

Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 grados de libertad.

Design and construction of a robotic arm with 6 degrees of freedom.

Raúl Moreno Rincón* (1).
Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez.
raull.mr@tuxtla.tecnm.mx.

Paola Martínez Pérez, Estudiante del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez,
lc16270591@tuxtla.tecnm.mx.

Álvaro Hernández Sol (3). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, alvaro.hs@tuxtla.tecnm.mx.

José Ángel Zepeda Hernández (4). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez,
jose.zh@tuxtla.tecnm.mx.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos (5). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez,
aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en julio 26, 2022; aceptado en septiembre 09, 2022.

Resumen.

Esta investigación está dirigida al desarrollo de tecnología en el campo de aplicación de los brazos robóticos. El trabajo consistió en el diseño electromecánico de un sistema de posicionamiento y control tridimensional para una garra, basado en un brazo robótico de seis grados de libertad, que permitirá maniobrar objetos. La metodología aplicada para el desarrollo del proyecto consistió en el diseño de un brazo robótico con 3 grados de libertad para el posicionamiento de la garra, que determinan el espacio de trabajo del brazo y 3 grados de libertad para la garra que permiten orientarla, según el objeto a recoger y su posición. El diseño de las partes físicas, eslabones, engranes y uniones y su simulación, se realizó a través del software Solid Works. El brazo robótico tiene articulaciones de tipo rotatorios y los actuadores propuestos son eléctricos: motores a pasos y servomotores, los eslabones y cubre juntas fueron impresos en PLA, el sistema de control está basado en el microcontrolador Arduino.

Palabras clave: Articulaciones, brazo robótico, diseño asistido por computadora, grados de libertad.

Abstract.

This research is aimed at the development of technology in the field of application of robotic arms. The work consisted of the electromechanical design of a three-dimensional positioning and control system for a claw, based on a robotic arm with six degrees of freedom, which will allow objects to be maneuvered. The methodology applied for the development of the project consisted of the design of a robotic arm with 3 degrees of freedom for the positioning of the claw, which determine the work space of the arm and 3 degrees of freedom for the claw that allow it to be oriented, according to the object to pick up and its position. The design of the physical parts, links, gears and joints and their simulation was carried out through the Solid Works software. The robotic arm has rotary type joints and the proposed actuators are electric: stepper motors and servomotors, the links and joint covers were printed in PLA, the control system is based on the Arduino microcontroller.

Keywords: Computer aided design, degrees of freedom, joints, robotic arm.

1. Introducción.

Un brazo robótico está constituido mecánicamente por una serie de eslabones unidos mediante articulaciones que le permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. (Barrientos, Peñín, Balaguer y Aracil, 2007). Para describir la morfología de un brazo robótico se hace referencia de los términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca (figura 1).

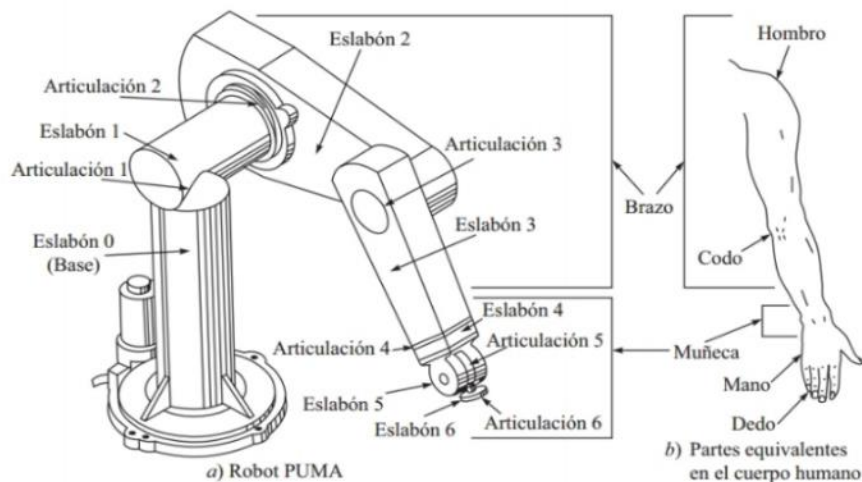


Figura 1. Analogía de un brazo robótico de tipo angular.

