\theta 2] + \ell 3\text{Cos}[\theta 2 + \theta 3])\text{Sin}[\theta 1] \\ \ell 1 - \ell 2\text{Sin}[\theta 2] - \ell 3\text{Sin}[\theta 2 + \theta 3] \\ 1 \end{pmatrix}$$

Vector de Posición

$$X = \overset{0}{a}_{3}[\![1, 4]\!]$$

Y=$\overset{0}{a}_{3}[[2,4]]$

Z=$\overset{0}{a}_{3}[[3,4]]$

X=Cos[θ1](ℓ2Cos[θ2] + ℓ3Cos[θ2 + θ3])

Y= (ℓ2Cos[θ2] + ℓ3Cos[θ2 + θ3])Sin[θ1]

Z= ℓ1 − ℓ2Sin[θ2] − ℓ3Sin[θ2 + θ3]

Código para la cinámica inversa

Funciones

Vector homogéneo

$$f = \{x, y, z, 1\};$$

Definición de matrices de transformación

```
Qx[θx_]:={
  {1,0,0,0},
  {0,Cos[θx], -Sin[θx],0},
  {0,Sin[θx], Cos[θx],0},
  {0,0,0,1}
  };

Qy[θy_]:={
  {Cos[θy], 0,Sin[θy],0},
  {0,1,0,0},
  {-Sin[θy],0, Cos[θy],0},
  {0,0,0,1}
  };

Qz[θz_]:={
  {Cos[θz], -Sin[θz],0,0},
  {Sin[θz], Cos[θz],0,0},
  {0,0,1,0},
  {0,0,0,1}
  };
(*Matriz de Traslación*)
Txyz[x_,y_,z_]:={
 {1,0,0,x},
 {0,1,0,y},
```

```
 {0,0,1,z},
 {0,0,0,1}
 }

Tx[x_]:={
 {1,0,0,x},
 {0,1,0,0},
 {0,0,1,0},
 {0,0,0,1}
 }

Ty[y_]:=
 {
 {1,0,0,0},
 {0,1,0,y},
 {0,0,1,0},
 {0,0,0,1}
 }

Tz[z_]:=
 {
 {1,0,0,0},
 {0,1,0,0},
 {0,0,1,z},
 {0,0,0,1}
 }
T3D[P_]:={P[[1]], P[[2]], P[[3]]}
n={0,0,0,1};
Q[θ_,d_,a_, α_]:=Qz[θ].Tz[d].Tx[a].Qx[α]
Q[θ,d,a, α]//MatrixForm
```

$$\begin{pmatrix} \text{Cos}[\theta] & -\text{Cos}[\alpha]\text{Sin}[\theta] & \text{Sin}[\alpha]\text{Sin}[\theta] & a\text{Cos}[\theta] \\ \text{Sin}[\theta] & \text{Cos}[\alpha]\text{Cos}[\theta] & -\text{Cos}[\theta]\text{Sin}[\alpha] & a\text{Sin}[\theta] \\ 0 & \text{Sin}[\alpha] & \text{Cos}[\alpha] & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Thetha 3

$$\text{SumXYC} = X^2 + Y^2 + Z^2\text{//Expand//FullSimplify}$$

$$\ell 2^2 + \ell 3^2 + 2\ell 2\ell 3\text{Cos}[\theta 3]$$

$$\text{Ct3} = \text{Solve}[\text{SumXYC} - x^2 - y^2 - z^2 - \ell 1 == 0, \text{Cos}[\theta 3]]\text{//Flatten}$$

$$\{\text{Cos}[\theta 3] \to \frac{x^2 + y^2 + z^2 + \ell 1 - \ell 2^2 - \ell 3^2}{2\ell 2\ell 3}\}$$

$$C3 = \text{Cos}[\theta 3]/.\, Ct3$$

$$\frac{x^2 + y^2 + z^2 + \ell 1 - \ell 2^2 - \ell 3^2}{2\ell 2\ell 3}$$

$$S3 = \sqrt{1 - C3^2}$$

$$\sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2 + z^2 + \ell 1 - \ell 2^2 - \ell 3^2)^2}{4\ell 2^2 \ell 3^2}}$$

$$t3 = \text{ArcTan}[C3, S3]$$

$$\text{ArcTan}[\frac{x^2 + y^2 + z^2 + \ell 1 - \ell 2^2 - \ell 3^2}{2\ell 2\ell 3}, \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2 + z^2 + \ell 1 - \ell 2^2 - \ell 3^2)^2}{4\ell 2^2 \ell 3^2}}]$$

Theta 2

Ecx2 =X^2//Expand;
Ecy2=Y^2//Expand;
Ecz2=Z^2//TrigExpand
Sumx2y2= Ecx2+Ecy2//TrigExpand

$$\begin{aligned}
&\frac{\ell 2^2}{2} + \frac{\ell 3^2}{2} - \frac{1}{2}\ell 2^2 \text{Cos}[\theta 2]^2 + \ell 2\ell 3 \text{Cos}[\theta 3] - \ell 2\ell 3 \text{Cos}[\theta 2]^2 \text{Cos}[\theta 3] \\
&\quad - \frac{1}{2}\ell 3^2 \text{Cos}[\theta 2]^2 \text{Cos}[\theta 3]^2 + \frac{1}{2}\ell 2^2 \text{Sin}[\theta 2]^2 \\
&\quad + \ell 2\ell 3 \text{Cos}[\theta 3] \text{Sin}[\theta 2]^2 + \frac{1}{2}\ell 3^2 \text{Cos}[\theta 3]^2 \text{Sin}[\theta 2]^2 \\
&\quad + 2\ell 2\ell 3 \text{Cos}[\theta 2] \text{Sin}[\theta 2] \text{Sin}[\theta 3] \\
&\quad + 2\ell 3^2 \text{Cos}[\theta 2] \text{Cos}[\theta 3] \text{Sin}[\theta 2] \text{Sin}[\theta 3] + \frac{1}{2}\ell 3^2 \text{Cos}[\theta 2]^2 \text{Sin}[\theta 3]^2 \\
&\quad - \frac{1}{2}\ell 3^2 \text{Sin}[\theta 2]^2 \text{Sin}[\theta 3]^2
\end{aligned}$$

$$\frac{\ell 2^2}{2}+\frac{\ell 3^2}{2}+\frac{1}{2}\ell 2^2\text{Cos}[\theta 2]^2+\ell 2\ell 3\text{Cos}[\theta 3]+\ell 2\ell 3\text{Cos}[\theta 2]^2\text{Cos}[\theta 3]$$
$$+\frac{1}{2}\ell 3^2\text{Cos}[\theta 2]^2\text{Cos}[\theta 3]^2-\frac{1}{2}\ell 2^2\text{Sin}[\theta 2]^2$$
$$-\ell 2\ell 3\text{Cos}[\theta 3]\text{Sin}[\theta 2]^2-\frac{1}{2}\ell 3^2\text{Cos}[\theta 3]^2\text{Sin}[\theta 2]^2$$
$$-2\ell 2\ell 3\text{Cos}[\theta 2]\text{Sin}[\theta 2]\text{Sin}[\theta 3]$$
$$-2\ell 3^2\text{Cos}[\theta 2]\text{Cos}[\theta 3]\text{Sin}[\theta 2]\text{Sin}[\theta 3]-\frac{1}{2}\ell 3^2\text{Cos}[\theta 2]^2\text{Sin}[\theta 3]^2$$
$$+\frac{1}{2}\ell 3^2\text{Sin}[\theta 2]^2\text{Sin}[\theta 3]^2$$

$$\text{Solt2}=\text{Solve}[\{\text{Sumx2y2}-x^2-y^2==0,\text{Ecz2}-z-\ell 1==0\},\{\text{Cos}[\theta 2],\text{Sin}[\theta 2]\}]//\text{Simplify}//\text{Flatten}$$

C1=Cos[θ1]/.Solt1[[1]]
S1=Sin[θ1]/.Solt1[[2]]

$$\frac{\text{e1}x+\text{e2}x\text{Cos}[\theta 2]+\text{e2}y\text{Sin}[\theta 2]}{\text{e1}^2+\text{e2}^2+2\text{e1e2Cos}[\theta 2]}$$

$$\frac{\text{e1}y+\text{e2}y\text{Cos}[\theta 2]-\text{e2}x\text{Sin}[\theta 2]}{\text{e1}^2+\text{e2}^2+2\text{e1e2Cos}[\theta 2]}$$

$$\text{t1}=\text{ArcTan}[\text{C1},\text{S1}]$$

$$\text{ArcTan}\left[\frac{\text{e1}x+\text{e2}x\text{Cos}[\theta 2]+\text{e2}y\text{Sin}[\theta 2]}{\text{e1}^2+\text{e2}^2+2\text{e1e2Cos}[\theta 2]},\frac{\text{e1}y+\text{e2}y\text{Cos}[\theta 2]-\text{e2}x\text{Sin}[\theta 2]}{\text{e1}^2+\text{e2}^2+2\text{e1e2Cos}[\theta 2]}\right]$$

SIMULACIÓN

Datos

```
e1=175;
e2=150;
tf=20;
aa=20;
```

Trayectoria

$$\text{For}[t=0,t\le \text{tf},t+=1,$$

$$p=(10*(\frac{t}{\text{tf}})^3-15*(\frac{t}{\text{tf}})^4+6*(\frac{t}{\text{tf}})^5);$$

$$s[t]=\{2*\text{aa}*\text{Cos}[2*\text{Pi}*p]-\text{aa}*\text{Cos}[4*\text{Pi}*p],$$

$2 * aa * Sin[4 * Pi * p] - aa * Sin[4 * Pi * p] + 60,0\}$];

```
tablaXYZ=Table[{s[t][[1]],s[t][[2]], 0},{t,0,tf,1}];
Trayectoria=Line[tablaXYZ];
```

