

*Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas*



ELEMENTOS DE FABRICACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO DE CUATRO GRADOS DE LIBERTAD BASADO EN PALANCAS

Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica

Autor: Yosvany Barceló Carmona

Tutor: Ing. Renier Fagundo Mesa

Dr. C. Ramón Quiza Sardiñas

Matanzas, 2021

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos» a darle el uso que estime más conveniente.

RESUMEN

Este trabajo consiste en el diseño de un sistema para el control de un prototipo de brazo robótico de cuatro grados de libertad. El mismo se desarrolló a partir del controlador Atmega328 presente en la placa de desarrollo Arduino Nano, emplea motores paso a paso modelo STP-42D3018 controlados a partir de drivers a4988 y una fuente de alimentación con tensión de 12V y corriente de 5A, utiliza potenciómetros como sensores de giro en cada articulación acoplados mecánicamente a los motores y de forma eléctrica a los conversores analógicos-digitales de la placa de control. Este dispositivo está conectado a una PC mediante la comunicación puerto serie que se utiliza en el modo manual a partir del cual se controla de forma directa por comandos o en un segundo modo de forma autónoma para la inicialización de parámetros de movimiento. Para el desarrollo del proyecto se inició con el diseño e implementación del circuito, luego se realizó la implementación del software y la interfaz de interacción con el robot; durante el proceso se tuvieron presentes las características principales del robot, las articulaciones y sus movimientos.

Palabras clave: brazo robótico; Arduino; a4988; potenciómetro.

ABSTRACT

This work consists of the design of a system for the control of a prototype of a robotic arm with four degrees of freedom. It was developed from the Atmega328 controller present on the Arduino Nano development board, it uses stepper motors model STP-42D3018 controlled from a4988 drivers and a power supply with 12V voltage and 5A current, it uses potentiometers such as rotation sensors in each joint mechanically coupled to the motors and electrically to the analog-digital converters of the control board. This device is connected to a PC through serial port communication that is used in manual mode from which it is controlled directly by commands or in a second mode autonomously for the initialization of movement parameters. The development of the project began with the design and implementation of the circuit, then the implementation of the software and the interaction interface with the robot was carried out. During the process, the main characteristics of the robot, its joints and motion were taken into account.

Keywords: robotic arm; Arduino; a4988; potentiometer.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1 Estado del Arte	3
1.1 Generalidades sobre los brazos robóticos	3
1.2 Fundamentos de la fabricación por manufactura aditiva	9
1.3 Conclusiones parciales	12
Capítulo 2 Secuencias Tecnológicas.....	13
2.1 Diseño preliminar los principales componentes	13
2.2 Secuencias de fabricación.....	14
2.3 Conclusiones parciales.....	15
Capítulo 3 Parametrización de los procesos de Fabricación.....	16
3.1 Parametrización de los procesos de manufactura aditiva	16
3.2 Parametrización de los procesos de corte por láser	17
3.3 Conclusiones parciales.....	18
Conclusiones	19
Recomendaciones	20
Referencias Bibliográficas	21
Anexos	23

INTRODUCCIÓN

Las soluciones robóticas juegan un papel clave en la industria manufacturera contemporánea, contribuyendo a lograr mayores niveles de automatización en los procesos de fabricación, eficiencia operacional, productividad y seguridad (Daniyan et al. 2020). Un sistema robótico consiste, de forma general, en un módulo mecánico para generar el movimiento, un módulo de control electrónico, un módulo de software que ejecuta un sistema de soporte de decisión para controlar a los actuadores electromecánicos y un protocolo de comunicación para transferir datos entre el sistema y el exterior (Rahul et al., 2020).

Los brazos robóticos son un tipo especial de sistemas robóticos, inspirados en el brazo humano, ampliamente utilizados en el sector industrial, principalmente, en funciones de producción, ensamble y manipulación. El movimiento de las partes del brazo robótico se logra a través de la rotación de los rotores de los motores eléctricos (Krimpenis et al., 2020).

En el presente trabajo se describe el diseño del módulo de control electrónico de un brazo robótico de cuatro grados de libertad, basado en tecnología Arduino. En el mismo, se expone tanto la selección de los componentes utilizados como el diseño y prueba del sistema propuesto.

Problema científico: Se necesita definir los procesos de fabricación de los principales componentes mecánicos de un brazo robótico de cuatro grados de libertad para ser utilizado como parte de una línea piloto de Industria 4.0.

Hipótesis: Mediante el uso de los procesos de fabricación modernos es posible fabricar los principales componentes mecánicos de un brazo robótico de cuatro grados de libertad.

Objetivo general: Definir los procesos de fabricación de los componentes principales de un brazo robótico de cuatro grados de libertad.