De acuerdo a la Asociación Internacional de Estándares (ISO) un Robot manipulador industrial es un manipulador de 3 o más ejes, con control automático, reprogramable, multi aplicación, móvil o no, destinado a ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial. Incluye dos elementos importantes: el manipulador, conformado por el sistema mecánico y accionadores; y el sistema de control, software y hardware de control y potencia (Barrientos, Peñín, Balaguer y Aracil, 2007).

Los brazos robóticos se aplican en la automatización de tareas en el área industrial para realizar trabajos como, por ejemplo, en fábricas de coches y grandes industrias de ensamblado y creación de estructuras, para transporte de materiales pesados de un lugar a otro o para realizar tareas de precisión, por mencionar algunas. Esta herramienta permite mejorar la eficiencia del trabajo en las fábricas y la calidad de vida de los empleados. (Esneca, 2019).

2. Métodos.

Para realizar el diseño electromecánico de un brazo robótico se debe considerar la determinación de las características físicas, accionamiento eléctrico y control (Bolton, 2017). que se requieren:

- El diseño mecánico a través del diseño asistido por computadora, lo cual permite tener una planeación de las dimensiones y formas de los eslabones del brazo y de los límites de movimiento de sus articulaciones (Miranda, 2016), además de corregir posibles errores antes de su manufactura: Número de articulaciones y tipo (rotación o traslación), rango de movimiento (en grados si se trata de una articulación de rotación y en milímetros si es de traslación) y dimensiones (del brazo total y de cada eslabón).

- Diseño del diagrama eléctrico y de control que permitirá el accionamiento de cada articulación de manera independiente a través de un microcontrolador y accionadores. En esta etapa es muy importante determinar: Tipo de controlador (si este será por medio de microcontrolador o PLC), tipo actuadores: si serán eléctricos (motores a pasos o servomotores) o neumático (pistones), tipo de comunicación de los actuadores con el controlador, lo que conlleva a la elección de los drivers y accionadores de acuerdo a sus características y funciones a realizar (botones, palancas o joysticks)
- Manufactura en 3D y ensamble final del armado físico y eléctrico.

Consideraciones: Al diseñar un robot es importante reducir el máximo su momento de inercia y los pares estáticos que deben vencer, los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas del actuador. Es por ello que, al diseñar un brazo robótico, se procura que los actuadores, los cuales suelen ser pesados, estén lo más cerca posible de la base del robot. Para esto, se utilizan sistemas de transmisión que trasladen el movimiento de los actuadores hasta las articulaciones.

Entre los sistemas de transmisión, destaca el *Circular-circular*, el cual puede consistir en un movimiento con engranajes, correa dentada, cadena, paralelogramo o cable. Las ventajas o inconvenientes de cada uno van de acuerdo a su aplicación; un sistema de engranes es apto para pares altos, sin embargo, tienden a desgastarse y necesitar una buena lubricación, mientras que un sistema de cuerda dentada es idóneo para distancias grandes.

Para mejorar un sistema de engranes en un brazo robótico es conveniente utilizar engranes helicoidales, puesto que, tienen la ventaja de que transmiten más potencia que los rectos y también pueden transmitir más velocidad y son más silenciosos; aunque, por el desgaste requieren ser sustituidos con mayor frecuencia que los rectos, sin embargo, tendrán un mejor desempeño.

