

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**“Diseño y Caracterización de sistema mecánico para automatización
de arquero en Taca-Taca”**

NICOLÁS EDUARDO HERNÁNDEZ PEÑA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRÓNICO, MENCIÓN COMPUTADORES**

PROFESOR GUIA: GONZALO CARVAJAL BARRERA

PROFESOR CORREFERENTE: FRANCISCO VARGAS

Agradecimientos

A lo largo de mi paso por la Universidad me vi acompañado de muchas personas y amigos con los cuales crecí como persona y profesional. Me gustaría agradecer y dedicar este proyecto a mis amigos y familia, que sin su apoyo incondicional no habría podido llegar hasta este punto.

Agradezco de forma especial al equipo Sysmic Robotic USM y sus integrantes, que han sido como una familia para mí durante los últimos años de carrera.

Resumen

El trabajo desarrollado en este proyecto de memoria de título corresponde al diseño, construcción, y caracterización experimental de una plataforma electro-mecánica para el control preciso del movimiento de la barra de un arquero de una mesa de taca-taca por medio de señales enviadas por un computador. El desarrollo de esta plataforma tiene dos objetivos inmediatos: (i) proveer una base para la evaluación experimental de distintas técnicas y tecnologías de sensado, procesamiento de datos, y algoritmos de control para controlar el movimiento de motores, tanto con fines de investigación como pedagógicos; y (ii) integrarse con un sistema de visión computacional existente que permita el movimiento automatizado del arquero para que pueda detener tiros dirigidos al arco.

La plataforma desarrollada permite controlar el movimiento horizontal de la barra del arquero por medio de poleas y correas síncronas, y el movimiento rotacional por medio de un servomotor y encoders rotacionales. Para evaluar y caracterizar el comportamiento del sistema electro-mecánico, se implementó un sistema computacional de peritaje que permite enviar señales de referencia a los motores y medir la posición del motor, posición del arquero, velocidad de desplazamiento y corriente consumida por la plataforma.

El presente documento reporta el análisis realizado para establecer los requerimientos del sistema considerando condiciones de juego reales, los criterios definidos para la selección de componentes, detalles de construcción de la plataforma electromecánica, caracterización experimental del desempeño de la plataforma en entornos controlados, y la integración con el sistema de visión computacional y de control desarrollado previamente para automatizar el movimiento del arquero en un juego.

Palabra clave: Automatización de taca-taca, BLDC, Odrive Robotics, ServoMotor.

Abstract

The work developed in this project of title memory corresponds to the design, construction, and experimental characterization of an electro-mechanical platform for the precise control of the movement of the bar of an archer of a taca-taca table by means of signals sent by a computer. The development of this platform has two immediate objectives: (i) provide a basis for the experimental evaluation of different sensing techniques and technologies, data processing, and control algorithms to control motor movement, both for research and pedagogical purposes; and (ii) integrate with an already developed computational vision system that allows automated archer movement so that it can stop shots aimed at the goal.

The developed platform allows to control the horizontal movement of the archer bar by means of pulleys and synchronous belts, and the rotational movement by means of a servomotor and rotational encoders. To assess and characterize the behavior of the electro-mechanical system, a computerized expert system was implemented that allows sending reference signals to the motors and measuring the position of the motor, position of the archer, travel speed and current consumed by the platform.

This document reports the analysis performed to establish the system requirements considering real game conditions, the criteria defined for the selection of components, construction details of the electromechanical platform, experimental characterization of the platform's performance in controlled environments, and integration with the computer vision and control system previously developed to automate the movement of the archer in a game.

Keywords: Automated foosball table, BLDC, Odrive Robotics, Servomotor, STEM.

Índice

1. Introducción	7
1.1. Motivación	7
1.2. Descripción del problema	10
1.3. Alcances y contribuciones	12
1.4. Organización del Informe	12
2. Revisión bibliográfica y trabajo previo	14
2.1. Descripción del juego de taca-taca	14
2.1.1. Proyectos de mesas automatizadas.	18
2.2. Trabajo previo	20
2.2.1. Requisitos	20
2.2.2. Prototipo propuesto	21
2.2.3. Conexión de hardware	23
2.2.4. Configuración y calibración	24
2.2.5. Dificultades y Problemas	26
2.2.6. Resultados de diseño previo	28
3. Decisiones de diseño y selección de componentes	31
3.1. Modificaciones a plataforma de prueba.	31
3.2. Selección de motor	35
3.2.1. Motor Stepper	35
3.2.2. Motor Corriente Continua Cepillado	37
3.2.3. Servo Motor	39

3.2.4.	Motor Brushless DC	41
3.2.5.	Motor elegido	44
4.	Implementación de la plataforma de prueba	46
4.1.	Ensamble mecánico	46
4.2.	Calibración y alineamiento	48
4.3.	Conexión Hardware	51
4.4.	Configuración y Calibración	52
4.5.	Puesta en marcha	57
4.5.1.	Estructura del firmware	57
4.5.2.	Conexión a placa y primer movimiento	57
4.5.3.	Manejo de Errores	58
4.5.4.	Protocolos de comunicación	59
5.	Experimentos y Resultados	61
5.1.	Precisión y búsqueda de rango	61
5.2.	Seguimiento de referencia	63
5.3.	Pérdida de pasos	73
6.	Conclusiones y Trabajo Futuro	76
6.1.	Discusión sobre resultados obtenidos	76
6.2.	Trabajo futuro	77

Índice de figuras

2.1. Barras y muñecos.	15
2.2. Dimensiones de mesa taca-taca y orden de los muñecos. Equipo A en azul, B en rojo. [17].	17
2.3. Sistema mecánico implementado en Kiro [18].	18
2.4. Sistema mecánico propuesto por la Universidad Técnica Eindhoven[20].	19
2.5. Sistema mecánico propuesto en trabajo previo del proyecto.	22
2.6. Diagrama de conexión para sistema de movimiento rotacional ClearPath [25].	24
2.7. Software ClearView para configuración y calibración de servomotores ClearPath [25].	25
2.8. Perfil y dimensiones de correa GT2 [23].	26
2.9. Representación gráfica del problema presente en las barras con baja rectitud, donde la barra dibujada con línea punteada representa un caso exagerado de poca rectitud en la barra.	27
2.10. Prueba de repetitividad en posición para diferentes velocidades sin barra acoplada.	28
2.11. Prueba de repetitividad en posición para diferentes velocidades con barra acoplada.	29
2.12. Error medido para distintas velocidades para el desplazamiento del carro con barra acoplada.	29
3.1. Comparación de bujes utilizados en plataformas de prueba y taca-taca.	32
3.2. Perfil y dimensiones de correa GT3 [24].	33
3.3. Diagrama estructural del motor: Sección transversal perpendicular al eje [30].	36
3.4. Curva de torque para distintos motores stepper con driver ST10 [28].	37
3.5. Representación gráfica de motor de corriente continua cepillado. [34].	38

3.6.	Sección transversal de motor DC [35].	38
3.7.	Curva de torque para motores 80350 Crouzet [32].	39
3.8.	Diagrama de funcionamiento de servomotor [37].	40
3.9.	Comparación de curvas de torque para motor paso a paso y servomotor de perfiles Nema 34.	40
3.10.	Representación de curva de torque vs RPM en motor BLDC [40].	42
3.11.	Curva Torque vs Corriente: Motores BLDC [41].	42
3.12.	Ripple de torque muestreado con sensado de posición, sensado de aceleración y sensor de torque en motor Exceed RC 86MA10 [49].	44
4.1.	Vista general de nueva versión de Soporte de Motor Horizontal ensamblado.	47
4.2.	Dimensiones de perfil Nema 34 [50].	47
4.3.	Vista general de segunda versión de Soporte de Barras.	48
4.4.	Imagen general del sistema construido acoplado a la plataforma de pruebas.	49
4.5.	Soportes regulables, que permiten alinear la plataforma en cada esquina de forma independiente.	50
4.6.	Acercamiento inicial de la barra del jugador con el sistema mecánico, donde se puede observar un desfase entre ambos, el cual debe ser corregido ajustando los soportes regulables de la plataforma de pruebas.	51
4.7.	Diagrama de conexión para sistema de movimiento horizontal Odrive.	52
4.8.	Diagrama del lazo de control en placa Odrive v3.6 [41].	53
4.9.	Comparación de respuesta del motor a cambio de referencia con Velocidad de 10.000 cuentas por segundo y límite de corriente 25 A para distinta carga.	55
4.10.	Comparación de respuesta del motor a cambio de referencia con Velocidad de 10.000 cuentas por segundo y límite de corriente 25 A para calibración de lazo de control con plataforma implementada.	56
4.11.	Diagrama de estructura implementada en placa Odrive v3.6.	57
5.1.	Setup para búsqueda de rango mediante limite mecánico.	62
5.2.	Diagrama de dispersión de rango mecánico encontrado en 100 iteraciones.	62
5.3.	Experimento de seguimiento de referencia a respuesta de esclón sin carga.	65
5.4.	Experimento de seguimiento de referencia a respuesta de esclón con 1 kg de carga.	66

5.5. Experimento de seguimiento de referencia a respuesta de escalón con plataforma acoplada.	67
5.6. Experimento de seguimiento de referencia sinusoidal sin carga.	68
5.7. Experimento de seguimiento de referencia sinusoidal sin carga.	69
5.8. Experimento de seguimiento de referencia sinusoidal con plataforma acoplada. . .	70
5.9. Experimento de seguimiento de referencia tipo rampa sin carga.	71
5.10. Experimento de seguimiento de referencia tipo rampa con 1 kg de carga.	72
5.11. Experimento de seguimiento de referencia tipo rampa con plataforma acoplada. . .	73
5.12. Mediciones de encoders en respuesta de motor a tren de escalones.	74

Índice de tablas

2.1. Cálculo de desempeño Servo Motor ClearPath ELNA.	23
3.1. Desglose de pesos del sistema.	32
3.2. Cálculo de desempeño Servo Motor ClearPath ELNA en plataforma corregida. . .	34
3.3. Resumen de características de motores estudiados.	44
4.1. Parámetros configurados para el lazo de control Odirve.	56
5.1. Resumen de datos obtenidos en prueba de tren de escalones.	74

Capítulo 1

Introducción

El trabajo desarrollado en esta memoria de título consiste en el diseño, implementación, y caracterización de un sistema electromecánico para controlar el movimiento de una barra de jugadores en una “Table football”, popularmente conocida en Chile como mesa de taca-taca. Este trabajo corresponde a una primera etapa de un proyecto más amplio, el cual apunta a lograr en el mediano plazo la completa automatización de uno de los equipos de una mesa de taca-taca. El desarrollo de una plataforma de este tipo apunta a la realización de pruebas experimentales asociadas a pruebas de algoritmos de predicción de movimiento y visión por computador, integración de hardware y software, difusión de ciencia y tecnología, y por supuesto, incentivar a las personas por medio de métodos didácticos a involucrarse en desarrollos tecnológicos.

Este capítulo presenta una breve reseña del planteamiento del problema general de automatizar una mesa de taca-taca y los métodos utilizados para su resolución. Posteriormente, se plantean los principales objetivos, alcances y restricciones del trabajo realizado, y un resumen de la organización del informe.

1.1. Motivación

En los últimos años ha habido un acelerado desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito de la ingeniería en computación y electrónica. Por ejemplo, la elevada capacidad de procesamiento y la reducción de costo de las plataformas computacionales para procesamiento paralelo ha facilitado

el acceso a tecnología que resultaba prohibitiva hace unos años atrás, lo cual ha permitido el resurgimiento y perfeccionamiento de las llamadas técnicas de *inteligencia artificial* [1] y algoritmos avanzados de control automático. Por otro lado, el uso de cámaras de alta velocidad y resolución en distintas aplicaciones se ha hecho cada vez más cotidiano, dando paso al creciente desarrollo del tópico de *visión computacional* [2]. Estos avances tecnológicos ofrecen grandes oportunidades para el desarrollo de plataformas orientadas a la docencia experimental y complementar cursos clásicos con experiencias demostrativas.

De igual manera, el desafío de automatizar una mesa de taca-taca es representativo de varios problemas contingentes en la industria moderna, ya que emula y resuelve problemas aplicables a esta, donde automatizar y dotar de inteligencia a, por ejemplo, sistemas de producción y cadenas de ensamblaje o distribución, es el primer paso para lograr sistemas ágiles y eficientes, lo que eventualmente se traduce en mayor productividad y reducción de costos. Hoy en día, estos sistemas se denominan *Cyber Physical Systems* (CPS) [4], los cuales llevan a la industria a una nueva revolución en Tecnologías de la información y comunicación, en donde sistemas completos que se componen dinámicamente a partir de otros sistemas son capaces de sentir y controlar el mundo físico, entendiéndolo y aprendiendo de las interacciones que se producen en él. Por otro lado, estos sistemas no se limitan solo al ámbito industrial, y representan un gran atractivo debido a su escalabilidad y adaptabilidad ya que pueden interactuar con humanos y su entorno pudiendo integrarse en infraestructuras, sistemas de salud, transporte, y muchos otros aspectos de la sociedad moderna.

Distintos grupos y empresas tecnológicas han desarrollado plataformas de características similares a las planteadas para este trabajo, cuyo objetivo general es automatizar el movimiento de un equipo en una mesa de fútbol, dando la opción de que un usuario pueda interactuar y competir contra la mesa robotizada [5, 6, 7]. Sin embargo, las soluciones reportadas están altamente especializadas y orientadas a actividades de promoción o competencias de alto nivel, no se encuentran debidamente documentadas, no permiten modificación de hardware o software, y suelen usar componentes de alto costo que las hacen prohibitivas para el uso en actividades de docencia. Todos estos proyectos tienen en común al menos cuatro desafíos técnicos que se describen a continuación:

- *Diseño mecánico y adaptación de la mesa para poder automatizarla.* Esto requiere modificar

la mesa tradicional para incorporar los sensores y actuadores en el sistema físico. Existen muchas formas de disponer los elementos en el sistema, dependiendo del tipo de sensores y actuadores que se utilicen [5, 8]. Dentro de las características deseables están, por ejemplo, que los movimientos mecánicos sean precisos, las barras donde se deslizan los jugadores sean rectas y rígidas, que la mesa sea firme y estable para evitar el ruido en la adquisición de mediciones, entre otros requerimientos.

- *Diseño y control del actuador para movimiento de las barras de jugadores.* En este caso se requiere definir qué elementos nos permitirán manipular las barras con jugadores, y de qué forma. En todos los casos estudiados, esto se realiza mediante motores eléctricos, existiendo una extensa literatura asociada al control y diseño de este tipo de sistemas (ver por ejemplo, [9] y las referencias ahí). Para un correcto diseño, se deben estudiar los tipos de motores, acoples y posibles configuraciones que permitan interpretar las señales de posición deseada de los jugadores y traducirlas a movimiento de las barras. Es importante considerar también los requerimientos técnicos en cuanto a torque, corriente, velocidad y rangos de operación.
- *Sensado para seguir la ubicación de la pelota y los jugadores.* Existen diversas formas de medir dichas posiciones, como el uso de encoders asociados a los motores, rejillas de láseres para medir posición de la pelota, o el uso de técnicas de visión por computador [10, 11]. Hoy en día, el uso de visión por computador es particularmente atractivo dada la accesibilidad de cámaras de alta velocidad y el soporte computacional para las etapas de adquisición y procesamiento de las imágenes extraídas [11, 12, 13].
- *Diseño e implementación de un algoritmo de control para movimiento de jugadores.* A partir del estado de la pelota y los jugadores, el controlador debe decidir cómo mover las barras de tal forma que cumplan el objetivo deseado. El controlador debe predecir dónde irá la pelota para anticiparse y mover los jugadores en la dirección adecuada, a través del actuador diseñado previamente. Existen diversas técnicas que podrían ser útiles para esta tarea, como el uso de redes neuronales, algoritmos de estimación y predicción, etc. [10][14], [7].

Es importante mencionar que los desafíos asociados a cada uno de los tópicos anteriores suelen abordarse en forma independiente en distintas áreas de la electrónica, debido a que cada uno representa un desafío en si mismo. Sin embargo, la implementación de una plataforma como la

planteada requiere una visión de sistema que permita integrar la teoría asociada a estas disciplinas con el desarrollo de hardware y software necesario para satisfacer los requerimientos técnicos asociados.

En base a un trabajo previamente realizado en el Departamento de Electrónica de la Universidad Técnica Federico Santa María, se ha logrado una primera versión de un sistema capaz de automatizar la línea del arquero de un taca-taca, en donde el sistema de visión encargado de identificar elementos y recolectar datos para su análisis es desarrollado en el trabajo de memoria de Richard Atuan (2018) [22]. En lo que respecta al sistema mecánico, se diseñó y construyó una plataforma simple que permite interactuar con la barra emulando el movimiento horizontal y rotación que un jugador podría realizar. Si bien se logró obtener un prototipo que sirve de prueba de concepto, este tiene una baja calidad en la construcción de la mesa y usa un sistema electromecánico poco preciso, por lo que no se logra un correcto funcionamiento, obteniéndose errores significativos entre los movimientos calculados y los efectivamente ejecutados en la plataforma.

En consecuencia, el trabajo presentado en esta memoria de título se enfoca en el diseño, implementación y caracterización de un sistema electromecánico que corrige los errores y deficiencias presentadas en la primera versión del sistema, apuntando a mejorar la precisión de los movimientos y la velocidad de desplazamiento de la barra del arquero.

1.2. Descripción del problema

Este trabajo aborda los desafíos de diseñar e implementar un sistema electromecánico que permita controlar el movimiento del arquero mediante una referencia externa con el fin de detener tiros al arco realizados por un usuario. Desde el punto de vista técnico, se impone como objetivo que la plataforma sea modular, fácil de modificar y extender, y además de bajo costo comparado a otras soluciones disponibles para aplicaciones profesionales. En la presente memoria se trabaja en torno a una plataforma previa utilizada como prueba de concepto (ver sección 2.2.2), apuntando a corregir deficiencias mecánicas que impiden obtener un control preciso de los movimientos de la barra del jugador.

Analizando los problemas encontrados en la plataforma previa, se determina que la aceleración que debe ejercer el motor de movimiento horizontal es crítica para lograr las velocidades y tiempos de respuesta requeridos. Es por esto que se necesita un motor con el torque suficiente para mover las barras en un corto plazo de tiempo y obtener velocidades que permitan reaccionar durante un juego estándar. En el peor de los casos, se considera que el arquero debe trasladarse de un extremo al otro, lo que corresponde a 12 cm en la plataforma de pruebas, esto equivale a 60 ms aproximadamente si la pelota se desplaza a 8 m s^{-1} . Por esta razón, se debió investigar diferentes tipos de motores, evaluando sus capacidades, ventajas y desventajas, para así poder tomar una decisión informada sobre el actuador y que este cumpla con las características requeridas para compensar las nuevas cargas generadas al modificar la plataforma y la barra del jugador (mayores detalles se describen en la Sección 2.2.2).

El trabajo se realiza en base a una plataforma experimental simplificada en relación a una mesa de taca-taca completa. La plataforma desarrollada contiene solamente la barra del arquero que se debe automatizar, lo cual facilita su manipulación para corregir los problemas detectados por medio de uso de diferentes materiales e integración de componentes electromecánicos, además de facilitar su instrumentación y transporte.

Dentro de las modificaciones propuestas al final del desarrollo de la plataforma anterior, se considera el uso de una barra de acero sólida en lugar de una hueca, con el fin de reducir los problemas asociados a la poca rectitud de una barra hueca usada en mesas estándar. El uso de una barra sólida genera nuevos problemas de precisión debido a que el sistema debe ejercer una gran fuerza para mover la barra provocando que el sistema de transmisión deslice, esto significa que el carro no avanza y el motor si realiza la rotación correspondiente, lo que conlleva a perder la referencia de donde realmente se encuentra el arquero, ya que físicamente el arquero no se desplaza la distancia correspondiente y el sistema no es capaz de detectar esta diferencia. Para esto se debe buscar una solución tanto con sensores como reducir las pérdidas por deslizamiento.

Finalmente, se deben realizar las pruebas pertinentes para caracterizar y evaluar el desempeño sistema, comprobando así si es capaz de cumplir su rol de interceptar los tiros al arco. Algunos

parámetros a determinar incluyen las velocidades alcanzadas, la precisión en el seguimiento de referencia y el error de deslizamiento mediante los sensores de rotación implementados en el motor y en la plataforma de movimiento. Para esto, se definen y desarrollan una serie de pruebas sistemáticas que permitirán a futuro probar distintos actuadores bajo el mismo procedimiento con el fin de evaluar qué sistema es adecuado, o incluso para probar distintos sistemas de control o de inteligencia aplicados.

1.3. Alcances y contribuciones

La plataforma descrita en este trabajo se enfoca exclusivamente en la automatización del arquero de tal forma que éste sea capaz de detener tiros dirigidos al arco en forma autónoma. Debido a que el motor de rotación se mantiene desde la versión previa, el trabajo de memoria se ve acotado solo a lograr un correcto movimiento horizontal.

Finalmente, este trabajo desarrolla e implementa una plataforma de dos grados de libertad, rotación y movimiento horizontal, la cual automatiza una línea de jugador, permitiendo probar distintos sistemas de control, algoritmos de inteligencia y distintos sistemas de visión. Por otra parte, se desarrolla una serie de pruebas que permitirán analizar distintos sistemas de actuación, de sencilla integración física debido al estándar Nema 34 utilizado, el cual define el perfil del motor y estandariza dimensiones para asegurar compatibilidad en implementaciones. Así mismo, se desarrolla una biblioteca de funciones que permiten monitorear y obtener datos de interés para el usuario y que estos sean almacenados si se desea.

1.4. Organización del Informe

El resto de este informe está estructurado como sigue:

- El **Capítulo 2** describe brevemente el juego de taca-taca y algunas especificaciones que se establecen para campeonatos. Además, el capítulo describe el trabajo realizado previamente a esta memoria de título, detallando el diseño, conexiones, los problemas encontrados en

el desarrollo de una plataforma para automatizar la línea del arquero en un taca-taca y los resultados obtenidos de esta etapa.

