



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN

INFORME DE TRABAJO MONOGRÁFICO

**PROTOTIPO DE SISTEMA, CON CONTROL REMOTO E
INALÁMBRICO, DE UN BLANCO EN MOVIMIENTO PARA
ENTRENAMIENTO EN TIRO, CON CAPACIDAD DE
LOCALIZACIÓN Y REGISTRO DE IMPACTOS EN TIEMPO
REAL**

Presentado por: Br. Luis Carlos Guevara Cerda

Br. Yader Daniel Ortiz Cerda

Tutor: MSc. Alejandro Alberto Méndez Talavera

Septiembre 13, 2019

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo monográfico en primer lugar a **Dios**, por permitirnos culminar una etapa importante de nuestras vidas.

A nuestros **Padres**, quienes siempre nos han apoyado incondicionalmente y nos brindaron la oportunidad de ser profesionales.

A nuestro **Tutor, MSc. Alejandro Méndez**, quien al compartirnos conocimientos, consejos y experiencias nos ha transmitido pasión por la electrónica y por ser profesionales de éxito.

A nuestros **Amigos**, con quienes hemos vivido diferentes experiencias, nos han apoyado, y son parte fundamental de la motivación que nos permitió llegar hasta el final.

Luis Carlos Guevara Cerda

Yader Daniel Ortiz Cerda

RESUMEN

Resultado de visitas a las instalaciones de algunos polígonos nacionales y la Federación Nacional de Tiro(FENATIRO) se identificó que en estas se presentan situaciones que generan inconvenientes para los usuarios y los propietarios. Las instalaciones cuentan con blancos fijos que al usarlos en las prácticas de disparo ocasionan que las habilidades que adquieren los tiradores sean reducidas y de efectividad engañosa al ponerlas a prueba en la realidad. El registro de los impactos se realiza de forma manual lo que ponen riesgo la vida humana al usar armas de fuego, ocasiona pérdidas de tiempo que reducen el número de rondas de disparo en una práctica y complica el proceso de llevar un historial de puntajes obtenidos por cada tirador.

En el mercado internacional existen equipos que dan solución a los inconvenientes identificados, pero existe una barrera para adquirirlos por sus elevados precios sumado a otras situaciones no deseadas por el hecho de ser de empresas extranjeras. Como una propuesta de solución se decidió desarrollar un prototipo de sistema para entrenamiento en tiro que para mayor desarrollo de las habilidades de los tiradores cuenta con un blanco que se mueve sobre una pista variando la velocidad y dirección de desplazamiento. El prototipo garantiza la seguridad de las personas y elimina las pérdidas de tiempo mediante el control remoto del blanco y la posibilidad de determinar los puntos de impacto, asignar un puntaje y mostrar la información obtenida en una interfaz cercana al tirador. Además, facilita el manejo de los resultados de los tiradores mediante su registro en una base de datos.

En este informe se presentan los detalles más relevantes del desarrollo de este trabajo monográfico, así como también los resultados obtenidos. Toda la información queda a disposición de la comunidad universitaria de la UNI para que pueda ser usada en proyectos futuros dirigidos a ofrecer mejores condiciones para el entrenamiento en tiro.

ABSTRACT

As a result of visits to some national shooting range facilities and the National Shooting Federation (FENATIRO, by its acronym in Spanish), it was identified that there are situations that create inconvenience for the shooting range users and owners. The facilities have fixed targets that, when they are used in shooting practices, it causes the skills acquired by shooters to be reduced and deceptively effective once tested in real life. The impacts recording is carried out manually, which makes people risk their life when using firearms; it causes wasted time that reduces the number of firing rounds in a practice and it makes hard the tracking of each shooter scores.

There are equipment in the international market to solve the identified problems but there is a barrier to acquire them like their high prices, besides other situations not desired because of being from foreign companies. As a solution proposal, it was decided to develop a prototype system for shooting training who has a target, which moves on a track varying the speed and travel direction for a better shooters skills development. The prototype guarantees people safety and eliminates lost time through the remote control of the target and the possibility of determining the impact points, giving a score and displaying the obtained information in an interface close to the shooter. In addition, it makes easier the shooters results managing due to their registers in a database.