En un engrane helicoidal la hélice que se forma se considera el avance de una vuelta completa del diámetro primitivo del engranaje, de esta hélice se deriva el ángulo β que forma el dentado con el eje axial; este ángulo tiene que ser igual para las dos ruedas que engranan, pero de orientación contraria, es decir, uno a la derecha y otro a la izquierda. Su valor se establece de acuerdo a la velocidad que tengan la transmisión (Jaen, 2011):

- Velocidad lenta: $\beta = 5^\circ - 10^\circ$
- Velocidad normal: $\beta = 15^\circ - 25^\circ$
- Velocidad elevada: $\beta = 30^\circ - 45^\circ$

El sistema de polea cuerda se forma a partir de pares de ruedas o poleas que están situadas a cierta distancia, con ejes normalmente paralelos que giran simultáneamente transmitiendo el movimiento desde el eje de entrada o motriz hasta el eje de salida o conducido, mediante una correa. Este puede mejorarse aplicando una cuerda dentada, la cual tiene un mayor agarre.

El movimiento que se transmite a la rueda conducida es en el mismo sentido que el movimiento de la rueda conductora. La relación de velocidades entre ambas ruedas se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\phi_1}{\phi_2} \quad (1)$$

Donde:

ϕ_1 = diámetro de entrada (conductora).

ϕ_2 = diámetro de salida (conducida).

n_1 = velocidad de entrada.

n_2 = velocidad de salida.

3. Desarrollo.

El presente brazo es de tipo articulado con 6 grados de libertad (GL) rotatorios, de estos, los primeros tres tienen la función de posicionar el objeto, lo que se conoce como: cintura del brazo (J1), hombro del brazo (J2) y codo del brazo (J3); y el resto, de la orientación del efector final, articulaciones denominadas como: cabeceo o elevación, pitch (J4), movimiento derecha-izquierda, yaw (J5) y rotación, roll (J6). Las dimensiones del brazo se definieron durante el diseño en 3D, cuenta con cuatro eslabones que conformarán la estructura mecánica

Tabla 1. Dimensiones del brazo robótico.

	Variable	Longitud (mm)
1	B1 (Altura del hombro)	224
2	B2 (Longitud del brazo)	190
3	B3 (Longitud del antebrazo)	156
4	B4 (Longitud de la muñeca)	78.5
5	BT (Longitud de la herramienta)	69

Se comenzó diseñando la base del brazo, constituyendo la primera articulación conocida como la Cintura (J1), haciendo girar al brazo sobre el eje “Z” (yaw), el movimiento es a través de un engrane helicoidal de 40 dientes incrustado en un disco giratorio, el cual va ensamblado con un engrane de 10 dientes ubicado en el eje del motor (relación de engranaje helicoidales 1:4). Sobre esta, se diseñó la base de la articulación 2 y 3, para soporte de los motores. Para el diseño de la relación de engranes helicoidales se hizo uso del software GearTrax, el cual nos permite diseñar engranes estableciendo las características como el paso circular p, el módulo m y el paso diametral P. Ver figura 2.



Figura 2. Diseño mecánico de la articulación 1.

La segunda articulación corresponde al movimiento giratorio respecto al eje “Y” (pitch) entre el eslabón 1 y 2, es decir, es el movimiento de arriba-abajo del brazo. Para esta, se propuso utilizar dos motores con caja de engranajes planetarios, se compone de un engrane helicoidal de 60 dientes (relación de engranaje helicoidales 1:6) situado en el eslabón derecho que corresponde al brazo y ensamblado a dos engranes helicoidales de 10 dientes en los ejes de dos motores (Jaen, 2011). Figura 3.



Figura 3. Diseño mecánico de la articulación 2.

La tercera articulación se encarga del movimiento giratorio en “Y” (pitch) del eslabón 2 y 3, alargando el espacio de trabajo del brazo y dándole un grado más de libertad. La transmisión de movimiento es por banda dentada y polea, la banda es de aproximadamente 510 mm de largo, 6 mm de ancho y 2 mm de paso. Para la polea conductora, se utilizó una polea comercial GT2 de 20 dientes y la polea conducida se diseñó en 3D, esta no es dentada, pero va sujeta a la cuerda ya que esta articulación tiene un rango de movimiento corto (Torres, s.f.). La relación de transmisión entre ambas es de 1:5. Figura 4.

