

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de un sistema de motores inteligentes para  
aplicaciones de robótica de alta precisión y desempeño**

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Juan Pablo Isaac  
Valenzuela Saravia, estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2022

## Resumen

En este trabajo se desarrollará un sistema de motores inteligentes con el objetivo de controlarlos mediante un protocolo basado en una comunicación tipo *daisy-chain* desde un microcontrolador maestro. Su implementación permitirá al usuario controlar y monitorear el sistema de una forma sencilla y conveniente. Se utilizará el protocolo de comunicación implementado en la fase anterior, cuyo canal principal es la comunicación UART entre los microcontroladores del sistema. Estará basado en motores *stepper*, los cuales estarán controlados principalmente por un driver y un controlador PID digital. También se desea fabricar una caja reductora con tamaño acorde al motor donde se colocará, entre las propuestas están un sistema de engranajes planetarios, uno harmónico y uno cicloidal. Por último, se busca fabricar una carcasa para acomodar las tarjetas electrónicas, el motor y la caja reductora, de modo que el sistema sea modular y se pueda utilizar en el brazo robótico de la universidad.

## Antecedentes

En la fase previa del presente trabajo se llevó a cabo el desarrollo de motores inteligentes utilizando motores *stepper* Nema 23 y Nema 17. Yau, desarrolló la infraestructura de comunicación entre motores, la cual permite que los motores se interconecten unos con los otros formando un lazo cerrado tipo *daisy-chain* con el microcontrolador maestro. Cada motor estuvo integrado con un microcontrolador *Arduiono UNO*, el cual fue el responsable de implementar el sistema de control del motor y de manejar el protocolo de comunicación. Desde el microcontrolador maestro se pudo ajustar los parámetros de los controladores individualmente y se monitoreó la información relevante de cada motor [1].

## Motores inteligentes

*Lynxmotion* es uno de los fabricantes más antiguos de kits de robots, incluidos brazos robóticos, robots bípedos que caminan, cuadrúpedos, hexápodos, vehículos con orugas, ruedas y más. Anteriormente, esta empresa desarrolló un modelo de motor inteligente, el cual se denomina *LSS Servo*. Los servos inteligentes *Lynxmotion* (LSS) son actuadores nuevos, compactos, modulares y configurables diseñados para ser una evolución del servo RC estándar para su uso en robótica con varios grados de libertad y capacidad de interconectarse entre sí y con un microcontrolador maestro. Inteligente significa que los parámetros de cada servo son modificables y configurables por el usuario, hay retroalimentación del sensor, características de seguridad incorporadas y, aunque están destinados a conectarse a un microcontrolador, se pueden usar como actuadores RC avanzados. El protocolo de comunicación de los motores se basó en el protocolo SSC-32 / 32U y hace que la comunicación, el control y la configuración de los servos sean fáciles e intuitivos.[2]

*DYNAMIXEL* es una marca de actuador inteligente desarrollada por *ROBOTIS* para su uso en cualquier sistema robótico. El nombre *DYNAMIXEL* se deriva de dos palabras: *Dynamic* y *Cell*. El término hace referencia a un actuador inteligente todo en uno. Existen varios modelos de motores *DYNAMIXEL* con diferentes capacidades [3]. Lo que los diferencia de otros tipos de motores es:

- Diferentes modos para control de posición, control de velocidad, control de corriente (par), control PWM y más.
- La retroalimentación en tiempo real de posición, velocidad, corriente (torque/carga), temperatura, voltaje, estado del hardware y más están disponibles a través del firmware DYNAMIXEL.
- El control PID completo para posición y velocidad permite a los usuarios ajustar los movimientos.
- *Daisychainable*, es decir que se interconectan unos con otros y comparten un bus de datos.
- Soporta comunicación RS-485 y TTL (half-duplex/asíncrona).
- Es compatible con C/C++, PYTHON, JAVA, MATLAB, LABVIEW, ROS, R+, SDK y librerías para Windows, Linux y Mobile.

Además del desarrollo de motores, la compañía *Trinamic* desarrolla *drivers* y módulos para el control de motores enfocado en el *hardware*. Su área de especialidad es la robótica avanzada, Internet de las cosas, dispositivos médicos (que funcionan con baterías), fabricación aditiva, prótesis entre otros. La tecnología que utilizan los *drivers* es llamada *MicroPlyer*. Por cada señal *STEP* enviada al controlador del motor paso a paso, *MicroPlyer* puede producir hasta 256 micropasos para un mayor rendimiento. La unidad interpoladora flexible de *Trinamic* lo hace interpolando el tiempo entre dos pulsos de paso, determinando la tasa de paso midiendo el intervalo de tiempo del período de paso anterior y dividiéndolo en partes iguales. Estos controladores también pueden realizar *Field Oriented Control*. El control orientado al campo es la forma más eficiente de impulsar motores. Transforma las corrientes de fase reales de sistemas de coordenadas fijos en el estator a sistemas de coordenadas síncronos de campo mediante el uso de dos transformaciones matemáticas simples. Se desarrolló originalmente para aplicaciones de gama alta y difíciles de implementar pero *Trinamic* ofrece control orientado al campo como un elemento básico de hardware fácil de usar [4].

Otra compañía que también ofrece soluciones para el control de motores es *Odrive*, pero sus controladores se enfocan más en el *software*. La comunicación con un ODrive consiste en una serie de operaciones de punto final. En teoría, una operación de punto final puede ser cualquier tipo de datos serializados de cualquier manera. Existe una implementación de serialización predeterminada, pero si se desea usar un tipo personalizado se debe crear. Los puntos finales disponibles se pueden enumerar leyendo el JSON desde el punto final 0 y pueden ser diferentes para cada interfaz de comunicación aunque en la práctica usualmente no lo son [5].

Cada operación de punto final puede enviar bytes a un punto final (referenciado por su ID) y al mismo tiempo recibir bytes del mismo punto final (comunicación *full Duplex*). La semántica de estas cargas útiles es específica para el tipo de cada operación punto final, cuyo nombre se indica en el *JSON*. Hay una versión basada en paquetes y una variante basada en flujo del protocolo. Cada variante se emplea según corresponda. Por ejemplo, USB ejecuta la variante basada en paquetes de forma predeterminada, mientras que UART ejecuta la variante basada en flujo [5].