This report presents the most relevant details of the development of this monographic work, as well as the obtained results. All the information regarding this project is available to the UNI university students in order to be used in future projects aimed offering better conditions for shooting training.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	4
JUSTIFICACIÓN	5
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	8
1 PROTOTIPO DE SISTEMA PARA ENTRENAMIENTO EN TIRO.....	8
1.1 Sistemas de puntuación automática para blancos.....	9
1.1.1 Segmentación y detección por área	9
1.1.2 Usando láseres y fotodiodos	10
1.1.3 Visión artificial	11
1.1.4 Ondas acústicas.....	12
1.2 Sistema Hard Target.....	14
1.2.1 Sensores piezoeléctricos	15
1.2.2 Acondicionamiento	15
1.2.3 Medición de las TDAs	16
1.2.4 Procesamiento	19
1.3 Sistema de control de movimiento	19
1.3.1 Estructura mecánica.....	20
1.3.2 Motor	21
1.3.3 Motores paso a paso.....	22
1.3.4 Driver.....	24
1.3.5 Controlador	26
1.3.6 Sensores de posición	26
1.4 Interfaz local	27
1.5 Comunicación inalámbrica.....	27
1.6 Interfaz remota.....	32
1.6.1 Visual Studio Community	33
1.7 Base de datos.....	33
1.7.1 MySQL Community	34

CAPÍTULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE SISTEMA PARA ENTRENAMIENTO EN TIRO	35
2 MODELO DEL PROTOTIPO DE SISTEMA PARA ENTRENAMIENTO EN TIRO 35	
2.1 Sistema de puntuación automática	36
2.1.1 Determinación de los sensores piezoeléctricos	36
2.1.2 Acondicionamiento	37
2.1.3 Diseño del blanco	41
2.1.4 Determinación del microcontrolador para la medición de las TDAs ...	44
2.1.5 Diagrama esquemático del circuito para medición de las TDAs	45
2.1.6 Fuente de alimentación para el circuito de medición de las TDAS	46
2.1.7 Algoritmo para le medición de las TDAs	48
2.1.8 Algoritmo para la determinación de los puntos de impacto	51
2.1.9 Implementación del circuito impreso para la medición de las TDAs ..	52
2.2 Sistema de control de movimiento	53
2.2.1 Estructura mecánica.....	53
2.2.2 Selección del motor PaP	53
2.2.3 Driver.....	55
2.2.4 Determinación del microcontrolador para el control de movimiento ...	57
2.2.5 Finales de carrera	58
2.2.6 Diagrama esquemático del circuito de control de movimiento	60
2.2.7 Fuente de alimentación para el sistema de control de movimiento....	61
2.2.8 Algoritmo de control de movimiento	63
2.2.9 Implementación del circuito impreso para el control de movimiento ..	65
2.3 Interfaz Local	66
2.3.1 LCD	66
2.3.2 Botones	68
2.3.3 Implementacion del circuito impreso de la interfaz local	69
2.4 Comunicación Inalambrica.....	70
2.4.1 Módulos XBee	70

2.4.2	Elementos de la Red	72
2.4.3	Parametros de configuración	73
2.5	Interfaz Remota y Base de Datos	76
CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....		82
3	PRUEBAS PARA LA VERIFICACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA.....	82
3.1	Determinación de los puntos de impacto y asignación automática de puntajes	82
3.2	Control local.....	85
3.3	Control remoto	86
3.4	Almacenamiento de resultados en la base de datos	86
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		89
BIBLIOGRAFÍA.....		91
ANEXOS.....		95
A-Ecuaciones para la determinación de impactos y asignación automática de puntaje.....		96
B-Cálculo del torque requerido para la selección del motor.		98