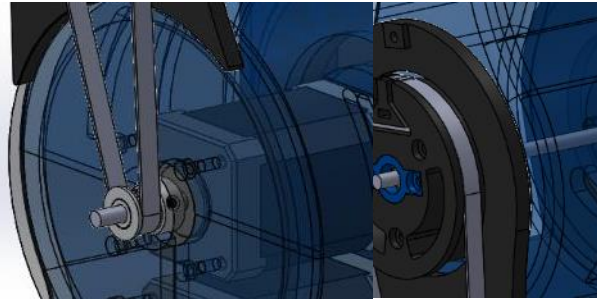


Figura 4. Diseño mecánico de la articulación 3.

Relación de transmisión de velocidad

$$i = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{12 \text{ mm}}{60 \text{ mm}} = \frac{1}{5} \tag{2}$$

Velocidad del eje conducido

$$n_1 = \frac{\phi_1 n_2}{\phi_2} = \frac{18.75 \times 12}{60} = 3.75 \text{ rpm} \tag{3}$$

Para la articulación 4, 5 y 6 se utilizaron servomotores, por lo que solo se diseñaron los eslabones y los soportes de cada servomotor, de manera que los eslabones fueran lo más cortos posibles, figura 5.

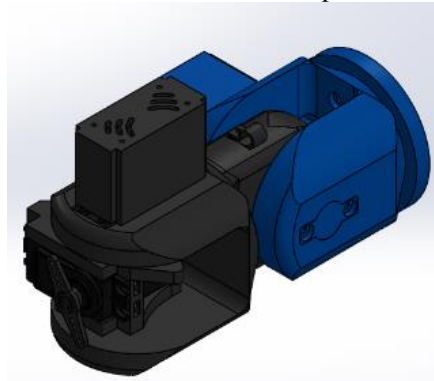


Figura 5. Muñeca de 3 grados de libertad.

Por último, tenemos la garra, figura 6, es la herramienta que manipulara el brazo robótico.

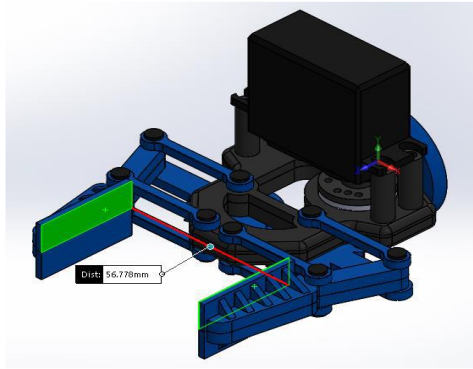


Figura 6. Garra para brazo robótico.

Diseño eléctrico y de control: Para el control se utilizó un Arduino Mega (Porcuna, 2016), junto con una Cnc Shield V3 para Arduino que permite controlar hasta 4 motores a pasos, conectar hasta 6 finales de carrera (dos para cada eje) y el driver correspondiente al modelo, que es el A4988. Para la articulación 1 se propuso el motor a pasos Vexta C6244-9212K, para la segunda los motores Nema 17HS13-0404S-PG5 y para la tercera articulación el motor Hanpose 17HS6401S. El diagrama de conexiones se muestra en la figura 7, estos incluyen dos sensores piezoeléctricos que permitirían medir el estado de la garra, abierta o cerrada, para evitar usar demasiada fuerza en los objetos.