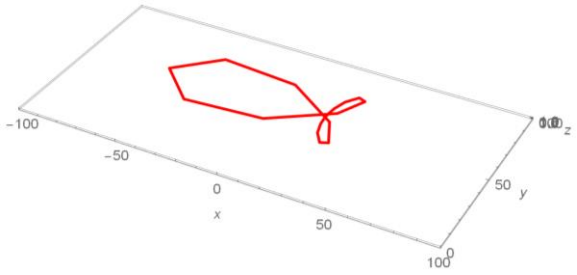
Graphics3D[

{AbsoluteThickness[2], RGBColor[1,0,0], Trayectoria},

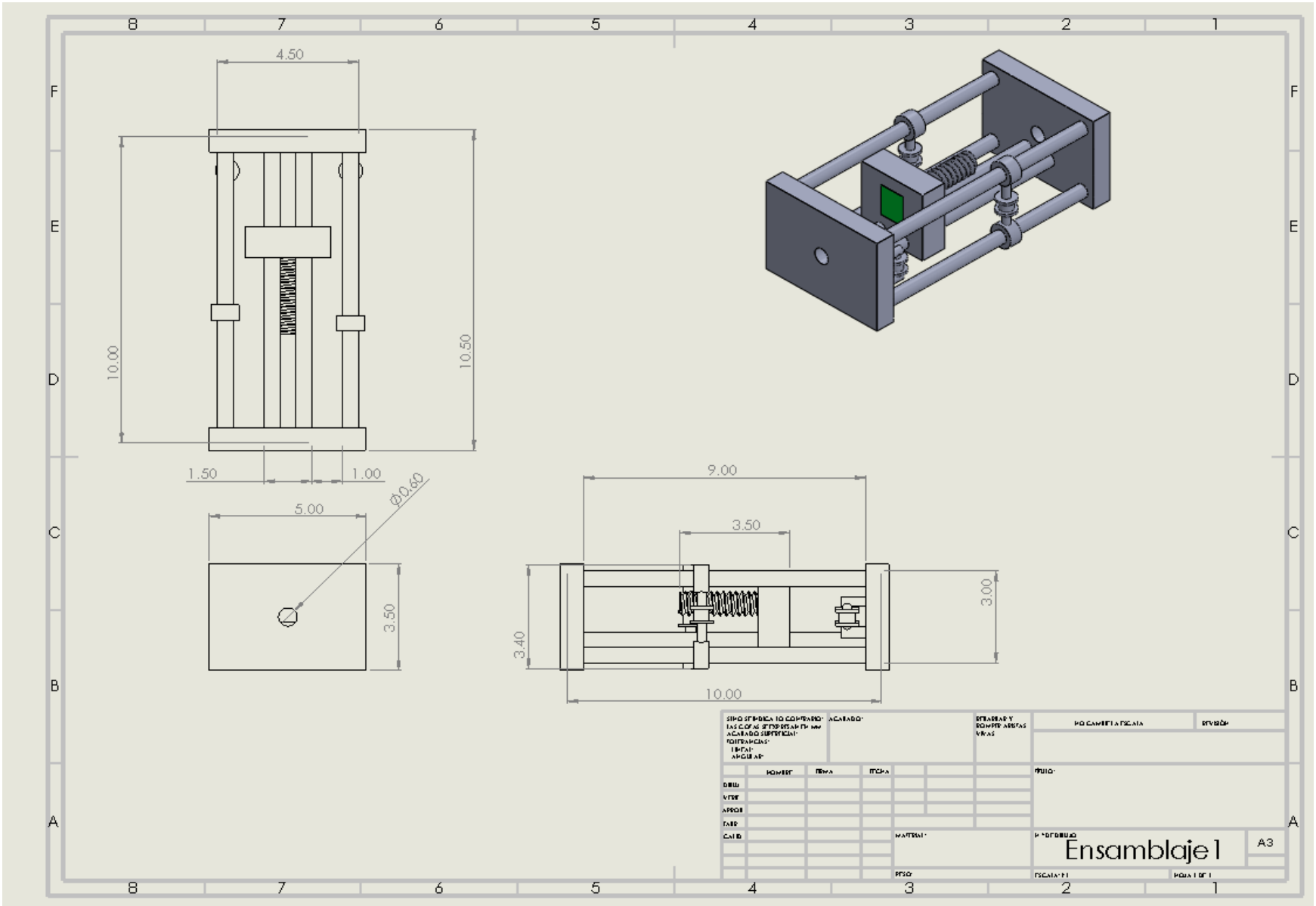
Axes → True, AxesLabel → $\{x, y, z\}$,

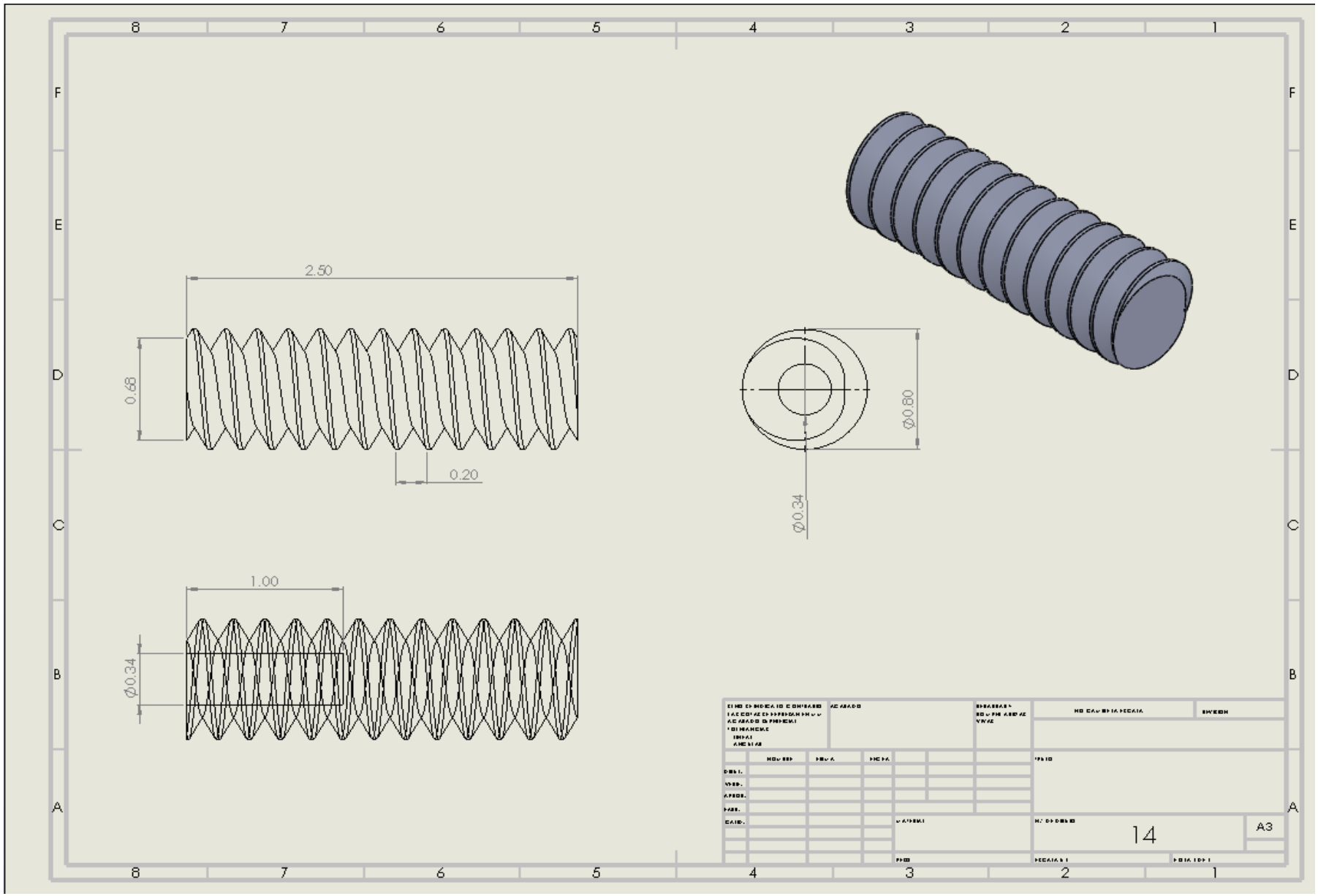
PlotRange → $\{\{-100,100\}, \{0,100\}, \{0,1\}\}$,