Lista de Figuras

Figura 1.1: Diagrama de bloques del sistema para entrenamiento en tiro	8
Figura 1.2: Blanco de tiro dividido en tres zonas de puntaje(Rojas y blanca).Tomado de Saona(2014)	9
Figura 1.3: Arreglo de láseres y fotodiodos. Tomado de Daware et al(2017).....	10
Figura 1.4: Determinación de los puntos de impacto en un blanco usando visión artificial.Tomado de Enríquez & Ortega(2015)	11
Figura 1.5: Onda de choque supersónica.Tomado de US nº 4349729(1982)	12
Figura 1.6: Onda de choque de impacto.Tomado de US nº 20090102129A1(2009).....	13
Figura 1. 7: Diagrama de bloques de un sistema Hard Target	15
Figura 1. 9: Diagrama de bloques del sistema de control de movimiento	19
Figura 1. 10: Sistema de transmisión Banda-Polea. Tomado de Gutierrez(s.f.)	21
Figura 1. 11: Estructura de los motores paso a paso unipolares y bipolares. Tomado de IEEEGlobalSpec(s.f).....	25
Figura 2.1: Prototipo de sistema para entrenamiento en tiro implementado.....	35
Figura 2. 2: Dispoaitivo SEN-10293. Tomado de Sparkfun(s.f)	37
Figura 2. 3: Estructura del sensor piezoeléctrico. (Captura de Pantalla).....	38
Figura 2. 4: Modelo de entrada analógico para el comparador de un microcontrolador. Tomado de la hoja de datos PIC16F1786(s.f)	38
Figura 2. 5: Amplificador no inversor.(Captura de Pantalla)	39
Figura 2. 6:Circuito de acondicionamiento.(Captura de Pantalla).....	40
Figura 2. 7: Lámina de Acrílico. Tomado de Trademe(s.f).....	41
Figura 2. 8: Blanco para entrenamiento en tiro seleccionado.....	42
Figura 2. 9: Posición de los sensores piesoeléctricos	43
Figura 2. 10: Esquemático del circuito para medición de las TDAs.(Captura de Pantalla)	46
Figura 2. 11: Circuito regulador de voltaje DC-3.6V.(Captura de Pantalla)	47
Figura 2. 12: Ejemplo de impacto de un proyectil en el blanco.....	48
Figura 2. 13: Zonas de impacto en el blanco.....	49
Figura 2. 14: Flujograma del programa encargado de la medición de las TDAs	50

Figura 2 15: Flujograma del programa encargado de la determinación de los puntos de impacto y asignación de puntaje.....	51
Figura 2. 16: Vista del plano inferior y superior del PCB para la medición de las TDAs.(Captura de Pantalla).....	52
Figura 2. 17: Estructura mecánica.....	53
Figura 2. 18: Fuerzas que interactúan en el movimiento del blanco.(Captura de Pantalla)	54
Figura 2. 19: Motor paso a paso 34HS31-5504S. Tomado de STEPPERONLINE(s.f.)	55
Figura 2. 20: Dispositivos ST-M5045. Tomado de AliExpress(s.f.).....	56
Figura 2. 21: Conexión de un microcontrolador con el ST-M5045.....	57
Figura 2. 22: Final de carrera electromecánico	59
Figura 2. 23: Diagrama esquemático para la conexión de los finales de carrera.(Captura de Pantalla)	59
Figura 2. 24: Esquemático del circuito para el control de movimiento.(Captura de Pantalla)	61
Figura 2. 25: Fuente DC de 24V.....	62
Figura 2. 26: Circuito regulador de voltaje DC-5V.(Captura de Pantalla)	63
Figura 2. 27: Diagrama del programa para el control de movimiento	64
Figura 2. 28: Vista del plano inferior y superior del PCB para el control de movimiento.(Captura de Pantalla)	65
Figura 2. 29: LCD	66
Figura 2. 30: Asignación de pines de la LCD.....	67
Figura 2. 31: Parámetros eléctricos de la LCD	67
Figura 2. 32: Esquemático de conexión de la LCD con el controlador.(Captura de Pantalla)	67
Figura 2. 33: Esquemático de conexiones de los pulsadores.(Captura de Pantalla)	68
Figura 2. 34: Vista del plano superior e inferior de la PCB de la interfaz local.(Captura de Pantalla)	69
Figura 2. 35: Módulo XBee ZB	70