- El **Capítulo 3** describe las decisiones de diseño y selección de componentes para la nueva versión de la plataforma de prueba, orientadas a mejorar el desempeño del control de movimiento horizontal de la barra.
- El **Capítulo 4** describe la implementación del motor seleccionado para las nuevas condiciones del sistema y las modificaciones mecánicas necesarias para su implementación. Se detalla además la conexión de hardware y los pasos necesarios para la puesta en marcha de la plataforma, dando una descripción breve del como calibrar y mover el motor implementado desde un computador externo.
- El **Capítulo 5** detalla los experimentos realizados, dando una descripción del procedimiento para cada prueba y los resultados obtenidos.
- El **Capítulo 6** resume las principales conclusiones obtenidas del trabajo realizado y se discuten los resultados obtenidos. De igual manera, se plantea el trabajo a realizar a continuación de esta memoria de título con el fin de dar continuidad al mejoramiento de la plataforma.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica y trabajo previo

En esta sección se realiza una descripción detallada del juego taca-taca, en qué consiste el juego, que tipo de jugadas se pueden realizar y cuales son permitidas en competencia. Se detallan además las características principales de la mesa como la cantidad y distribución de sus jugadores, sus dimensiones generales y construcción. Por último, se analiza el estado del arte, resumiendo algunas soluciones propuestas por otros autores, y se presenta el trabajo desarrollado en la primera versión de la plataforma utilizada como base para esta memoria.

2.1. Descripción del juego de taca-taca

Las mesas de taca-taca son un juego popular en todo el mundo. Inventada en 1921 en el Reino Unido, este juego ha logrado perdurar hasta nuestros días, recibiendo distintos nombres dependiendo de la ubicación geográfica donde nos situemos: futbolito, metegol, fulbito, futmesa, fulbatin, taca-tacó, futillo, fulbacho, tiragol, fulbote, foosball, table soccer, kicker, son algunos de los nombres que recibe en otros lugares.

Este juego se encuentra basado en el deporte del fútbol, buscando el enfrentamiento entre dos equipos los cuales deben anotar la mayor cantidad de goles en la portería contraria. Al igual que su juego original, este posee competencias internacionales como la Copa del Mundo, donde la Federación Internacional de Fútbol de Mesa (ITSF) [15] se encarga de establecer las reglas y normativas de cada competición.

En la competencia, dos grupos de competidores compuestos por 1 o 2 jugadores cada uno, cuentan con cuatro barras a su disposición. Estas barras corresponden a la línea de arquero, defensa, medio campo y delanteros. En la Figura 2.1 se puede observar los muñecos adheridos a las barras con los que ambos equipos intentarán golpear la pelota, los cuales pueden ser de plástico, madera o metal. Los participantes pueden de esta forma, mover cada una de estas barras además de girarlas sobre su propio eje, el equipo que anote la mayor cantidad o bien una sean los primeros en anotar una determinada cantidad de goles al rival gana el juego.



Figura 2.1: Barras y muñecos.

Algunos tiros que se pueden dar durante el juego son:

- Tiro Aéreo: Consiste en pasar la pelota por arriba del rival.
- Tiro tic-tac: Los muñecos de una misma barra se dan pases para después tirar a portería.
- Tiro a la banda: Se utilizan los límites físicos de la mesa de juego para hacer rebotar el balón.
- “Spinning”: Se hace girar la barra con la palma de la mano para golpear el balón con mayor fuerza.

Dependiendo de cada competencia, los tiros pueden ser legales o ilegales, como por ejemplo el “spinning”, que resulta ilegal en ciertas competencias o bien está sujeto a reglas de uso dentro del juego, por ejemplo, que sólo el arquero pueda utilizar este movimiento.

Existe una gran variedad de modificaciones a la mesa de juego, como lo son los materiales de fabricación, las porterías sobresalientes al terreno de juego o bien embutidas dentro de los límites de la cancha, la cantidad de muñecos por barra, muñecos con los pies juntos o separados (es la parte inferior de los muñecos con que golpean el balón en general), cantidad de barras, entre otras.

La Figura 2.2 muestra un ejemplo de las dimensiones de la mesa de juego, las cuales pueden variar dependiendo del fabricante y competición, pero en competiciones profesionales (utilizadas para este estudio) se ha reglamentado que estas tendrán 1.1 m de largo y 0.7 m de ancho [16]. Las barras se encuentran espaciadas a lo largo de la cancha, distribuidas a 12 cm de cada una, estando la primera posicionada desde los 12 cm partiendo de un extremo, dando un total de 8 barras. El color de la mesa varía según el fabricante y depende mayormente de factores estéticos, encontrándose diseños que emulan una cancha de fútbol tradicional (color verde con líneas blancas para marcar el centro y área del arquero), hasta diseños que usan acrílico transparente.

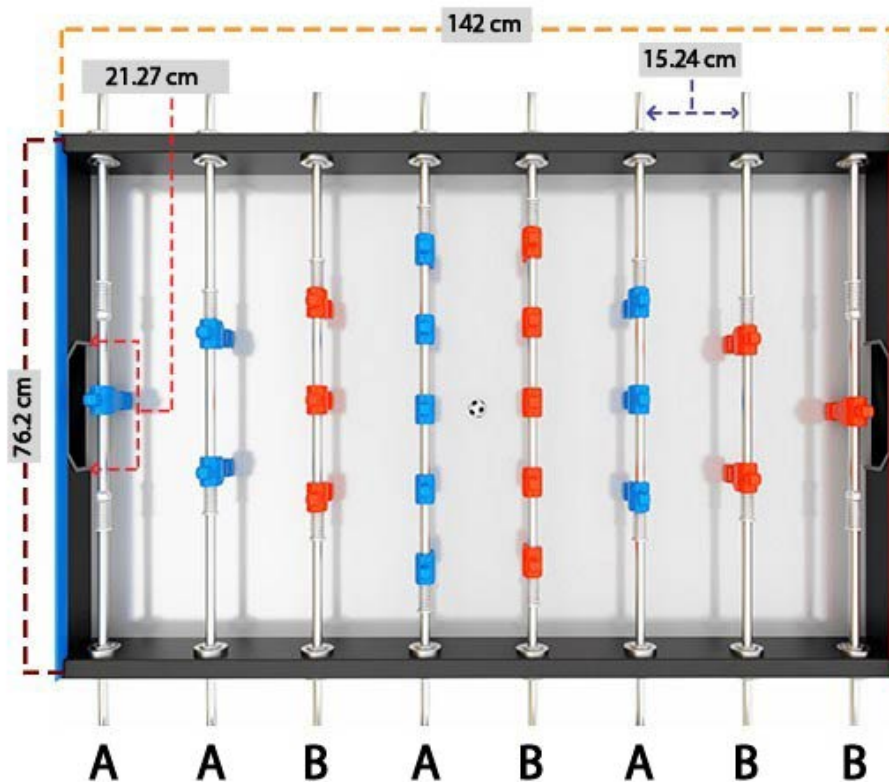


Figura 2.2: Dimensiones de mesa taca-taca y orden de los muñecos. Equipo A en azul, B en rojo. [17].

Como se puede observar en la Figura 2.2, los equipos poseen un orden específico. Desde la izquierda el equipo A juega atacando el arco a la derecha y análogamente por la derecha juega el equipo B atacando el arco a la izquierda. La cantidad de muñecos por barra puede variar, pero en competencias la cantidad de muñecos por equipo corresponde a la siguiente distribución 1-2-5-3, lo que corresponde a 1 arquero, 2 defensas, 5 de medio campo y 3 delanteros.

En cuanto a las características de la pelota, estas suelen tener 3 cm de diámetro y suelen tener distintos materiales y colores. En entornos competitivos, la pelota es seleccionada por la organización previo al encuentro, por lo que el color y el material puede variar en competencias.

2.1.1. Proyectos de mesas automatizadas.

De las diversas versiones y soluciones encontradas a partir de la revisión bibliográfica, se reconoce como base común de investigación el proyecto Kiro [18], realizado en la Universidad Freiburg en conjunto con la compañía Gauselmann AG. Kiro propone un modelo capaz de mover las barras con precisión mediante cuerdas y motores, como se puede observar en la Figura 2.3. Este diseño representa una solución interesante debido a que el volumen utilizado fuera de la mesa es mínimo, manteniendo la estética y espacio original de la mesa, y al utilizar cables la poca rectitud de las barras o algún desalineamiento presente no representan mayor problema, ya que la elasticidad de estas es capaz de amortiguar estos problemas. Por otro lado, la solución propuesta acarrea un problema de precisión, donde la misma elasticidad del cable puede generar un error al momento de realizar desplazamientos rápidos. La principal desventaja que se observa en este diseño es que se debe tener ambos extremos de la barra sujetados por la cuerda para tener el movimiento horizontal requerido, lo que implica un diseño complejo y mayor intervención en la mesa de taca-taca, por otro lado, tener parte del sistema mecánico del lado que el usuario utilizará es una potencial fuente de accidentes debido a que una mala ubicación o manipulación por parte del usuario podría implicar que este se vea arrastrado o golpeado por el sistema.

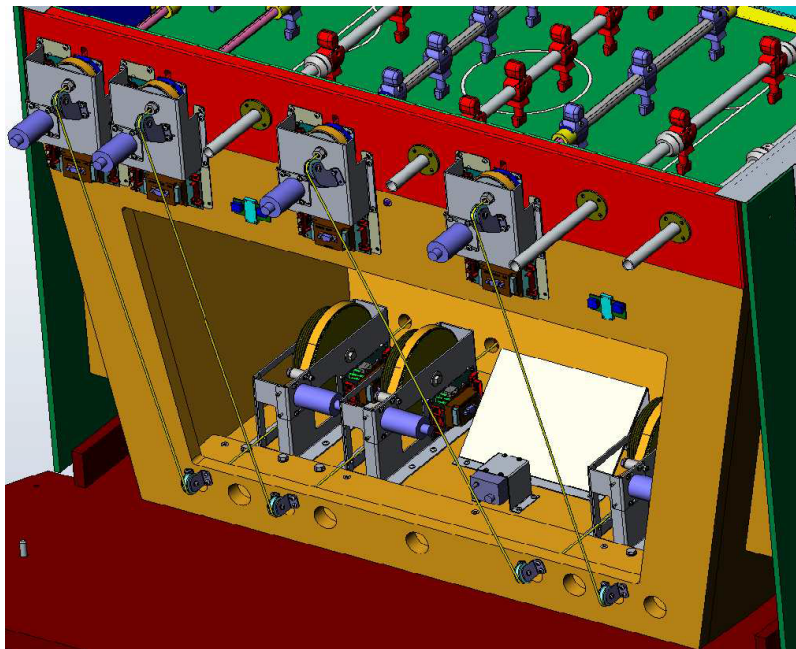


Figura 2.3: Sistema mecánico implementado en Kiro [18].

Se destaca también la investigación y desarrollo realizado por la Universidad Técnica Eindhoven [20], en donde la solución propuesta logra superar los requerimientos mínimos de un jugador profesional, estos fueron determinados por el equipo de Eindhoven mediante el análisis de vídeo y audio de competencias oficiales obteniendo así una velocidad de reacción de 1.8 m s^{-1} y aceleración 35 m s^{-2} . Su propuesta consiste en utilizar motores lineales de alto torque para el movimiento horizontal y motores tipo anillo para la rotación del jugador, con lo cual obtienen una velocidad horizontal de 2.2 m s^{-1} y aceleración de 144 m s^{-2} . El modelo de la implementación se puede observar en la Figura 2.4, donde la configuración elegida representa un consumo menor de espacio respecto a las otras propuestas encontradas y se tiene una barra única para el movimiento del jugador reduciendo considerablemente el peso a mover en comparación con un sistema con el motor montado en la barra. El sistema permite montar los motores directamente a la mesa, obteniendo mayor rigidez del sistema y la barra perfectamente alineada con los motores implementados. Sin embargo, se observa el mismo problema que la solución planteada en Kiro, donde se tiene parte del sistema mecánico sobresaliendo del lado del jugador por lo que el riesgo de accidente no se evita, incluso se considera aun mayor debido a la fuerza que tiene su sistema (204 N peak y 100 N continuos). Otra desventaja práctica, y la que se considera de mayor relevancia, es que los motores utilizados tiene un costo muy elevado, dejando el costo de automatizar una línea de jugadores en torno a los 5500 €, estimados al 2008 [20].

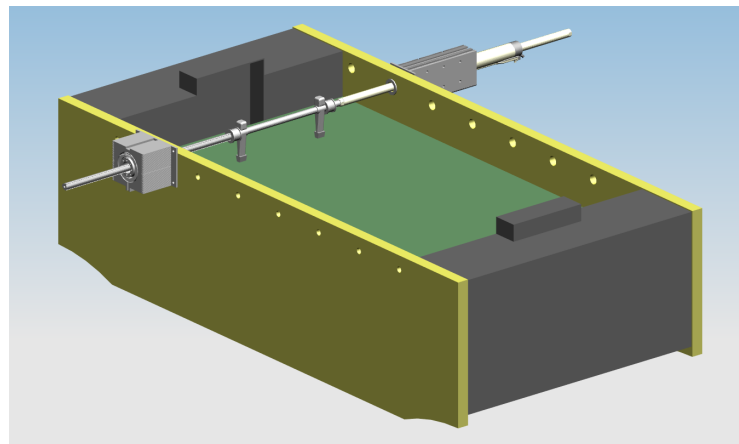


Figura 2.4: Sistema mecánico propuesto por la Universidad Técnica Eindhoven[20].

Es importante destacar y mencionar la versión previa desarrollada en Eindhoven [19] que utili-

za un sistema de correas similar al empleado en la solución propuesta en este trabajo de memoria, pero su complejidad mecánica representa un posible punto de fallo por pérdida de eficiencia y por problemas de rigidez y rectitud en la construcción. Por otro lado, se tiene la propuesta reportada por la Universidad de Yaskawa [21], con alto detalle de construcción y estructura desarrollada dando un excelente punto de partida para el diseño de una plataforma. Sin embargo, un sistema de engranajes y cremallera del largo requerido hace compleja la construcción de este sistema.

Finalmente se encuentra el trabajo previo realizado en el Departamento de Electrónica de la Universidad Santa María, que consiste en una plataforma preliminar para evaluar factibilidad y requerimientos técnicos para realizar una versión local de una mesa automatizada [22]. Este trabajo previo se enfocó principalmente un sistema de visión computacional para la estimación de trayectoria de la pelota utilizando una cámara de alta velocidad, además de la implementación de un algoritmo de control para el movimiento automatizado de la barra del arquero. En esta primera etapa, se utilizaron entornos de simulación para probar los algoritmos en una “mesa virtual”, y también se logró una plataforma mecánica que sirvió como prueba de concepto para entender los requerimientos y desafíos asociados a la plataforma electromecánica. Este trabajo será utilizado como base para usar la referencia de la pelota entregada y así controlar la nueva versión del sistema de actuación, en contraste se puede observar en la Figura 2.5 el diseño del sistema previo.

2.2. Trabajo previo

El proyecto consta de diversas etapas, de las cuales la primera etapa fue ejecutada como trabajo previo y es usada como base para el desarrollo de esta memoria. Se deben corregir dificultades y problemas encontrados durante el desarrollo de esta primera fase.

2.2.1. Requisitos

Del estudio de vídeos realizados en [22] se obtiene experimentalmente una velocidad máxima de la pelota de 8 m s^{-1} . Por otra parte, en [19] se analiza el caso de partidos profesionales donde la pelota llega a ser lanzada a 12.5 m s^{-1} en tiros al arco, y llegan además a la conclusión que la velocidad de reacción humana no sobrepasa los 1.8 m s^{-1} . Considerando como objetivo poder

al menos igualar, y ojalá superar el desempeño de un jugador humano, se fija como objetivo alcanzar al menos la velocidad de 1.8 m s^{-1} para el movimiento horizontal de las barras de jugadores.

Por otro lado, además de alcanzar la velocidad de movimiento adecuada, estos movimientos deben tener cierto grado de precisión. Para efectos prácticos, la precisión en el seguimiento de referencia se toma con la idea de “como mínimo un muñeco debe interrumpir un tiro dirigido al arco”, por lo que tiene sentido que la precisión sea con un error menor al diámetro de la pelota (17 mm).

En cuanto al rango de movimiento este debe ser variable y modular, ya que esta plataforma debe permitir escalar desde una línea de jugador a las 4 de un equipo. Se diseña en primera etapa solo para el arquero, siendo este el de menor rango de movimiento, pero el sistema diseñado es compatible con los distintos rangos de movimiento que poseen las demás posiciones.

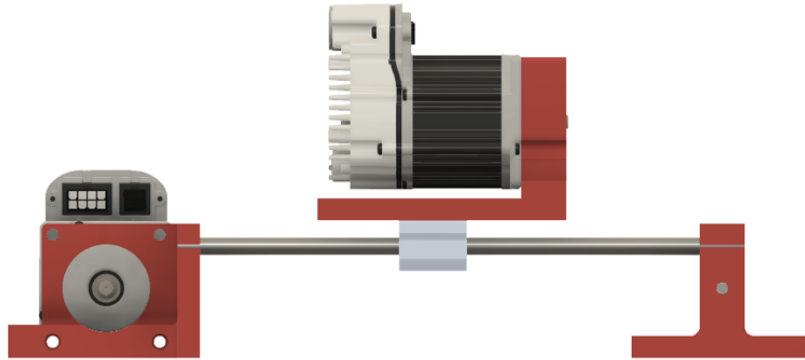
Finalmente, los requisitos para el desarrollo de la plataforma quedan determinados como:

- Velocidad máxima de movimiento horizontal: 1.8 m s^{-1} .
- Error en el seguimiento de referencia menor a 17 mm.
- Rango de movimiento amplio que permita el uso del sistema en todas las líneas de juego, cuyas formaciones y cantidad de jugadores limitan el rango posible de movimiento para cada una.
- Alta modularidad. Es decir, las componentes desarrolladas para el control de movimiento de la línea del arquero deben poder usarse en otras líneas de jugadores sin mayores modificaciones.

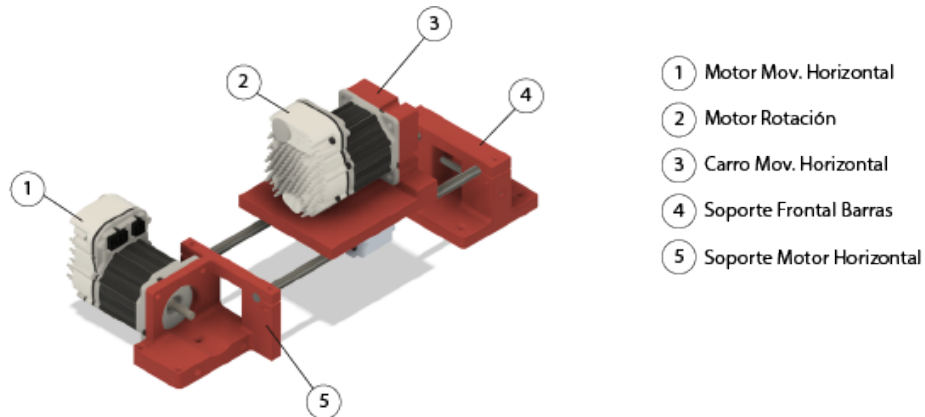
2.2.2. Prototipo propuesto

En base a una estimación inicial se propuso un diseño basado en correas para el sistema de movimiento, cuyo modelo diseñado en un software CAD se puede observar en la Figura 2.5. Este sistema fue diseñado con la idea de implementar dos motores iguales para ambos grados de libertad

(movimiento lineal y rotación del muñeco).



(a) Vista Lateral del sistema modelado.



(b) Vista General y detalle del sistema modelado.

Figura 2.5: Sistema mecánico propuesto en trabajo previo del proyecto.

Los motores escogidos en la etapa previa son servomotores ClearPath Teknic [25], estos son seleccionados debido a su bajo costo en relación a las prestaciones que tienen. Como se puede observar en la Tabla 2.1, con la polea del sistema mecánico se puede mover 4.08 kg, lo que en un análisis inicial indica que es capaz de mover una línea con barras telescópicas, cuyo peso sin muñeco es de 100 g. aproximadamente y para el caso del arquero con muñeco ronda los 250 g. Por otro lado, se tiene el sistema ClearView que permite tunear y configurar los motores de forma sencilla y rápida. Este software permite monitorear los motores de forma paralela durante su uso para lo cual se puede utilizar un puerto micro USB disponible en la parte posterior a estos. Por

último, la mayor ventaja que se observa en este motor es que su sistema corre en C++ lo cual lo hace compatible con el sistema de visión ya desarrollado, así permitiendo integrar directamente el accionamiento de los motores con el sistema de inteligencia [22].

Tabla 2.1: Cálculo de desempeño Servo Motor ClearPath ELNA.

Clear Path CPM-SCSK-2310P-ELNA		
RPM	4000	
Torque	0.8	N m
	0.082	kg m
Peso en polea	4.08	kg
Precio	370	USD

2.2.3. Conexión de hardware

El sistema diseñado utiliza servomotores ClearPath ELNA [25] para el movimiento horizontal y el rotacional. La Figura 2.6 muestra el diagrama de conexión utilizado en el sistema, el cual permite la manipulación de 4 motores simultáneamente mediante comunicación serial con el uso de las bibliotecas en C++ proporcionadas por el distribuidor. Además, se tiene la opción de controlar los motores como si fuesen motores “paso a paso” mediante pines de uso general (GPIO) de la placa de control.

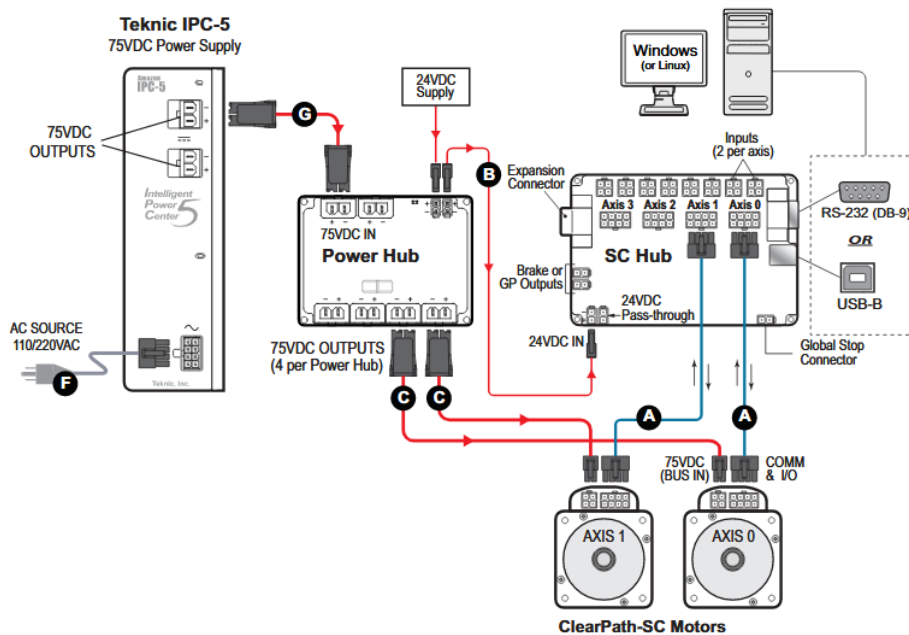


Figura 2.6: Diagrama de conexión para sistema de movimiento rotacional ClearPath [25].