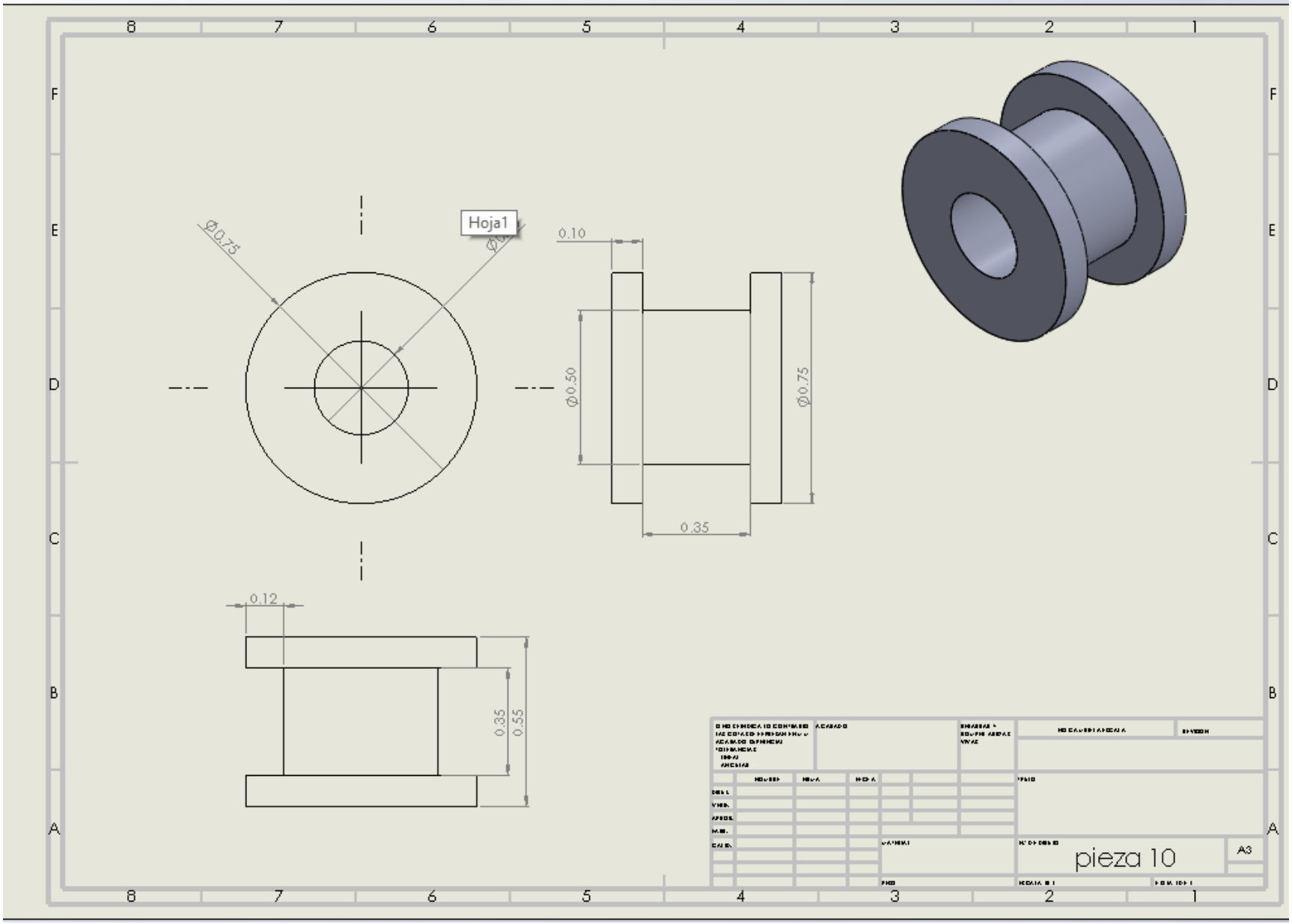
ImageSize → 400

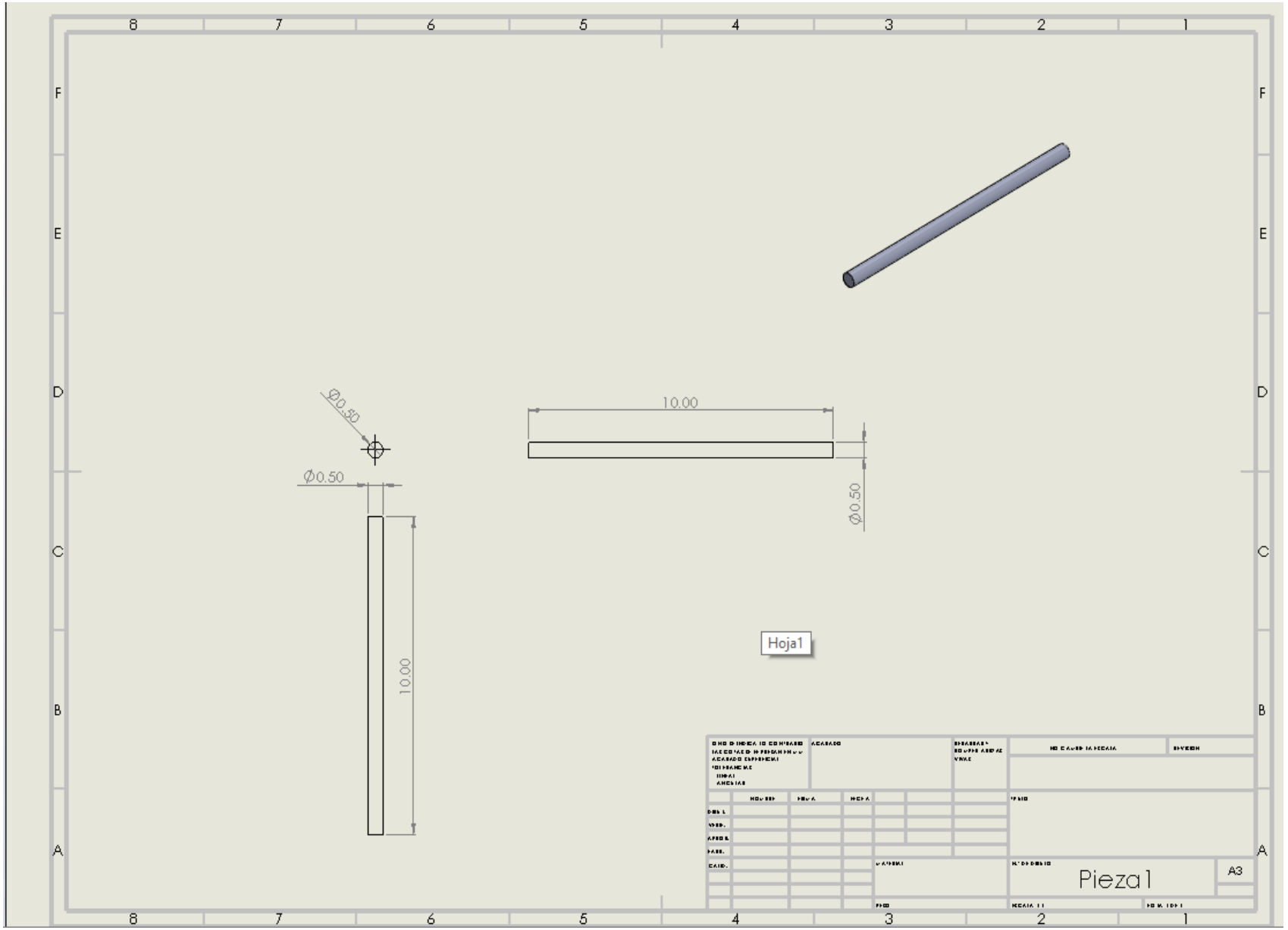


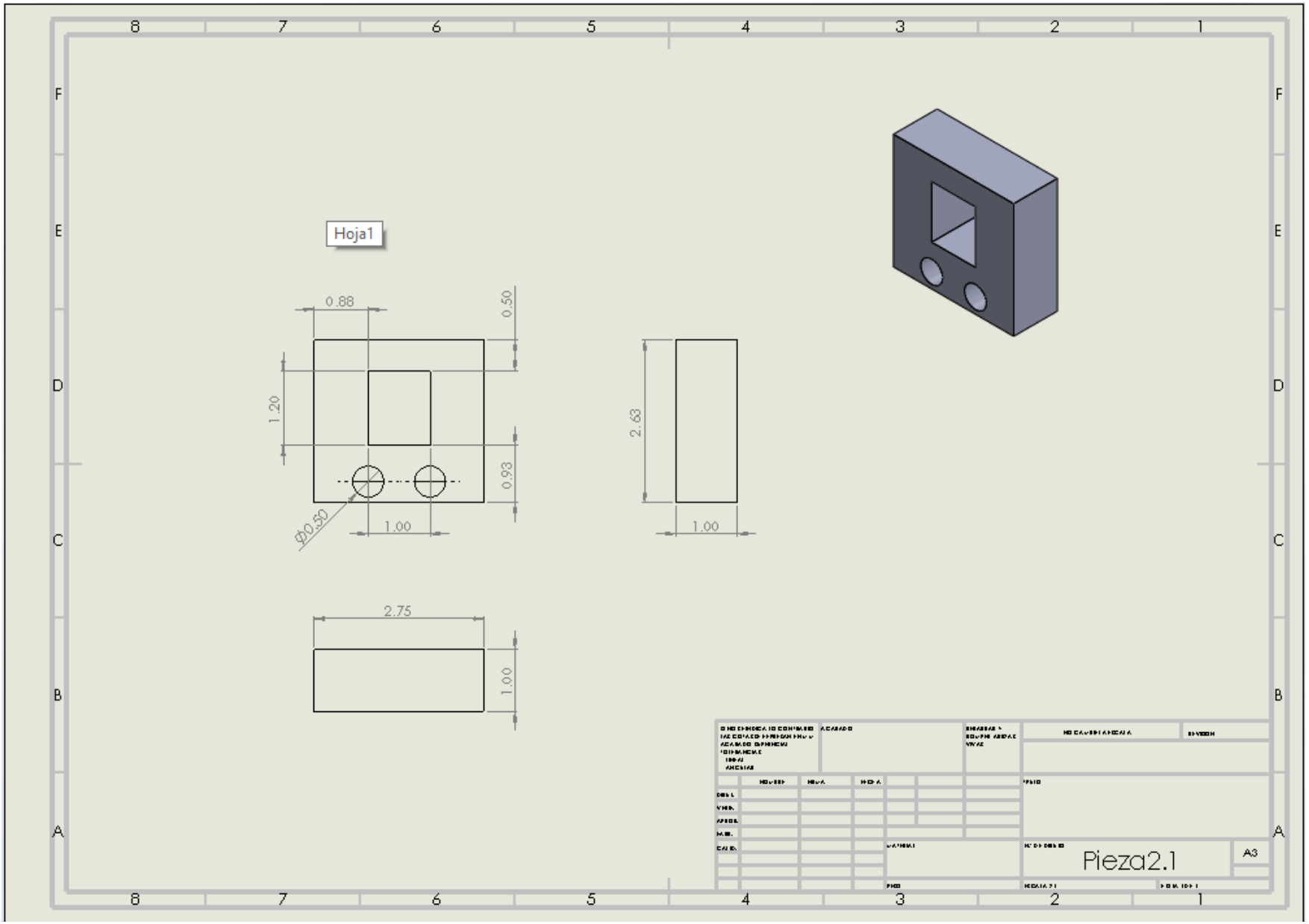
Apendice 3 Planos del actuador

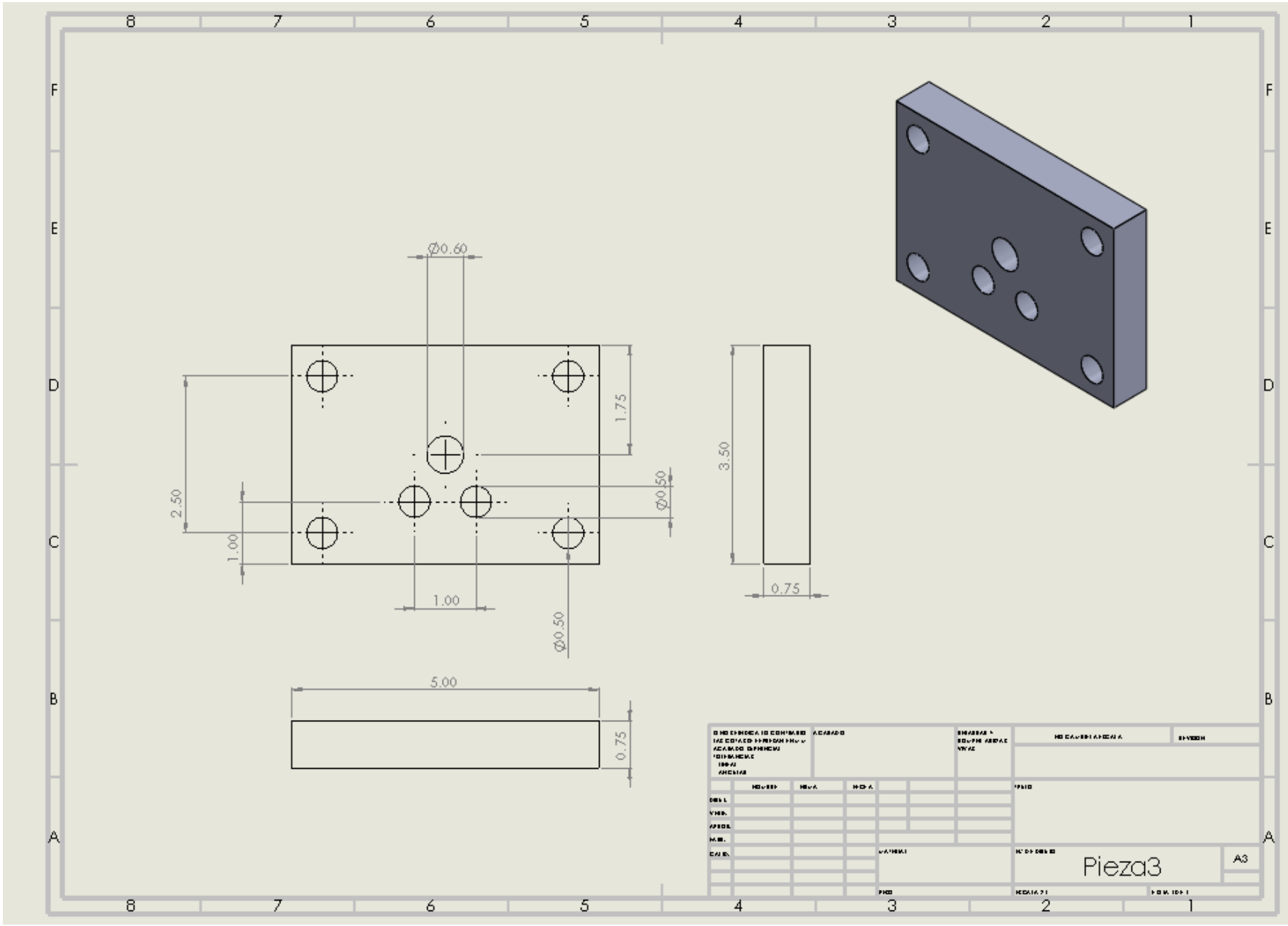

4.50
10.00
10.50
1.50
1.00
Ø0.60
5.00
3.50
9.00
3.50
3.40
3.00
10.00
Ensamblaje1
A3

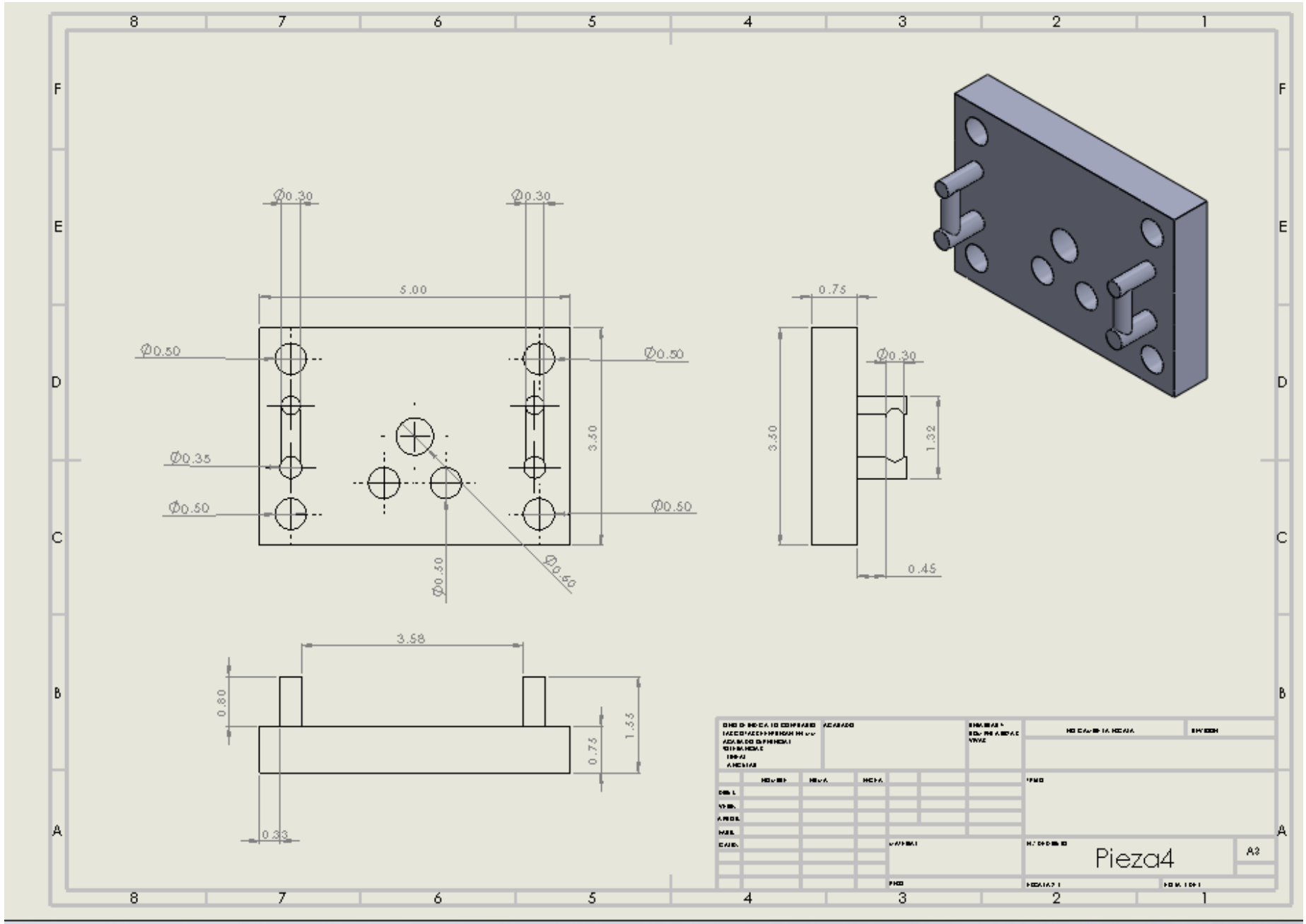

2.50
0.68
0.20
Ø0.80
Ø0.34
1.00
Ø0.34
14
A3


Hoja1
Ø0.75
0.10
Ø0.50
Ø0.75
0.35
0.12
0.35
0.55
pieza 10
A3


8
7
6
5
4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
Ø0.50
Ø0.50
10.00
10.00
Ø0.50
Hoja1
Pieza1
A3


Hoja1
0.88
0.50
1.20
0.93
Ø0.50
1.00
2.63
1.00
2.75
1.00
Pieza2.1
A3


Ø0.60
1.75
2.50
1.00
Ø0.50
1.00
Ø0.50
3.50
0.75
5.00
0.75
Pieza3
A3


Ø0.30
Ø0.30
5.00
Ø0.50
Ø0.50
Ø0.35
Ø0.50
Ø0.50
3.50
Ø0.30
Ø0.50
0.75
Ø0.30
3.50
1.32
0.45
3.58
0.80
1.55
0.75
0.33
Pieza4
A3

Apéndice 4 Articulo en congreso SOMIM 2019

Tema A3b Mecanismos y Robótica: (Instrumentación y robótica.)

"Implementación de un actuador lineal por cuerda en una articulación de un robot manipulador serial"

(Deje este espacio en blanco) *(Letra Times New Roman 14)*

(Deje este espacio en blanco) *(Times News Roman 12)*

(Deje este espacio en blanco) (Times New Roman 8)

R E S U M E N

Los actuadores lineales por cuerda, son actuadores de nueva generación, que funcionan en base a un mecanismo novedoso e inspirado en el molino chino o molino diferencial. La necesidad de caracterizar a estos actuadores, es generar un banco de pruebas para el fortalecimiento en la enseñanza en la asignatura de instrumentación y control, que permita a los alumnos de ingeniería, el acercamiento de forma física, práctica y teórica. En la introducción se presentan diferentes tipos de actuadores lineales, incluso los que se utilizan en la robótica blanda, se seleccionó un actuador lineal por cuerda, se realizó un prototipo, se caracterizó, se obtuvo el modelo cinemático del manipulador y la relación del actuador lineal por cuerda para actuar una articulación rotacional del robot manipulador, teniendo como resultado material de apoyo para el fortalecimiento y comprensión de fenómenos físicos, su relación con los modelos matemáticos y la implementación en casos prácticos.