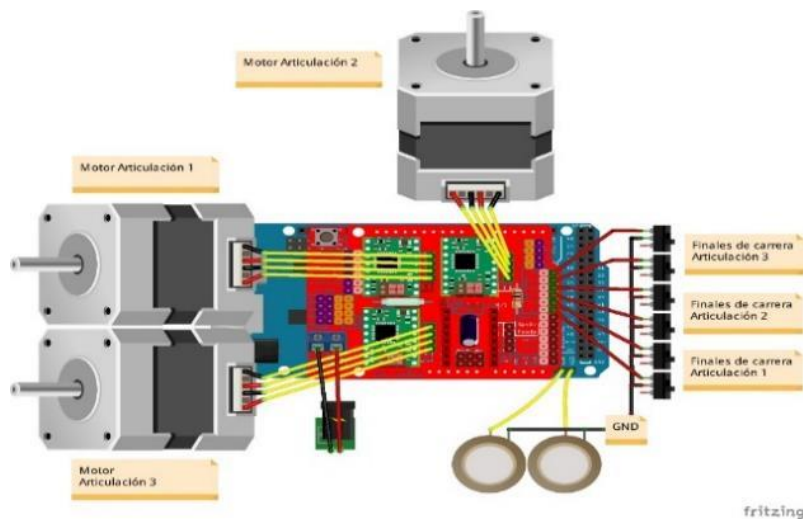


Figura 7. Diagrama eléctrico, motores, sensores finales de carrera y alimentación.

Mientras que, para las articulaciones 4, 5 y 6 se propuso el servomotor MG995 de alta velocidad y engranes de metal, con un par de 8.5 kgf.cm. figura 8.

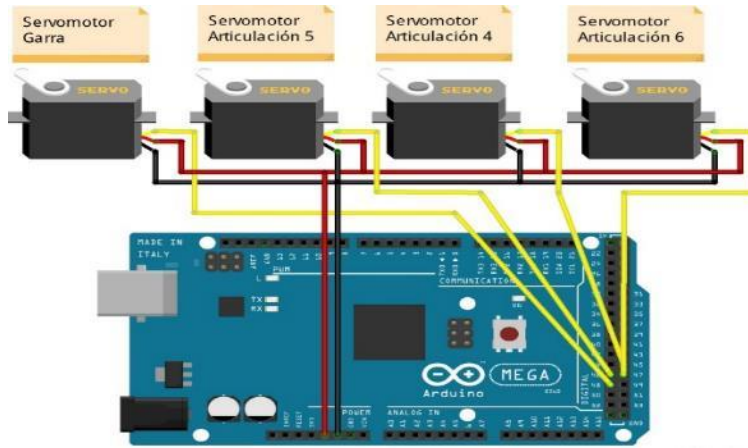


Figura 8. Diagrama eléctrico, servomotores.

Los accionadores se eligieron de acuerdo a las aplicaciones del brazo, figura 9, estos son los principales al diseñar un brazo robótico y sus características, para este caso:

- Palanca de 2 estados: permite seleccionar entre el modo manual y automático.
- Botón de arranque: inicia el sistema en modo manual o automático de acuerdo a lo seleccionado.
- Botón de paro: realiza un paro con fin de ciclo y lleva al brazo a su posición inicial.
- Botón de reset: para limpiar registros internos del programa o conteos, o llevar al brazo posición inicio.
- Botón de paro de emergencia: detiene instantáneamente al brazo robótico sin perder el curso de su trayecto, de manera que si se reinicia este continúa su tarea.
- Botón de accionamiento de la garra: acciona al actuador que cierra y abre la garra.
- Botón de accionamiento de rutina en modo automático: iniciar la rutina programada para el brazo robótico.
- Joysticks: permiten el control manual de las 6 articulaciones.

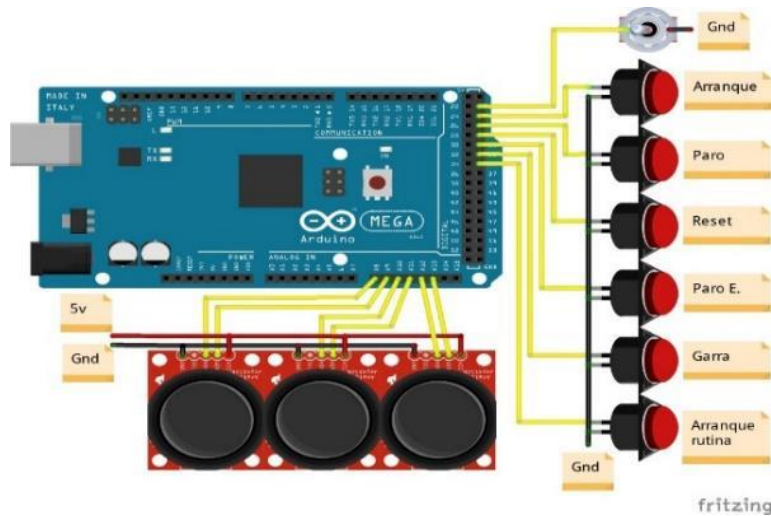


Figura 9. Elementos de entrada.