Tareas:

1. Definir los principales componentes del brazo robótico.
2. Definir las secuencias tecnológicas para la fabricación de los principales componentes del brazo robótico.
3. Establecer los parámetros tecnológicos fundamentales de los procesos de fabricación de los principales componentes del brazo robótico.

CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE

En este primer capítulo se exponen los principales conceptos utilizados en la investigación, la fundamentación teórica de los diferentes criterios del tema necesarios para el desarrollo de la metodología, diseño y los fundamentos de la fabricación de un brazo robótico de cuatro grados de libertad basado en palancas.

1.1 Generalidades sobre los brazos robóticos

En esencia la definición corta de un brazo robótico son robots articulados pues un brazo mecánico es construido y elaborado con estructuras de carácter flexible y conformadas por articulaciones adaptables que permiten ejecutar un amplio rango de movimientos y funciones simulando a un brazo humano. Tienen como principal característica el cumplir las funciones de agilizar actividades, tareas y funciones que requieren una actividad de repetitividad y precisión con entornos humanos seguros; durante los procesos de automatización de líneas de producción y manipulación de máquinas en diferentes industrias, Mecánica, Minería, Automovilística, Farmacéutica y Alimenticia.

El funcionamiento generalmente de los brazos robóticos es mediante la ejecución de un conjunto de lenguajes de programación que establecen las principales funciones, además de la incorporación de sensores que consolidan los objetivos de automatización para poder ejecutar las referencias por: fuerzas, aceleración, temperatura y ubicación durante la realización de sus actividades.

Las partes o componentes que conforman un brazo robótico según sus principales actividades de funcionamiento son:

- Controlador: Se constituye por un microordenador con unidad central encargado de calcular los procesos, movimientos y comandos a ejecutar.
- Actuadores: Corresponde a los motores encargados de generar fuerza para los movimientos.
- Manipulador: Parte mecánica que cumple la función de realizar los movimientos de los brazos mecánicos.
- Articulaciones y Muñeca: Subpartes de los manipuladores, y permiten generar los movimientos lineales y angulares.
- Muñeca: Es una parte de los robots industriales encargada de realizar los movimientos de elevación, desviación y giro, según el tipo de funciones.
- Mano robótica: Es la extensión final de la muñeca y cumple la función de la tarea de movimiento mecánico final, según sea el componente que corresponde a una pinza o alguna herramienta que cumpla las funciones de las condiciones de trabajo.

Actualmente, existe un crecimiento bastante importante de diferentes modelos de brazos robóticos que han sido incorporados a diversas aplicaciones en distintas industrias. Su uso a distintos niveles de actividades siempre han estado identificados en sus diversas capacidades según el número de articulaciones que lo conforman, las configuraciones que implican los niveles de movimiento, sus capacidades de posicionamiento, el grado de exactitud al realizar diversas tareas programadas, las capacidades de carga, sin dejar a un lado los aspectos asociados a la cantidad de peso que pueden movilizar o transportar, y finalmente la velocidad, relacionado al desplazamiento en que pueden ejecutar sus actividades.

Al mencionar este aspecto podemos indicar que son varias las industrias donde pueden incorporarse. Las aplicaciones de los brazos robóticos tienen mayor relevancia en el sector manufactura, minero y alimenticio. A continuación, enlistamos los de mayor relevancia:

- **Brazo robótico automatizado (Automotriz).** Se usan los robots de tipo cartesiano, los cuales tienen 3 ejes y cumplen con las funciones de soldadura, ensamblaje, pintura y atornillado garantizando repetitividad y bajo costo económico.
- **Brazo mecánico eléctrico.** Tienen un amplio dominio, los cuales proporcionan un eje final en el plano Z, que permiten hacer movimientos con cualquier o determinada herramienta, permiten el traslado y levantamiento de objetos.
- **Robot para Industria Minera.** Tiene predominancia de los robots articulados de 6 ejes, pues permiten realizar numerosas actividades de traslado de materiales pesados, laminación y ensamble de algunos procesos de fundición de metales.
- **Robot para Industria de Alimentos.** Existe una notable variedad de brazos mecánicos útiles para este tipo de industria, destacan los robots paralelos que cumplen diversas funciones de descarga, paletizado y distribución de objetos en una línea de producción.