Palabras Clave: Actuador lineal, Actuador por cuerda, Instrumentación en robots.

A B S T R A C T

The linear actuators by rope, are the actuators of the new generation, which work based on a novel mechanism and inspired by the Chinese mill or differential mill. The need to characterize these actuators, is to generate a test bench for strengthening the teaching of instrumentation and control, which allows engineering students to approach the physical, practical and theoretical form of the actuators. Different types of linear actuators are presented, including those used in soft robotics, a linear actuator was selected per string, a prototype was published, it was characterized, the kinematic model of the manipulator and the relation of the linear actuator per string was obtained. A rotational articulation of the manipulator robot, resulting in support material for the strengthening and understanding of a physical phenomenon, its relationship with mathematical models and implementation in practical cases

Keywords: Linear actuator, Actuator by rope, Instrumentation in robots.

1. Introducción

Actuadores convencionales

Los actuadores son dispositivos mecánicos con la capacidad de transformar un tipo de energía a otro, proporcionando la fuerza para mover o actuar otro dispositivo[1]. Dependiendo de la fuerza de actuación pueden ser de tres tipos: presión neumática, presión hidráulica y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). Dependiendo del origen de la fuerza, el actuador se denomina "neumático", "hidráulico" o "eléctrico", los principios físicos de cada uno le darán la energía necesaria dependiendo de su fuente de alimentación.

Los Actuadores electrodinámicos pueden ser de movimiento lineal o angular. Su principio de funcionabilidad se basa en una fuerza, llamada fuerza de Lorentz, que actúa sobre un conductor sometido en un campo magnético que conduce una corriente [2]

Los actuadores piezoeléctricos junto con los actuadores electro-dinámicos se encuentran con mayor frecuencia en maquinarias de precisión (máquinas de test de fatiga y corrosión). El principio de funcionamiento de los actuadores piezoeléctricos se basa en una fuerza, que actúa sobre la estructura atómica de un cristal y la deforma.