Manufactura y ensamblado final: La manufactura del brazo robótico consistió en la impresión en 3D de las piezas del robot, el material del que está hecho es de filamento de PLA. Las características principales que configuramos

fueron la altura de capa: 0.2, grosor de pared: 1 a 1.5, recuento de líneas de pared: 1 a 5, relleno: 20 a 45 y patrón de relleno: Trihexagonal.

Resultados: El brazo robótico se seis grados de libertad completamente ensamblado se muestra en la siguiente imagen, figura 10, destacando las partes que lo conforman, las medidas mencionadas en el desarrollo fueron respetadas.

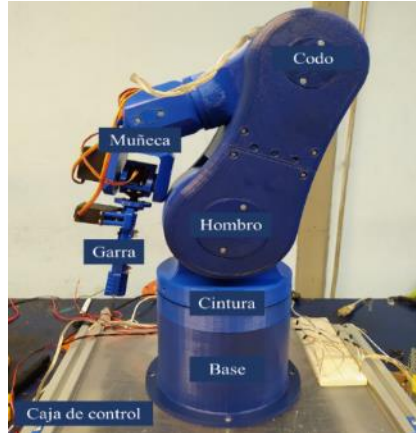


Figura 10. Ensamble final y partes que conforman al brazo robótico.

Tabla 2. Caracterización del brazo robótico.

Característica		Parámetro
Dimensión total		695.25 mm
Capacidad de movimiento	Articulación 1	-160°, 0, 160°
	Articulación 2	0°, 130°
	Articulación 3	-160°, 0, 160°
	Articulación 4	-90°, 0°, 90°
	Articulación 5	-90°, 0°, 90°
	Articulación 6	-90°, 0°, 90°
Velocidad	Articulación 1	4.6874 rev/min
	Articulación 2	3.125 rev/min
	Articulación 3	3.75 rev/min
	Articulación 4	0.2 s/60°
	Articulación 5	0.2 s/60°
	Articulación 6	0.2 s/60°
Alimentación		12 volts
Peso total		5111 g
Capacidad de carga		500 g aprox.

Conclusiones.

Al final se logró satisfactoriamente el objetivo de este proyecto, que es tener una estructura rígida que tiene un movimiento constante y estable, además se pueden realizar movimientos de las articulaciones de forma manual (para demostraciones o mantenimiento) o diseñando tareas específicas a realizar en forma automática y en este caso permite establecer libremente al programador el método de control que desee aplicar, quedando como posible mejora el diseño de un software amigable y específico a él.

La aplicación con 3 GL para el posicionamiento y 3 GL para la orientación de su herramienta (garra) demostró la premisa de que es suficiente para la ubicación de la garra en cualquier punto del espacio de trabajo y con la orientación necesaria

Pudimos determinar que la aplicación del software AutoCAD Mechanical, y SolidWorks permiten el diseño y simulación de los sistemas electromecánicos, eliminando la necesidad de construir para probar, reduciendo de esta manera tiempo, dinero y esfuerzo y permitiéndonos ubicar los sensores de final de carrera para cada articulación que protegen a los motores y a la estructura de movimientos peligrosos o inadecuados

Además, determinamos que podemos darle mayor potencia a nuestro brazo robótico, si cambiamos la tarjeta CNC que controla a los motores de las 3 articulaciones de posición por driver programables e independientes por motor que nos permitirían controlar e incrementar la corriente a cada uno de estos de acuerdo a sus necesidades (trabajo futuro)

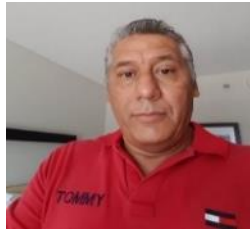
Créditos.