## Diseño de un sistema de motores inteligentes en conjunto con un sistema de control del brazo robótico asistencial para cirugías estereotácticas

El objetivo principal del proyecto fue diseñar un sistema de motores inteligentes que incorpore motores *stepper*, *drivers*, sensores y microcontroladores para luego implementarlo en el brazo robótico. También se buscó diseñar un protocolo cuya función principal fue entrelazar los módulos de reconocimiento de imágenes y control remoto. Asimismo, se diseñó un lazo de control manual a lazo abierto y otro a lazo cerrado únicamente para los movimientos finos. Después se desarrolló un sistema de motores inteligentes que combinó motores *stepper* y microcontroladores con comunicación tipo *daisy-chain*.

Para llevar a cabo esa tarea se eligió el modelo Dynamixel AX-12A, los cuales se utilizaron para generar el movimiento rotacional de 6 juntas. Sin embargo, Yau afirma que se descartó el primer prototipo debido a la construcción asimétrica del brazo. Se detalla en su trabajo que el segundo prototipo tuvo un diseño más simétrico y eso aumentó la estabilidad del sistema. La problemática de esta iteración fue que los motores no eran suficientemente robustos para soportar el peso de las primeras tres juntas, las cuales estaban próximas a la base. Finalmente Yau explica que para el prototipo numero 3 se cambiaron los motores problemáticos por unos modelo MX-106, del mismo fabricante. Finalmente se utilizó un arduino Mega para controlar los motores porque éste tiene una alta cantidad de entradas y salidas digitales.

Para la segunda etapa, Yau decidió cambiar los servomotores de la primera etapa por motores paso a paso o *stepper*. Los motores *stepper* son motores eléctricos de corriente directa sin escobillas. Dividen una rotación completa en varios pasos iguales.[6]

Con base en los cálculos mecánicos de la construcción del robot, se determinó que los motores Nema fueron adecuados para las juntas principales, debido al torque y robustez requeridos, y los Nema 17 para las juntas en la parte superior del brazo.

Se seleccionó el *driver* TB67S128FTG y se colocó en el motor Nema 23 en la base. En el caso del TB67S249FTG, se le colocará al segundo Nema 23 porque puede entregar 4.5 A, lo cual es suficiente para su aplicación. Por último se utilizó el *driver* DRV8825 para el resto de motores porque no manejaron cargas elevadas y se utilizaron para realizar movimientos con la herramienta [1].

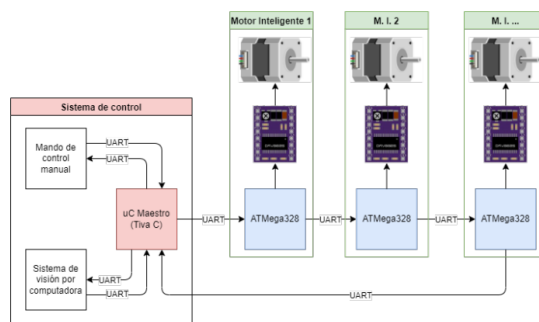


Figura 24: Diagrama de comunicación entre los dispositivos del brazo robótico

Figura 1: Conexión de los motores y el microcontrolador maestro

Luego se desarrolló un sistema de comunicación por UART para crear un lazo cerrado entre los motores y el microcontrolador maestro. Se utilizó un sistema *daisy-chain* en el cual se conectó un ATmega328 al *driver* correspondiente y se utilizó su módulo UART para comunicarse con los microcontroladores adyacentes. Se eligió este microcontrolador por sus recursos, disponibilidad en el mercado, precio y facilidad de implementación. Se conectó la salida de un microcontrolador a la entrada del siguiente, el primer microcontrolador se conectó a la salida UART del microcontrolador maestro mientras que el último se conectó a la entrada del UART maestro. Para comunicarse con los motores se dispone de una serie de comandos en donde la información viaja de microcontrolador a microcontrolador, de modo que al llegar al destino correcto se genere un mensaje de confirmación el cual regresa al microcontrolador maestro. De esta forma se puede verificar el funcionamiento adecuado en todos los motores. Como microcontrolador maestro se implementó la TivaC (TM4C123GH6PM) debido a que en la fase previa al trabajo de Yau ya se le había considerado. Desde el controlador maestro se supervisa el estado de todos los motores en la cadena y se les puede enviar los parámetros de sus controladores adaptativos [1].

Yau menciona que se realizaron pruebas con la Tiva C y el sistema de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) mediante un programa de python que permitió la comunicación serial entre el microcontrolador y la computadora. Sin embargo se encontraron problemas y se tomaron las siguientes medidas:

- Conexión serial en Python usando *ser.Serial()* y desconexión con *ser.close()*
- Verificación de la apertura del puerto serial con *ser.isOpen()*
- Uso de indicadores LED para verificar la ejecución de instrucciones

Al implementar el sistema OCR al sistema de control del brazo se resolvió el problema de latencia que se experimentó. Los resultados fueron satisfactorios, se obtuvo un error máximo de  $0.2^\circ$  en cada movimiento debido a que el número de pasos ejecutados era bajo. Por último, se realizaron pruebas con simulación del mando de control manual, en donde se armó un circuito sencillo utilizando un potenciómetro el cual intentaba acercarse lo más posible al funcionamiento real de un *encoder*. Luego se movió el motor paso a paso de la manera esperada pero solo cuando se rotaba lentamente el potenciómetro. El principal problema presentado fue la desincronización al mover el potenciómetro rápidamente. Yau concluyó que esto se podía deber al flujo de iteraciones utilizando la función “for” para llevar a cabo los pasos, en conjunto con el sistema de valores actuales y valores pasados implementado para evitar repeticiones de pasos.

Posteriormente se reemplazó el potenciómetro con un mando físico y se integró el sistema de reconocimiento de texto. Se conectaron los *drivers* con mayor capacidad de corriente a los motores Nema 23 mientras que se conectaron los *drivers* de segunda mayor capacidad a los motores Nema 17. Debido a los recursos limitados con los que se contaba, solo se utilizaron 3 motores en cada prueba, se cambiaron de posición para poder evaluar el rendimiento de las diferentes juntas. Los resultados permitieron verificar la exitosa recepción de datos del mando de control, tanto para ejecución de pasos como para cambio de modo de operación y la recepción de datos del sistema OCR. Adicionalmente, se logró confirmar el funcionamiento de los comandos creados para el sistema daisy chain empleado para el sistema de motores inteligentes [1].