- **Brazo Robótico Soldador.** Son brazos robóticos diseñados y optimizados para garantizar eficiencia y rentabilidad en los procesos de soldaduras con láser, gas o de otro tipo. Son compactos y trabajan a velocidad elevada, se caracterizan por su flexibilidad y muñeca central final para trabajar en lugares precisos al soldar.
- **Brazo Robótico para Armar.** Son un tipo de brazos robóticos industriales que permiten generar soluciones viables y polivalentes, pues generan lograr una automatización mediante tareas continuas que impliquen movilizar objetos de distintos pesos combinados con precisión y realizar montajes en diversos ángulos y posiciones.
- **Brazo Robótico para aplicación de pintura.** Están contruidos para brindar soluciones en procesos de automatización que impliquen equilibrar velocidad y rendimiento en aplicaciones de pintura en distintas industrias, son muy útiles para optimizar los márgenes de rentabilidad, tienen un balance entre capacidad de carga y alcance con ciclos de aceleración que ofrecen mejor desempeño.
- **Brazos Robóticos para Transporte de Material.** Son un tipo de brazo robótico ideal para lograr traslado de materiales pesados superiores a los 100 Kg, tienen un montaje flexible, pueden trabajar a distintas temperaturas, garantizan una actividad sostenida y rentable, pues se dedican a una tarea repetitiva con costos relativamente reducidos.

El circuito debe tener una unidad de control que gestione el movimiento de los motores, adquiera información de los sensores y que le permita comunicarse con un ordenador. Para esta función fue seleccionado el Arduino que no es más que una plataforma de desarrollo de software y hardware libre basada en una placa con un microcontrolador y entorno de desarrollo integrado (IDE) cuya principal ventaja es la facilidad de programación.

Específicamente, el modelo Arduino NANO, consta de 14 pines, cada uno de los cuales se puede configurar como entrada o salida digital. Los pines configurados como salida pueden proporcionar o absorber una corriente de hasta 40 mA, suficiente para excitar muchos circuitos, sensores, aunque insuficiente para otros, tales como relés, solenoides o motores. En estos casos, es preciso utilizar algún circuito excitador, tal como el driver A4988 que se usa específicamente para control de motores paso a paso.

Seis de los pines del arduino tienen la particularidad de que se pueden configurar también como salidas PWM (Pulse Width Modulation o, Modulación por ancho de pulso), lo que permite variar el ciclo de trabajo de la señal cuadrada generada en el pin, obtener una tensión cuyo valor medio puede variar entre 0 y 5 V y así simular una salida analógica sobre una salida digital como dispositivo de salida en la verificación y depuración de programas. Los pines 0 y 1 de E/S digital se pueden configurar para utilizarse como un puerto serie. Todas estas características hacen de esta placa de desarrollo una opción a considerar en términos de automática y robótica (Pessanha Santos, 2008).

Los drivers llevan integrado un potenciómetro cuya misión es la de regular la cantidad de corriente suministrada al motor, esta corriente refleja la fuerza que el motor es capaz de mover. Según el fabricante los valores óptimos de trabajo se encuentran ente 200 y 600 mA de corriente. Debido a la potencia que estos drivers manejan se calientan por tanto se debe efectuar una correcta disipación del calor generado añadiendo disipadores pasivos de aluminio. La disipación ayuda al correcto funcionamiento del chip ya que si la temperatura es extrema este puede reiniciarse, perder la configuración, movimiento y en un caso extremo destruirse (García Abella, 2018).

Con el objetivo de conocer las posiciones de los diferentes elementos del brazo, se utilizan potenciómetros, que consisten en una resistencia eléctrica de tres terminales en la que se puede desplazar uno de los terminales para crear un divisor de tensiones variable. Si sólo se conectan el terminal variable y uno de los fijos se tiene un reóstato o resistencia variable.

Son dispositivos relativamente económicos y muy utilizados en la industria a todos los niveles de especificación. Además, al consistir en un circuito de resistencias prácticamente cualquier diseño es posible. En cuanto al tipo de desplazamiento del actuador se puede distinguir entre deslizantes o de desplazamiento lineal y rotativo o de desplazamiento angular. En cuanto a materiales suelen fabricarse con resistencias cerámicas, de composite metálico-cerámico, de plástico conductor o de cable arrollado de cobre. El cuerpo se fabrica de algún material aislante, como medida de seguridad para el usuario, que suele ser termoplástico o termoestable.

Un potenciómetro de desplazamiento angular se puede acoplar con relativa facilidad al mecanismo de forma que el giro de éste último provoque la variación de resistencia en el primero. El contacto eléctrico que se produce en esta unión es de resistencia variable con dicha rotación. Al estar el cuerpo del servomecanismo también sólidamente unido al fuselaje, se consigue que no existan movimientos relativos entre el cuerpo del mecanismo y el cuerpo del potenciómetro, y el ángulo girado por el eje del mecanismo será idéntico al ángulo girado por el eje del potenciómetro.