Los actuadores electromagnéticos son el tipo de actuador más utilizado en automatización. Se utilizan en máquinas de café, bombas de agua y para re direccionar el flujo de papel dentro de las impresoras de oficina. El principio de funcionamiento de los actuadores electro magnéticos es basado en una fuerza, que actúa sobre un circuito magnético para minimizar la energía encerrada. [2].

Los actuadores electrostáticos forman parte del grupo de transformadores eléctricos, como los actuadores

piezoeléctricos. Los actuadores de campo electrostático se utilizan debido a su diseño simple y de bajo consumo de energía. Como resultado del progreso técnico de la micro ingeniería, las ventajas de los diseños integrados se aprovechan al máximo. Especialmente para sistemas miniaturizados, los actuadores de campo electrostático ganan mayor importancia en comparación con otros principios de actuadores. [2]

Los Actuadores electroneumáticos existen dos tipos cilindros neumáticos y motores neumáticos, los cilindros neumáticos consisten en el desplazamiento de un embolo encerrado en un cilindro, pueden ser de simple efecto y de doble efecto. Los motores neumáticos consiguen el movimiento de un eje por medio de aire a presión, pueden ser motores de aletas rotativas y motores de pistones axiales. [3]

Los actuadores electrohidráulicos pueden ser clasificados de acuerdo con la forma de operación, y aprovechan la energía de un circuito o instalación hidráulica de forma mecánica, generando movimientos lineales. Los cilindros hidráulicos pueden ser: de simple efecto, de doble efecto, telescópicos.

Actuadores en la robótica blanda

La robótica blanda o también conocida como Soft Robotic, es una nueva rama de la robótica en la cual los componentes están esencialmente hechos de materiales blandos y estructuras activas monolíticas (o continuas), esto permite una mejor interacción en su entorno que los robots que están hechos de materiales rígidos. La robótica blanda al estar constituida de materiales blandos, causa impacto en las áreas que requieren de materiales sensibles e inteligentes, las aplicaciones médicas, interacción social y la manipulación de objetos frágiles serán de las áreas que la robótica blanda asistirá y tendrá relevancia para realizar tareas que la robótica rígida convencional está limitada. [4]. “En la Fig. 1” se muestra un ejemplo de robot suave que está basado en las estructuras de la robótica blanda.

Figura 1. Robot suave “Octobot”

Siendo los materiales y componentes flexibles e inteligentes para la configuración de los robots blandos, el desarrollo de sensores y actuadores para la rama de la robótica blanda también ha ido evolucionando, teniendo como resultado mayores capacidades de trabajo y desempeño que los materiales rígidos que constituye la robótica clásica, además de un mayor rango de movilidad dando así la ventaja de trabajos que requieran precisión y sensibilidad. [5]

Actuadores blandos (Músculos artificiales). Actuadores blandos actuados eléctricamente. La esencia de los actuadores blandos sub actuados eléctricamente, es someter un polímero que sirve como dieléctrico entre dos nodos, esto crea un campo magnético entre los dos nodos, haciendo que el dieléctrico por la carga de energía eléctrica sufra una deformación.

Actuador blando “elastómeros dieléctricos son materiales aislantes blandos. Se deforman por fuerzas eléctricas cuando se usan en un condensador entre dos electrodos mecánicamente compatibles. “Ver Fig. 2” .[5]

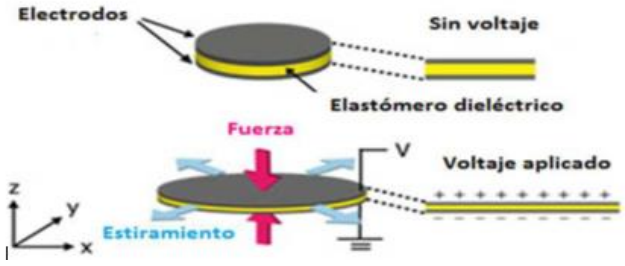


Figura 2. Funcionamiento de un elastómero

Los elastómeros dieléctricos son un subgrupo de polímeros electro activos, materiales utilizados en transductores electromecánicos”[6]. Se han investigado muchas clases de materiales para este tipo de aplicaciones incluyendo acrilatos, siliconas, uretanos cauchos en estado látex ABS y diferentes co-polímeros, para su uso como actuadores o músculos artificiales”.[5]

Los acrilatos más comunes y usados son los de la serie VHB de 3M corporation, que están hechos de mezclas de acrilato alifático y se basan en la estructura de un ácido carboxílico terminal, tienen importantes características visco eléctricas, además que son sensibles a la humedad y a la temperatura. La silicona, el poli (dimetilsiloxano) su nomenclatura (PDMS), es un polímero orgánico e inorgánico (mixto), ya que se constituye de silicio y oxigeno con un módulo elástico es relativamente bajo, así como también su constante dieléctrica y densidad de energía a comparación de otros acrílicos, por eso su respuesta electro mecánica es más modesta, una de sus ventajas es su

viscosidad baja ya que proporciona un tiempo de respuesta rápido y con menores perdidas, no son afectados por la humedad ni por la temperatura.

Los poliuretanos, estos materiales se polimerizan (cuando se agrupan un conjunto de monómeros entre si dando lugar a una molécula de mayor peso llamada polímero) generalmente por la reacción de isocianatos con alcoholes y ofrecen una gran versatilidad en su procesamiento y propiedades finales. Tiene una gran sensibilidad a comparación con otros polímeros.

Elastómeros cristal líquido como su nombre sugiere, estos materiales están constituidos de cristales líquidos con redes elastómeras, ambas con propiedad que complementan el funcionamiento de la otra. Este actuador funciona con cargas relativamente bajas (1,5 - 25 V/µm) a comparación de los demás Elastómeros dieléctricos que necesitan fuentes altas de voltajes para su funcionamiento, sin embargo, las deformaciones que se obtienen de estos son mínimas (>10%).

Actuadores blandos actuados neumáticamente.

Los actuadores blandos sub-actuados neumáticamente son de los sistemas de músculos artificiales en desarrollo entorno a robots blandos. (Yang, Verma et al. 2016)[7], menciona que un sistema de actuador neumático blando son accionados por el inflado de una red neumática de pequeños canales dentro del material elastómero, que producen contracciones y expansiones en los materiales cuando el sistema es sub actuado por los flujos de gases comprimidos. Las limitantes de estos tipos de actuadores es que su accionamiento es relativamente lento, por lo que se requieren cantidades grandes de aire comprimido para poder accionar todo el sistema y el flujo del gas comprimido pueda llegar a todos los canales de los materiales elastómeros.

Los músculos artificiales neumáticos inspirados biológicamente (PAM-Pneumatic Artificial Muscles), fueron desarrollados por primera vez bajo el nombre de McKibben Artificial Muscles en la década de 1950 para su uso en extremidades artificiales. La empresa de caucho Bridgestone (Japón) comercializó la idea en la década de 1980 bajo el nombre de rubbertuators. La fuerza de retracción del (PAM) está limitada por la suma de la resistencia total de las fibras individuales en el armazón del tejido, “ver Fig. 3”. [8].

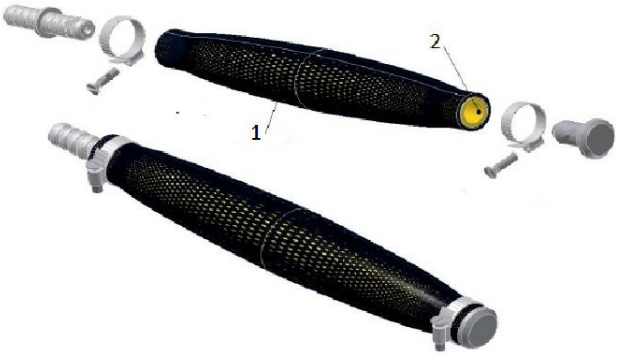


Figura 3 Actuador neumático tipo McKibben: 1 - trenza cruzada de poliéster, 2 - núcleo de caucho (Parandyk, Ludwicki et al. 2015).

Actuador blando Pneu – Nets. Pneumatic Network (Pneu- Nets) “Red neumática”, este material de pequeños canales pueden producir movimientos sofisticados, el diseño propuesto en este artículo reduce la cantidad de gas necesario para la inflación de la red de neumáticos y por lo tanto aumenta su velocidad de accionamiento, [9].

Actuador Blando VAMP (vacuum-actuated muscleinspired pneumatic structures) Los actuadores con estructuras neumáticas inspiradas en el músculo con accionamiento al vacío difieren de los demás sistemas de actuadores blandos, ya que usan pandeo de haces elastoméricos para generar movimientos similares a los músculos cuando se les aplica presión negativa.

Actuadores blandos actuados hidráulicamente. Los actuadores sub actuados hidráulicamente poseen una gran cantidad de energía que se transfiere a través de un sistema que conecta con las partes para ejecutar el movimiento del actuador lo que provoca una alta densidad de potencia, dicho sistemas por lo general están acompañados de maquinaria pesada, debido al gran trabajo y energía que estos brindan al accionarse. [10]

Actuador blando HASEL (Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators). Actuadores electrostáticos autorregenerables de amplificación hidráulica, utiliza un mecanismo electrohidráulico para activar arquitecturas hidráulicas totalmente blandas combinando la versatilidad de los accionadores fluidicos con el rendimiento muscular y la capacidad de autodetección de los actuadores.

Actuadores blandos actuados térmicamente. Los actuadores accionados térmicamente son uno de los prototipos de músculos artificiales más prometedores debido a su simpleza en su funcionamiento y los materiales inteligentes, dentro de los sistemas de actuadores térmicos definimos a un material inteligente que posee memoria de forma al someterse a una diferencia de temperatura, ya que esto le permite al material deformarse y volver a su estado inicial sin dañar su estructura.

Actuadores blandos de Nylon. En el área de los materiales inteligentes, el nylon ha sido uno de los más estudiados debido a sus propiedades termoplásticas que le permite deformarse gracias a un estímulo externo como el calor, la electricidad o incluso el agua. Las fibras de nylon y polietileno son grandes precursores de las fibras musculares artificiales en la actualidad, ya que permite combinar la contracción que ocasiona la inducción térmica reversible en dirección de la fibra, la gran expansión térmica volumétrica y la gran anisotropía en los cambios dimensionales inducidos térmicamente para proporcionar un mejor golpe muscular. [11]. La figura 4 muestra un ejemplo de un músculo de nylon retorcido.