## Justificación

Se continuará con el desarrollo debido a que en la fase anterior quedó pendiente la implementación del código fuente como una librería. También se deseaba evaluar la implementación de *Type-Length-Value* para el protocolo de comunicación ya que éste permite que el usuario defina los comandos del tipo de dato que está transmitiendo y los parámetros de la comunicación. Yau menciona que para añadir flexibilidad al sistema, se recomienda reconfigurar el sistema para poder utilizar cualquier tipo de motor, especialmente motores DC y servos. Finalmente, una de las principales oportunidades que la fase anterior dejó fue la creación de un motor más completo. Se desea agregar un *encoder* para que el sistema tenga un cero global para obtener un sistema de lazo cerrado. Esto permite que el usuario pueda obtener información específica del sistema como la posición de los actuadores e implementar un mejor sistema de control que reduzca vibraciones, *overshoot* y ajustes cuando se reemplaze un motor [1].

Otra de las razones es porque en el trabajo presentado por Castillo, se menciona que una de las principales complicaciones fue la manufacturación del sistema. Debido a que los detalles de la carcasa eran tan pequeños que no se pudieron fabricar mediante impresión 3D. La segunda razón fue porque la tecnología de la Universidad del Valle de Guatemala, no fue capaz de fabricar placas de por lo menos 4 capas y la única forma de obtenerlas era mediante empresas externas. Éstas placas eran necesarias para disminuir drásticamente el tamaño del actuador ya que lo que ocupa más espacio después del motor, son las placas electrónicas. Sin embargo, Castillo detalla que se logró diseñar un actuador suficientemente compacto pero no se logró fabricar. En este trabajo se desea fabricar actuadores similares pero con base en motores *stepper*, los cuales son de mayor tamaño debido a que serán implementados en un brazo robótico en un futuro. Debido a que en esta propuesta el sistema es de mayor tamaño, se podrá fabricar con mayor facilidad [7].

## Objetivos

### Objetivo general

Desarrollar un sistema de motores inteligentes, basado en motores *stepper* que se controle mediante un protocolo tipo *daisy-chain* desde un microcontrolador maestro.

### Objetivos específicos

1. Fabricación de una carcasa para contener el motor y la electrónica de control
2. Implementación de una caja reductora acorde a las necesidades de cada motor
3. Integración de *encoders* al sistema
4. Validación del protocolo de comunicación

## Subtareas

- Primer objetivo
  1. Diseño en CAD de una carcasa.
  2. Análisis estructural del diseño.
  3. Fabricación del prototipo de carcasa.
  4. Pruebas del prototipo.
  5. Implementación de mejoras resultantes de las pruebas.
  6. Integración con el brazo robótico.
- Segundo objetivo
  1. Investigar de posibles cajas reductoras a implementar.
  2. Diseñar la caja seleccionada acorde al tamaño del motor.
  3. Probar los engranajes con el motor.
  4. Realizar mejoras según los resultados de las pruebas.
- Tercer objetivo
  1. Investigar el mejor *encoder* para la aplicación.
  2. Diseñar o comprar el *encoder* según sea necesario.
  3. Integrar el *encoder* al motor.
  4. Realizar pruebas de funcionamiento.
- Cuarto objetivo
  1. Realizar pruebas en lazo abierto con motores *stepper*.
  2. Realizar pruebas de control en lazo cerrado con motores *stepper*.
  3. Realizar pruebas de comunicación entre motores.
  4. Verificar el funcionamiento de los comandos.

## Marco teórico

### Motores *stepper*

Como se mencionó anteriormente los motores *stepper* son máquinas eléctricas que convierten la energía eléctrica en energía mecánica. Además, es un motor eléctrico síncrono sin escobillas que puede dividir una rotación completa en muchos pasos. La rotación del eje se puede controlar con precisión sin utilizar retroalimentación, siempre que se utilice el motor adecuado para la aplicación [8].

El motor *stepper* utiliza imanes permanentes en el rotor y electroimanes en el estator para hacer que el eje del motor gire una distancia precisa cuando se proporciona un pulso de electricidad. Generalmente, el estator tiene ocho polos y el rotor tiene seis polos. El rotor requerirá 24 pulsos de electricidad para mover los 24 pasos para hacer una revolución

completa. Cuando se le suministra una corriente a las bobinas del estator, se genera un campo magnético alrededor de las mismas. Éste campo crea fuerzas electromotrices que interactúan con las fuerzas del campo magnético del rotor y lo hacen girar [8].

Cuando el rotor gira se alinea con el estator o para tener el menor espacio a través del estator. De esta forma, los estatores se activan en serie para hacer girar el motor paso a paso. En este motor, el devanado del estator está hecho de láminas de hierro al silicio para asegurar una magnetización adecuada. Los polos del estator y del rotor son independientes del tipo de motor [6].

Los tipos de motores *stepper* son:

- De imán permanente.
- Síncrono híbrido.
- De reluctancia variable.

Anteriormente se mencionó que los motores de imán permanente, lo utilizan en el rotor y funcionan con la atracción o repulsión entre el rotor y los electroimanes del estator. Este motor es el más común en comparación con los demás y también se conoce como motor de lata/lata. Su principal beneficio es que tiene el menor costo de fabricación [6].

Los motores de reluctancia variable tienen un rotor de hierro y funcionan según el principio de que la reluctancia mínima se produce con un entrehierro mínimo, por lo que los puntos del rotor se atraen hacia los polos magnéticos del estator. Se utiliza desde hace muchos años y como sugiere el nombre, la posición angular del rotor depende principalmente de la reluctancia del circuito magnético que se puede formar entre los dientes del estator y del rotor [6].

Los motores *stepper* híbridos reciben este nombre porque utilizan una combinación de técnicas de imán permanente (PM) y reluctancia variable (VR) para lograr la máxima potencia. Es el más popular porque ofrece un buen rendimiento en comparación con un rotor de imanes permanentes en términos de velocidad, resolución de paso y par de retención. Su principal desventaja es su elevado costo en comparación con los motores *stepper* de imanes permanentes. Estos motores se utilizan cuando se requiere un ángulo de paso menor, como 1.5, 1.8 y 2.5 grados [6].