El sistema Clearpath es un sistema modular, permite su expansión y tiene diversas configuraciones para la utilización de mayor cantidad de motores, por lo que se sugiere leer el manual en caso de requerir una configuración diferente.

Es importante mencionar que para los motores Clearpath el cable de alimentación para la fuente viene configurado para 110V, por lo que se debe hacer un corte especificado en las instrucciones de la fuente. En caso de algún error en este procedimiento la fuente trae un fusible en su interior.

2.2.4. Configuración y calibración

Se destaca que la configuración y calibración en los servomotores ELNA es un proceso crítico ya que durante las pruebas y configuraciones se observa que una configuración no adecuada genera un lazo de control interno inestable resultando en un sistema que oscila violentamente. Se recomienda leer detalladamente el manual del motor provisto en [25].

Para su configuración y calibración se debe utilizar el software ClearView facilitado por la

compañía. Una imagen representativa de este se encuentra en la Figura 2.7.

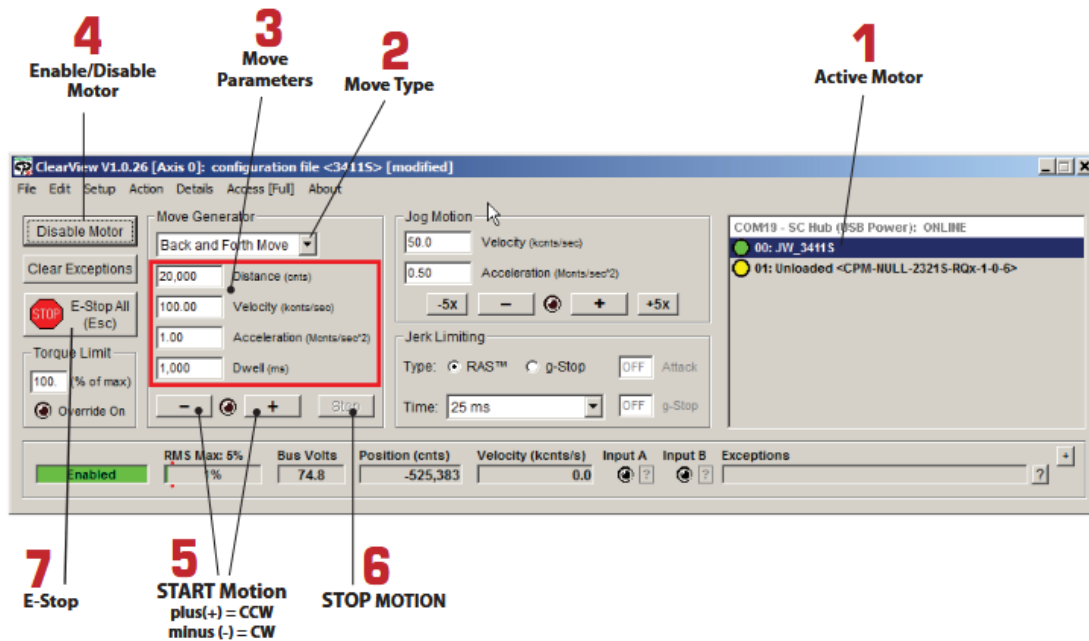


Figura 2.7: Software ClearView para configuración y calibración de servomotores ClearPath [25].

Los pasos a seguir para la configuración se detallan a continuación:

1. Si se realizan las conexiones apropiadamente la placa de control debería encender la luz de estado.
2. Conectar la placa de control al PC y esperar que se instalen los drivers pertinentes.
3. Al iniciar el software deberían salir listado automáticamente los motores conectados a la placa.
4. Si todo salió en orden el motor está listo para su manipulación y configuración, para esto se debe habilitar el motor y posiblemente limpiar las alertas de seguridad.

Primero se recomienda correr el asistente de calibración con el sistema libre de carga para comprobar el correcto funcionamiento del motor. Una vez finalizado se puede acoplar a la plataforma y repetir con la carga que genera la barra y el jugador.

2.2.5. Dificultades y Problemas

Durante la implementación del sistema se encontraron diversos problemas y dificultades a la hora de ejecutar pruebas, los cuales resultaron ser críticos a la hora de diseñar y estimar el sistema.

A Poleas:

La Figura 2.8 detalla el perfil y dimensiones de una sección de la correa GT2, en donde cada diente de la correa es construido a partir de dos circunferencias de radio R y de separación 0.8 mm entre ellas, el pitch de 2 mm indica la separación entre estos dándole la nominación GT2 o 2GT.

Por otra parte, debido al torque y las velocidades requeridas para el funcionamiento del sistema se tiene que el perfil de la correa GT2 es muy pequeño y tiene poca tracción sobre los dientes de la polea para soportar tal carga, por lo que al ejecutar movimientos más demandantes se observa un error en el movimiento horizontal, en donde por cada ejecución, la correa desliza sobre la polea dentada perdiendo así la referencia de la posición del carro.

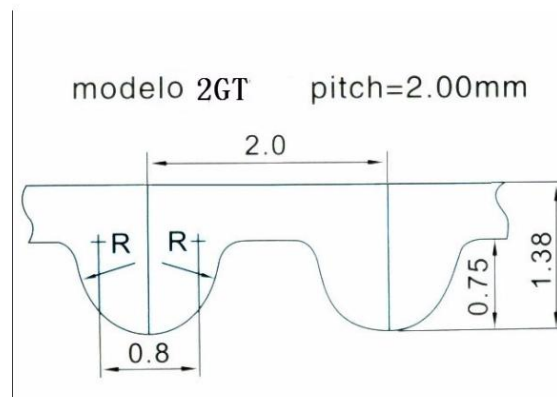


Figura 2.8: Perfil y dimensiones de correa GT2 [23].

B Barra:

Siendo uno de los puntos más críticos en la construcción del taca-taca, se esperaba un comportamiento de bajo roce y con un grado de rectitud moderado que permita acoplar un sistema mecánico sin ejercer mayor presión sobre los rodamientos a usar. Sin embargo, la construcción artesanal del taca-taca no es la más adecuada para el desarrollo de un proyecto de esta magnitud, esto se pudo observar ya que el sistema telescópico de las barras posee poca rectitud (aprox. 15 mm m^{-1}) y la poca calidad de los materiales genera un gran roce mecánico interno en el sistema aumentando considerablemente la carga a mover por los motores.

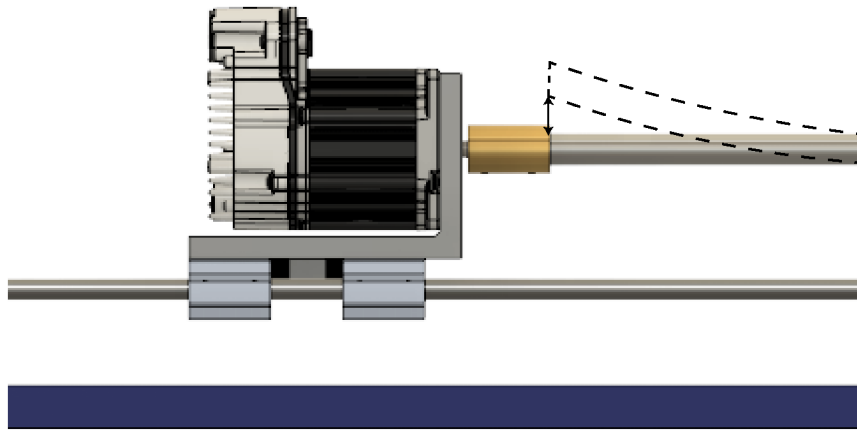


Figura 2.9: Representación gráfica del problema presente en las barras con baja rectitud, donde la barra dibujada con línea punteada representa un caso exagerado de poca rectitud en la barra.

C Seguimiento de referencia:

Los motores ClearPath poseen un sistema de control integrado que permite lograr movimientos con precisión. Sin embargo, este sistema de control presenta un problema para la implementación del sistema, el firmware implementado recibe la referencia entrando en un loop de movimiento hasta llegar a la referencia pedida, esto bloquea los cambios de referencia durante el movimiento y cualquier nueva referencia es almacenada en una lista. Esto representa un problema grave ya que vuelve considerablemente más lento la respuesta del motor debido a que se debe esperar a que terminen todos los movimientos almacenados. Por otra parte, se puede aplicar un método de detención que interrumpe el movimiento y permite salir del bloqueo pero no asegura una detención precisa ni instantánea.

2.2.6. Resultados de diseño previo

Finalmente se presentan mediciones experimentales del sistema con y sin la barra del tacataca acoplada para las mediciones de error que se obtienen con la correa. Cabe destacar que el experimento consiste en posicionar el carro, medir su ubicación con un flexo-metro, ejecutar un movimiento de X distancia conocida a velocidad determinada y medir la ubicación final del carro, iterando con distintas velocidades para así medir cuantos milímetros se desfasa por movimiento. El experimento se realiza de esta forma dado que se desea medir como responde el sistema mecánico a su uso continuo con cambios de referencias, ya que esto representa un error grave debido a que el error se acumula en cada movimiento y el sistema pierde total referencia de la posición del arquero.

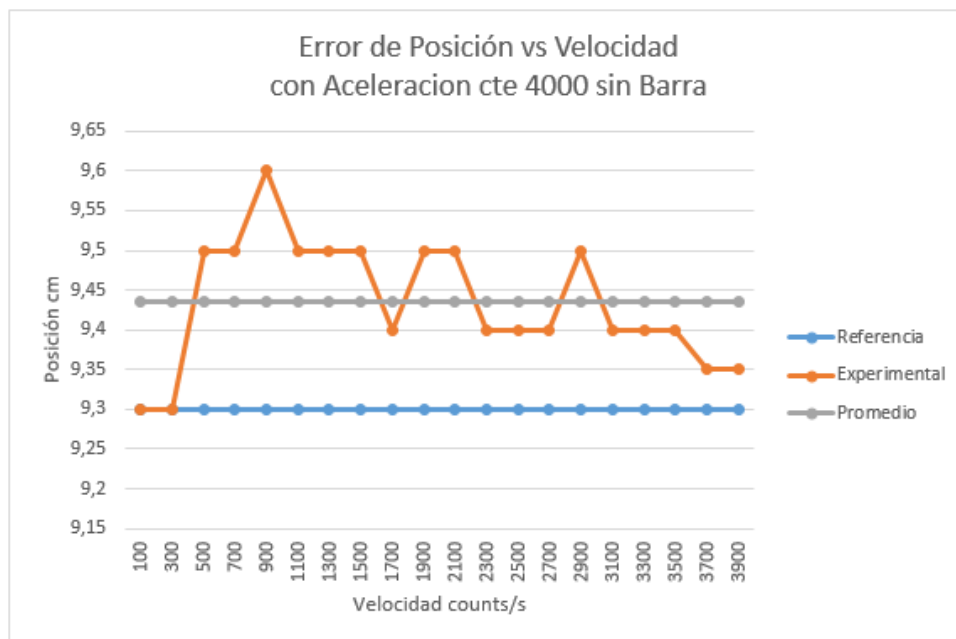


Figura 2.10: Prueba de repetitividad en posición para diferentes velocidades sin barra acoplada.

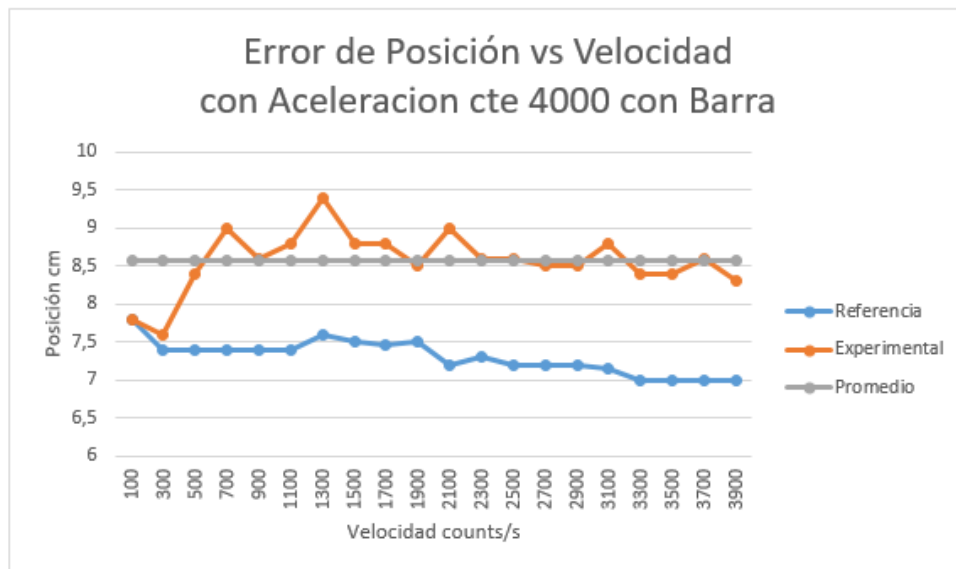


Figura 2.11: Prueba de repetitividad en posición para diferentes velocidades con barra acoplada.

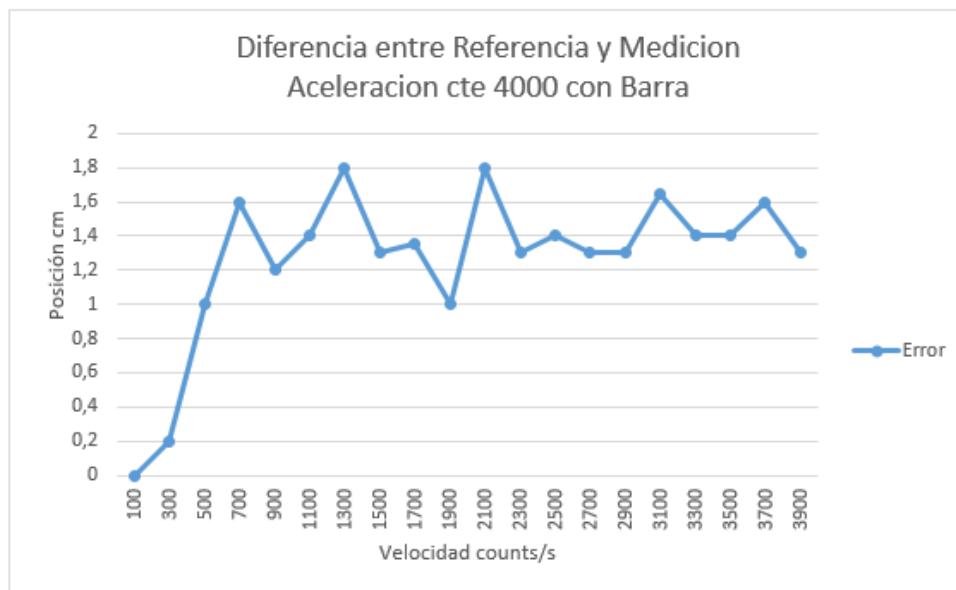


Figura 2.12: Error medido para distintas velocidades para el desplazamiento del carro con barra acoplada.

De los experimentos realizados se puede observar que sin barra acoplada se tiene un error promedio de 0.1 cm por movimiento, mientras que, acoplando el sistema a la plataforma de prueba del taca-taca, se observa un error entre 1 a 1.8 cm. Por lo que se considera crítico implementar diferentes niveles de sensado, es decir, agregar sensor de posición al carro en conjunto al encoder

ya utilizado en el motor, así pudiendo cerrar un lazo de control en base a la posición del arquero.

Capítulo 3

Decisiones de diseño y selección de componentes

A partir de la experiencia adquirida en el diseño y fabricación de la primera versión de la plataforma, y en base a las mediciones realizadas sobre la plataforma ya fabricada, se determina que la nueva versión debe incorporar correcciones mecánicas y el uso de nuevos materiales. Además, no de los aspectos más importantes es el cambio del tipo de motor. Este capítulo resume el estudio realizado sobre las componentes disponibles en el mercado, justificando las decisiones de diseño para la implementación de la nueva plataforma.

3.1. Modificaciones a plataforma de prueba.

Como se menciona en la Sección 2.2.5, uno de los mayores problemas encontrados en la primera versión de la plataforma de prueba se asocia a la poca rectitud de las barras telescópicas normalmente utilizadas en mesas de taca-taca comerciales, lo cual termina afectando significativamente la precisión de los movimientos. Para corregir este problema, se decide cambiar de la barra telescópica a una barra sólida rectificada, lo cual requiere algunas modificaciones a la mesa, como se puede observar en la Figura 3.1.



(a) Buje plástico normalmente utilizado en taca-taca con barras telescópicas.



(b) Buje de bronce diseñado y torneado específicamente para suplir buje original.

Figura 3.1: Comparación de bujes utilizados en plataformas de prueba y taca-taca.

Con las modificaciones realizadas a la plataforma se obtienen un sistema robusto y de movimiento suave, sin embargo, el sacrificio realizado por esa mayor rectitud es el incremento de masa a mover. La Tabla 3.1 muestra el desglose de los componentes que aportan al peso que debe soportar el motor de movimiento horizontal, estos son usados para la construcción y ensamble del sistema mecánico, las piezas y su distribución se pueden observar en la Figura 2.5b.

Tabla 3.1: Desglose de pesos del sistema.

Ítem	Peso kg
Barra	0.98
Motor	0.6
Pernos y Rodamientos	0.5
Otros	0.5
Total	2.55

Por otra parte, se tiene la necesidad de trabajar con mayores fuerzas que las requeridas en el diseño previo por esto es necesario cambiar la correa síncrona GT2 por una con un perfil más robusto como es el caso de la correa GT3.

La correa dentada GT3 posee dientes de mayor radio y grosor asegurando mayor tracción entre la polea y la correa, lo que se traduce en transmitir con mayor eficacia la rotación del motor, es decir, se evita el deslizamiento de la correa evitando la pérdida de posición del arquero. En cuanto al detalle y dimensiones de la correa, estas se pueden observar en la Figura 3.2 donde P corresponde a la separación entre dientes, R1 el radio del filete entre el diente y la correa, y R2 con R3 son los radios que construyen el diente. Para corroborar la eficacia se realizaron pruebas cuyos resultados se pueden observar en la sección 5.3.

TYPE	P	R ₁	R ₂	R ₃	b	H	h	i	PLD
2GT	2	0.15	1.00	0.555	0.40	1.38	0.75	0.63	0.254
3GT	3	0.25	1.52	0.85	0.61	2.40	1.14	1.26	0.381

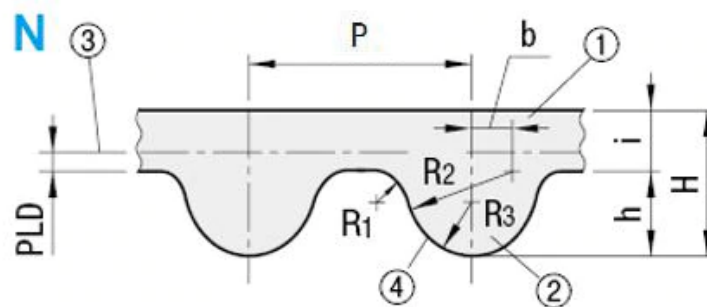


Figura 3.2: Perfil y dimensiones de correa GT3 [24].

El nuevo sistema que incorpora la barra sólida tiene una masa total de aproximadamente 2,6 kg, y debido al cambio de correa síncrona se debe utilizar una polea dentada correspondiente al perfil GT3, la cual por disponibilidad del mercado tiene radio 2 cm, lo que mecánicamente equivale a tener un desplazamiento del arquero de 0.126 m por vuelta. En la misma línea, considerando que en el peor de los casos el arquero debe desplazarse 12 cm y cumplir los requisitos planteados en 2.2.1 tenemos un tiempo de desplazamiento de 0.067 s, estos datos dictan que el motor debe rotar 14.3 revoluciones por segundo, equivalente a 858 revoluciones por minuto. El motor ELNA [25] es capaz de mover 4,08 kg a 1000 RPM como se detalla en la Tabla 3.2, seguidamente se resta el peso que debe mover el motor y se despeja la fuerza restante para así, con la ecuación

de fuerza $F = ma$, obtener una aceleración de 4.21 m s^{-2} . Finalmente, volviendo al caso crítico descrito anteriormente, en 0.067 s se alcanza una velocidad de 0.28 m s^{-1} , lo que permite observar la incapacidad del sistema construido previamente para moverse a las velocidades requeridas de 1.8 m s^{-1} . Es por esto que es fundamental seleccionar un motor cuyas capacidades se adecuen al sistema implementado, para así lograr cumplir los objetivos planteados.

Tabla 3.2: Cálculo de desempeño Servo Motor ClearPath ELNA en plataforma corregida.

Clear Path CPM-SCSK-2310P-ELNA		
RPM	4000	
Torque	0.8	N m
	0.082	kg m
Peso en polea	4.08	kg
Vel. Esperada	0.28	m s^{-1}
Aceleración	4.21	m s^{-2}
Precio	370	USD

3.2. Selección de motor

En esta sección se da un breve acercamiento sobre los tipos de motores evaluados, sus ventajas y desventajas. Basado en los resultados obtenidos en la etapa 1 del proyecto y de las correcciones realizadas se elige un motor entre los diversos tipos encontrados en el mercado. Como referencia común se analiza el tamaño Nema 34, que es un estándar del perfil de montura del motor, dando así un marco para poder comparar estos motores.