Figura 2. 36: XBee Explorer Regulated. Obtenido de SparkFun Electronics.....	71
Figura 2. 37: XBee Explorer Dongle. Obtenido de SparkFun Electronics.....	72
Figura 2. 38: Red inalámbrica del prototipo	73
Figura 2. 39: Topología de la red inalámbrica	74
Figura 2. 40: Creación de la red mediante el módulo coordinador(Captura de pantalla).....	75
Figura 2. 41: Direccionamiento de la red en el modulo coordinador(Captura de pantalla).....	75
Figura 2. 42: Direccionamiento de la red en el módulo end device del sistema de medición de las TDAs(Captura de Pantalla).....	76
Figura 2. 43: Ventana de inicio de sesión. (Captura de pantalla)	77
Figura 2. 44: Ventana para crear cuenta de usuario.(Captura de pantalla)	77
Figura 2. 45: Tabla de usuarios registrados en la base de datos.(Captura de Pantalla)	78
Figura 2. 46: Menú principal.(Captura de Pantalla)	78
Figura 2. 47: Ventana para configurar el entrenamiento. (Captura de Pantalla). 79	
Figura 2. 48: Ventana de administración de usuarios.(Capturas de Pantalla)....	80
Figura 2. 49: Ventana del historial.(Captura de Pantalla)	80
Figura 2. 50: Esquema historial de la base de datos.(Captura de Pantalla)	81
Figura 2. 51: Ventana para visualizar el puntaje promedio por cada práctica.(Captura de Pantalla).....	81
Figura 3. 1:Zonas de impacto y coordenadas X,Y.(Captura de Pantalla).....	83
Figura 3. 2: Blanco del sistema.	84
Figura 3. 3: Resultado de la determinación de los puntos de impacto.(Captura de Pantalla)	84
Figura 3. 4: Instalación de sistemas para el control local	85
Figura 3. 5: Segmento de la interfaz para el control remoto.(Captura de Pantalla)	86
Figura 3. 6: Registro de usuario.(Captura de Pantalla)	87
Figura 3. 7: Viasualización de los impactos sobre el blanco de la interfaz.(Captura de pantalla)	87

Figura 3. 8: Almacenamiento de resultados por cada impacto	88
Figura 3. 9: Resultados de la práctica	88

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Tecnologías de comunicación inalámbrica	31
Tabla 2. 1: Características técnicas del sensor pieoeléctrico seleccionado.....	37
Tabla 2.2: Diamétros de las zonas de puntuación del blanco.....	42
Tabla 2. 3: Voltaje de operación de componentes del circuito de medición de TDAs.....	47
Tabla 2. 4: Combinaciones en la activación de los sensores para cada zona....	49
Tabla 2. 5:Caraterísticas técnicas del motor PaP.....	55
Tabla 2. 6: Características de la fuente seleccionada	62

INTRODUCCIÓN

Los polígonos de tiro son instalaciones especialmente diseñadas para entrenamientos en los que se busca mejorar la exactitud y precisión al momento de realizar disparos con un arma; por tanto, deben contar con una variedad de equipos que permita a los usuarios efectuar prácticas, desde niveles básicos hasta profesionales, acorde a las habilidades que posean o deseen desarrollar.

Resultado de diversas visitas realizadas a las instalaciones de los polígonos de tiro Magnum y el Especialista se observó que estos poseen sistemas de entrenamiento con dos tipos de blancos: los que están diseñados para permanecer en una posición fija y los que tienen la capacidad de moverse por cierto tiempo en respuesta al impacto de una bala en un área específica. Sin embargo, las habilidades que logran adquirir los tiradores al realizar prácticas en estas instalaciones resultan reducidas y de efectividad engañosa al ponerlas a prueba en entornos reales, donde el blanco puede estar en movimiento y cambiando de dirección y velocidad de desplazamiento de forma inesperada. Por otro lado, para llevar el registro de los impactos acertados es necesario que el tirador, o algún asistente, se acerque hasta el blanco y realice la tarea de forma manual, con ayuda de la observación, ocasionando que se ponga en riesgo la vida humana por la posibilidad de presentarse algún disparo accidental. En este caso, el registro de los resultados tiene un nivel de complejidad directamente proporcional con la distancia a la que se encuentre el blanco con respecto al punto de disparo, ya que, a mayor distancia es necesario caminar más o utilizar un medio de transporte auxiliar.

La Federación Nacional de Tiro (FENATIRO), por su parte, ofrece una variedad de disciplinas de tiro deportivo en las que el principal elemento que se evalúa es la realización de disparos que impacten en un punto específico del blanco con gran precisión y exactitud. En esta organización el registro, control y evaluación de los resultados que se obtienen en una jornada de práctica es realizado por los tiradores; utilizan para ello un tipo de blanco descartable de papel que luego de usarse en una ronda de disparos es llevado hacia ellos con la ayuda de un sencillo

sistema electromecánico; seguidamente, de forma manual asignan un puntaje de acuerdo con las posiciones de los agujeros que resultan en el blanco debido al impacto de las balas. El proceso completo incluye llevar un registro de los resultados para analizar cómo han evolucionado los tiradores en las diferentes sesiones de entrenamiento y en función de eso el instructor puede asesorarlos correctamente. El método de registro, control y evaluación de los resultados descrito que utiliza la FENATIRO posee limitantes: ocasiona pérdidas de tiempo que limitan el número de rondas que se pueden alcanzar en una jornada de prácticas y crea interferencias en la concentración de los tiradores la cual es fundamental cuando se quieren hacer disparos con gran precisión y exactitud.