A continuación se detalla las diferentes formas para operar un motor *stepper*:

1. El método básico para impulsar un motor paso a paso es el modo de excitación único. Es un método antiguo y actualmente ya no se usa, pero es importante conocerlo. En esta técnica cada fase frente al estator adyacente, se activará una por una alternativamente con un circuito especial. Esto magnetizará y desmagnetizará el estator para mover el rotor hacia adelante [6].
2. La siguiente técnica es conocida como paso completo o *full step*. En esta técnica, dos estatores se activan a la vez en lugar de uno en un intervalo casi instantáneo. El resultado es un par alto que permite que el motor impulse una carga alta sin problemas [6].



3. Después viene la técnica del medio paso o *half step*. Esta técnica está relacionada con la de paso completo porque los dos estatores se colocarán uno al lado del otro para que se activen primero, mientras que el tercero se activará luego. Esta técnica dará como resultado una resolución mejorada del motor paso a paso mientras se reduce el par [6].
4. Por último, viene la técnica conocida como *Micro Stepping*. Esta técnica es la más utilizada debido a su precisión. El principio fundamental consiste en dividir cada paso completo en pasos más pequeños para suavizar la rotación del motor a velocidades bajas. Por ejemplo, un paso de 1.8 grados se puede dividir hasta 256 veces, logrando un ángulo de paso de 0.007 grados ( $1.8 \div 256$ ), o 51,200 micropasos por cada revolución. El *Micro Stepping* se logra mediante el uso de voltaje modulado por ancho de pulso (PWM) para controlar la corriente a los devanados del motor. El controlador envía dos ondas sinusoidales de voltaje, desfasadas 90 grados, a los devanados del motor. Mientras que la corriente aumenta en un devanado, disminuye en el otro devanado. Esta transferencia gradual de corriente da como resultado un movimiento más suave y una producción de par más constante que el control de paso completo o de medio paso [6].

### *Daisy-Chain*

Una conexión tipo *Daisy-Chain* se parece un poco a una flor de margarita. En electrónica, una conexión en cadena tipo margarita es donde se conecta múltiples dispositivos secuencialmente en una conexión de cable ininterrumpida. En la red Daisy Chain, una computadora está conectada a la siguiente sin ningún dispositivo que intervenga, por lo tanto, el mensaje se envía de una computadora a la siguiente y luego a la siguiente, y así sucesivamente. Esto implica que el último dispositivo del bucle puede o no conectarse al primero. Esto quiere decir que estas conexiones pueden ser lineales o tipo anillo [9].



Linear Daisy Chain Topology

Figura 2: Conexión *Daisy-Chain* [10]

En una conexión en cadena lineal, una computadora se conecta a la siguiente mediante la conexión de cables de dos vías entre ellas, como se muestra en la figura 2.

Lo opuesto a la conexión *Daisy-Chain* es la conexión en estrella. En ésta cada dispositivo esclavo está conectado al maestro con un cable individual. El cableado en cadena se encuentra comúnmente en las comunicaciones en serie como RS485, donde los dispositivos individuales se conectan secuencialmente [11].

Una de las ventajas de las conexiones tipo *Daisy-Chain* es que utilizan menos longitud de cable en comparación con las conexiones en estrella, esto equivale a un tiempo y costo de instalación más rápidos. En teoría, una conexión *Daisy-Chain* puede parecer un anillo

pero en la práctica, difícilmente lo es. Es posible que tenga varios dispositivos repartidos a distancias irregulares y colocados en un área cerrada, lo que eleva el costo de la instalación de conexiones en estrella [11].

Este tipo de conexión facilita bastante la comunicación entre dispositivos pero también presenta desventajas. Mientras que se ahorra costos y tiempo de instalación, si ocurre una falla en un solo cable puede causar una interrupción total del sistema. Por ejemplo, si se rompe un cable entre el maestro y el primer dispositivo provocaría una pérdida de comunicación en todos los dispositivos [9].

## Cajas reductoras

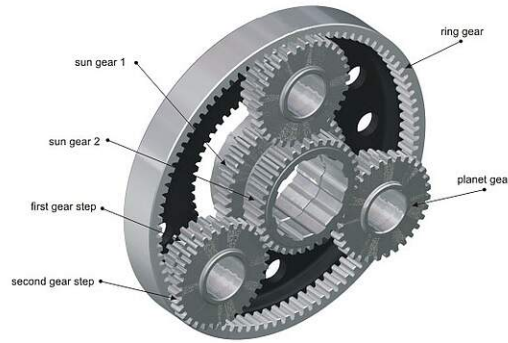


Figura 3: Transmisión planetaria [12]

Un sistema de transmisión planetaria (o sistema epicicloidal), consta normalmente de un engranaje solar de pivote central, una corona y varios engranajes planetarios que giran alrededor del solar [12].

La ventaja de una transmisión planetaria está determinada por la distribución de la carga entre múltiples engranajes planetarios. Por lo tanto, es posible transferir pares elevados utilizando un diseño compacto. Si se coloca la entrada de potencia a un miembro del sistema planetario y se aplica un mecanismo de freno para evitar la rotación de un segundo miembro, el tercer miembro girará y se convertirá en la salida [13]. Ésta permite tener varias reducciones de velocidad en un mismo mecanismo dependiendo de dónde sea la entrada de potencia y dónde sea la salida. Estas reducciones se detallan en el Cuadro 1, en donde  $N_s$  es el número de dientes del sol,  $N_A$  el número de dientes del anillo y  $N_p$  el número de dientes del planeta [14].

Detenido	Entrada	Salida	Reducción
Anillo	Sol	Portasatélite	$\frac{N_A}{N_s} + 1$
Portasatélites	Sol	Anillo	$\frac{N_A}{N_s}$
Sol	Anillo	Portasatélite	$\frac{N_s}{N_A} + 1$

Cuadro 1: Reducciones posibles del engranaje planetario [14].