3.2.1. Motor Stepper

Una primera inspección al mercado de motores indica una gran variedad en motores paso a paso, tanto en tamaño como en potencias, por lo que es tentador utilizar este tipo de motor.

El motor paso a paso o stepper se caracteriza por tener un sistema de control de lazo abierto que permite movimientos precisos. La Figura 3.3 muestra la distribución del par de bobinas que conforman las distintas fases del motor, las cuales al ser excitadas en un orden determinado realizan movimientos de una cierta cantidad de ángulos, estos comúnmente son conocidos como los pasos del motor y son determinados según las especificaciones del motor, es decir, la cantidad de pares de polos y su distribución. Si se desea estudiar en mayor detalle, se recomienda [30].

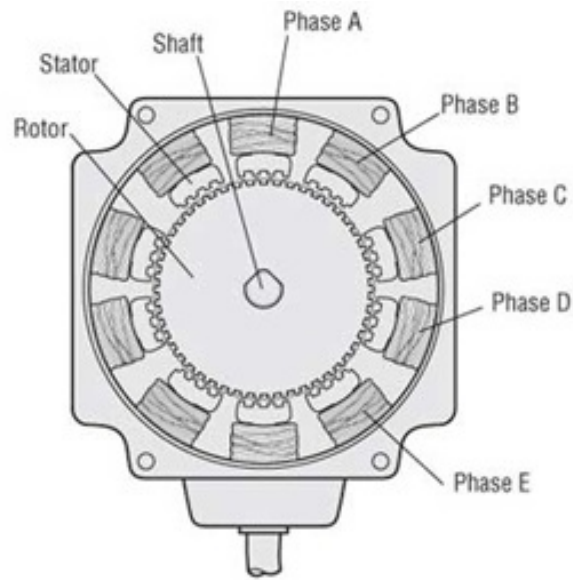


Figura 3.3: Diagrama estructural del motor: Sección transversal perpendicular al eje [30].

La principal ventaja de este tipo de motores está en su fácil manipulación, mediante el uso de un driver solo se necesita enviar la dirección, la cantidad de pasos y la velocidad. Los pasos se regulan con pulsos y la frecuencia de los pulsos determina la velocidad de rotación. Además, este tipo de motor posee un gran torque de retención, es decir, a velocidad cero puede ejercer su máxima fuerza. Sin embargo, la gran desventaja de este motor es que a mayor velocidad su curva de torque decrece significativamente, como se puede observar en la Figura 3.4 y en caso de ser superado el torque, el rotor no puede dar el “paso” perdiéndose la referencia de la ubicación del motor y haciendo necesario implementar un encoder para cerrar el lazo de control. Por último, el costo es muy restrictivo, a pesar de haber gran cantidad de estos en el mercado, un motor de este tamaño ronda en los 400 USD [27], y a esto se debe agregar el valor del Driver que ronda los 800 USD, (2019) [29].

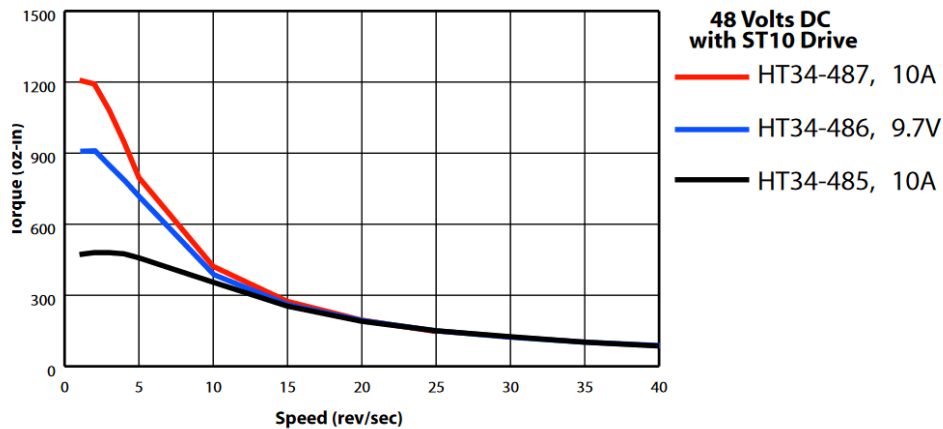


Figura 3.4: Curva de torque para distintos motores stepper con driver ST10 [28].

Suponiendo el caso que se deba llegar a 2 m s^{-1} para superar la velocidad de reacción humana como se especifica en la sección 2.2.1 y con una polea de 2 cm de radio, por revolución del motor se están avanzando 125.6 mm equivalente a 0.126 m. Para este caso implica que el motor debe estar girando a 15.9 vueltas por segundo y como bien se puede observar en el gráfico a 15 rps se tiene aproximadamente 300 oz-in (2.12 N m). Usando la formula $F = ma$ se puede determinar que con 2.6 kg de carga el motor acelerará 27.32 m s^{-2} obteniéndose una velocidad de 1.64 m s^{-1} , siendo estos resultados prometedores ya que son cercanos al objetivo planteado de 1.8 m s^{-1} .

3.2.2. Motor Corriente Continua Cepillado

El motor de corriente continua cepillado, o brushed dc motor (BDC), es ampliamente encontrado en el mercado. Dado que estos motores son de bajo torque se pueden encontrar opciones con cajas reductoras que permiten obtener el torque requerido para la aplicación, siendo una de las principales ventajas la gran variedad tanto en tamaños como especificaciones. Sin embargo, el uso de cajas reductoras representa un sacrificio de velocidad, ya que se reduce considerablemente las revoluciones por minuto (rpm).

El funcionamiento de los motores BDC, a diferencia de los demás tipos de motor, consiste en que la conmutación de la corriente que circula por sus bobinas es realizada de forma mecánica mediante el uso de barras de carbón, en la Figura 3.5 se observan estas barras de carbón con el nombre de Brushes o cepillos en español. Una explicación más detallada de su funcionamiento se

encuentra en [31].

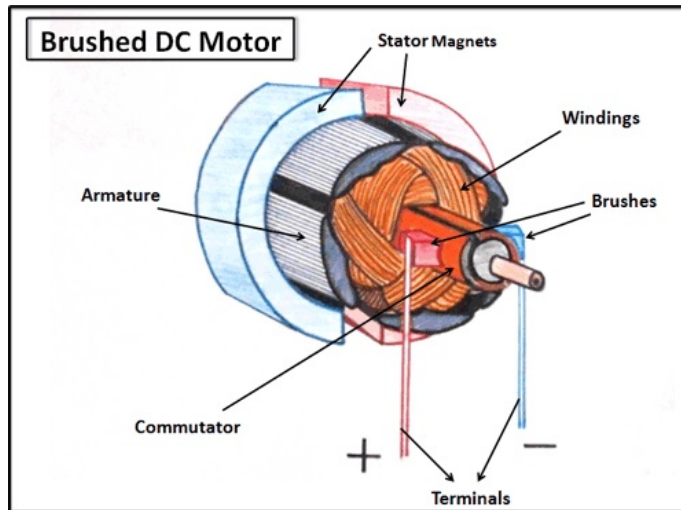


Figura 3.5: Representación gráfica de motor de corriente continua cepillado. [34].

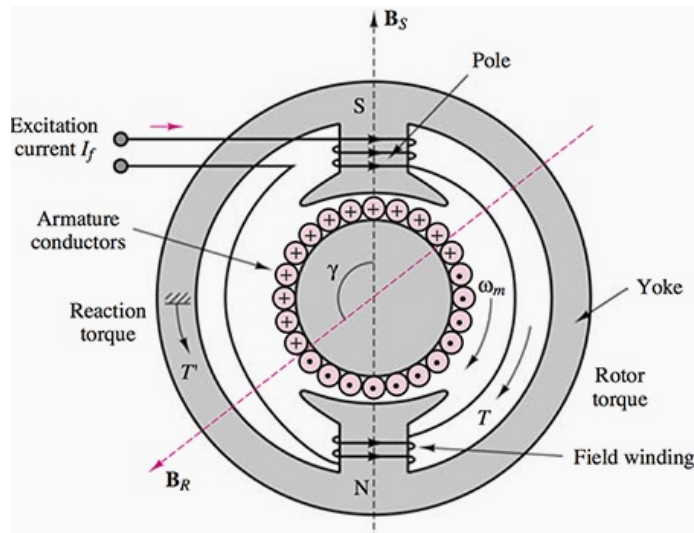


Figura 3.6: Sección transversal de motor DC [35].

Por otro lado, en la sección 3.2.1 se llega a la conclusión de que son necesarios 15 rps para llegar la velocidad de 2 m s^{-1} lo que equivale a 900 rpm, esto usando una simple conversión de revoluciones por segundo a revoluciones por minuto. De esto se sigue que, para esta aplicación, implicaría utilizar un motor como los encontrados en [33] y como se puede observar en la Figura 3.7, para este motor, se tiene un torque de 2.5 N m cerca de los 1000 rpm, con lo cual en el análisis

se obtiene una velocidad alcanzada de 2.04 m s^{-1} y una aceleración de 34 m s^{-2} cumpliendo el requisito mínimo para su funcionamiento.

Finalmente, dentro de sus desventajas se puede destacar su baja vida útil, ya que utiliza un sistema mecánico de conmutación y este está expuesto a desgaste. De igual forma, para cumplir con los requisitos de la aplicación se debe pagar acorde a las características, lo que resulta ser su mayor desventaja, el precio del motor. El cual como se puede observar en [33] tiene un costo a la fecha superior a 800.000 CLP en 2019.

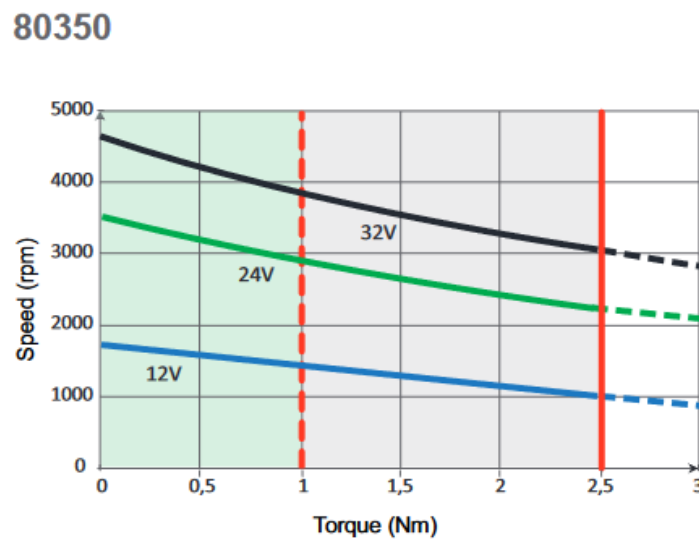


Figura 3.7: Curva de torque para motores 80350 Crouzet [32].

3.2.3. Servo Motor

Un servomotor corresponde a un motor DC con una caja reductora el cual está en lazo cerrado mediante un sensor óptico o encoder, comúnmente en servomotores análogos se utiliza un potenciómetro como retorno para controlar la posición, esto permite lograr movimientos precisos y controlados. Una imagen referencial al sistema de control es la Figura 3.8.

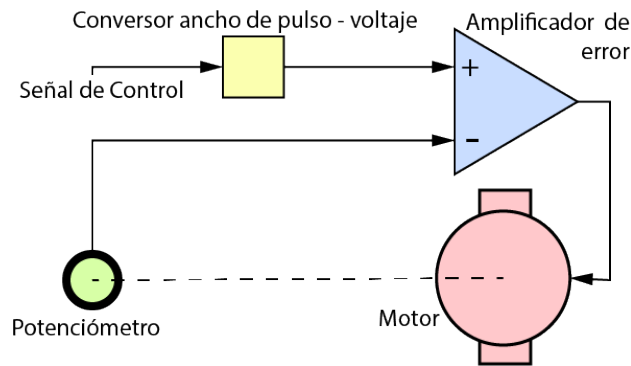
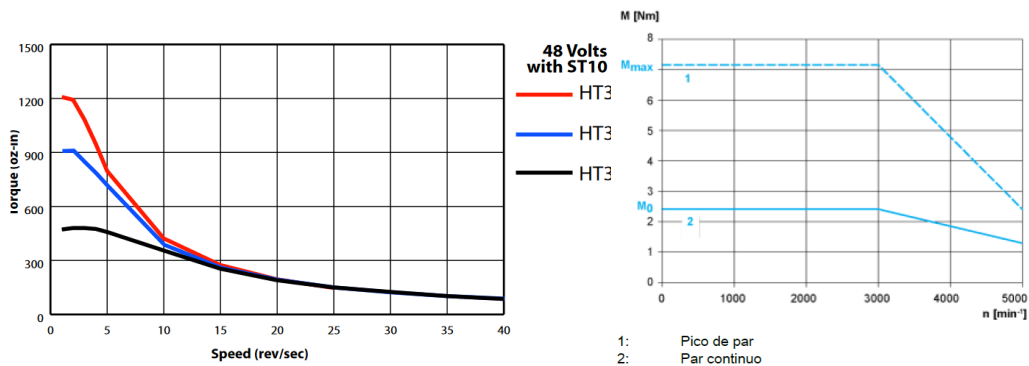


Figura 3.8: Diagrama de funcionamiento de servomotor [37].

La gran ventaja que se tiene con este tipo de motor es su gran precisión y su alto torque en velocidades altas. Estos actuadores vienen integrados con un sensor que entrega retroalimentación de la posición del motor, cerrando así el lazo de control por lo que se puede determinar la posición en la que se encuentran o en su defecto es capaz de corregir por sí mismo el error, además poseen mayor torque en su rango de operación. Por otro lado, la desventaja de estos motores corresponde a su mayor costo y complejidad, ya que al ser de alta precisión suelen ser caros respecto a otros tipos de motores con características similares, de igual forma se necesita de drivers al igual que los motores steppers para su funcionamiento, un ejemplo de esto se puede observar en [38].



(a) Curva de torque para distintos motores stepper con driver ST10 [28].

(b) Curva de Torque: Servomotor BCH2LF0733CA5C [38].

Figura 3.9: Comparación de curvas de torque para motor paso a paso y servomotor de perfiles Nema 34.

Como se puede observar en la Figura 3.9 para dos motores equivalentes se tiene mejor desempeño en un servomotor a lo largo de su rango de velocidad, pudiendo mantener su torque constante

para baja velocidad, mientras que el motor stepper pierde torque considerablemente a medida que aumenta la velocidad de rotación.

Aplicando el mismo análisis para los 15 rps (900 rpm), se tiene un torque de 2.5 N m para los 1000 rpm, de lo que se obtiene un resultado igual al motor DC con velocidad alcanzada de 2.04 m s^{-1} y una aceleración de 34 m s^{-2} cumpliendo el requisito mínimo para su funcionamiento, con un costo aproximado de 240.000 CLP para el motor y 340.000 CLP para el driver para el año 2019, esto sin considerar accesorios menores como cables.

3.2.4. Motor Brushless DC

Los motores brushless (BLDC) son motores de corriente continua cuya diferencia reside en la forma de conmutar las bobinas del motor, este como bien dice su nombre no utiliza los cepillos de carbón como el brushed dc motor, por lo que su vida útil es considerablemente mayor. Para la conmutación utilizan un arreglo de hardware comúnmente conocido como Electronic Speed Controller (ESC). Su funcionamiento es similar al Motor Stepper, en donde al excitar de forma secuencial las bobinas se logra la rotación del motor. Una gran referencia y fuente de información respecto a este tipo de motor se puede encontrar en [40].

Una de las ventajas que tiene este tipo de motor es su torque constante a lo largo de su rango de velocidad, este comportamiento está representado en la Figura 3.10. Además se tiene que el torque es proporcional a la corriente proporcionada, una versión simplificada de la fórmula de torque para los motores BLDC es la ecuación 3.1 que ejemplifica esta relación directa, en donde Kv corresponde a los kilo volts de la especificación del motor, I_A corresponde a la corriente consumida por el motor y 8.3 corresponde a una aproximación de la ecuación de torque.

Otro factor interesante es que la velocidad máxima sin carga, se puede calcular mediante la ecuación 3.2, donde ω_{NL} es la velocidad máxima alcanzada sin carga y V_{supply} el voltaje con el que se alimenta al motor. Se debe considerar que para una estimación real de la velocidad del motor se deben tomar en cuenta diversos factores como pérdidas y roces. Finalmente, la gran ventaja de estos motores y la razón de su estudio es el gran torque que pueden ejercer considerando que son

de bajo costo y fácil obtención.

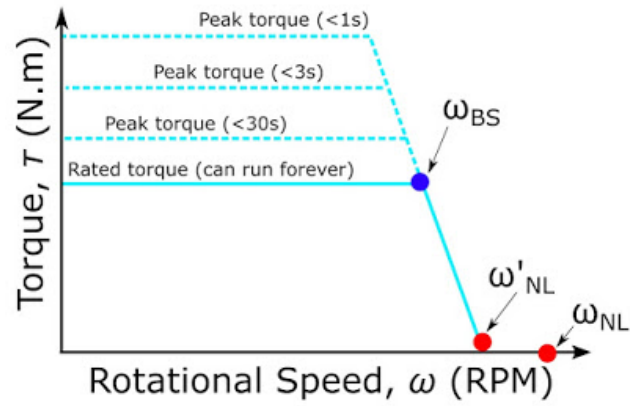


Figura 3.10: Representación de curva de torque vs RPM en motor BLDC [40].

$$\tau \approx \frac{8,3 \cdot I_A}{Kv} \quad (3.1)$$

$$\omega_{NL} = Kv \cdot V_{supply} \quad (3.2)$$

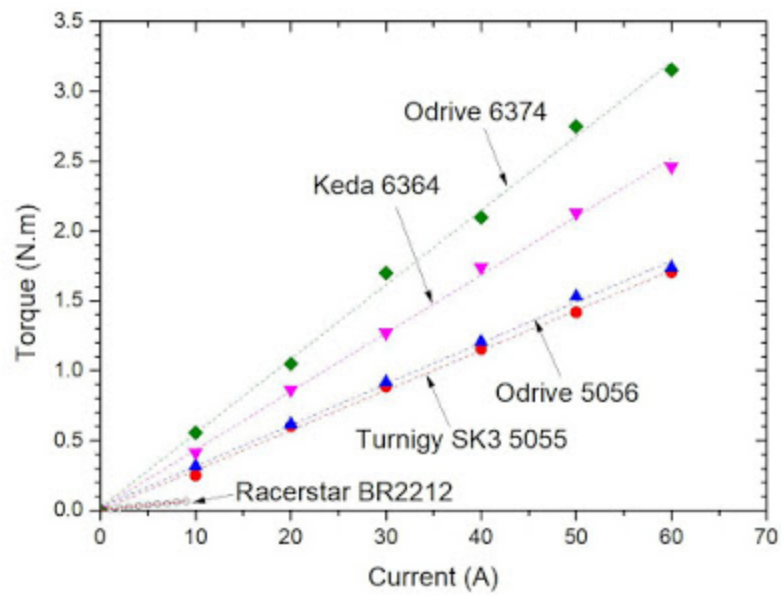


Figura 3.11: Curva Torque vs Corriente: Motores BLDC [41].

Como se puede ver en la Figura 3.11 el motor brushless Odrive 6374 a 60A corresponde al de mayor torque con 3.25 N m experimental, este motor puede ser encontrado en [41] cuyo costo para el 2019 es de aproximadamente 99 USD, 39 USD el encoder y 119 USD el driver correspondiente, el conjunto convierte el motor Odrive en un servomotor de alto torque y bajo costo.

Las especificaciones del motor Odrive 6374 nos dan un valor de 3.86 N m de torque y realizando el análisis correspondiente se tiene una velocidad alcanzada de 3.5 m s^{-1} y una aceleración de 57.8 m s^{-2} cumpliendo los requisitos pedidos previamente. Es importante destacar que, así como tal el motor carece de precisión al igual que el motor dc, por lo que se debe utilizar un encoder que permita cerrar el lazo de rotación del motor incrementando los costos y la complejidad en la implementación.

Sumado a lo previamente mencionado una de las grandes desventajas y complicaciones que presentan estos motores es su comportamiento a bajas revoluciones, en donde la interacción entre los imanes permanentes en el rotor y las ranuras del estator genera torque “sin corriente”. Este torque es periódico y depende de la cantidad de polos magnéticos del motor. Esta interacción causa ripple en el torque ejercido causando ruido en su movimiento, es interesante mencionar que a mayor velocidad no se observa este problema dado que la inercia que genera el motor a alta velocidad filtra este ruido. Dado que es un problema periódico y con variables conocidas se puede caracterizar y corregir mapeando el fenómeno y aplicando correcciones en el sistema de control. En la Figura 3.12 se aprecia este efecto en la curva de torque de un motor girando a velocidad constante.

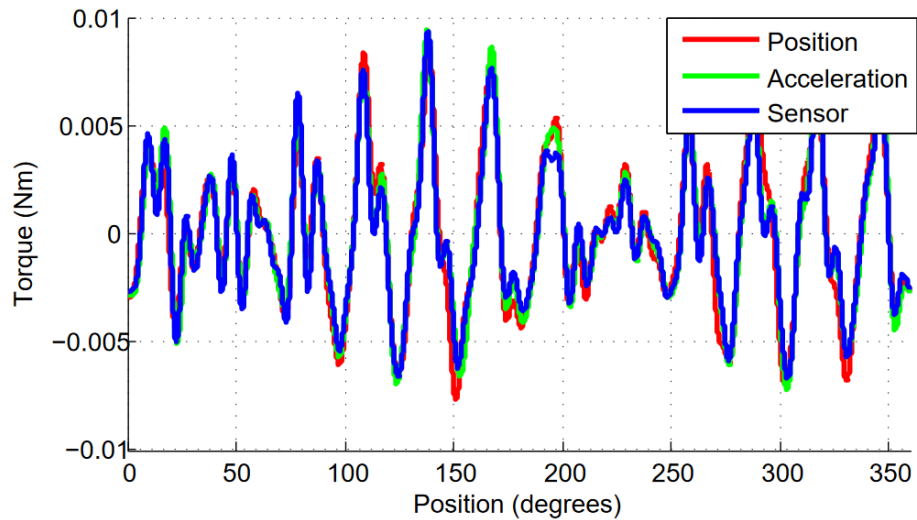


Figura 3.12: Ripple de torque muestreado con sensado de posición, sensado de aceleración y sensor de torque en motor Exceed RC 86MA10 [49].