Para el diseño del circuito se tuvieron en cuenta las características mecánicas del brazo robótico en particular los grados de libertad que según García Abella (2018), es el número mínimo de variables necesarias para definir la posición del robot en el espacio y su efector final. Se conoce como efector final al extremo de robot, es la parte del robot que nos interesa ya que adquirirá la posición y orientación deseada. Las variables del espacio (X, Y, Z, α) 4 en total permiten alcanzar cualquier posición (restringida en el espacio) y orientación. Para lograr estos 4 grados de libertad fue necesario el empleo de 4 motores como se puede observar en la que son los encargados de mover las articulaciones del brazo robótico que fueron nombradas en analogía con las de un brazo humano.

1.2 Fundamentos de la fabricación por manufactura aditiva

La fabricación aditiva, es un nuevo concepto de producción industrial a través del cual el material (plástico o metal) es depositado capa a capa de manera controlada allí donde se requiere.

Mediante esta técnica, que conocemos como impresión 3d, se pueden producir formas geométricas personalizadas en función de las necesidades de cada sector.

El proceso de fabricación aditiva comienza con un boceto CAD. A partir de ahí, el equipo de fabricación aditiva lee los datos de dicho archivo digital y agrega capas sucesivas de líquido, polvo o el material de que se trate (termoplástico, metal, resina, filamentos, fibra de carbono...), capa sobre capa, para fabricar un objeto 3D.

En contraste con las técnicas de fabricación industrial tradicionales, la fabricación aditiva significa:

Producción más rápida y más económica: Como te contábamos, la fabricación aditiva logra reducir hasta un 90% los tiempos de producción. Esto permite intensificar el ritmo de producción y reducir el coste por pieza. Los materiales que se utilizan para la impresión de pieza son a su vez económicos.

Producciones a menor escala y a medida: La relación histórica entre volumen de producción y coste no se cumple en la manufactura aditiva. Con la impresión 3D, la producción de piezas a medida y en tiradas de bajo volumen se convierte en una opción rentable y viable.

Reducción de costes logísticos: La posibilidad de fabricar piezas mediante procedimientos digitales repercute directamente en una reducción drástica de los costes de almacenaje y de logística. En la actualidad, podemos disponer de un stock virtual y fabricar “en el momento” aquella pieza que nos haga falta.

Ahorro energético: Emplear la fabricación aditiva en las líneas de producción es, entre otras cosas, una excelente alternativa para reducir el consumo energético de las

industrias. ¿Por qué? La respuesta es simple. Las piezas fabricadas digitalmente pesan mucho menos y esto implica que las máquinas necesiten mucha menos energía para funcionar.

Fabricación más sostenible: Mediante la fabricación aditiva se reducen los consumos energéticos y los costes de transporte (la materia prima ocupa menos espacio y se transporta de forma más sencilla. Además, la producción local se abarata y se evita la subcontratación de producciones en otros países. Todo ello consigue reducir de manera importante las emisiones contaminantes derivadas de los procesos productivos. Por otro lado, cabe mencionar que algunas tecnologías de fabricación aditiva, como el SLS o la MJF, permiten reciclar una importante parte del material que se ha usado durante el proceso de impresión. La manufactura aditiva consigue una producción más limpia y más respetuosa con el medio ambiente.

Fundamentos de la fabricación por corte por láser:

Un cortador láser es una herramienta de fabricación usado principalmente por ingenieros, diseñadores y artistas para cortar y grabar en materiales planos y prototipos. Cortadoras Láser utilizan un rayo láser fino, concentrado de perforar y cortar a través de materiales para cortar patrones y geometrías especificados por los diseñadores. Además de corte, láser cortador puede también trama o grabar diseños en las piezas de trabajo mediante el calentamiento de la superficie de la pieza, lo que la quema fuera de la capa superior del material para cambiar su apariencia donde fue realizada la operación de la trama.

Cortadoras Láser son herramientas muy útiles cuando se trata de prototipos y fabricación; se utilizan en talleres en escala industrial para cortar pedazos grandes de material, son utilizados por empresas de hardware para crear prototipos rápidos, baratos, y son herramientas utilizadas por los creadores y artistas como una herramienta de fabricación DIY para traer sus diseños digitales en el mundo físico. En esta guía que voy a explicar qué cortadoras láser son, lo que pueden hacer, y cómo se pueden utilizar, y también le proporcionaré algunos recursos si quieres aprender y hacer láser más con cortadores.

1.3 Conclusiones parciales

El análisis realizado permitirá la programación de los movimientos del brazo robótico, en combinación con su diseño electrónico y lógico. Permitirá, además, realizar el análisis de fabricación con respecto al corte por láser y la impresión 3D. Para realizar el diseño detallado de cada uno de sus componentes, esta información constituye la base del siguiente paso en investigación.