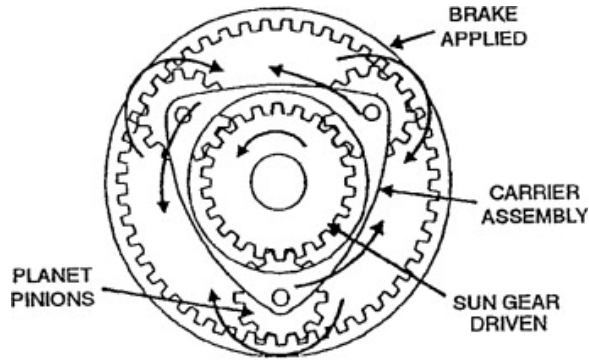


Figura 4: Partes del engranaje planetario [14]

Otra forma de lograr una transmisión de potencia efectiva es mediante el uso de un engranaje de transmisión armónica o *Harmonic Drive*. Es un dispositivo mecánico de cambio de velocidad, inventado en la década de 1950, que reduce la relación de transmisión de una máquina rotativa para aumentar el par. Funciona según un principio diferente al de las transmisiones de velocidad convencionales. El dispositivo consta de un anillo delgado que se desvía elásticamente mientras rueda dentro de un anillo circular rígido un poco más grande [15].

Hay tres elementos en un *Harmonic Drive*: un *spline* circular, un *flexspline* y un generador de ondas. El *spline* circular tiene dientes internos que engranan con dientes externos en el *flexspline*, que tiene menos dientes y un diámetro efectivo menor que el *spline* circular. El generador de ondas tiene forma elíptica y actúa como un enlace con dos rodillos que giran dentro del *flexspline*, haciendo que se engrane progresivamente con el *spline* circular en puntos diametralmente opuestos. Si el generador de ondas, (entrada de potencia) gira en el sentido de las agujas del reloj mientras el *spline* circular está fijo, el *flexspline*, que actúa como salida de potencia, girará a un ritmo mucho más lento y en sentido contrario a las agujas del reloj [16].

La relación entre la velocidad de entrada y la de salida depende de la diferencia en el número de dientes en la ranura circular y en la ranura flexible. Es posible producir reducciones de velocidad de hasta 320 a 1 en estas transmisiones, las cuales son más ligeras, más pequeñas y más eficientes que las transmisiones convencionales de alta relación [16].

Entre las ventajas de esta transmisión se encuentran la falta de juego, porque el movimiento de acoplamiento de los dientes (cinemática) del engranaje impulsor armónico es muy diferente al de los engranajes planetarios o rectos. El diseño permite que un 30 % de los dientes esté engranado en todo momento en comparación con seis dientes para un engranaje planetario o uno o dos para una transmisión tradicional recta. Otra ventaja es el rendimiento consistente ya que como parte del diseño, los dientes del engranaje de la ranura flexible están precargados contra los de la ranura circular en el eje principal de la elipse. A medida que los dientes del engranaje se desgastan, la deformación radial elástica actúa como un resorte muy rígido para compensar el espacio entre los dientes que, de lo contrario, provocaría un aumento en la holgura. También relaciones de torque a peso y de torque a volumen más altas que otras tecnologías de engranajes. Por último, ofrecen una excelente precisión en las posiciones debido a la combinación del principio de transmisión armónica y la tecnología de

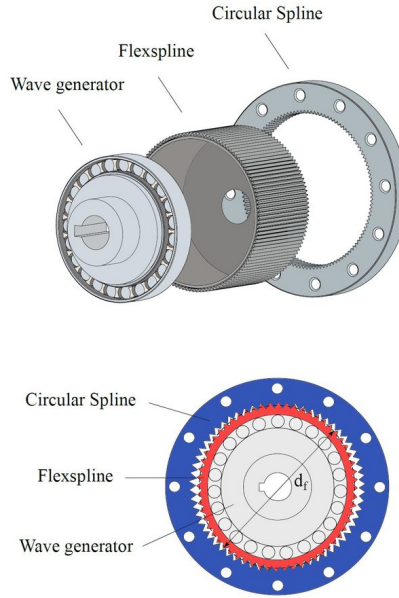


Figura 5: Partes del *Harmonic Drive* [17].

fabricación, lo que permite una precisión de posición de 30 segundos de arco ( $0.008^\circ$ ) [15].

La transmisión cicloidal es otro sistema eficiente que se utiliza frecuentemente en muchas áreas industriales enfocadas en velocidad y conversión de par, debido a su gran relación de transmisión, tamaño compacto, gran capacidad de carga y alta eficiencia. En los últimos años se utilizan cada vez más en la transmisión de precisión, principalmente en el área de robótica y aeroespacial. Se caracteriza por engranar simultáneamente la mitad de sus dientes, además, tienen el excelente efecto de promediación de los errores lo que aporta una alta precisión. En comparación con el *Harmonic Drive*, no hay ningún elemento flexible en la transmisión cicloidal que pueda generar una gran rigidez [18].

Esta transmisión consiste en un eje de transmisión excéntrico que impulsa un disco cicloidal con pasadores anulares. Los pasadores están dispuestos en un círculo alrededor del eje excéntrico, en el que se acopla el disco cicloidal. Debido al movimiento excéntrico, el disco cicloidal gira alrededor de estos pasadores para que el disco cicloidal gire alrededor de su eje de simetría. Hay agujeros en el disco cicloidal que, a diferencia del eje excéntrico, ahora giran en el sentido de las agujas del reloj. Los pasadores de rodillos de un disco de pasadores encajan en estos orificios. De esta manera, el disco cicloidal acciona el disco de pasadores, al que se une el eje de salida montado en el centro y que es coaxial con el eje de entrada [18].

La relación de transmisión de un accionamiento cicloidal está determinada por el número de pines fijos del anillo ( $N$ ) y el número de lóbulos del disco cicloidal ( $n$ ). El número de lóbulos en el disco cicloidal siempre debe ser menor que el número de pasadores que lo rodean, de lo contrario, el disco sería más grande que el círculo de referencia de los pasadores y el disco ni siquiera encajaría entre los pasadores. En la mayoría de los casos, el disco cicloidal tiene un lóbulo menos que el número de pines [18].