3.2.5. Motor elegido

Al momento de seleccionar un motor para la segunda etapa del proyecto se debe considerar que las distancias de desplazamiento son pequeñas, para el caso del arquero no mayores a 15 cm y los tiempos de reacción del orden de 60 ms o menos, esto quiere decir que se debe tener una aceleración alta, idealmente superior a 35 m s^{-2} como se detalla en [20]. Por otro lado, el proyecto se encuentra en fase de prototipo, por lo que se debe tomar en cuenta su limitado presupuesto para la construcción de este.

Tabla 3.3: Resumen de características de motores estudiados.

	Torque Nominal N m	Velocidad m s^{-1}	Aceleración m s^{-2}	Costo USD	Torque/Costo
Deseadas	-	1.8	35	-	-
Stepper	2.12	1.64	27,33	1200	0,00176
Brushed DC	2.5	2.04	33,9	1163,8	0,00214
Servo Motor	2.5	2.04	33,9	834,33	0,00299
Brushless DC	3.86	3.46	57.8	257	0,01501

La Tabla 3.3 resume las principales características de los motores estudiados, de las cuales se

puede observar que el sistema con mejor desempeño corresponde al motor Brushless con el sistema de Odrive, el cual además es el de menor costo, por lo que corresponde a la selección clara para implementar en la segunda versión del proyecto.

Capítulo 4

Implementación de la plataforma de prueba

En esta sección se describe la construcción de la nueva versión de la plataforma de prueba basada en el análisis presentado en el capítulo anterior. Además del ensamblaje mecánico, se describen las componentes computacionales que permiten realizar calibraciones y setear el modo de operación del sistema, con el fin de poder replicar el proyecto independiente del usuario que haga uso de este.

4.1. Ensamble mecánico

Para el diseño mecánico se mantiene la línea del diseño propuesto en el trabajo previo del proyecto, con el fin de reducir costos y tiempo de implementación. Además, se debió modificar el soporte de motor horizontal y el soporte frontal de barras para así acomodar al sistema el nuevo motor cuyo tamaño es mayor.

Debido al mayor torque ejercido por el sistema en relación a la plataforma original, se hace necesario reforzar las piezas impresas en 3D, para lo cual se aumenta el grosor de las paredes a un total de 8 paredes de 0.4 mm. Un análisis de la resistencia y tolerancias de las piezas impresas en 3D por medio de deposición de material (FDM) se puede observar en [43].

La Figura 4.1 muestra el soporte del motor, el cual se debió rediseñar para aumentar el tamaño del soporte para así poder dar espacio al nuevo motor cuyo perfil corresponde a un Nema 34, detallado en Figura 4.2. También se puede observar la polea lisa de color negro en la parte derecha inferior del soporte, la cual se debió agregar para lograr la compatibilidad con el sistema previo. Esta polea se encarga de alinear la correa con el eje del Soporte de barras y permite que la correa abrace un mayor perímetro de la polea dentada adosada al motor, esto a su vez permite que haya mayor número de dientes haciendo tracción al momento de realizar un movimiento y así reduciendo la probabilidad de deslizamiento y pérdida de posición.

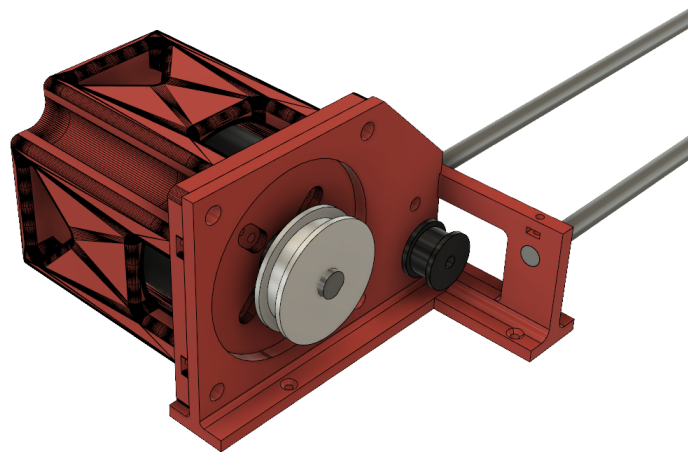


Figura 4.1: Vista general de nueva versión de Soporte de Motor Horizontal ensamblado.

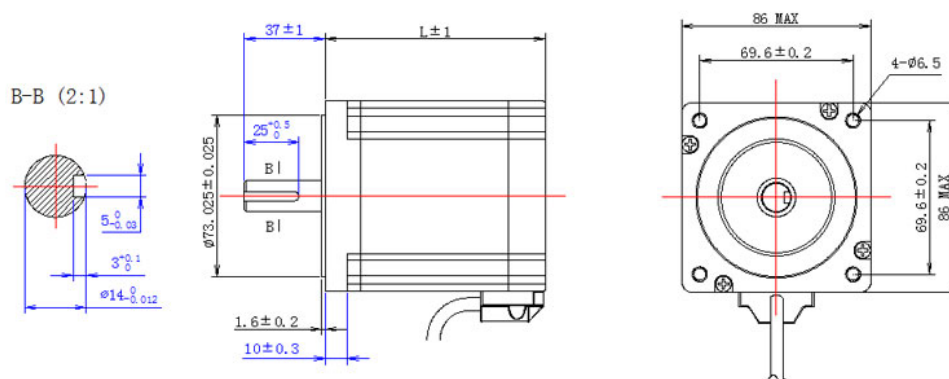


Figura 4.2: Dimensiones de perfil Nema 34 [50].

En la Figura 4.3 se puede observar el Soporte de Barras, al cual se debió aumentar su ancho para así poder acomodar el encoder AMT103 [42]. Otro cambio significativo fue en el eje que este posee en su ensamble. Dado que se tiene un encoder que lee la rotación del eje, se debió adherir una polea dentada para así transmitir la rotación del carro en el movimiento horizontal y poder así cerrar el lazo de control con la posición del carro. Finalmente se debió considerar que las altas velocidades y la tensión ejercida por la correa sobre el eje generan exceso de fricción en el plástico, lo que equivale a altas temperaturas. Debido a esto fue necesario agregar rodamientos para evitar que el soporte se calentara en exceso y potencialmente se derritiera, dado que su punto de transición es de 50 °C aproximadamente para el PLA usado [44] [45].

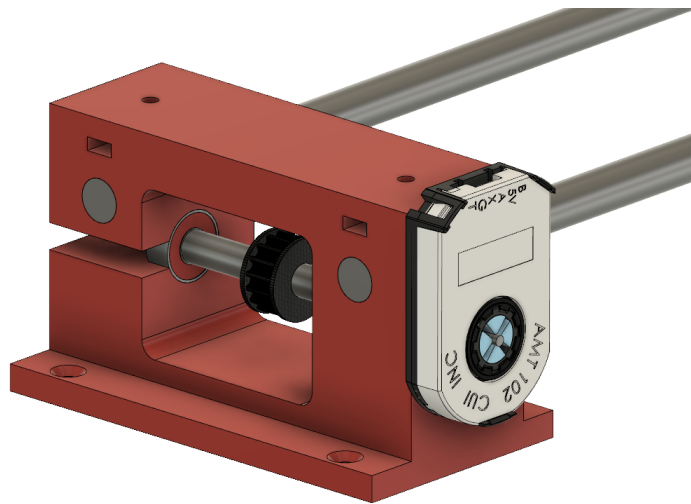


Figura 4.3: Vista general de segunda versión de Soporte de Barras.

El detalle del ensamble y los modelos 3D realizados para la construcción de esta nueva versión se encuentran anexadas al trabajo desarrollado. En estas se pueden ver las dimensiones específicas de que cada pieza y cómo esta ensamblado. La versión del proyecto desarrollada para este trabajo de memoria queda respaldada y documentada en [51].

4.2. Calibración y alineamiento

El sistema construido e implementado se puede apreciar en la Figura 4.4. A la hora de hacer funcionar el sistema, es crítico que todas las piezas estén alineadas correctamente para así evitar

cargas no deseadas, como roces o fuerzas excesivas en los rodamientos, para esto, se agregan soportes regulables a la plataforma, los cuales se encuentra en la parte inferior de esta como se puede observar en la Figura 4.5, esto con el fin de poder regular la altura de cada esquina independientemente de la superficie en la que se monte el sistema y esta pueda ser alineada sin problemas.

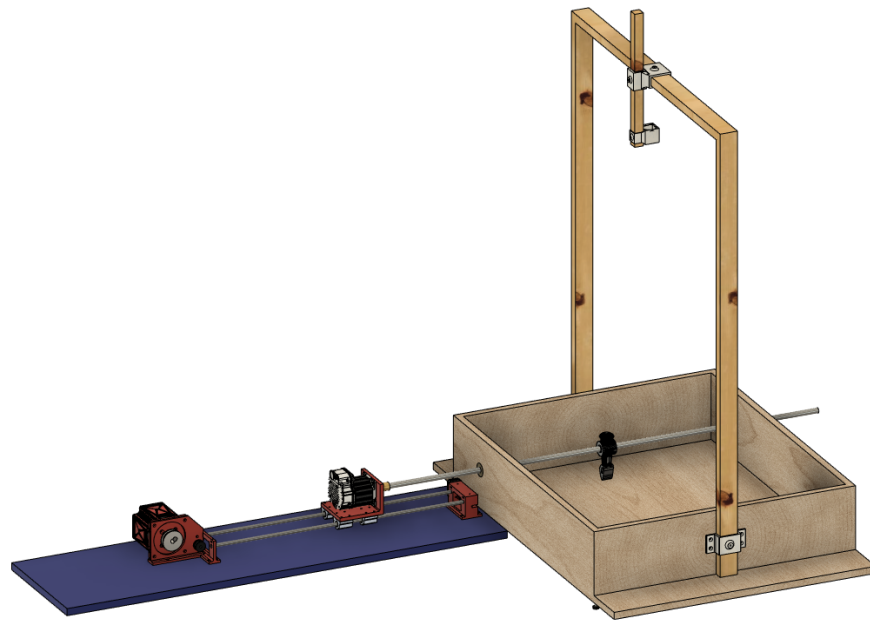
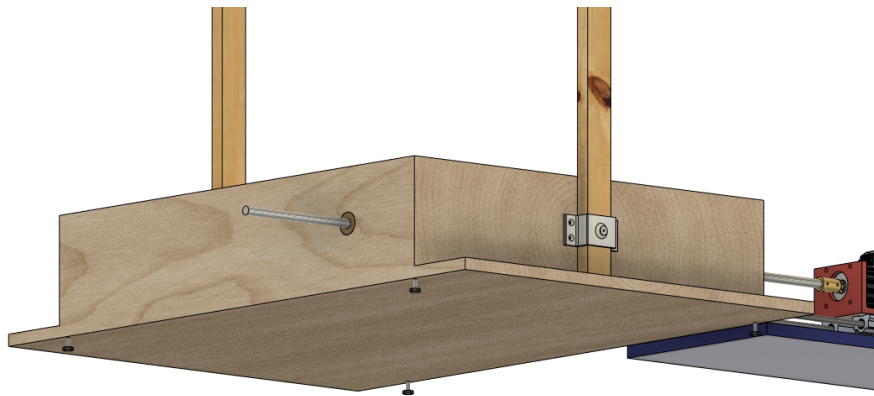
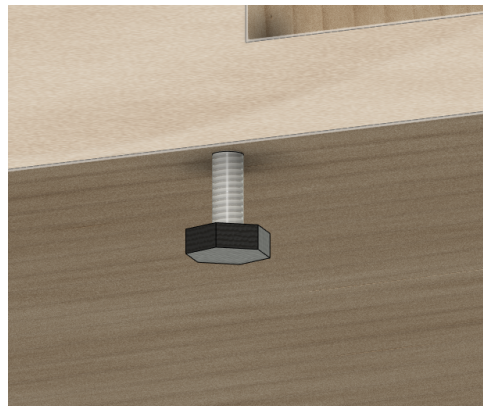


Figura 4.4: Imagen general del sistema construido acoplado a la plataforma de pruebas.



(a) Vista general ubicación de soportes implementados.



(b) Acercamientos de soportes.

Figura 4.5: Soportes regulables, que permiten alinear la plataforma en cada esquina de forma independiente.

Los pasos a seguir para alinear el sistema son los siguientes:

1. Fijar sistema de movimiento a la mesa donde se trabajará.
2. Acercar inicialmente la plataforma con el sistema de movimiento. Un ejemplo se puede observar en la Figura 4.6, donde se tiene un desfase vertical de la barra con el acople.
3. Por inspección ajustar ambas patas regulables del lado adyacente al sistema de movimiento para así alinear la barra del arquero con el acople de bronce en el motor horizontal. Estos soportes son pernos empotrados en la plataforma por lo que atornillando en sentido horario se reduce la altura y antihorario se aumenta.

4. Mediante el uso de un inclinómetro ajustar la inclinación de la plataforma ajustando el lado del jugador humano para igualar el ángulo de esta con el ángulo de la barra en el sistema mecánico.
5. Comprobar que el sistema se deslice suavemente y no se mueva el carro en direcciones no deseadas a causa de desalineamientos.

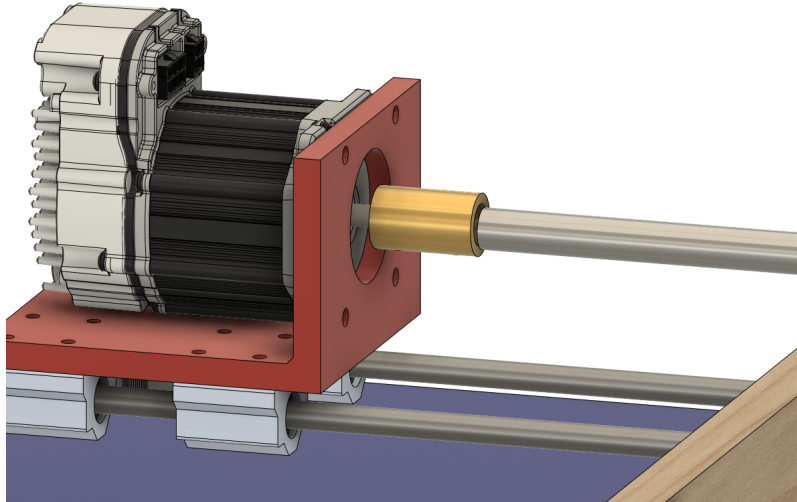


Figura 4.6: Acercamiento inicial de la barra del jugador con el sistema mecánico, donde se puede observar un desfase entre ambos, el cual debe ser corregido ajustando los soportes regulables de la plataforma de pruebas.

4.3. Conexión Hardware

Para la conexión del hardware se debe considerar que se están utilizando dos sistemas, uno para el movimiento horizontal, que corresponde al driver Odrive 3.6 [41] en conjunto con los encoders ATM103 y el motor brushless D6374, y otro para el movimiento rotacional del arquero, el cual se mantiene del sistema diseñado en base al servomotor Clearpath ELNA [25].

Ambos sistemas usan su propia fuente y su propia placa de control debido a las distintas tecnologías que utilizan. El diagrama de conexión para el sistema Odrive implementado se observa en la Figura 4.7, el cual permite la conexión de 2 motores con sus respectivos sensores de rotación y una resistencia de alta potencia para disipar potencia al momento de frenar los motores.

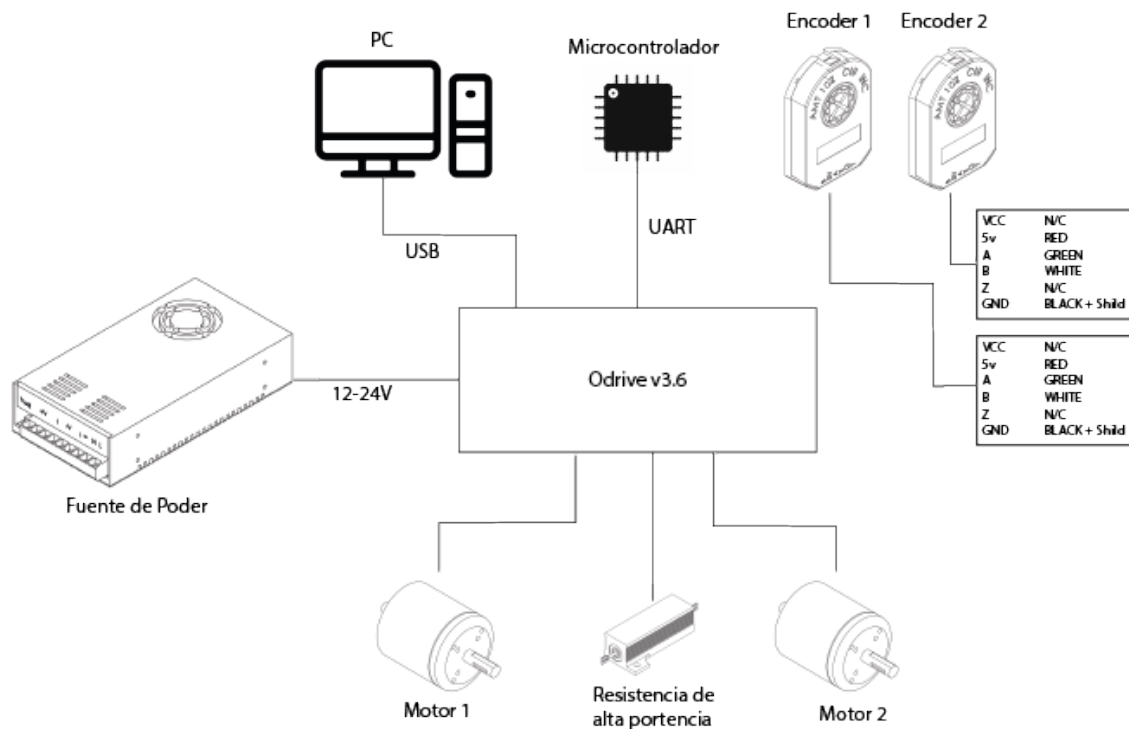


Figura 4.7: Diagrama de conexión para sistema de movimiento horizontal Odrive.

4.4. Configuración y Calibración

Previo a la puesta en marcha del sistema, es importante calibrar y configurar los motores ya que, por defecto, las placas de control de cada motor vienen configuradas para rotación libre sin peso. El uso sin cuidado potencialmente puede destruir el sistema y los motores debido al torque con el que se esta trabajando.

El sistema Odrive es posible utilizarlo tanto en Windows como en Linux. Para el caso de esta memoria se implementa en Windows debido a que lo desarrollado en la fase previa se encuentra en este sistema operativo. Dado que las bibliotecas oficiales son implementadas en Python la implementación del código es compatible con ambos sistemas, solo se deben seguir las instrucciones adecuadas al sistema operativo correspondiente, las cuales se encuentran en [41].

Siguiendo la documentación oficial de Odrive robotics [46] para el uso del sistema, se deben realizar los siguientes pasos para instalar y dejar operativo el driver:

1. Instalar Python 3. para esto se recomienda instalar Anaconda [47], ya que este IDE instala automáticamente la versión de Python seleccionada y ofrece herramientas para trabajar con este lenguaje.
2. Instalar Odrive Tools desde la consola de Anaconda con *pip install odrive*.
3. Conectar la placa mediante USB al computador. La placa no se alimenta por USB, por lo que debe estar energizada por la fuente de poder.
4. Usando Zadig [48] instalar el driver para la placa Odrive. Usar Libusb en Odrive 3.x Native Interface (Interface 2).

Para la calibración se debe tener en cuenta que la placa Odrive funciona con un sistema en cascada, cuyo diagrama se puede observar en la Figura 4.8 y dependiendo del modo en cual se desea trabajar es el lazo que corresponde. Para el caso del sistema propuesto es de interés la posición del arquero, por lo que el lazo de control utilizado corresponde al diagrama completo, en donde la referencia entregada es Position Command, y las feedforwards provienen del sistema anticogging, el cual compensa la fuerza ejercida por los polos magnéticos del motor a baja velocidad.

Los bloques de control corresponden a variaciones de un controlador PID, en donde el control de posición es un lazo proporcional, el control de velocidad y corriente proporcional integrativo.

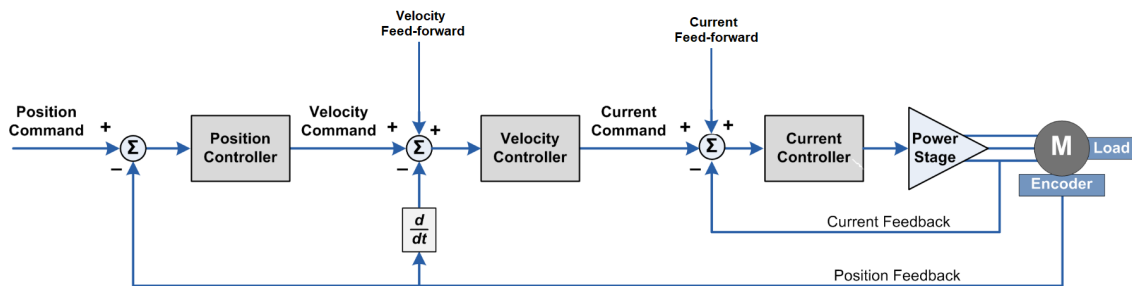


Figura 4.8: Diagrama del lazo de control en placa Odrive v3.6 [41].