Existen otro tipo de actuadores que su configuración es muy distinta a las mostradas en los actuadores suaves y convencionales, estos en palabras de sus autores nos señalan las cualidades que posee en el desempeño de sus actividades supera en mayor medida a los actuadores convencionales gracias a que su mecanismo trabaja con un molino diferencial, la cual reparte y distribuye la carga a través de la tensión de una cuerda la cual está guiada por un husillo cónico.

Actuador lineal por cuerda

Los actuadores lineales por cuerda son de los actuadores de nueva generación que funcionan en base a un mecanismo novedoso e inspirado en el molino chino o molino diferencial, los cuales funcionan a partir de un accionamiento cónico diferencial propuesto por la empresa RISE ROBOTICS quienes nombran este actuador como "Cyclone Muscle" "la Fig. 5" muestra un ejemplo del actuador.

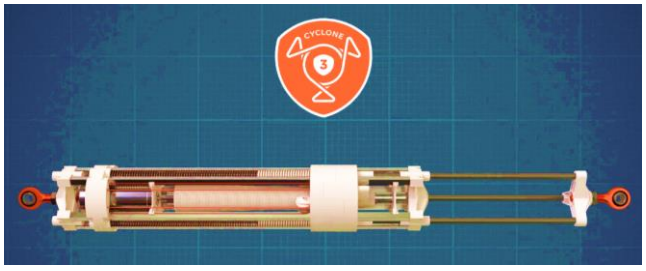


Figura 5 Actuador por cuerda "Cyclone Muscle"

Esta propuesta de actuador trabaja bajo los principios del Molino Diferencial o también conocido como Molino Chino, este consiste en un molinete horizontal simple, con una manivela en un extremo, el molinete esta hecho en forma cónica, siendo más grande de un extremo que en el otro, la fuerza aplicada al molinete se notara a momento de soportar la carga ya que la fuerza del molinete se multiplicara por la forma de la misma, el poder de elevación proviene de la forma en que el cable se enrolla alrededor de dos tambores de diámetros ligeramente diferentes en el mismo eje. Cuando se gira la manija para levantar la carga, la cuerda del tambor más pequeño y se coloca en el más grande. Ejemplo de molino chino "ver Fig. 6".

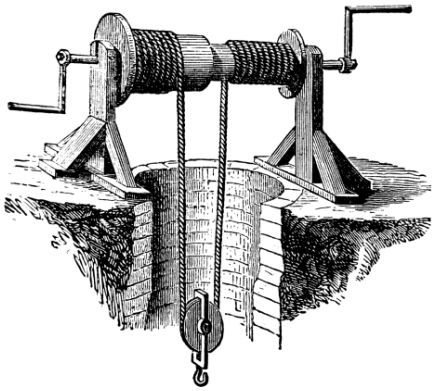


Figura 6 Molino Chino

La necesidad de caracterizar estos actuadores para el estudio y enseñanza de la materia de instrumentación y control, permite a los alumnos que, tengan el acercamiento de forma física, práctica y teórica en el funcionamiento de los actuadores, comparar los resultados prácticos junto con los teóricos para un mejor análisis y comprensión de los fenómenos físicos que ocurren en la actuación de los mecanismos. En este trabajo se reporta la caracterización de un actuador lineal no convencional para su análisis e implementación en una articulación de un manipulador serial, con el fin de generar material didáctico en la materia de instrumentación y control, robótica, en estudiantes de Ingeniería. El estudio de estos actuadores beneficiará en la enseñanza en el área de instrumentación y control, robótica, generando material didáctico y un banco de pruebas para la formación profesional de estudiantes de ingeniería. En la industria el impacto es en el desarrollo de sistemas ligeros y con mayor capacidad de trabajo.

2. Diseño conceptual

Los actuadores lineales con cuerda se presentan como un nuevo diseño de actuadores lineales capaces de generar movimientos potentes gracias a su estructura basada en

poleas y un husillo inspirado en el principio de molino diferencial o chino.

A partir del diseño “de la Fig. 7”, se estudió el actuador lineal por cuerda, tomando partes importantes del actuador de la empresa “Rise Robotics” para generar un actuador que pueda cumplir con las características de un actuador convencional y demostrando la efectividad del mismo. Se optó por el eje cilíndrico sin ningún tipo de ángulo de inclinación “ver Fig. 7”.

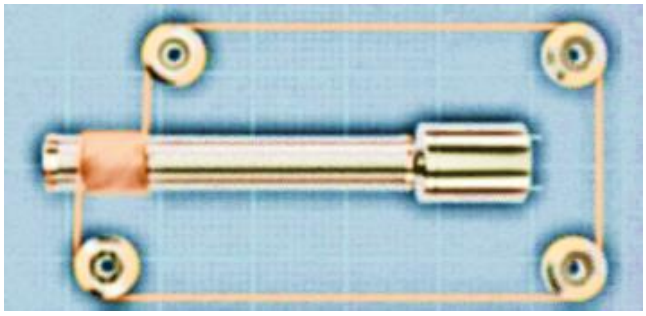


Figura 7. Husillo cilíndrico

Teoría antecedente actuador lineal con cuerdas

Para el estudio de estos actuadores se toman en cuenta los parámetros de velocidad angular, torque, fuerza.

Tensión Para los actuadores de cuerda se denomina tensión, a la acción de fuerzas que se encuentran opuestas, al que un cuerpo se encuentra sometido “ver Fig. 8”.

$$T = \tau / S \quad (1)$$

$$\tau = T * S \quad (2)$$

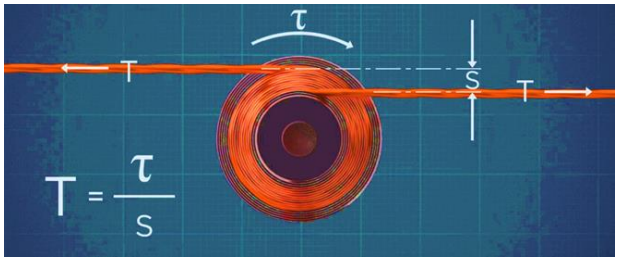


Figura 8. Esquema de la tensión de la cuerda

T= tensión [N]

τ = Torque [N*m]
S= desplazamiento [m].

Torque El momento de un par es el producto de la magnitud de una de las fuerzas y la distancia perpendicular entre las líneas de acción de las mismas.

$$\tau = F * R \quad (3)$$

Donde:
F= Fuerza [N]

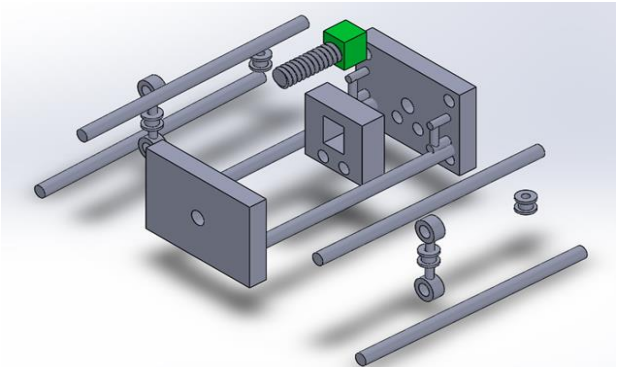
R= La distancia al centro de giro [m].

Sistemas de poleas, las poleas son elementos mecánicos simples su función es transmitir una fuerza menor de carga a un objeto sostenido a un extremo del mismo. Existen tres tipos de sistemas de poleas polea fija y polea móvil, una polea está sujeta a una base fija, su función es la de cambiar la dirección de fuerza y con ella no se gana fuerza, sin embargo, ayuda a redirigir la fuerza utilizando contrapesos o el mismo peso de una persona para cargar un objeto sostenido del otro extremo de la polea.

Diseño CAD del prototipo del actuador lineal

Se realizó un diseño previo del actuador lineal con cuerdas en un CAD asistido por el programa SolidWorks, este diseño pretende ser un prototipo del actuador lineal de cuerdas el cual servirá para la realización de la investigación de los actuadores de cuerda y su desempeño en la implementación en la articulación de un robot manipulador serial.

En la Figura 9 se observa el actuador lineal de cuerda,



está formado por un husillo, que permitirá el movimiento lineal, el cual esta acoplado a un motorreductor eléctrico y de acuerdo al diámetro de paso se genera el movimiento lineal, el sistema de poleas permiten la transmisión del movimiento a través de una cuerda la cual permitirá un

menor esfuerzo por parte del motorreductor para moverse sobre el eje y aminorar la carga de transmisión de la cuerda. Este diseño es sencillo para comprender el principio de funcionamiento de la cuerda de transmisión del movimiento lineal y la fuerza de transmisión como un actuador lineal.

Figura 9. Prototipo piloto del actuador por cuerda

Los elementos utilizados para el actuador lineal por cuerda son los siguientes: Se utilizaron cuatro poleas para dar la dirección a la cuerda ver Figura 10(a), cuatro porta poleas ver Figura 10(b), un soporte para motorreductor," ver Fig. 10(c)", dos bases para soportar varillas "Fig. 10(d)", cuatro varillas para soporte" Fig. 10(e)" y un husillo "Fig. 10(f)".

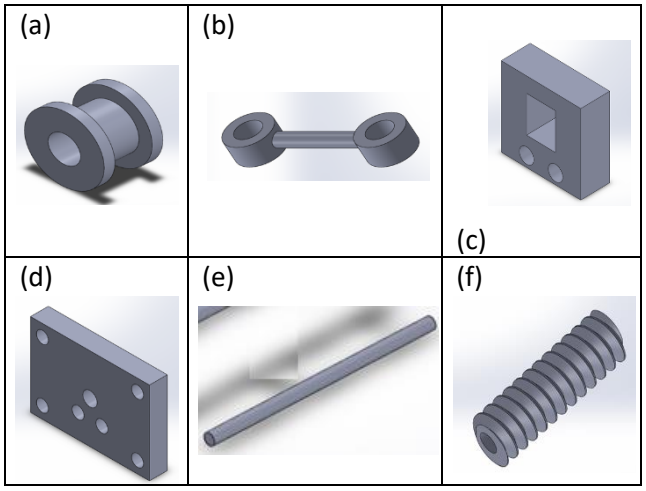


Figura 10-(a) Polea; (b) Porta polea; (c) Soporte para motorreductor; (d) Base porta varilla; (e) Varilla; (f) Husillo.