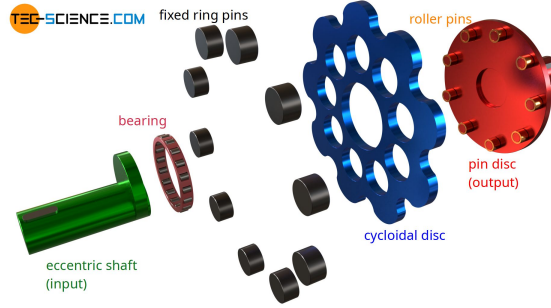


Figura 6: Partes de la transmisión cicloidal [19]

La relación de transmisión de un accionamiento cicloidal se puede determinar de la siguiente manera, sobre la base del número de lóbulos del disco cicloidal  $n$  y la diferencia con el número de pines  $N$ :

$$i = \frac{n}{N-n}$$

## Encoders

Un *encoder* es un dispositivo que proporciona retroalimentación negativa si se implementa en un lazo de control. Convierten el movimiento en una señal eléctrica que puede ser leída por algún dispositivo en un sistema de control de movimiento, como un contador o un PLC. El codificador envía una señal de retroalimentación que se puede usar para determinar la posición, el conteo, la velocidad o la dirección. Un dispositivo de control puede usar esta información para enviar un comando para una función particular [20].

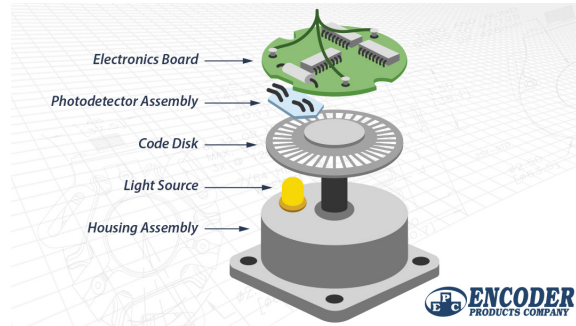


Figura 7: Elementos de un *encoder*[20].

Utilizan diferentes tipos de tecnologías para crear una señal, que incluyen: mecánica, magnética, resistiva y óptica, siendo la óptica la más común. En la detección óptica, el *encoder* proporciona información basada en la interrupción de la luz. En la detección óptica un haz de luz emitido por un LED pasa a través del *Code Disk*, que tiene un patrón de líneas opacas (parecido a los radios de una rueda de bicicleta). A medida que gira el eje del motor en donde se instaló, el haz de luz se ve interrumpido por las líneas opacas del disco de codificación antes de ser captado por el conjunto del fotodetector. Esto produce una señal de pulso: luz = encendido y sin luz = apagado. La señal se envía al contador o controlador,

que luego enviará la señal para producir la función deseada [20].

La implementación de *encoders* para controlar motores trae muchas ventajas. Son precisos y confiables, tienen bajo costo, alta resolución, son compactos y además tiene electrónica integrada que hace todo el proceso. Sin embargo, presentan algunas desventajas como interferencia en *encoders* magnéticos debido a ondas electromagnéticas o de radio. En los ópticos, las fuentes externas de luz pueden interferir con el proceso. En general, son susceptibles a la suciedad, contaminantes de polvo y aceite dependiendo del ambiente en donde estén [21].

Algunas aplicaciones de estos dispositivos son en robótica, taladros de todo tipo, bandas transportadoras, **equipo médico**, líneas de ensamblaje, automatización y control de compuertas [21].

El *encoder* lineal convierte la posición lineal en una señal de salida eléctrica. Sus partes principales son una escala de cinta métrica, una fuente de luz y un fotorreceptor. Generalmente, la fuente de luz y el fotorreceptor se encuentran juntos. Éste dispositivo puede detectar el movimiento a partir de los cambios de posición con el tiempo.

Los *encoders* lineales pueden ser de tipo óptico, magnético, inductivo, capacitivo y de *Corriente de Eddy*. Los magnéticos usan un sensor magnético y una escala magnética para producir los canales de salida analógicos A y B, de modo que cuando el sensor magnético pase a lo largo de la escala magnética, el sensor detectará un cambio en el campo magnético y emitirá una señal. Esta señal de salida será proporcional a la velocidad de medición y al desplazamiento del sensor. La principal ventaja del *encoder* lineal es que funciona mediante un cambio en el campo magnético, por lo que no se verá afectado por la interferencia de la luz, el aceite, los desechos, etc [20].

Los de tipo capacitivo funcionan detectando la capacitancia entre un lector y una báscula. Las aplicaciones comunes son calibradores en digitales o *vernier*. Una de las desventajas es la sensibilidad a la suciedad irregular, que puede cambiar localmente la permitividad relativa e introducir errores en las mediciones [21].

Los de tipo inductivo son resistentes a los contaminantes, por lo que se pueden utilizar en calibres y otras herramientas de medición a prueba de refrigerantes. Una aplicación muy popular del principio de medición inductivo es el Inductosyn [21].

Los de tipo de *corriente de Eddy* de alto rendimiento se caracterizan por no tener contacto y medir la posición y el movimiento de los objetivos conductores. Estos sensores usan una bobina de referencia para producir un campo magnético en un objetivo. A medida que el objetivo se acerca al sensor, los campos magnéticos del sensor y del objetivo se distorsionan entre sí. Frecuentemente se les confunde con los de tipo inductivo debido a principios de funcionamiento similares. Estos últimos, se utilizan en los interruptores de proximidad industriales, pero no son adecuados para aplicaciones de metrología de precisión. Por el contrario, los sensores de *corriente de Eddy* tienen salidas muy lineales, alta resolución y son estables con la temperatura [21].

Otro tipo de *encoder* es el rotatorio, el cual es capaz de convertir la posición angular del movimiento del eje en una señal digital. En éste, el eje del dispositivo estará acoplado al eje del motor a monitorear. La revolución del eje luego se convierte en una señal eléctrica y se hace con la ayuda de un sistema fotoeléctrico y uno de procesamiento. Por último, esta

señal eléctrica se transfiere al PLCs.

Los *encoders* rotatorios también pueden ser de tipo óptico, magnético y mecánico. Los últimos también se conocen como *encoders* conductivos. Para su implementación, se utiliza una serie de pistas de cobre circunferenciales grabadas en una PCB para codificar la información a través de cepillos de contacto que detectan las áreas conductoras. Son económicos pero susceptibles al desgaste mecánico. Son comunes en las interfaces humanas, como los multímetros digitales, ratones optomecánicos y trackballs, reómetros de tensión controlada y plataformas de radar giratorias [22].

Todos los tipos anteriores se refieren a la forma en que funcionan estos dispositivos, pero esto se puede resumir en dos grandes clasificaciones que se refieren a la forma en la que toman los datos: los absolutos y los incrementales.