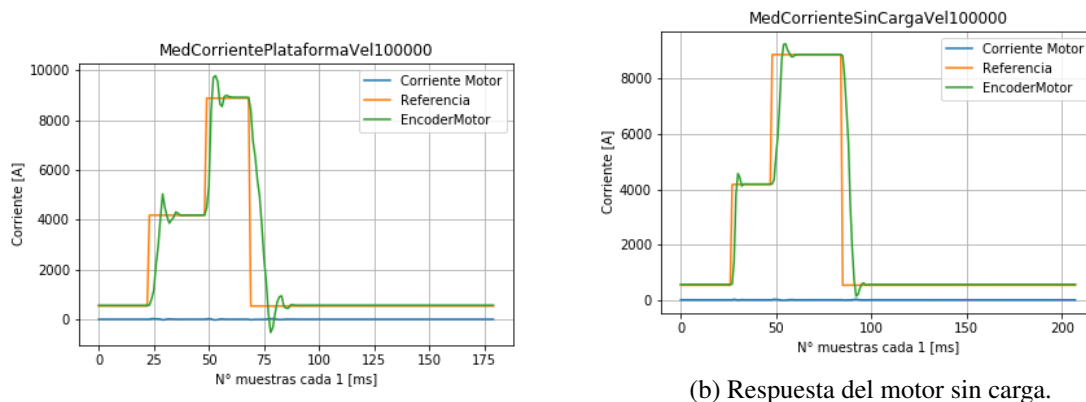
Para la configuración del sistema se puede encontrar un procedimiento básico en la documentación del fabricante, el cual consta de los siguientes pasos para sintonizar los parámetros del sistema

de control:

1. Fijar *my_drive.axis0.controller.config.vel_integrator = 0*.
2. Se debe tener un sistema estable, en caso contrario disminuir todas las ganancias hasta obtenerlo.
3. Aumentar *my_drive.axis0.controller.config.vel_gain* un 30 % hasta obtener una vibración en el motor.
4. Disminuir *my_drive.axis0.controller.config.vel_gain* al 50 % del valor de vibración.
5. Aumentar *my_drive.axis0.controller.config.pos_gain* un 30 % hasta observar overshoot en el seguimiento a referencia.
6. Disminuir *my_drive.axis0.controller.config.pos_gain* hasta no tener overshoot.
7. El integrador puede ser fijado a *my_drive.axis0.controller.config.vel_integrator = 0.5 * bandwidth * vel_gain*

El bandwidth corresponde al inverso del tiempo de asentamiento se obtiene al hacer un cambio de referencia, es decir, es el tiempo desde que se asigna un valor a la variable setpoint hasta que se llega a un valor estable en la medición¹. Este valor debe ser obtenido con la plataforma armada, ya que los roces y pesos a mover afectan el tiempo de asentamiento de la posición. Este comportamiento se puede observar en la Figura 4.9.

¹**Francisco's comment:** el setpoint y referencia se refieren a lo mismo, por lo que lo anterior se lee raro. Además el tiempo de asentamiento se mide respecto a un porcentaje del valor final (en muchos casos el sistema llega a la referencia asintóticamente, y en ese caso el tiempo sería infinito..) recomiendo cambiar a la definición: el tiempo que se demora el sistema en llegar al 98 % (o 95 %, depende del criterio) del valor estacionario dado un cambio de referencia tipo es



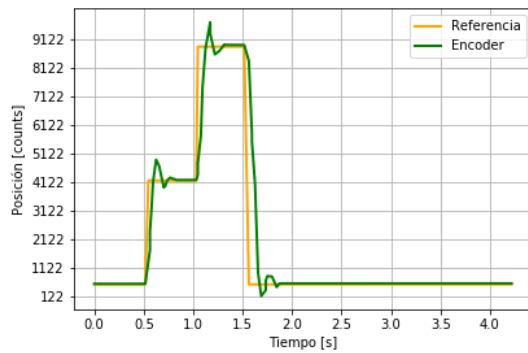
(a) Respuesta del motor con plataforma ensamblada.

(b) Respuesta del motor sin carga.

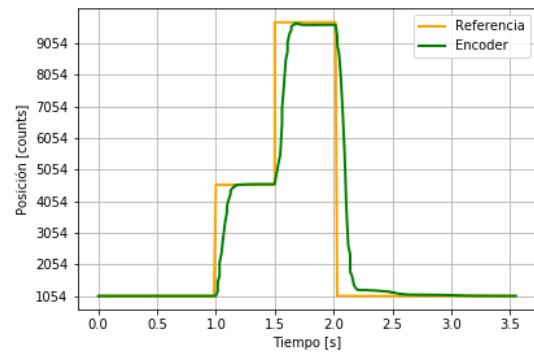
Figura 4.9: Comparación de respuesta del motor a cambio de referencia con Velocidad de 10.000 cuentas por segundo y límite de corriente 25 A para distinta carga.

Es importante usar el liveplotter instalado con el pack de herramientas Odrive, o usar algún medio para graficar el comportamiento del motor durante el proceso de calibración, ya que se requiere identificar claramente si existe o no overshoot en la respuesta del motor.

Se puede observar en la Figura 4.10 el cambio en el comportamiento del motor antes y después de ajustar los parámetros del controlador. En la Figura 4.10a se tiene una velocidad de reacción mayor, pero se tiene excesivo overshoot. Por otra parte, sacrificando un poco la velocidad se puede llegar a la referencia de forma suave y estable como se puede observar en la Figura 4.10b, lo cual es de interés ya que podría significar una colisión no deseada en caso de realizar un movimiento rápido estando cerca del límite mecánico.



(a) Lazo de control con ganancias por defecto.



(b) Lazo de control con ganancias ajustadas.

Figura 4.10: Comparación de respuesta del motor a cambio de referencia con Velocidad de 10.000 cuentas por segundo y límite de corriente 25 A para calibración de lazo de control con plataforma implementada.

Los parámetros utilizados obtenidos en la calibración corresponden están expuestos en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros configurados para el lazo de control Odrive.

Corriente límite	25
Ganancia de posición	$20 * 0.90$
Ganancia de velocidad	$(5.0/10000) * 0.9$
Ganancia integrador de velocidad	$0.5 * 10 * (5.0/10000) * 0.9$

Finalmente, la versión de firmware corresponde a una versión anterior a la actual desarrollada al momento de realizar esta memoria, esta última corresponde a la 3.6 y posee un par de características extras pero el sistema desarrollado es compatible, esto debido a que se usan funciones básicas que ambas versiones poseen. Hasta el momento existe un error documentado y presente en el firmware de la placa Odrive 3.6, el cual consiste en que es necesario realizar un reboot al momento de guardar, para esto se debe ejecutar el comando `my_drive.save_configuration()` seguido de `my_drive.reboot()` con lo cual se logra almacenar la configuración en la memoria eprom de la placa.

4.5. Puesta en marcha

En esta sección se detallan los principales pasos para conectarse a la placa, como realizar movimientos y se explica como están organizados los elementos del firmware. Esto con la finalidad de dar al lector una introducción del código implementado y la capacidad de manipularlo con confianza, si se desea estudiar en mayor detalle el procedimiento o el firmware, estos pueden ser encontrados en la documentación proporcionada por Odrive robotics [41].

4.5.1. Estructura del firmware

El firmware de la placa Odrive tiene una estructura orientada a objetos, cuya estructura es graficada en la Figura 4.11, donde la placa es representada por Drive. El Axis corresponde a un eje compuesto por un motor, su encoder y el lazo de control correspondiente. Cada placa Odrive posee Axis0 y Axis1 pudiendo usar distintos motores y configurar lazos de control independientes para cada uno. Por último, el Motor y el Controlador poseen sus configuraciones para configurar el tipo de motor como para tunear y manipular el lazo de control.

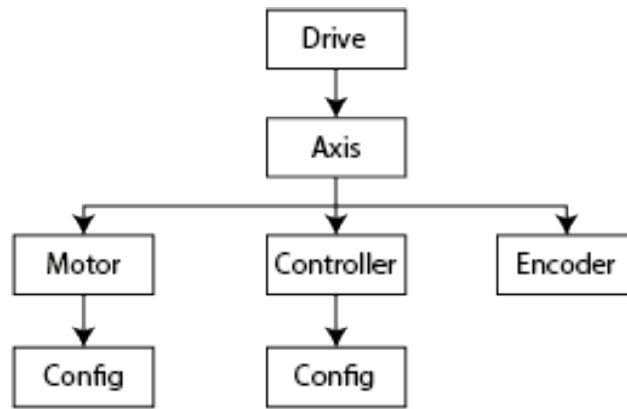


Figura 4.11: Diagrama de estructura implementada en placa Odrive v3.6.

4.5.2. Conexión a placa y primer movimiento

El script expuesto a continuación corresponde a lo esencial para conectarse a la placa Odrive y dejarla operativa para realizar pruebas y movimientos:

Con este script se importan las bibliotecas necesarias para el funcionamiento del sistema Odrive, donde *odrive* importa las funciones básicas que el firmware de la placa nos permite usar y

```

import odrive
import odrive.enums import *

my_drive = odrive.find_any()

if((A0.motor.is_calibrated)==False):
    # Calibrate motor and wait for it to finish
    print("starting_calibration...")
    my_drive.axis0.requested_state = AXIS_STATE_FULL_CALIBRATION_SEQUENCE

while my_drive.axis0.current_state != AXIS_STATE_IDLE:
    time.sleep(0.1)

my_drive.axis0.requested_state = AXIS_STATE_CLOSED_LOOP_CONTROL

my_drive.axis0.pos_setpoint = 10000

```

odrive.enums importa la lista de errores posibles para así poder interpretar cualquier problema ocurrido durante la ejecución.

Primero se debe enlazar la placa mediante la función *odrive.find_any()*, la cual busca las placas conectadas al computador y de encontrar una la almacena en el objeto *my_drive*. Por temas de seguridad, la placa Odrive siempre enciende con los motores en estado IDLE, y para poder salir de este estado es necesario calibrar los motores. Luego se debe seleccionar un tipo de movimiento, en el caso del taca-taca se trabaja con *AXIS_STATE_CLOSED_LOOP_CONTROL* el cual aplica movimientos basados en referencias de posición. Por último, se presenta el método para mover los motores, el cual consiste en darle un valor a la referencia del eje.

Dado que el encoder ATM102 tiene señal de índice, es decir, envía un pulso cada vez que se da una vuelta completa, lo que permiten calibrar el motor una sola vez, guardar esta calibración y buscar el índice del encoder al inicio de la rutina para así sincronizar el motor con la calibración realizada previamente. Mayor detalle se puede encontrar en la documentación oficial de Odrive Robotics [41] y en el código desarrollado para esta memoria.

4.5.3. Manejo de Errores

Durante la ejecución del sistema es posible encontrar diversos tipos de errores, de estos el que con mayor frecuencia se encontró fue el error por exceso de corriente, el cual es gatillado por un

```

import odrive
import odrive.enums import *
from odrive.utils import dump_errors

#Conexion a placa y calibracion
...

my_drive.axis0.pos_setpoint = 10000
# En caso de ocurrir un error al pedir un movimiento por ejemplo

dump_errors(my_drive, True)
my_drive.axis0.requested_state = AXIS_STATE_CLOSED_LOOP_CONTROL

```

peak de corriente mayor al límite configurado, esto debido a una mala calibración del PID sumado al ripple generado por el par de polos del motor.

Para identificar los errores es necesario importar *odrive.enums* y para poder limpiar el registro de errores y habilitar nuevamente los motores se debe utilizar la función *dump_errors()* que se encuentra en *odrive.utils*. A continuación se presenta un ejemplo de uso:

En caso de tener un error al demandar el movimiento por ejemplo, la placa pasa a estado IDLE y se almacenan los errores en hexadecimal. Para poder ver el detalle de lo ocurrido se puede utilizar la función *dump_errors()*, cuyo primer argumento es la placa a analizar. Esta función imprime por consola el detalle de los errores y en caso de pasarle el segundo argumento *True* se limpian los errores, por defecto la función usa *False* como segundo argumento. Finalmente se debe cambiar el estado de eje para volver a mover el motor.

4.5.4. Protocolos de comunicación

La placa Odrive permite distintos medios de comunicación para distintos protocolos disponibles en su firmware, para los cuales se probó la comunicación serial mediante USB, comunicación USB y comunicación con UART por medio de un FTDI. Para el caso de estas pruebas se debe considerar que la placa Odrive permite múltiples conexiones mediante el puerto USB dado que usa un sistema de dispositivo compuesto creando COM virtuales. Más detalladamente se prueba los 3 tipos de comunicación de forma simultánea, logrando así tener 3 medios de comunicación paralelo. sin embargo, por tiempo y complejidad no se logra una comunicación funcional mediante

```
import usb.core
import usb.util

device = usb.core.find(idVendor=0x1209, idProduct=0x0d32)
print(device)
```

protocolo USB, si bien se logra la comunicación con el dispositivo y enviar un comando a la placa, no se logra recibir una respuesta satisfactoria. Para los otros medios de comunicación se establece conexión con la cual se pudo leer y escribir a la placa, pudiendo mover los motores y configurarlos. Los protocolos aceptados por la placa es el Nativo que corresponde a la biblioteca de Python y el protocolo ASCII que puede ser usado por los demás medios de comunicación.

Dentro de los experimentos realizados se puede observar una discrepancia en la documentación respecto al protocolo USB y sus interfaces, en donde se recomienda utilizar la Interface 2 dado que las demás interfaces son utilizadas por el driver communications device class (CDC), sin embargo en la descripción de la Interface 2 solicitada, luego de buscar el dispositivo mediante la idVendor y idProduct, se observa el identificador numérico de la interface como 0, lo que en la lista de dispositivos se ve descrito como Interface 0 y es el COM de esta interface la que se debe utilizar si es que se desea usar este medio de comunicación.

Finalmente se presenta un código de como buscar y obtener información de las interfaces de la placa para protocolo USB:

Capítulo 5

Experimentos y Resultados

Una vez construido el sistema mecánico se deben realizar distintos tipos de pruebas para así comprobar las capacidades del sistema y a su vez generar un conjunto de pruebas sistemáticas que permitan probar distintos motores de ser necesario. Para estas pruebas se utilizan los parámetros configurados previamente, los cuales se detallan en la Tabla 4.1.

5.1. Precisión y búsqueda de rango

El primer experimento realizado consiste en encontrar el rango de movimiento mecánico y a su vez comprobar la precisión que se puede lograr con el sistema evaluando la diferencia en el rango encontrado cada vez que se realiza el experimento. Las pruebas consisten en desplazar el carro en dirección al punto A representado en la Figura 5.1, aumentando en cada iteración 100 cuentas de la referencia comprobando que la medición del encoder y la referencia no supere un delta de error, el cual de ser muy grande representa un tope mecánico e indica que se ha encontrado el extremo A. Para el extremo B se aplica un procedimiento análogo disminuyendo la referencia en 100 cuentas cada iteración. Por último, ambas posiciones son almacenadas al final del procedimiento e iterando se puede comprobar la repetitividad del sistema y que precisión es lograda en la búsqueda de rango.

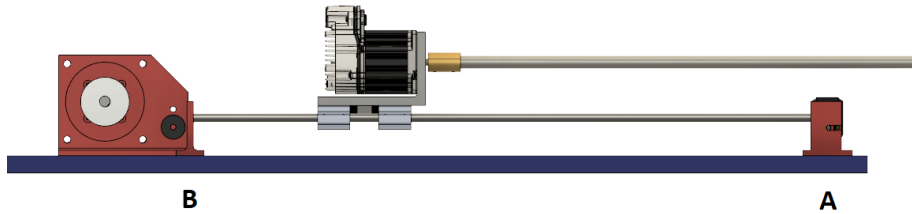


Figura 5.1: Setup para búsqueda de rango mediante limite mecánico.

Realizando 100 iteraciones se obtiene el diagrama de dispersión mostrado en la Figura 5.2 en donde se puede observar que el rango máximo encontrado corresponde a 31 281.77 counts del encoder ATM102 acoplado al eje que mide el movimiento horizontal y el rango mínimo encontrado corresponde a 31 266.0 con el rango promedio de 31 276.24 counts, de donde se puede observar que el error de mayor magnitud es de 10.24 counts. Dado que el sistema tiene un largo de 57.15 cm se tiene que aproximadamente una cuenta corresponde a 0.001 827 cm dando así que el error de rango encontrado respecto al promedio es de 0.0187 cm o equivalentemente 0.187 mm.

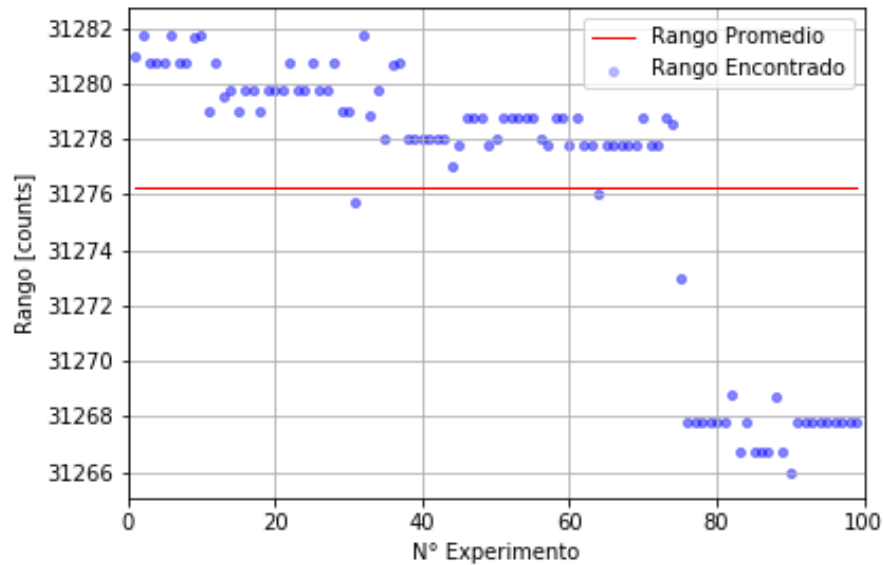


Figura 5.2: Diagrama de dispersión de rango mecánico encontrado en 100 iteraciones.

5.2. Seguimiento de referencia

Para el correcto funcionamiento del sistema se necesita que sea capaz de seguir las referencias dadas por el sistema de visión con la precisión adecuada para poder atajar la pelota y con la agilidad necesaria para poder reaccionar a las velocidades en un juego, ver sección 2.2.1 para mayor detalle. Se debe poder reaccionar a cambios bruscos de referencia debido a cambios repentinos de dirección de la pelota durante el juego, esto es crítico para asegurar un funcionamiento óptimo del arquero y los jugadores. Con esto en mente se realizan una serie de pruebas que permiten observar el comportamiento del motor frente a distintas instancias: Respuesta a escalón, Seguimiento sinusoidal y Seguimiento de rampa.

Para los experimentos se configura el sistema para calibrar una vez y mediante el uso del encoder se sincroniza las fases del motor con la configuración guardada. Esto permite iniciar el motor en una posición fija en cada experimento ya que el mismo sistema busca un punto de referencia en el encoder. Se inicia buscando el rango máximo de operación para trabajar en función de este y así evitar una colisión no deseada con uno de los extremos del sistema. Es importante notar que el rango disponible para operar el sistema sin plataforma es distinto al que se tiene con el sistema acoplado a la plataforma ya que el movimiento se ve limitado por el arquero, es por esto que se deben iniciar las pruebas con el sistema acoplado, guardar el rango de operación y trabajar usando esta distancia.

Para los 3 casos de estudio debido a las limitaciones de la fuente de poder utilizada, y por temas de seguridad, se limita la velocidad a 100.000 cuentas por segundo y corriente límite de 25 A. Por último, para cada caso se utilizaron las siguientes configuraciones de carga:

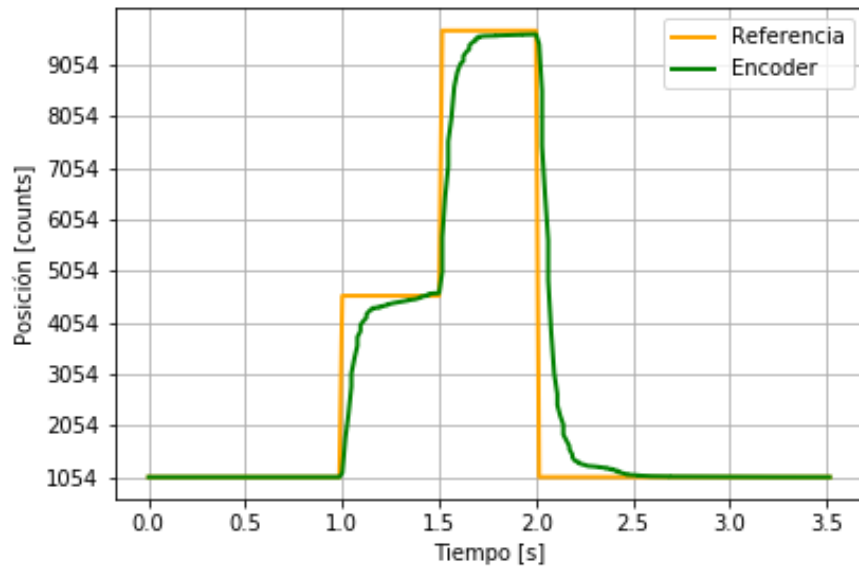
- Plataforma acoplada completa.
- Motor rotacional acoplado (1 kg aprox).
- Sin carga.

De los datos obtenidos se puede observar que el controlador calibrado es capaz responder suavemente y llegar a la referencia sin overshoot teniendo un comportamiento similar para distintos

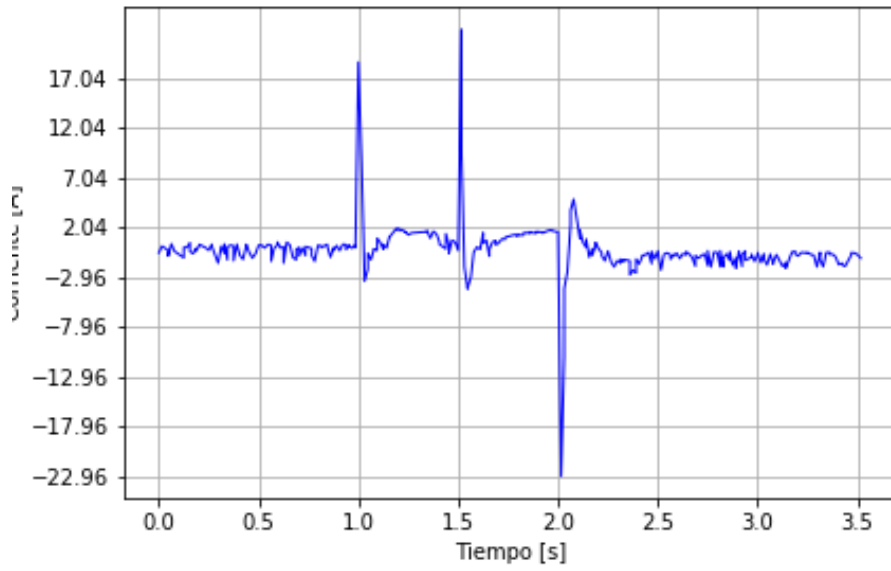
tipos de carga como se puede observar en las Figuras 5.3 a 5.11. Por otra parte, analizando los datos obtenidos para la respuesta a escalón con la plataforma acoplada se tiene que el tiempo de respuesta para el tercer cambio de referencia es de 1.094 s, es decir, el motor se desplaza a 0.145 m s^{-1} en 15.83 cm.