Los autores de la presente investigación agradecen al Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo y el apoyo proporcionado a través de sus alumnos de electrónica en diferentes modalidades de colaboración, como son residencias profesionales y servicios social.

Referencias Bibliográficas.

- Barrientos, A., Peñín, L., Balaguer, C. y Aracil, R. (2007).** *Fundamentos de robótica, 2da edición.* México: Editorial McGraw-Hill.
- Bolton, W. (2017).** *Mecatrónica.* México: Editorial Alfaomega.
- Esneca (2019).** *Qué es el brazo robótico y en qué industrias se emplea.* (05 de abril de 2019). ESNECA.
<https://www.esneca.com/blog/brazo-robotico-industrias/>
- Jaen, E. (2011).** *Cálculo y diseño de engranes helicoidales, Monografía de licenciatura,* Universidad Veracruzana,
https://www.academia.edu/17383436/C%C3%A1lculo_y_dise%C3%B1o_de_engranes_helicoidales
- Miranda, C. (2016).** *Cinemática y dinámica de robots manipuladores.* México: Editorial Alfaomega.
- Porcuna, L. (2016).** *Robótica y domótica básica con Arduino.* México: Editorial Ediciones de la Ura-ma.
- Torres, M. (s.f.).** *Sistemas de polea y correa.* Xunta de Galicia.
https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/42_sistemas_d_e_polea_y_correa.html

Información de los autores.



Raúl Moreno Rincón, Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, egresado de la ESIME IPN, en la ciudad de México, D.F. Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Toluca. Maestro en Educación Superior por la Universidad Autónoma de Chiapas. Certificado en SolidWorks Associate. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y jefe de Proyectos de Docencia de Ingeniería Electrónica. Es investigador desde 1999 y Colabora en la línea de investigación “Robótica” de Ingeniería electrónica y es parte del cuerpo académico en formación “sistemas de control inteligentes”. Ha realizado proyectos como: Sistema de alarma para personas con deficiencia auditiva basado en XBEE, robot de cafetería, araña hexápoda, sistema de control de animatronic, entre otros.



Paola Martínez Pérez, Estudiante de Ingeniero en Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, curso la especialidad de mecatrónica industrial, realizó su tesis profesional con el proyecto denominado “Sistema de control y posicionamiento tridimensional basado en un brazo robótico de 6gl (sistema electromecánico)”.



Álvaro Hernández Sol, es Ingeniero en electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y es investigador desde 1997. Certificado en SolidWorks Associate. Jefe de proyectos de investigación de ingeniería electrónica desde el 2001. Fundo y asesora el “Club de robótica del ITTG”. Colabora en la línea de investigación de “Robótica” de Ingeniería electrónica. Dirige el área de trabajo en “Robótica” y es parte del cuerpo académico “sistemas de control inteligentes”. Ha realizado investigaciones en el área de los sistemas alternativos de comunicación y en sistemas robóticos, Así como en sistemas traductores de lenguaje.



José Ángel Zepeda Hernández, es Ingeniero Industrial en Eléctrica y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez e investigador desde 1999, Imparte cátedra en el área de Ingeniería Electrónica y la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el ITTG, donde imparte las asignaturas de Diseño con Transistores y Electrónica Básica respectivamente. Líder del cuerpo académico en formación “sistemas de control inteligentes”.



Aldo Esteban Aguilar Castillejos, obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en el 2011 y el título de Ingeniero en Electrónica en el mismo Instituto, con especialidad en Instrumentación y Control. Certificado en SolidWorks Associate y SolidWorks Professional Avanzado, con Diplomado en Competencias para la enseñanza de las ciencias, Diplomado en Unreal Engine. Actualmente es parte del cuerpo académico en formación “sistemas de control inteligentes” del I.T.T.G. y parte del grupo de investigación en la Universidad del Valle de México, con desarrollos de proyectos financiados por CONACyT y empresas privadas. Con campos de interés en: dispositivos opto-mecatrónicos, manufactura, sensores de fibra óptica, instrumentación y control.