Los absolutos pueden proporcionar la ubicación específica. Pueden ser de una o varias vueltas. Los de una sola vuelta son adecuados para aplicaciones de recorrido corto, mientras que los de varias vueltas son adecuados para aplicaciones de posiciones largas. Los componentes de un *encoders* absoluto son casi los mismos que los de un incremental.

Los absolutos están compuestos por una fuente de luz que sería LED, un fotodetector y un disco. Los codificadores absolutos también se denominan *encoders* de ángulo de eje y se utilizan para detectar la posición angular. El disco o placa que tiene segmentos opacos o transparentes pasa entre una fuente de luz y esta podría ser un LED y el haz de luz sería interrumpido por el detector. La señal electrónica generada se transferirá luego a un controlador donde la posición y la velocidad se calculan de acuerdo con la señal recibida [22].

Por el otro lado, los incrementales se utilizan principalmente para determinar la posición angular o lineal. Tienen sensores para hacer la medición angular, los cuales pueden ser mecánicos o magnéticos. El codificador incremental utiliza un disco transparente y tendría secciones opacas que están igualmente espaciadas para conocer el movimiento. El LED pasaría la luz a través de un disco de vidrio y sería detectado por un fotodetector, por lo que el codificador generaría pulsos que son pulsos igualmente espaciados [22].

## Metodología

**Pruebas de comunicación** Se realizarán pruebas de comunicación para verificar que el protocolo sea robusto y funcione adecuadamente. También se harán modificaciones en los comandos según sea necesario para mejorar la interacción usuario-controlador.

**Pruebas del sistema de control** Se ajustarán los controladores para obtener un mejor desempeño en cada motor. También se realizarán pruebas para verificar que el sistema de control funcione adecuadamente.

**Diseño de carcasa** Se diseñará una carcasa en CAD para acomodar todos los componentes e integrarlos. Ésta debe ser robusta, compacta y debe poder fabricarse con las herramientas de la universidad.

**Selección de *encoder*** Se evaluará la posibilidad de implementar un *encoder* comercial o la fabricación de uno. Se prefiere un *encoder* óptico ya que éste tiene un bajo costo y su principio de funcionamiento es sencillo.

**Instalación de *encoder*** Se instalará el *encoder* cuando el prototipo de carcasa esté terminado junto con el motor y demás electrónicos.

**Pruebas de drivers** Se utilizará el driver A4988, el cual se puede conseguir localmente y se utilizó en la fase anterior para realizar pruebas con los motores. Se verificará que el funcionamiento de los motores sea adecuado, primero en lazo abierto y luego en lazo cerrado implementando el controlador utilizado en la fase previa.

**Selección de caja reductora** Se evaluará la mejor opción para implementar la caja reductora para cada motor. Las principales opciones son utilizar engranajes planetarios, armónicos o cicloidales. Se escogerá la opción que sea más precisa, presente menos interferencia y que se pueda fabricar de una forma compacta con las herramientas disponibles.

**Implementación de la caja reductora** La caja reductora se integrará a la carcasa general para simplificar el proceso de ensamblado y reparación (de ser necesario).

**Evaluación de sensores** Se busca implementar principalmente sensores ópticos infrarrojos para utilizarse en los *encoders*. Se desea que el diseño sea simple, funcional y que se pueda desarrollar en 6 meses, por lo que no se implementarán demasiados sensores.

**Integración de todo el sistema** Se trabajará un diseño modular que se pueda ensamblar fácilmente y de ser posible evitar utilizar herramientas sofisticadas.

**Pruebas finales** Se pondrán a funcionar los motores, alimentados con las fuentes de laboratorio y se controlarán desde el microcontrolador maestro.

**Revisión** Por último se procederá a realizar una revisión general del funcionamiento del sistema y también una revisión después de cada fase de prueba con el objetivo de obtener retroalimentación de los resultados obtenidos para implementar mejoras en el diseño.



# Cronograma de actividades

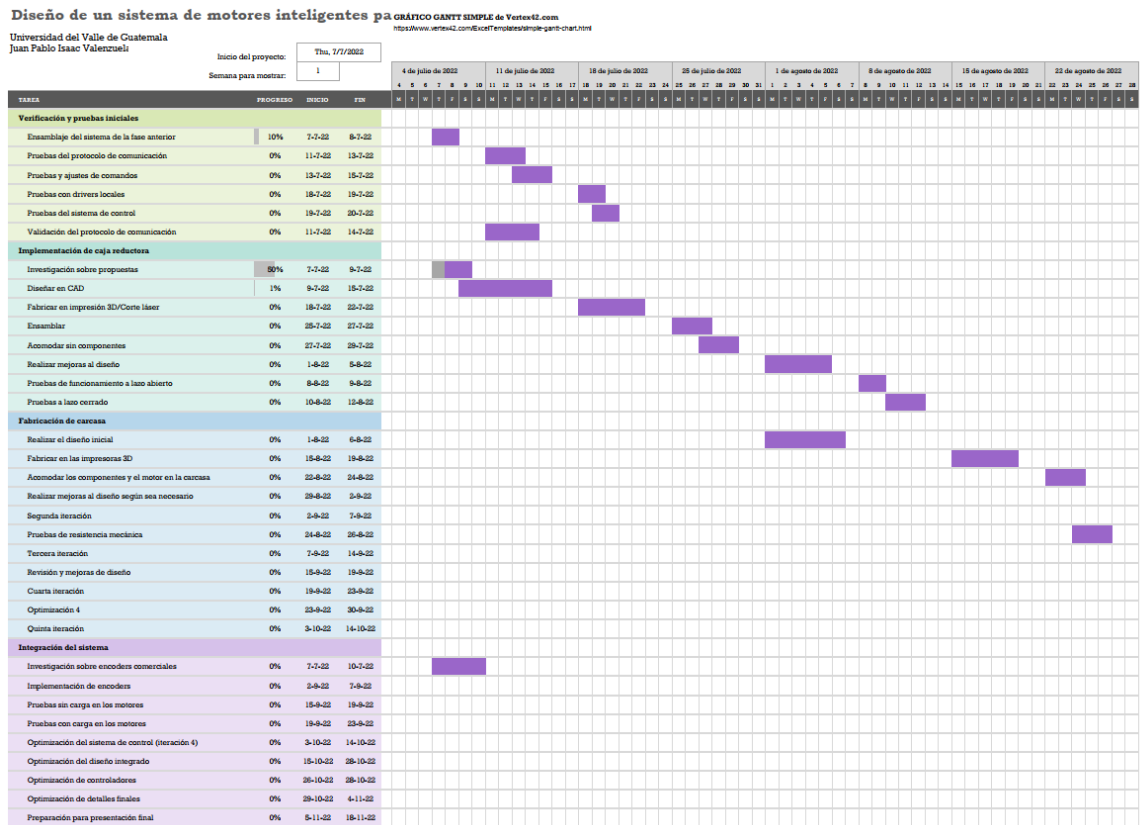


Figura 8: Diagrama de Gantt de la ejecución del protocolo.