CAPÍTULO 2 SECUENCIAS TECNOLÓGICAS

En este segundo capítulo se expone el diseño preliminar, acompañado de la secuencia de fabricación a utilizar utilizando el análisis de posiciones y concluye dando resultados de dimensiones. Los conceptos utilizados en la investigación son la fundamentación teórica de los diferentes criterios del tema necesarios para el desarrollo de la metodología, diseño y el análisis de los parámetros de un brazo robótico de cuatro grados de libertad basado en palancas.

2.1 Diseño preliminar los principales componentes

Diseñar moldes para imprimir las piezas por inyección. o diseñarlas para poder ser cortadas con láser, utilizando como material el aluminio o un metal similar. o Diseñarlas para imprimirlas en una impresora 3D, utilizando como material el plástico.

Para el actuador final o elemento terminal se carga el filamento de termoplástico en la impresora, el cual es alimentado en el extrusor. Dentro del cual es calentado hasta fundirse. El extrusor es muy parecido en funcionamiento de una pistola de cola caliente este se encuentra conectado a un sistema en tres dimensiones que le permite moverse en tres ejes distintos. De izquierda a derecha, de arriba a abajo y cerca y lejos. La impresora imprime el objeto por capas, utilizando el filamento adecuado para cada uno. El proceso de impresión es lento, ya que se ha de esperar que el material utilizado se solidifique, por ello algunas impresoras 3D suelen tener un pequeño ventilador conectado al extrusor, pero esta lentitud promueve terminación a la pieza y con tal de conseguir que el modelo físico sea más fuerte, algunas impresoras suelen rellenar de más algunas partes del objeto.

En el caso del cuerpo, brazo y muñeca el corte con láser es una técnica que, a través de la energía térmica, es empleada.

Durante el proceso de corte, el rayo láser concentra la luz sobre un punto de la superficie del material de trabajo elevando su temperatura hasta que se derrite o vaporiza. Una vez el rayo láser ha traspasado la superficie se inicia el proceso de corte, redirigiendo el rayo láser en los puntos determinados según la geometría seleccionada hasta separar por completo el material.

Una vez finalizado el proceso de corte, realizado a través de maquinaria especializada y altamente tecnológica, se utiliza gas a presión (oxígeno, nitrógeno o CO₂) para extraer el material resultante.

Se obtiene alta precisión, versatilidad, agilidad y eficacia.

2.2 Secuencias de fabricación

Se realiza la construcción del sistema siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación.

1. Corte y construcción de piezas para la estructura.
2. Ensamblaje de estructura o esqueleto del sistema.
3. Adaptación de componentes varios.
4. Conexión entre sistema de control y estructura ensamblada.

2.3 Conclusiones parciales

El proceso de fabricación, manufactura o producción es el conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de las materias primas. Estas características pueden ser de naturaleza muy variada como la forma, la densidad, la resistencia, el tamaño o la estética, teniendo claro el proceso y secuencia determinados, las posibilidades de error son minimizadas a casi un 2% de error, estadística que permite continuar hacia la parametrización.

CAPÍTULO 3 PARAMETRIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

En este capítulo se incluye la parametrización escogida para la realización de nuestro brazo, se introducen las alternativas elegidas para la elaboración del mismo y los aspectos a tener en cuenta pensando en una forma de aplicación fácil y dinámica que deje en claro la dinámica elegida.

3.1 Parametrización de los procesos de manufactura aditiva

Una vez realizado el croquis de las piezas se ha utilizado SolidWorks, un software para diseño y simulación de piezas 3D. En dicho software se procede a crearlas en 3D y posteriormente se ensamblan virtualmente para comprobar su correcto funcionamiento y se añaden algunas relaciones con el fin de otorgarle movimiento y poder comprobar que las piezas están bien diseñadas y dimensionadas.

Tras hacer los diseños se guardan las piezas con el formato. SLDPRT y los ensamblajes con el formato. SLDASM. El archivo también se guarda con extensión. STL para que sea reconocido por la impresora 3D que utiliza el software Cura.

- Altura de capa: 0,2 mm.
- Altura de capa inicial: 0,2 mm.
- Ancho de línea: 0,4 mm.
- Ancho de pared: 0,4 mm.
- Densidad del soporte: 15 %.
- Relleno: 15 - 20 %.
- Tipo de adherencia de la placa de impresión: Falda.

- Boquilla: 0,4 mm. - Temperatura del extrusor: 240 °C.
- Temperatura de la cama: 70 °C la primera capa y 84 °C el resto.
- Velocidad de impresión: 65 mm/s.