Se debe tener en cuenta que al utilizar una fuente de poder pequeña se debe limitar la corriente para no dañar el equipo utilizado, por lo que el motor a lo más utilizará la corriente que se le configure como límite, esto se corrobora con la Figura ??.

Tomando en cuenta la ecuación 3.1 que nos dice que el Torque aplicado por el motor es proporcional a la corriente que este utiliza, se tiene que a 25 A se utiliza un 35.7 % de las capacidades del motor, por lo que el motor potencialmente es capaz de llegar a 0.405 m s^{-1} . Por otro lado, analizando los datos del motor con las configuraciones por defecto, cuyas respuestas presentan overshoot y oscilación se tiene que para 15,53 cm se demora 0.281 s mejorando considerablemente la velocidad de respuesta, alcanzando una velocidad de 0.553 m s^{-1} y potencialmente una velocidad de 1.55 m s^{-1} .

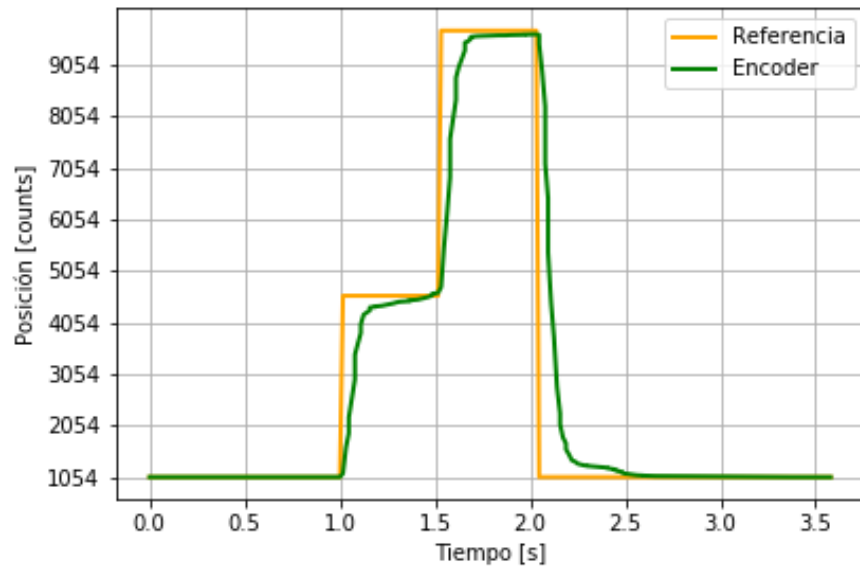


(a) Seguimiento de referencia de respuesta a escalón sin carga.

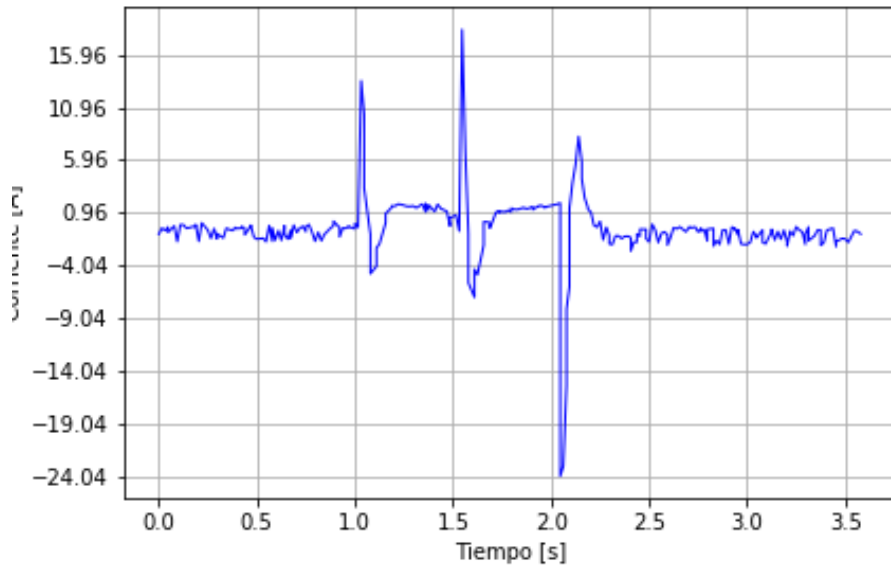


(b) Corriente medida en seguimiento de referencia a respuesta a escalón sin carga.

Figura 5.3: Experimento de seguimiento de referencia a respuesta de esclón sin carga.

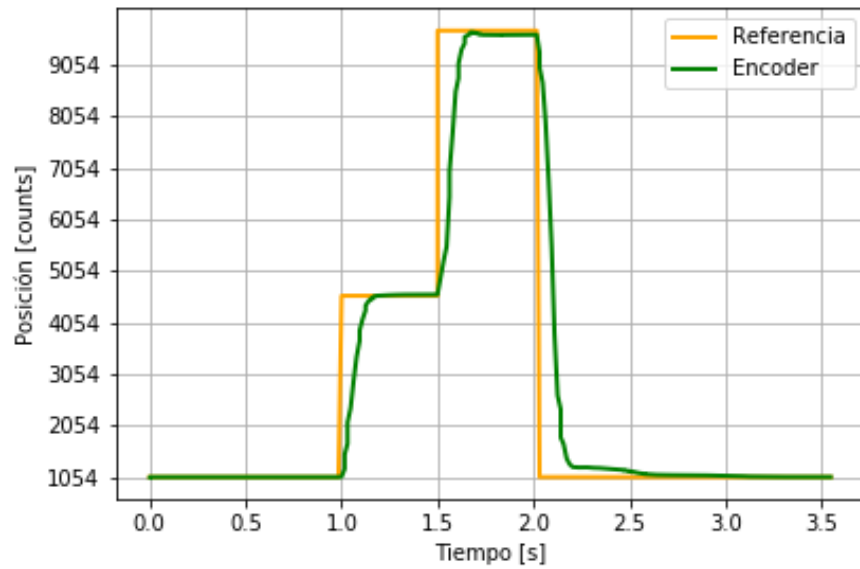


(a) Seguimiento de referencia de respuesta a escalón con 1 kg de carga.

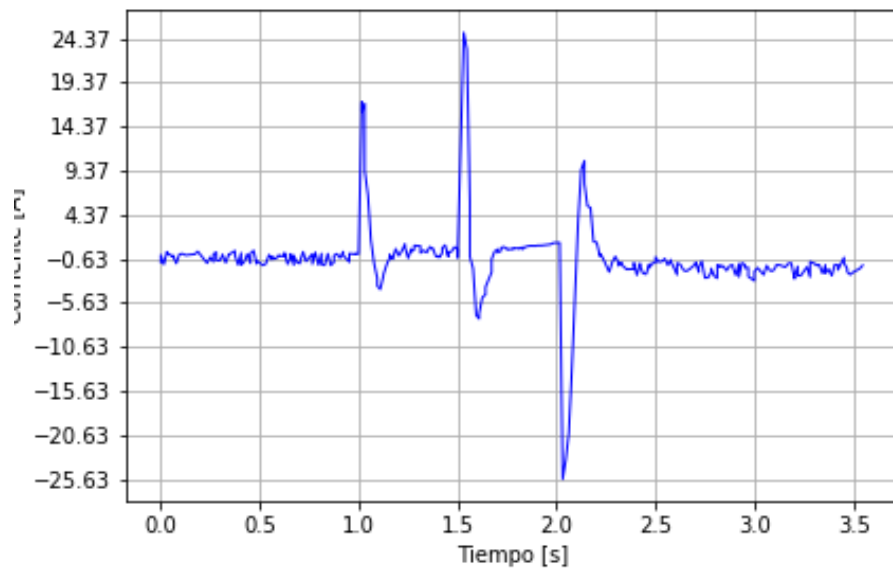


(b) Corriente medida en seguimiento de respuesta a escalón con 1 kg de carga.

Figura 5.4: Experimento de seguimiento de referencia a respuesta de esclón con 1 kg de carga.

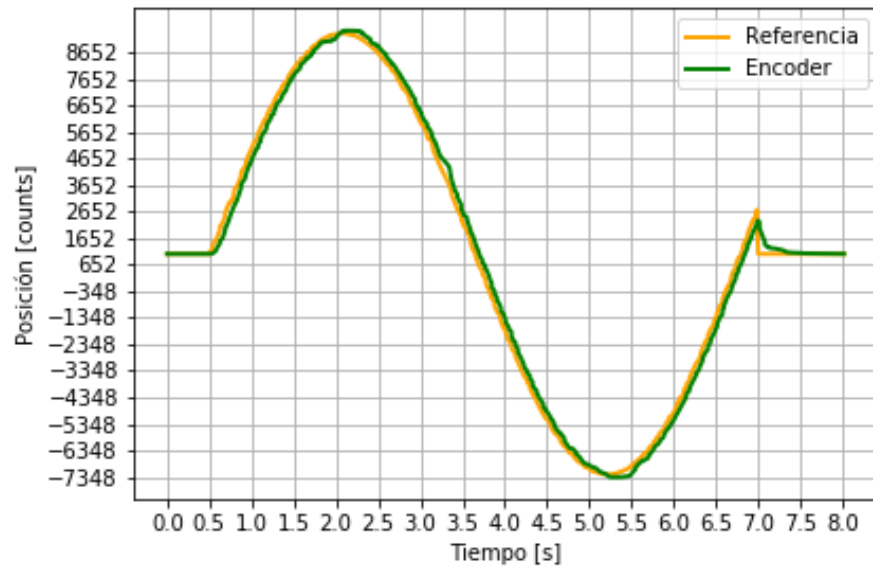


(a) Seguimiento de referencia de respuesta a escalón con plataforma acoplada.

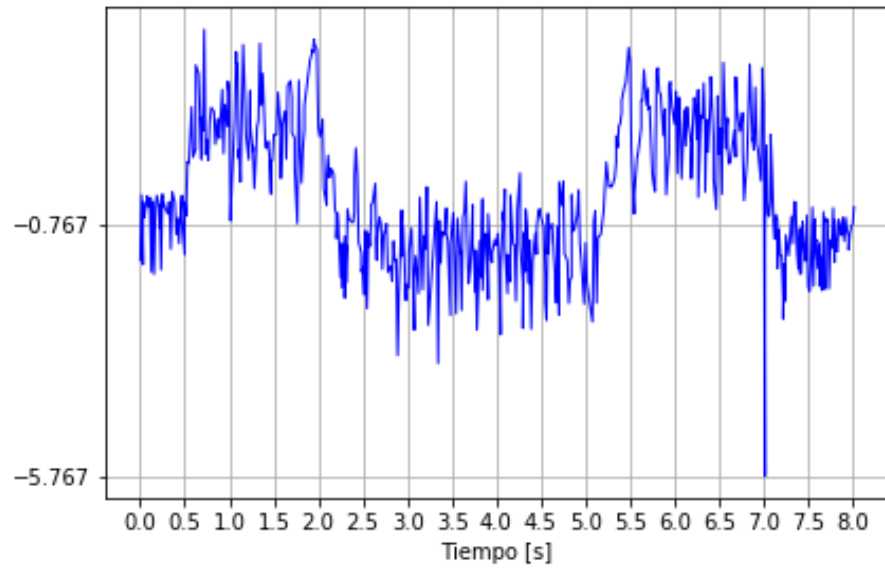


(b) Corriente medida en seguimiento de respuesta a escalón con plataforma acoplada.

Figura 5.5: Experimento de seguimiento de referencia a respuesta de escalón con plataforma acoplada.

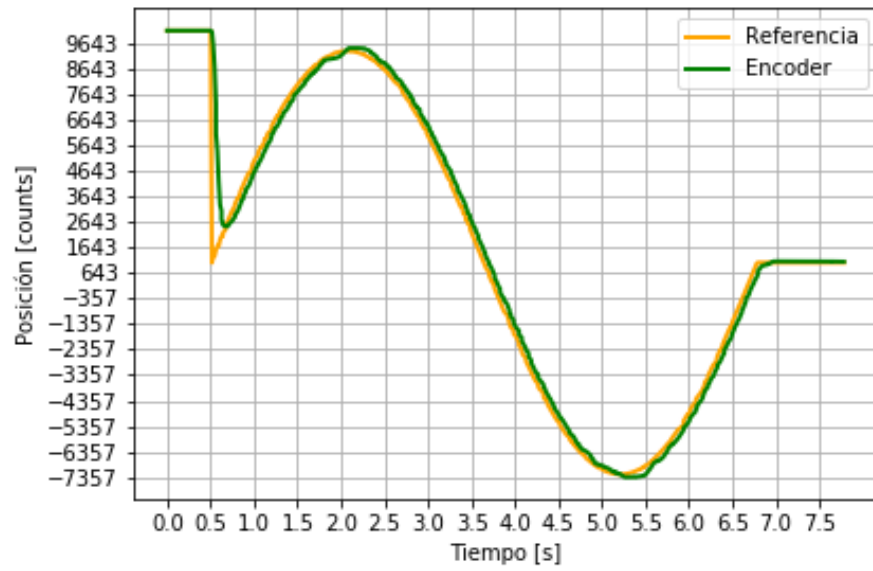


(a) Seguimiento de referencia sinusoidal sin carga.

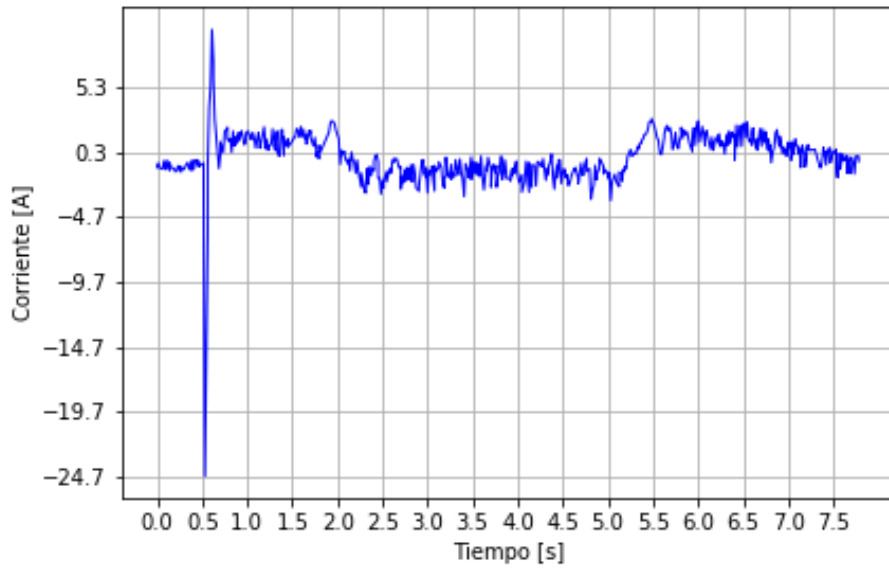


(b) Corriente medida en seguimiento de respuesta sinusoidal sin carga.

Figura 5.6: Experimento de seguimiento de referencia sinusoidal sin carga.

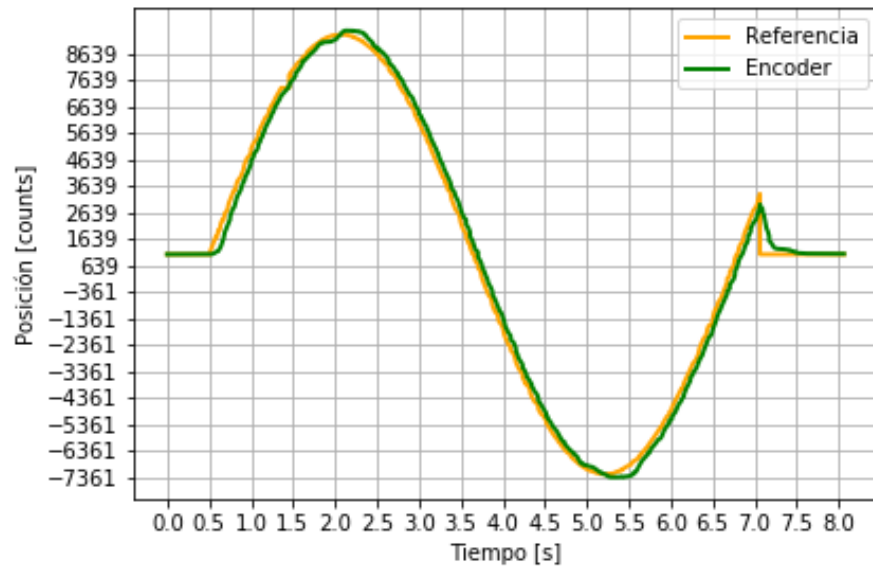


(a) Seguimiento a referencia sinusoidal con 1 kg de carga.

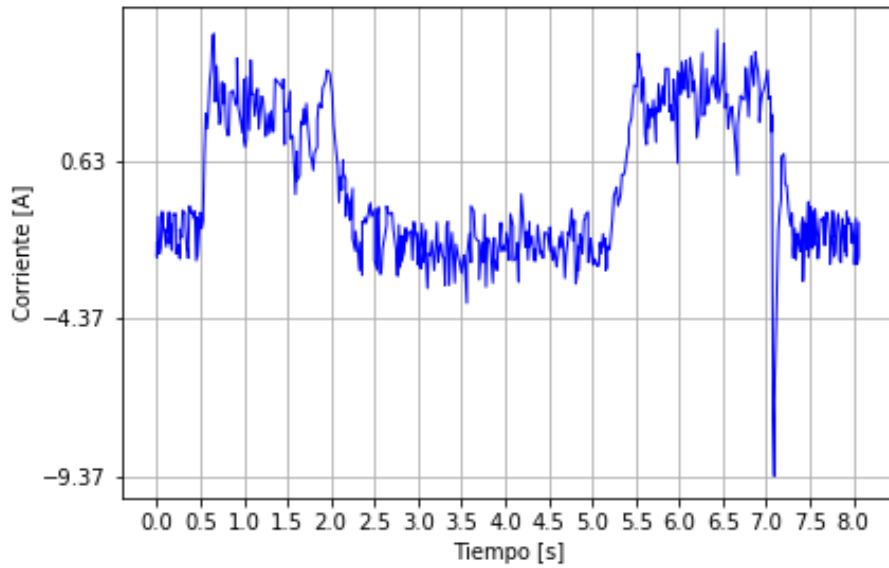


(b) Corriente medida en seguimiento de respuesta sinusoidal con 1 kg.

Figura 5.7: Experimento de seguimiento de referencia sinusoidal sin carga.

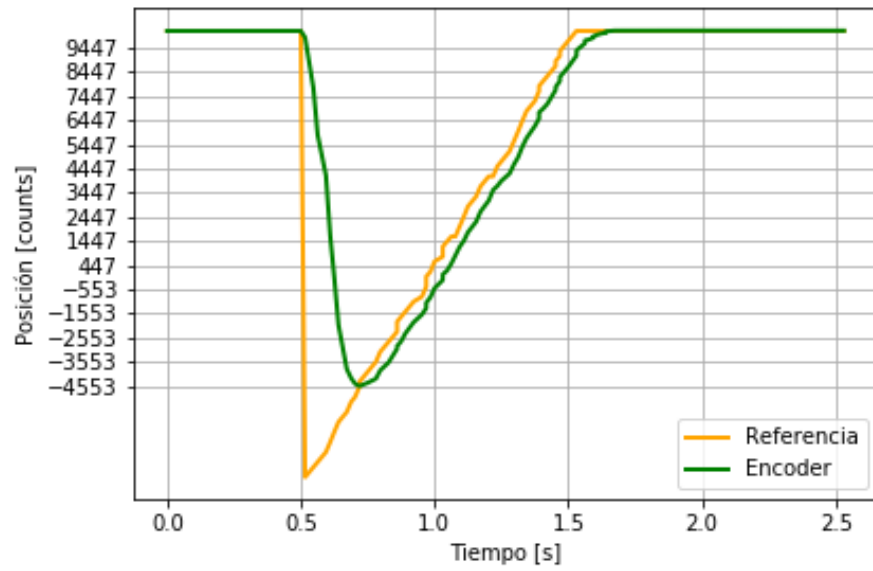


(a) Seguimiento a referencia sinusoidal con plataforma acoplada.

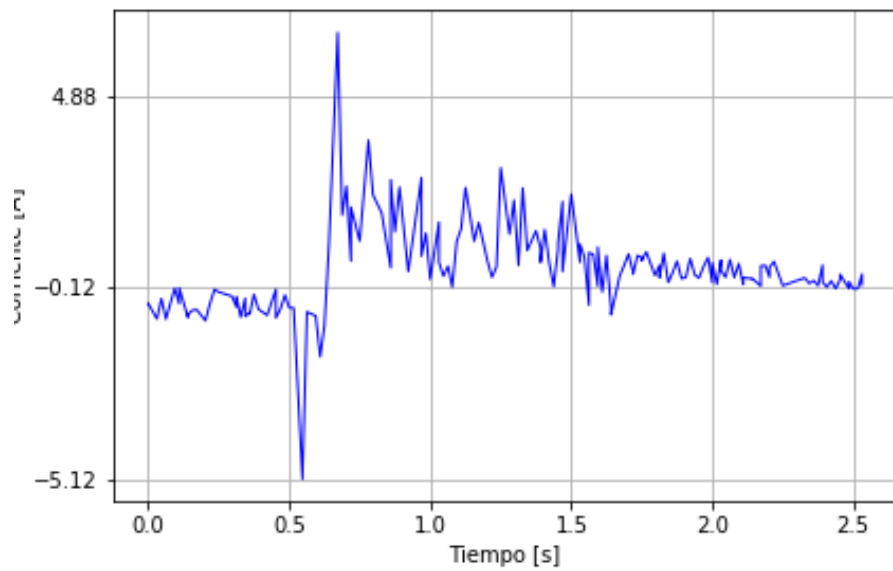


(b) Corriente medida en seguimiento de respuesta sinusoidal con plataforma acoplada.

Figura 5.8: Experimento de seguimiento de referencia sinusoidal con plataforma acoplada.