# Índice preliminar

1. Prefacio
2. Lista de figuras
3. Lista de cuadros
4. Resumen
5. Abstract
6. Introducción
7. Antecedentes
  - a) Motores inteligentes
  - b) Diseño de un sistema de motores inteligentes en conjunto con un sistema de control del brazo robótico asistencial para cirugías estereotácticas
8. Justificación
9. Objetivos
  - a) Objetivo general
  - b) Objetivos específicos
10. Alcance
11. Marco teórico
  - a) Motores *stepper*
  - b) *Daisy-Chain*
  - c) Cajas reductoras
    - 1) Engranaje planetario
    - 2) *Harmonic Drive*
    - 3) *Cycloidal Drive*
    - 4) *Encoders*
12. Desarrollo de motores *stepper* inteligentes
13. Integración del sistema
14. Pruebas realizadas
15. Desgaste
16. Interferencia en engranajes
17. Conclusiones
18. Recomendaciones
19. Bibliografía
20. Anexos

## Referencias

- [1] P. Yau, “Diseño de un sistema de motores inteligentes en conjunto con un sistema de control del brazo robótico asistencial para cirugías estereotácticas,” Tesis de Ingeniería Mecatrónica, Universidad del Valle de Guatemala, Departamento de Ingeniería Biomédica, Mecatrónica y Electrónica, ene. de 2021.
- [2] Lynxmotion. “LSS Servos.” (2021), dirección: <http://www.lynxmotion.com/>.
- [3] Dynamixel. “What is DYNAMIXEL?” (2022), dirección: <http://www.dynamixel.com/whatisdxi.php>.
- [4] Trinamic. “Motor Control Technology.” (2022), dirección: <https://www.trinamic.com/technology/motor-control-technology/>.
- [5] O. Robotics. “ODrive Communication Protocol.” (2021), dirección: <https://docs.odriverobotics.com/v/latest/protocol.html>.
- [6] D. Jones. “Control of Stepper Motors.” (2021), dirección: <http://homepage.divms.uiowa.edu/~jones/step/>.
- [7] J. D. Castillo, “Desarrollo de actuadores altamente dinámicos con aplicaciones en robótica bio-inspirada,” Tesis de Ingeniería Mecatrónica, Universidad del Valle de Guatemala, Departamento de Ingeniería Biomédica, Mecatrónica y Electrónica, ene. de 2021.
- [8] Elprocus. “What is a Stepper Motor: Types and Working.” (2013), dirección: <https://www.elprocus.com/stepper-motor-types-advantages-applications/>.
- [9] A. Jahejo. “Daisy Chain Network | Advantages and Disadvantages.” (2022), dirección: <https://computernetworktopology.com/daisy-chain-network/>.
- [10] D. Asturias. “Network Topology Guide: Types, Mapping, and Design.” (2021), dirección: <https://www.pcwld.com/network-topology-guide>.
- [11] A. Designer. “Keep the Petals on: Optimizing Daisy Chain Wired Communication.” (2018), dirección: <https://resources.altium.com/p/keep-petals-optimizing-daisy-chain-wired-communication>.
- [12] Rohloff. “Planetary gear system.” (2022), dirección: <https://www.rohloff.de/en/experience/technology-in-detail/planetary-gear-system>.
- [13] “International Gear Conference 2014,” en *Forsthoffer’s Best Practice Handbook for Rotating Machinery*, W. Forsthoffer, ed., Boston: Butterworth-Heinemann, 2014, pág. ix, ISBN: 978-0-08-096676-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096676-2.10038-4>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080966762100384>.
- [14] F. Ren y D. Qin, “Investigation of the effect of manufacturing errors on dynamic characteristics of herringbone planetary gear trains,” en *International Gear Conference 2014: 26th–28th August 2014, Lyon*, P. Velez, ed., Oxford: Chandos Publishing, 2014, págs. 230-239, ISBN: 978-1-78242-194-8. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781782421955.230>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782421948500276>.
- [15] A. Lauletta, “Basics of harmonic drive gearing,” *Gear product news*, págs. 32-36, abr. de 2006. DOI: <https://web.archive.org/web/20160303211059/http://www.gearproductnews.com/issues/0406/gpn.pdf>.

- [16] J. P. Rafferty. “Harmonic Drive.” (2021), dirección: <https://www.britannica.com/technology/Harmonic-Drive>.
- [17] E. Saerens. “Exploded view of the different parts of a harmonic drive (top) and a detailed cross-section view of it (bottom).” (2019), dirección: [https://www.researchgate.net/figure/Exploded-view-of-the-different-parts-of-a-harmonic-drive-top-and-a-detailed\\_fig12\\_334030874](https://www.researchgate.net/figure/Exploded-view-of-the-different-parts-of-a-harmonic-drive-top-and-a-detailed_fig12_334030874).
- [18] B. Chen, H. Zhong, J. Liu, C. Li y T. Fang, “Generation and investigation of a new cycloid drive with double contact,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 49, págs. 270-283, 2012, ISSN: 0094-114X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.10.001>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X11001935>.
- [19] TecScience. “How does a cycloidal drive work?” (2019), dirección: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/how-does-a-cycloidal-gear-drive-work/>.
- [20] EPC. “What is an Encoder?” (2022), dirección: <https://www.encoder.com/article-what-is-an-encoder>.
- [21] S. Basler, *Encoder und Motor-Feedback-Systeme*, 1.<sup>a</sup> ed. Springer Fachmedien, 2016.
- [22] M. Murray. “HOW ROTARY ENCODERS WORK – ELECTRONICS BASICS.” (2021), dirección: <https://www.thegeekpub.com/245407/how-rotary-encoders-work-electronics-basics/>.