Aunque se usan las características de impresión citadas anteriormente, en algunas piezas se varía el valor del relleno. Por ese motivo se pone el rango entre 15 y 20 %.

3.2 Parametrización de los procesos de corte por láser

Cuanto más grueso es el material a cortar, más crucial es contar con una alta potencia de láser para lograr una buena calidad. Por ejemplo, para el acrílico se aplica como regla general lo siguiente: 10W por milímetro.(Arias Delgado, 2019)

Para preparar un archivo de corte láser tienes que hacer lo siguiente:

- Para usar la máquina puedes utilizar cualquier software vectorial, desde Illustrator a Rhinoceros o Autocad.
- El dibujo debe estar a escala 1:1.
- Los límites de impresión óptimos son 600×300 mm o 1000×600 mm (según el láser).
En ningún momento el material puede ser más grande de estas dimensiones porque no entraría en la máquina.
- El orden de capas en el que debe estar dibujado el archivo para poder mecanizarse correctamente es:
 - cortes interiores = azul
 - cortes exteriores = verde

- grabado vector = rojo
- grabado raster = negro
- no imprimir = magenta:

Para usar la máquina puedes utilizar cualquier software vectorial, desde Illustrator a Rhinoceros o Autocad (empleado en la investigación). El dibujo debe estar a escala 1:1. Los límites de impresión óptimos son 600×300 mm o 1000×600 mm.(De León, Martínez, Rodríguez, & Cordero) En ningún momento el material puede ser más grande de estas dimensiones porque no entraría en la máquina.(Jordán Gamito, 2020)

3.3 Conclusiones parciales

Los parámetros recomendados favorecen la construcción del brazo robótico, en cuanto a coste y funcionalidad se trata, en la construcción final del prototipo se evidenciará fluides en los movimientos del robot al escoger materiales con fuerza y poco peso que no cederán y tendrán buen agarre.

CONCLUSIONES

1. En el diseño, desarrollo y fabricación de mecanismos autónomos, siempre será necesario implementarlos con un sistema de control, para que les permita interactuar con el entorno de una forma óptima. Se debe evaluar si el funcionamiento del mecanismo es el adecuado y que las acciones que ejecuta contribuyan a realizar tareas cumplir los objetivos que se asignaron.
2. Posterior a la construcción de la parte mecánica de un robot, es necesario que se realicen pruebas para determinar si existen elementos que no se incluyeron en el diseño y que su presencia o ausencia afectan al desempeño planificado.
3. Los robots están contruidos con piezas mecánicas y fuerzas externas como la gravedad y fricción que provocan distintos efectos en estos mecanismos.
4. El mayor aporte de la robótica a la humanidad y especialmente a la industria, es que a contribuido al mejoramiento de la producción, minimizando el tiempo de fabricación, mejorando la calidad y uniformidad.
5. Los beneficios que brinda la robótica en el presente y que brindara en el futuro son muy importantes y beneficiosos para la humanidad, pero no debemos olvidar que su significación social llevara a la mano de obra humana a otros niveles específicos lo que desencadenara una mayor ola de especialistas.

RECOMENDACIONES

1. Si se va a implementar un proyecto similar al brazo robótico presentado, se recomienda tomar en cuenta todos los pesos y torque generados por los eslabones del brazo robótico, y tomar en cuenta el escenario del peor caso, para así abarcar más allá de lo necesitado y no tener problemas de tipo mecánico.
2. Si no se tiene experiencia en el uso de programas de diseño mecánico, solicitar cualquier tipo de asesoría es de mucha ayuda ya que existen programas muy completos que pueden, con las simulaciones adecuadas, revelar problemas o inconvenientes que a simple vista no se observan.
3. Siempre es bueno explorar varias opciones. En este proyecto se consideraron varias opciones desde el material con el que se iba a realizar la estructura hasta la metodología con la cual se calcula el modelo cinemático directo. Esto no solo lleva a encontrar la solución más fácil, o económica, o eficaz, sino que también ayuda a enriquecer el conocimiento sobre algún tema en específico sobre el cual se puede tener poco o nada de información.