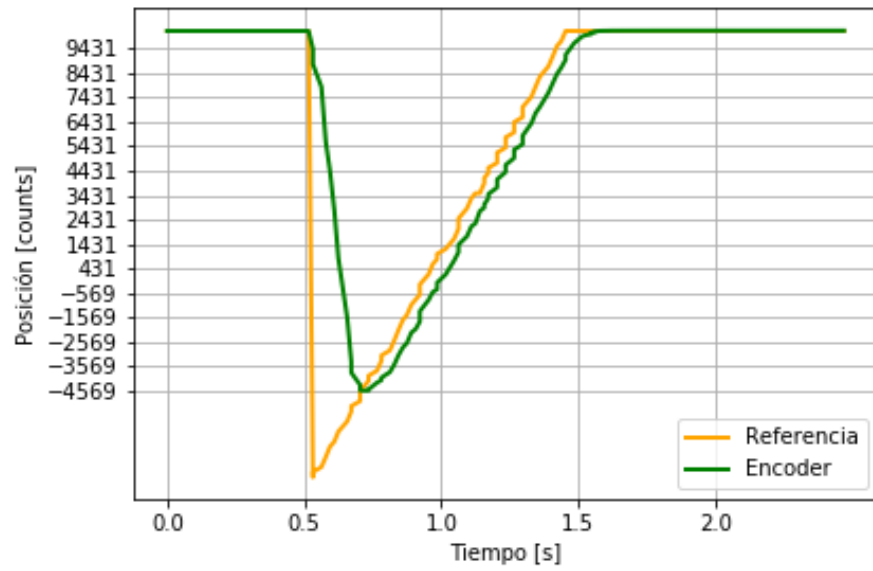


(a) Seguimiento a referencia tipo rampa sin carga.

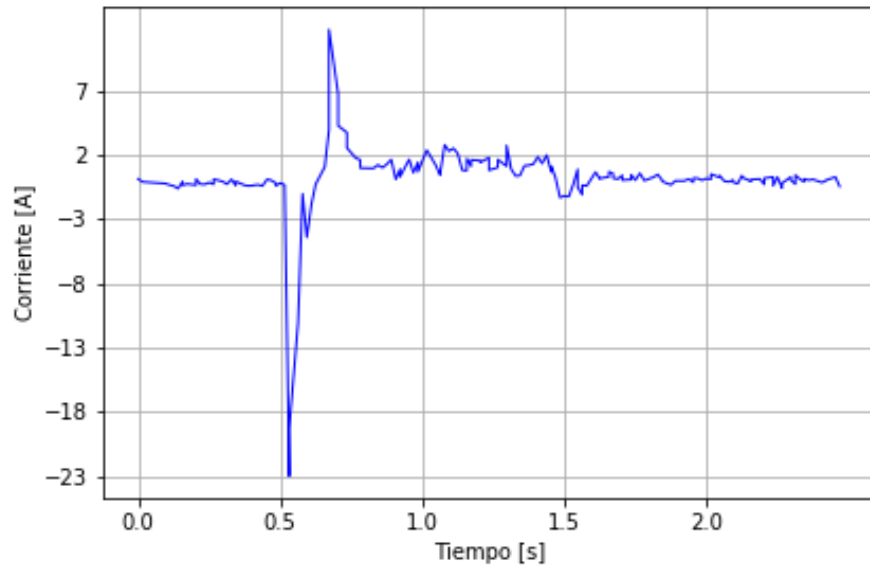


(b) Corriente medida en seguimiento de respuesta tipo rampa sin carga.

Figura 5.9: Experimento de seguimiento de referencia tipo rampa sin carga.

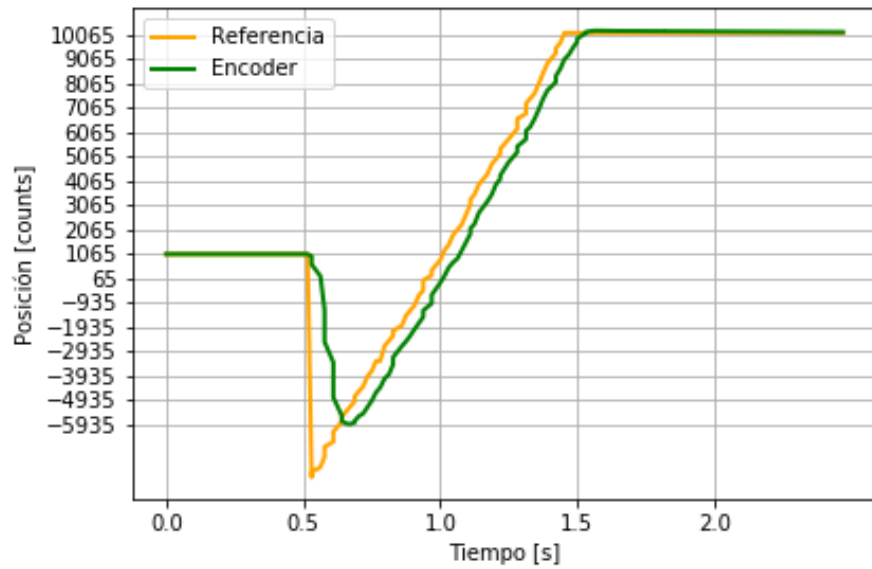


(a) Seguimiento a referencia tipo rampa con 1 kg de carga.

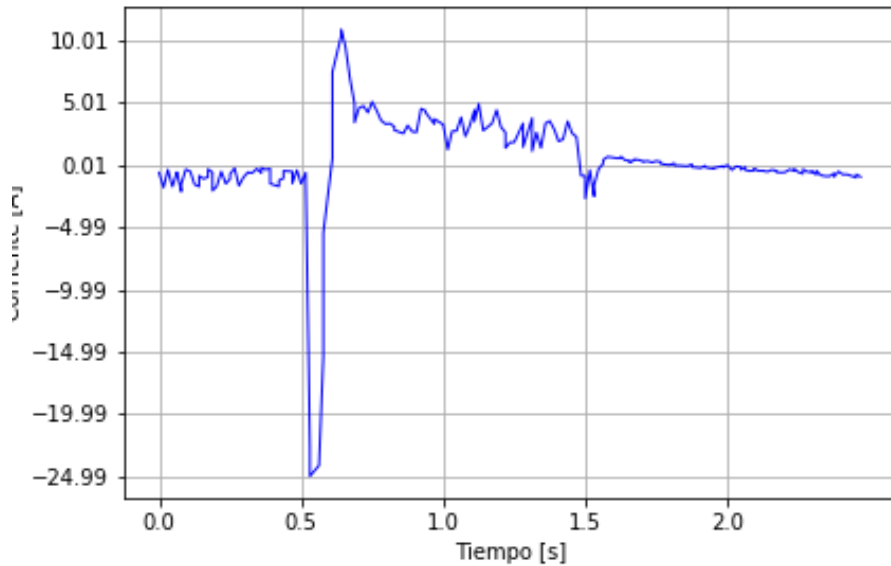


(b) Corriente medida en seguimiento de respuesta tipo rampa con 1 kg de carga.

Figura 5.10: Experimento de seguimiento de referencia tipo rampa con 1 kg de carga.



(a) Seguimiento a referencia tipo rampa con plataforma acoplada.



(b) Corriente medida en seguimiento de respuesta tipo rampa con plataforma acoplada.

Figura 5.11: Experimento de seguimiento de referencia tipo rampa con plataforma acoplada.

5.3. Pérdida de pasos

Uno de los problemas presentados durante la primera fase de desarrollo del proyecto consistió en la pérdida de referencia en la ubicación del arquero, esto debido a la gran fuerza que debe aplicar

el motor y la resistencia que genera la carga que este debe mover produciendo un deslizamiento de la correa sobre la polea dentada, lo que finalmente se traduce en rotación del motor y no en el desplazamiento del arquero. Con la finalidad de probar la nueva correa y pulea utilizadas en el sistema se ejecuta una serie de movimientos graficados en la Figura 5.12.

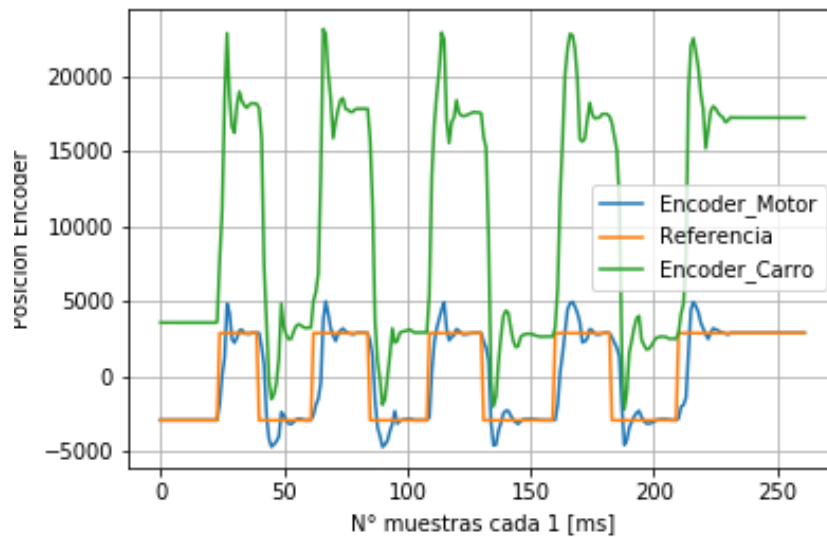


Figura 5.12: Mediciones de encoders en respuesta de motor a tren de escalones.

A primera vista se tiene un comportamiento adecuado en la lectura de los encoders en donde el número de unidades medidas en la posición del encoder al repetir el movimiento se mantiene constante. Analizando en estado estacionario para cada escalón se obtiene la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Resumen de datos obtenidos en prueba de tren de escalones.

Referencia	Encoder Motor	Encoder Carro
2881.5	2890.235	18155.234
2881.5	2887.235	17816.234
2881.5	2887.235	17818.016
2881.5	2887.235	17326.156
2881.5	2887.236	17221.234

De los datos obtenidos se puede apreciar la repetitividad y precisión que se tiene al medir la

rotación del motor con los encoders AMT102. Se observa una tendencia en las mediciones del encoder correspondiente al carro, donde en los últimos 4 datos se puede observar un desfase en la posición del carro respecto al encoder del motor. Nuevamente usando la conversión a distancias se tiene que el error acumulado al final de la prueba es de 1.71 cm siendo una distancia no menor, ya que es muy similar al diámetro de la pelota, esto pudiendo afectar gravemente el rendimiento del proyecto durante un partido. Sin embargo, considerando que la prueba requiere 9 movimientos el error promedio corresponde a 0.19 cm y se tiene que el error entre movimientos de mayor magnitud corresponde a 0.898 cm. De igual forma, se puede observar que el rango de error se redujo considerablemente desde [1, 1.8] cm en la plataforma previa en comparación con [0.0033, 0.898] cm con el nuevo sistema, considerando el mayor rango de error se tiene que el error se reduce un 50,12 %.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

6.1. Discusión sobre resultados obtenidos

En este trabajo de memoria se estudió, diseñó e implementó un prototipo experimental para automatización de un arquero de una mesa de fútbol. La plataforma cumple el propósito de ser el puntapié para actividades docentes y de difusión, además de brindar oportunidades para el desarrollo de temas de investigación aplicada en áreas de automatización, visión por computador, diseño digital y mecánico, entre otros.

A partir de las pruebas desarrolladas es posible determinar en primer lugar que no se logra cumplir los requisitos mínimos, esto debido a que las estimaciones de peso y fuerzas que ejerce la plataforma de pruebas son mayores a las consideradas en los cálculos teóricos, sin embargo, la velocidad potencial que puede adquirir el sistema usando la corriente adecuada no es menor, dejando así abierta la posibilidad de incluso superar los requerimientos planteados, esto si se reduce el peso y se aplica un sistema de control adecuado.

En segundo lugar, se puede concluir que la carga no afecta de mayor manera el tipo de respuesta del motor, es decir, si bien la carga limita aceleración del sistema, es el control de posición el que determina el tiempo necesario para llegar a la referencia entregada por lo que es de suma importancia aplicar un controlador adecuado cuyo enfoque tenga equilibrio entre precisión y velocidad.

En cuanto a la implementación del sistema mecánico y su integración con el sistema de visión, se ve un incremento en la complejidad que este requiere para integrar ambas partes, esto debido a que ambos motores utilizados en una misma línea utilizan bibliotecas en distintos lenguajes de programación, por lo que se pierde la característica de que todo el sistema se implementa en base a un mismo lenguaje. Sin embargo, esto no representa una imposibilidad de integración, se debe generar un medio de comunicación entre procesos u optar por otro de los protocolos de comunicación permitidos por la placa Odrive.

Por otra parte, se tiene que a pesar de aumentar el tamaño y robustez del sistema de transmisión de movimiento aún se puede observar pérdidas de posición, por lo que es de suma importancia aplicar un método de sensado en el carro y así recuperar la referencia de la ubicación del arquero.

Finalmente se puede concluir que el concepto del proyecto es viable, ya que es factible la construcción de una plataforma capaz de reemplazar un jugador de taca-taca con una plataforma de bajo presupuesto, puliendo el diseño y construcción del sistema se podrá obtener aún mejores resultados.

6.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone el análisis y caracterización del sistema de control para así desarrollar un controlador adecuado cuyas características permitan un movimiento suave y ágil sin sacrificar la precisión del sistema.

Diseñar e implementar un sistema mecánico de mayor robustez y rigidez, dado que se trabaja con torques y fuerzas de gran magnitud es crítico para el funcionamiento continuo y a largo plazo del proyecto.

Finalmente se deben realizar las pruebas pertinentes con el máximo de corriente posible para así determinar el real alcance del sistema mecánico, cuyas capacidades no pudieron ser totalmente probadas en este trabajo de memoria.

Bibliografía

- [1] Goodfellow, Ian and Bengio, Yoshua and Courville, Aaron. *Deep learning*. MIT press, 2016.
- [2] Chen, Chi-hau. *Handbook of pattern recognition and computer vision*. World Scientific, 2015.
- [3] Silva, Manuel and Curto, Belen and Moreno, Vidal. *A Robot in the Classroom*. ISEP/IPP - School of Engineering, Polytechnic Institute of Porto and INESC TEC, 2015. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
- [4] Villalonga, Alberto and Beruvides, Gerardo and Castaño, Fernando and Haber Guerra, Rodolfo Elias. *Industrial cyber-physical system for condition-based monitoring in manufacturing processes, in Conference: 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, pp. 637-642, 2018.
- [5] R. Janssen and J. de Best and R. van de Molengraft and M. Steinbuch. “*The design of a semi-automated football table*”, in *2010 IEEE International Conference on Control Applications, Yokohama, Japan, Sep, 2010*, pp. 89-94.
- [6] Gutierrez-Franco, Juan David and Inlow, John and Graham, Jesse and Huang, Larry. *Automated Foosball Table Year 1: Final Project Report*, 2013.[Accedido el 20 de Octubre, 2019]
- [7] Hans Michael Krause. *KI-cker, table soccer robot with artificial intelligence*. InnovationLab at Bosch Rexroth, 2018. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.bosch.com/stories/bend-it-like-bosch/>
- [8] Martinoia, Diego and Calandriello, Daniele and Bonarini, Andrea. “*Physically interactive robogames: Definition and design guidelines*”, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 8, pp. 739-748, 2013.

- [9] Krishnan, Ramu *Electric motor drives: modeling, analysis and control*. Prentice Hall, 2001.
- [10] Zhang, Dapeng and Nebel, Bernhard. “Recording and segmenting table soccer games–initial results”, in *Proceedings of the 1st International Symposium on Skill Science*, pp. 61-67, 2007.
- [11] Rob Janssen and Mark Verrijt and Jeroen de Best and René van de Molengraft. “Ball localization and tracking in a highly dynamic table soccer environment”, *Mechatronics*, vol. 22, no. 4, pp. 503-514, 2012.
- [12] J. Lues, G. S. Gupta, and D. Bailey. “Evaluation of High-Speed Image Processing for Low Latency Control of a Mechatronic System”, *Robot Intelligence Technology and Applications* 5, pp. 565, 2017.
- [13] B. Browning and M. Veloso. “Real-time, adaptive color-based robot vision”, in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3871-3876, 2005.
- [14] T. Weigel, K. Rechert and B. Nebel. “Behavior recognition and opponent modeling for adaptive table soccer playing”, in *Annual Conference on Artificial Intelligence*, pp. 335-350, 2005.
- [15] *Federacion Internacional de Fútbol de Mesa (ITSF)*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.tablesoccer.org/>
- [16] *Federación Española de Fútbol (FEFM)*. *Normativa Oficial Temporada 2017-2018..*
 [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
[https://www.fefm.es/doc/\[17\]NormativaFEFM0.3.pdf](https://www.fefm.es/doc/[17]NormativaFEFM0.3.pdf)
- [17] Games Room Stuff. *Foosball Table Dimensions*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<http://www.gamesroomstuff.com/foosball-table-dimensions/>
- [18] Thilo Weigel. *KiRo - A Table Soccer Robot Ready for the Market*, in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005.
<http://gki.informatik.uni-freiburg.de/papers/weigel-ki2005.pd>

f

- [19] Erik G. Hijkoop. *Designing a foosball table actuator*, Bachelor Final Project at Technical University of Eindhoven, 2007. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/8876.pdf>
- [20] E. Stoltenborg. *Design of an autonomous football table*, at Technische Universiteit Eindhoven, 2008. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/9139.pdf>
- [21] Jim Stefani, Alex Herpy, Brett Jaeger, Kevin Haydon, Derek Hamel. [Accedido el 20 de Octubre, 2019] *Automated Foosball Table Final Report*, at California Polytechnic State University, 2014.
- [22] Richard Atuan. *Automatización de un “Table Football” mediante procesamiento de imágenes y algoritmos Neuro-Difusos*, en Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.
- [23] Nattytec. *Correa dentada GT2 2GT GT3 3GT de sincronización / Timing Belt*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://nattytec.com.mx/CNC/correa-dentada-gt2-2gt-gt3-3gt-de-sincronizacion-timing-belt/>
- [24] Openbuildspartstore. *3GT (GT2-3M) Timing Belt - By the Foot* [Accedido el 23 de Octubre, 2019]
<https://openbuildspartstore.com/3gt-gt2-3m-timing-belt-by-the-foot/>
- [25] ClearPath Teknic. *Servomotor CPM SCSK 2310P ELNA*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.teknic.com/model-info/CPM-SCSK-2310P-ELNA/>

- [26] Motion Control Online. *Types of Electric Motors*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.motioncontrolonline.org/blog-article.cfm/Types-of-Electric-Motors/3>
- [27] Applied-Motion. *Stepper Motor Nema 34*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.applied-motion.com/products/stepper-motors/ht34-486>
- [28] Applied-Motion. *NEMA 34 High Torque Step Motor DataSheet*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
https://www.applied-motion.com/sites/default/files/ST_speed-torque.pdf
- [29] Applied-Motion. *Driver St10*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.applied-motion.com/products/stepper-drives/st10-c-ce>
- [30] Oriental Motor. *Stepper Motor Overview*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-overview.html>
- [31] Reston Condit, Microchip Technology Inc. *Brushed DC Motor Fundamentals*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00905b.pdf>
- [32] Crouzet. *DCmind Brushless Motors*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://docs-apac.rs-online.com/webdocs/16b9/0900766b816b96b4.pdf>
- [33] RS Components Ltd. *Motor de dc Crouzet 80350001*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://es.rs-online.com/web/p/motores-dc/1830056/>
- [34] Mouser. *Don't Ignore the Humble Brushed DC Motor*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.mouser.cl/applications/dont-ignore-the-brushed-dc-motor/>

- [35] Physical Structure & Configuration of DC Machines. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://electrical-engineering-portal.com/physical-structure-configuration-of-dc-machines>
- [36] RobotPlatform. *How does a servo motor work?*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
http://www.robotplatform.com/knowledge/servo/what_makes_a_servo.html
- [37] Wikipedia. *Servomotor de modelismo*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
https://es.wikipedia.org/wiki/Servomotor_de_modelismo
- [38] Schneider Electric. *Servomotor BCH2LF0733CA5C*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
[https://www.se.com/es/es/product/BCH2LF0733CA5C/servo-motor-bch---80mm---750w---w-oil-seal---w-key---leads-con-\(\(*\)\)](https://www.se.com/es/es/product/BCH2LF0733CA5C/servo-motor-bch---80mm---750w---w-oil-seal---w-key---leads-con-((*)))
- [39] Electrocraft. *Servomotor TPP23*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.electrocraft.com/products/stepper/TPP23/>
- [40] Things in Motion. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://things-in-motion.blogspot.com/>
- [41] Odrive Robotics. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://odriverobotics.com/>
- [42] CUI Inc. *AMT10 Series*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.cui.com/product/motion/rotary-encoders/incremental/modular/amt10-series>
- [43] CNC Kitchen. *INFILL pattern and SHELLS - How to get the maximum STRENGTH out of your 3D prints?*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.youtube.com/watch?v=AmEaNAwFSfI>
- [44] Tecnología de los plásticos. *Poliácido láctico (PLA)*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html>

- [45] Hitachi Hightech. *Thermal analysis of polylactic acid*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
https://www.hitachi-hightech.com/file/global/pdf/products/science/appli/ana/thermal/application_TA_081e.pdf
- [46] Odrive Robotics. *Odrive Documentation*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://docs.odriverobotics.com/>
- [47] Anaconda. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.anaconda.com/distribution/>
- [48] Zadig. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://zadig.akeo.ie/>
- [49] Matthew Piccoli and Mark Yim. *Anticogging: Torque Ripple Suppression, Modeling, and Parameter Selection*, in *The International Journal of Robotics Research*, vol. 35, pp. 148-160, 2016.
https://www.modlabupenn.org/wp-content/uploads/piccoli_matthew_anticogging_torque_ripple_suppression_modeling_and_parameter_selection.pdf
- [50] ATO. *Nema 34 Stepper Motor, 3.3A, 1.2 degree, 3 phase 6 wires*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://www.ato.com/nema-34-stepper-motor-3-3a-1-2-degree-3-phase-6-wires>
- [51] *Documentación y respaldo de proyecto de tesis*. [Accedido el 20 de Octubre, 2019]
<https://github.com/klone52/TacaTaca>