En "la Fig. 11" se muestra el ensamble del prototipo piloto del actuador lineal por cuerda

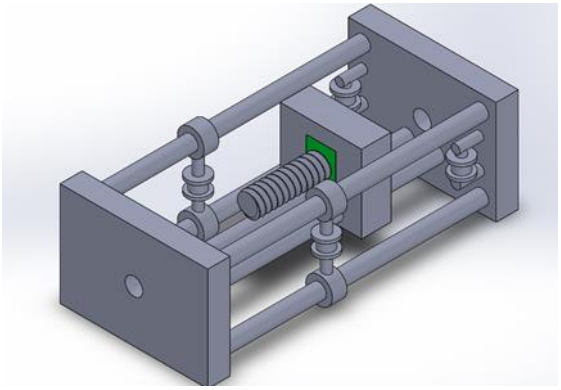
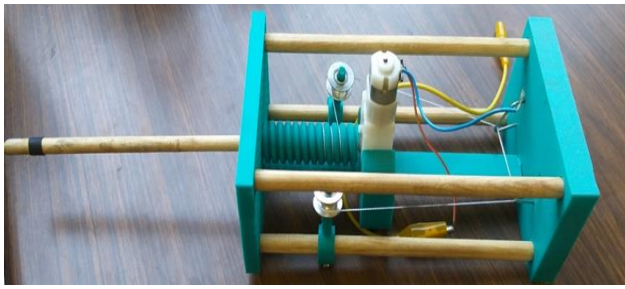
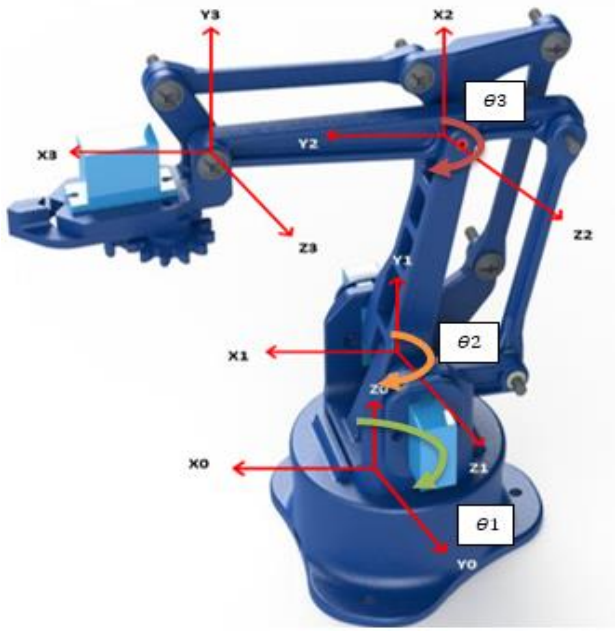


Figura 11. Prototipo piloto actuador lineal por cuerda

Cinemática directa del manipulador a instrumentar



La cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot



como una función del tiempo, en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares. [3]La cinemática directa consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas se utiliza el método de Denavit-Hartember para encontrar la cinemática directa del manipulador "de la Fig. 12".

Figura 12. Sistemas de referencia del manipulador serial

Utilizando la el método de Denavit-Hartember se llega a la tabla 1, que muestra los parámetros de la cinemática directa.

Tabla 1 – Parámetros de Denavit-Hartemberg.

i	Θi	di	ai	αi

1	Θ1	L1	0	-90°
2	Θ2	0	e1	0
3	Θ2	0	e2	0

3. Prototipo piloto y prototipo final

Prototipo inicial actuador lineal por cuerdas

El prototipo inicial del actuador lineal por cuerda permite visualizar el fenómeno físico del actuador, por medio de un husillo, su función permite la transmisión de la tensión de la cuerda a través de un sistema de poleas, que permiten transmitir la tensión de la misma cuerda inducida por un motor en movimiento giratorio. "Ver Fig. 13".

Figura 13 Prototipo inicial actuador lineal por cuerda

Se caracteriza al prototipo para obtener los principios físicos del movimiento circular de la cuerda conectada al motor.

La velocidad angular se define como el desplazamiento angular o ángulo de giro por una unidad de tiempo, y entre mayor sea la velocidad angular mayor será la rapidez del objeto que está rotando sobre un círculo. Para encontrar la relación entre la velocidad angular y la rapidez se debe multiplicar el Radio "R".

$$v = d / t \tag{4}$$

Para conocer la velocidad de movimiento del prototipo inicial se somete a una prueba de desplazamiento por tiempo utilizando la ecuación 4, los resultados de las pruebas tomadas para el parámetro de velocidad se encuentran en la tabla 3-3.

Tabla 2-Velocidades de acción de carrera del prototipo inicial

# Pruebas	distancia (m)	tiempo(s)	velocidad (m/s)
1	0.038	12.3	0.00308943
2	0.038	11.9	0.00319328
3	0.038	12.2	0.00311475
4	0.038	12.1	0.0031405
5	0.038	11.9	0.00319328
6	0.038	12	0.00316667
7	0.038	12.2	0.00311475
8	0.038	11.8	0.00322034
9	0.038	12.1	0.0031405
10	0.038	12.2	0.00311475
	Promedio	12.07	0.00314882

Para calcular la tensión de la cuerda se utiliza: "La ec (5)".

$$T = \tau / S \tag{5}$$

Sustituyendo los siguientes valores*: $\tau=0.054$* kgf m, *$s=0.01$* m y se tiene que *1*kgf *=9.807* N, por lo tanto el valor de *$T=52.95$*N.

El trabajo realizado por el actuador se define por "La ec.6".

$$W = F * d \tag{6}$$

La potencia del actuador queda definida por "La ec. 7".

$$P = W / t \tag{7}$$

Tabla 3-Parámetros del actuador inicial

Parámetros	Actuador lineal por cuerda
Longitud del husillo	0.10 m
Diámetro del husillo	0.02 m
Carrera del husillo	0.038 m
Velocidad promedio del actuador	0.00314882 m /s
Velocidad angular del husillo	85 RPM
Tensión de la cuerda	52.95 N
Fuerza axial máxima del actuador	0.5 N
Torque máximo del actuador	0.054 kgf -m
Trabajo del actuador	0.5292 Joule
Potencia del actuador watts	0.0438
Consumo de energía del actuador	6 V

Prototipo final del actuador lineal por cuerdas.

A partir de la caracterización y de los parámetros obtenidos, se manufacturó el prototipo del actuador lineal por cuerdas en aluminio, con el fin de proporcionar al actuador lineal mayor rigidez, fuerza y optimizar las dimensiones, y así obtener mejores resultados, en comparación con el prototipo inicial. "Ver Fig. 14".

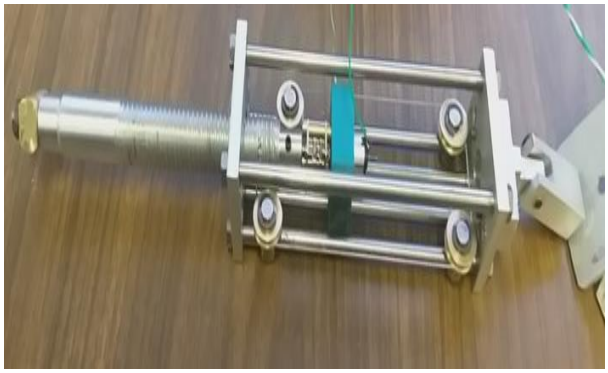


Figura 14. Prototipo final Actuador lineal por cuerda

El motor utilizado en el prototipo de aluminio, fue el micro motor reductor HP, está compuesto de un sistema de engranaje que le permite reducir considerablemente la velocidad producida por el motor, cuenta con una relación de 1000: 1 en el engranado, "ver Fig. 15".

Figura 15. Motorreductor HP

El prototipo del actuador lineal por cuerda se sometió a pruebas de velocidad, con el fin de validar la velocidad promedio.

Tabla 4-Velocidades de acción de carrera a 5V

# Pruebas	distancia (m)	tiempo(s)	velocidad (m/s)
1	0.045	51.42	0.00087515
2	0.045	51.24	0.00087822
3	0.045	50.46	0.0008918
4	0.045	51.38	0.00087583
5	0.045	50.12	0.00089785
6	0.045	52	0.00086538
7	0.045	53.17	0.00084634
8	0.045	51.96	0.00086605
9	0.045	51.72	0.00087007
10	0.045	51.26	0.00087788
		51.47	0.00087446

Los parámetros del actuador final por cuerdas se definen en la tabla 5.

Tabla 5-Parámetros del actuador final aluminio

Parámetros	Actuador lineal por cuerda
Longitud del husillo	0.15 m
Diámetro del husillo	0.01 m
Carrera del husillo	0.01 m
Velocidad promedio del actuador	0.01024187 m /s
Velocidad angular del husillo	32 RPM
Tensión de la cuerda	121.70 N
Fuerza axial máxima del actuador	1.8 N
Torque máximo del actuador	0.10 kgf -m
Trabajo del actuador	0.882 Joule
Potencia del actuador watts	0.017
Consumo de energía del actuador	6 V

4. Implementación del actuador lineal por cuerda en la articulación tres (Θ3) del manipulador serial.

Para el estudio del actuador lineal por cuerda como actuador en la articulación del manipulador serial, se acopla en la

articulación dos. En la "Fig. 16" se muestra una vista lateral del manipulador.

El modelo cinemático inverso del manipulador para la articulación dos, que es la articulación actuada por el actuador lineal por cuerdas, el movimiento angular del robot queda en función del movimiento lineal del actuador. Por lo que primero se obtiene el modelo cinemático de la articulación dos y posteriormente se realiza la caracterización con el movimiento lineal del actuador.

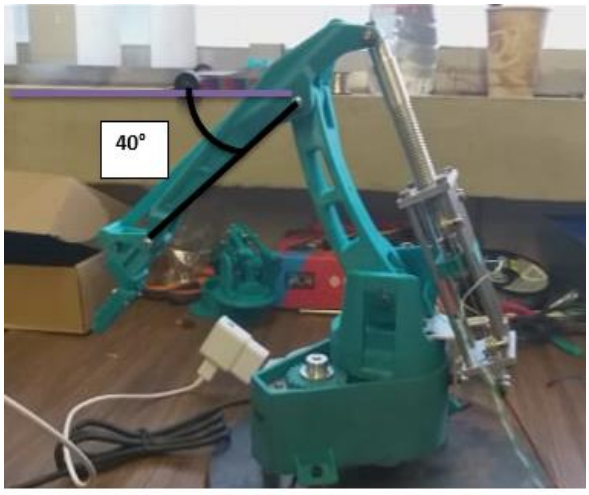


Figura 16 Vista lateral del banco de pruebas

En la "Fig. 17" se muestra una vista frontal del banco de pruebas.