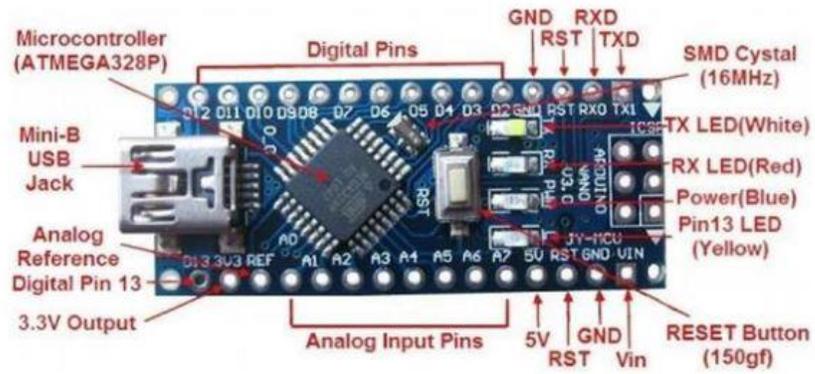
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Qahtani, H. M., Mohammed, A. A., & Sunar, M. (2017). Dynamics and Control of a Robotic Arm Having Four Links. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(5), 1841-1852. doi:10.1007/s13369-016-2324-y
- Bi, Z. M., Miao, Z., Zhang, B., & Zhang, C. W. J. (2020). The state of the art of testing standards for integrated robotic systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63, 101893. doi:10.1016/j.rcim.2019.101893
- De Jesús Rubio, J., Serrano, J., Figueroa, M., & Aguilar-Ibañez, C. F. (2014). Dynamic model with sensor and actuator for an articulated robotic arm. *Neural Computing and Applications*, 24(3), 573-581. doi:10.1007/s00521-012-1259-9
- Evliyaoglu, K. O., & Elitas, M. (2017). Design and Development of a Self-adaptive, Reconfigurable and Low-Cost Robotic Arm. Paper presented at the *Mechatronics and Robotics Engineering for Advanced and Intelligent Manufacturing*, Cham (Switzerland).
- Matulis, M., & Harvey, C. (2021). A robot arm digital twin utilising reinforcement learning. *Computers & Graphics*, 95, 106-114. doi:10.1016/j.cag.2021.01.011
- Ribeiro, J., Lima, R., Eckhardt, T., & Paiva, S. (2021). Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 – A Literature review. *Procedia Computer Science*, 181, 51-58. doi:10.1016/j.procs.2021.01.104
- Siemasz, R., Tomczuk, K., & Malecha, Z. (2020). 3D printed robotic arm with elements of artificial intelligence. *Procedia Computer Science*, 176, 3741-3750. doi:10.1016/j.procs.2020.09.013

Xu, L. (2019). Remote Control and Monitoring System of Robotic Arm Using Raspberry Pi. Paper presented at the *Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics*, Cham (Switzerland).

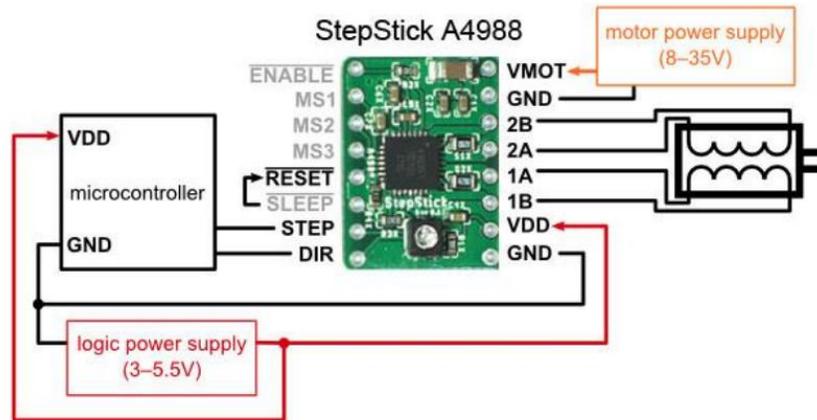
ANEXOS

Anexo 1.



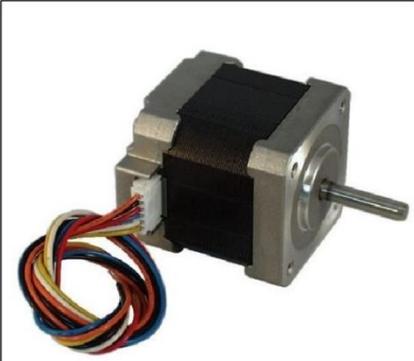
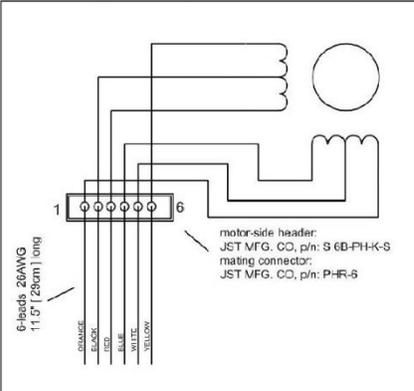
Arduino Nano (Herrero Herranz & Sánchez Allende, 2015)

Anexo 2.