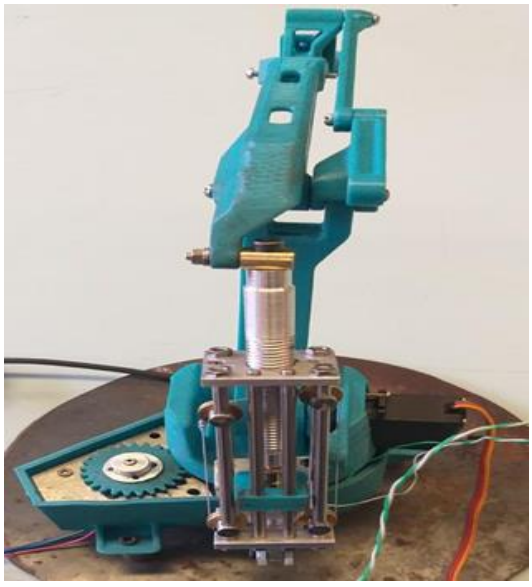


Figura 17 Vista lateral del banco de pruebas

Cinemática inversa del robot manipulador

Para el estudio de la cinemática inversa del manipulador serial se utilizó el método algebraico para la obtención de las variables articulaciones del manipulador.

De la matriz de Denavit Hartenberg definida como ${}^{0}A_{3}$ (Barrientos), se encuentra las Ecuaciones de la cinemática directa, para posicionar al efector final del manipulador en un punto X, Y, Z.

$$X = Cos(\theta 1)(e1Cos(\theta 2) + e2Cos(\theta 2 + \theta 3)) \quad (8)$$

$$Y = Sin(\theta 1)(e1Cos(\theta 2) + e2Cos(\theta 2 + \theta 3)) \quad (9)$$

$$Z = \ell 1 - e1Sin(\theta 2) + e2Sin(\theta 2 + \theta 3) \quad (10)$$

Se despeja la variable θ1, que se encuentra en la base del manipulador sobre la proyección de los ejes de X y Y respectivamente. Se utiliza la expresión de ArcTan2 (y,x) (Craig), para encontrar la solución de la variable articular en el intervalo de 0-360°, quedando Θ1 como:

$$\theta 1 = AngTan2(Y, X) \quad (11)$$

De "La ec. (8) se despeja al $Cos(\theta 3)$, de "ec. (9)" se despeja $Sin(\theta 3)$, posteriormente se elevan al cuadrado y se suman ambas expresiones de ambos lados de la igualdad (Barrientos), teniendo como resultado:

$$(Z - L1)^2 + X\,Cos(\theta 1) + Y\,Sin(\theta 1) = e1^2 + e2^2 + 2e1e2Cos(\theta 3) \quad (12)$$

Se despeja al Cos($\theta 3$) de la ecuación (12).

Una vez que se conoce el Cos($\theta 3$), se utiliza "La ec. (13)", para encontrar el Sin($\theta 3$).

$$Sen(\theta 3) = \sqrt{1 - Cos(\theta 3)^2} \quad (13)$$

Utilizando la expresión de ArcTan2 (Sin(θ), Cos(θ)) (Craig) se tiene que el ángulo theta 3 es:

$$\theta 3 = ArcTan2(Sin(\theta 3), Cos(\theta 3)) \quad (14)$$

"La ec. (14)" expresa el valor de la variable articular en función de los parámetros de Denavit-Hartemberg, de las longitudes delo eslabones y de la posición del efector final. Para dejar a la variable articular theta tres en función de la variable del actuador lineal "ver Fig. 18".

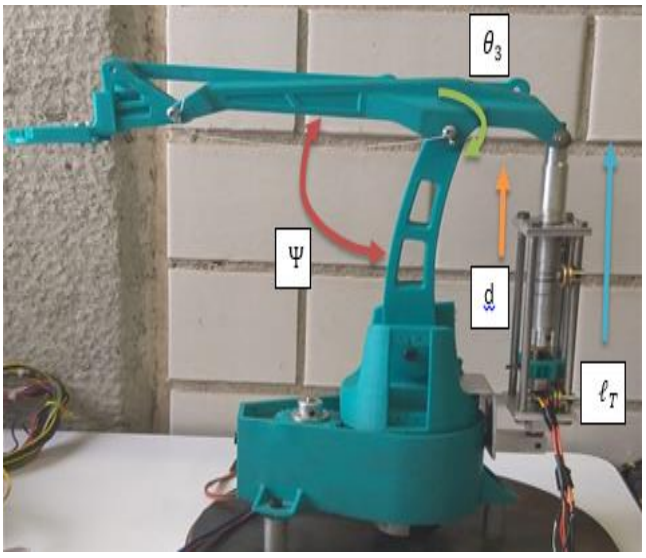


Figura 18. Variables del actuador lineal que intervienen en la articulación.

Utilizando: "La ec (15) se tiene".

$$\theta 3 = f(d) \tag{15}$$

Se encuentra la relación del desplazamiento angular ψ en función del desplazamiento lineal d, para obtener "La ec. (16)".

$$d = (\theta 3 * \ell_T) / \psi \tag{16}$$

Donde la longitud de carrera del tornillo es ℓ_T y el ángulo de desplazamiento total es Ψ.

5. Resultados

En la tabla 6 compara la distancia recorrida del actuador y la influencia que tiene en el desplazamiento angular del brazo robótico.

Tabla 6-Movimiento del brazo inducido por la carrera del actuador lineal con cuerdas

Carrera del Actuador	Desplazamiento angular
1 cm	10°
2 cm	20°
3 cm	30°
4 cm	40°
Velocidad de actuación suministrando 5 Volts.	0.08744 (cm)/s
Velocidad de actuación suministrando 12 Volts	1.9399 (cm)/s

La tabla 7 se escriben los datos obtenidos a partir de aplicar los conceptos teóricos de la cinemática inversa del manipulador con respecto a lo grados desplazados en función del movimiento lienal para mover el eslabón del manipulador. "Se utiliza la ec. (16)".

Tabla7- Cinemática inversa del manipulador

	Carrera del actuador	**Desplazamiento angular del brazo del manipulador**
Cinemática inversa	**1 cm**	**10°**
	2 cm	**20°**
	3 cm	**30°**
	4 cm	**40°**

Discusión

El estudio y análisis de los actuadores lineales por cuerdas ayudan a visualizar el comportamiento de diferentes configuraciones de actuadores lineales para el movimiento de sistemas mecánicos. El banco de pruebas presentado en este trabajo, permite observar y analizar el desempeño de los actuadores lineales por cuerda en la implementación de un manipulador serial.

Este trabajo muestra el desempeño que tiene un actuador no convencional con una configuración distinta a los actuadores convencionales, obteniendo parámetros interesantes en la búsqueda de igualar las características que poseen un actuador comercial para la industria. Sin embargo, al ser un prototipo en escala diseñado para un manipulador orientado a ser un banco de pruebas para la enseñanza de la materia de instrumentación y control, los parámetros obtenidos fueron suficientes para el control del movimiento del eslabón de un manipulador serial.

6. Conclusión

El presente trabajo de investigación se enfocó en la caracterización de un actuador lineal no convencional y su implementación en una articulación de un manipulador serial, que forma parte de un banco de pruebas para el fortalecimiento de la enseñanza de la materia de instrumentación y control, en la Carrera de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial. Los actuadores no convencionales fortalecen el aprendizaje en la materia de instrumentación y control, robótica, debido a que la configuración del actuador está bajo un principio físico diferente a los actuadores convencionales, permitiendo estudiar, desarrollar, caracterizar, obtener modelos

matemáticos, aplicar dispositivos novedosos y diferentes en casos prácticos.

Como trabajo a futuro se utilizarán los sensores y actuadores del robot manipulador como un banco de pruebas, para aplicaciones orientadas en la industria 4.0 que alberga al internet de las cosas.

Agradecimientos

Agradezco en lo que corresponde a la DGAPA, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIME, PE112319:"Desarrollo de material didáctico y banco de pruebas para el fortalecimiento de la enseñanza en instrumentación y control, aplicando tecnologías IoT y Robótica".

REFERENCIAS

[1] J. Van der Geer, J. A. J. Hanraads, R. A. Lupton, Journal of Science Communication **163** (2000) 51.
[2] W. Strunk Jr., E. B. White, *The elements of style* (3rd ed.). New York: MacMillan (1979).
[3] G. R. Mettam, L. B. Adams, In B. S. Jones & R. Z. Smith (Eds.), *Introduction to the electronic age* (pp. 281–304). New York: E-Publishing Inc. (1999).
[4] J. Fachinger, Nuclear engineering and design **236** (2006) 54.

1. *Actuator*, in *Encyclopedia of Neuroscience*, M.D. Binder, N. Hirokawa, and U. Windhorst, Editors. 2009, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 53-53.

2. Haus, H., et al., *Actuator Design*, in *Engineering Haptic Devices: A Beginner's Guide*, C. Hatzfeld and T.A. Kern, Editors. 2014, Springer London: London. p. 253-371.

3. Barrientos, A., *Fundamentos de robótica*. 1997: McGraw-Hill.

4. Campbell, S., *The Robotics Revolution Will Be Soft: Soft Robotics Proliferate-Along with Their Sources of Inspiration.* IEEE Pulse, 2018. **9**(3): p. 19-24.

5. Gonzalez-Jimenez, A.R., *Elastómeros dieléctricos para su uso como actuadores o músculos artificiales*, in *Plásticos Modernos*. 2015. p. 14-17.

6. Bauer, S., *Dielectric Elastomers*, in *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*, S. Kobayashi and K. Müllen, Editors. 2014, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 1-9.

7. Yang, D., et al., *Buckling Pneumatic Linear Actuators Inspired by Muscle.* Advanced Materials Technologies, 2016. **1**(3): p. 1600055.

8. Popović, M.B., *Biomechanics and robotics*. 2013: Pan Stanford.

9. Mosadegh, B., et al., *Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly.* Advanced Functional Materials, 2014. **24**(15): p. 2163-2170.

10. !!! INVALID CITATION !!! {}.

11. Haines, C.S., *Artificial muscles from fishing line and sewing thread*. 2015, ProQuest LLC.