Conexión del driver A4988 (De Bakker, 2020)

Anexo 3.

SPECIFICATIONS		(u) - UNIPOLAR connection (b) - BIPOLAR-SERIES connection
Step Angle	deg	1.8
Voltage	V DC	5.2 (u), 8.8(b)
Current / phase	A / phase	0.9 (u), 0.64(b)
Resistance / phase	ohm / phase	5.8 (u), 11.6 (b)
Inductance / phase	mH / phase	2.4 (u), 9.6 (b)
Holding Torque	oz-in	47 (u), 66 (b)
	N-cm	33 (u), 46 (b)
Detent Torque	oz-in	N/A
	N-cm	N/A
Rotor Inertia	oz-in ²	N/A
	g-cm ²	N/A
Weight	lbs	0.69
	kg	0.31

Características del motor STP-42D3018 (Kenshi, 2021)

Anexo 4.

Articulaciones		Sensores	
Grado de Libertad	Nombre	Pin Analógico	Unidad de entrada
GDL1	Hombro	A0	V
GDL2	Codo	A1	V
GDL3	Muñeca	A2	V
GDL4	Pinza	A3	V

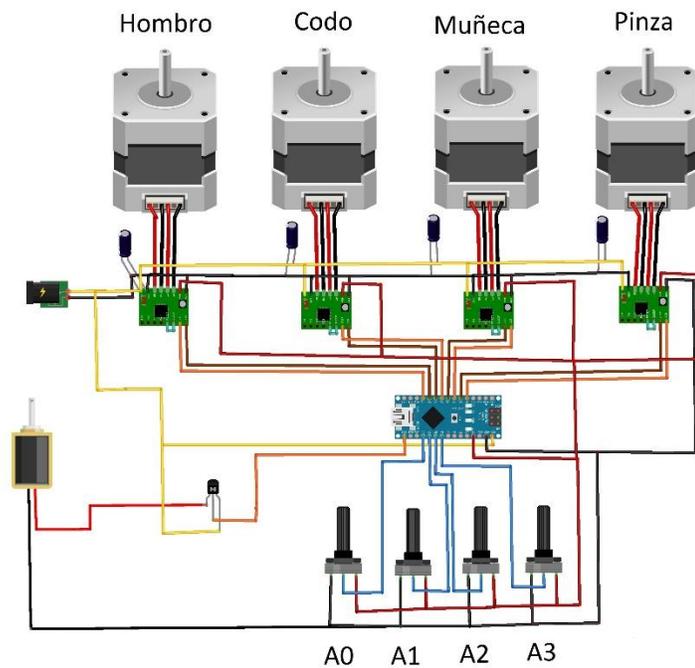
Articulaciones y sensores correspondientes

Anexo 5.

Ángulo de rotación		
Nombre	Mínimo	Máximo
Hombro	0°	270°
Codo	0°	90°
Muñeca	0°	90°
Pinza	0°	180°

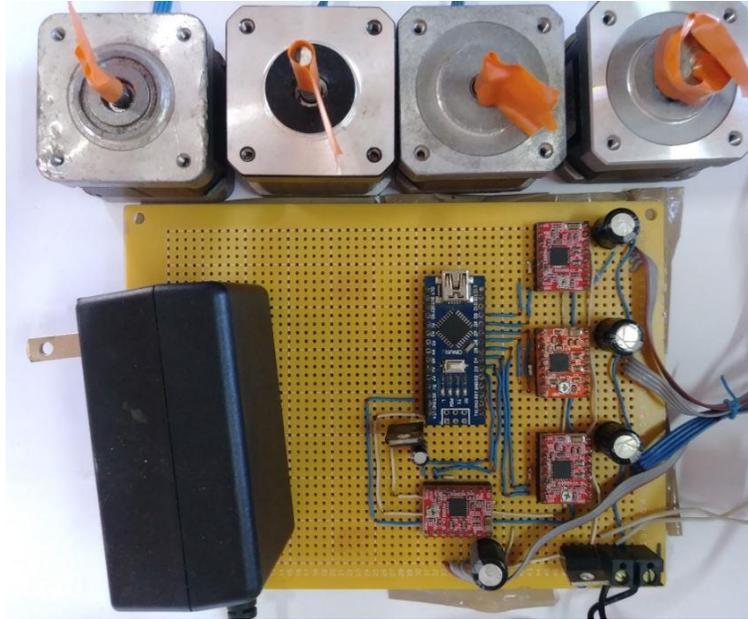
Rangos de movimiento angular por articulación

Anexo 6.



Diseño del circuito eléctrico

Anexo 7.



Circuito eléctrico del brazo robótico de 4 grados de libertad