Las situaciones indeseadas que se presentan en los polígonos de tiro mencionados y la FENATIRO son resultado de la falta de equipos modernos de entrenamiento. En la revisión de literatura se encontró que en el mercado internacional existen una gran variedad de empresas que ofrecen blancos de tiro con sistemas electrónicos de puntuación automática que permitirían solucionar los inconvenientes que se presentan, las más prestigiosas y pioneras son SIUS y MEGAlink. La primera es de origen suizo fundada en 1949 y la segunda de Noruega fundada en 1991. Aunque son sistemas altamente confiables y eficientes los costos de inversión que requieren son muy altos, a lo que también se deben sumar gestiones en aduana. Otro punto en contra es que, si se adquiere este tipo de equipos manufacturados fuera del país, debe venir personal del extranjero perteneciente a la empresa a la cual se le realizó la compra para darles un mantenimiento preventivo y correctivo adecuado.

En este trabajo monográfico se desarrolló un prototipo de sistema para prácticas de tiro que da respuesta a las situaciones indeseadas que se mencionaron. El sistema cumple con los siguientes requerimientos establecidos de acuerdo a la revisión de literatura y conversaciones sostenidas con algunos propietarios de los polígonos, el presidente de la FENATIRO y nuestro tutor MSc. Alejandro Méndez: el blanco de tiro debe moverse sobre una pista, se debe controlar los movimientos del blanco de forma local y remota inalámbrica, el sistema debe tener la capacidad

de localizar los impactos en el blanco y mostrar esa información en una interfaz en la que pueda ser visualizada por el tirador, finalmente, el sistema debe contar con una base de datos para almacenar la información relacionada al desempeño de los tiradores en las prácticas.

El prototipo de sistema para entrenamiento en tiro tiene un blanco electrónico que permite que el tirador pueda observar en tiempo real, en una PC ubicada cerca de él, la posición de impacto del proyectil. El blanco también posee la capacidad de desplazarse sobre una pista pudiendo variar la dirección y velocidad de desplazamiento, desde el control local o remoto e inalámbrico, ofreciendo de este modo condiciones de entrenamiento más cercanas a la realidad. Por otro lado, la interfaz gráfica y la base de datos se complementan para que el sistema pueda ser operado solo por usuarios autorizados y debidamente registrados; además, se almacenan los resultados que estos obtienen en las prácticas e información personal que pueda ser útil al momento que el instructor desee clasificar, analizar y evaluar los datos para una adecuada asesoría. Para alcanzar el objetivo se hizo uso de alternativas de software libre en la implementación de la interfaz gráfica y la base de datos; en el caso de los circuitos de medición y control se usó microcontroladores por ser una tecnología de bajo precio que reducirá los costos de desarrollo.

El presente trabajo monográfico incluye: los antecedentes encontrados en la revisión de literatura relacionados al contexto del problema; la justificación que respalda la ejecución del proyecto; los objetivos que determinan el punto a partir del cual se miden los resultados; el marco teórico que presenta los conocimientos y aspectos tecnológicos en los que se basa la solución; el diseño e implementación que muestra en detalle el sistema desarrollado; el análisis y presentación de los resultados que se obtuvieron al realizar los experimentos para comprobar el cumplimiento de los requerimientos establecidos; y por último, las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó luego del análisis.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar un prototipo de sistema, con control remoto e inalámbrico de un blanco en movimiento para entrenamiento en tiro, con capacidad de localización y registro de impactos en tiempo real.

Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos del sistema para delimitar el alcance de este.
- Diseñar el sistema de localización de impactos en el blanco con asignación automática de puntajes para garantizar la efectividad y eficiencia del mismo.
- Diseñar el sistema local, y remoto inalámbrico, para el efectivo control de la dirección y velocidad de desplazamiento del blanco de tiro.
- Diseñar una base de datos, con su debida interfaz gráfica, usando software libre, para el registro de información y resultados de los tiradores.
- Realizar experimentos con cada uno de los subsistemas para comprobar el funcionamiento apropiado de los mismos.
- Comprobar que el sistema total cumpla con los requerimientos establecidos.

JUSTIFICACIÓN

Los polígonos de tiro son instalaciones diseñadas para la realización de entrenamientos de disparo. Resultan de mucha importancia para todas las personas que tienen armas y desean adquirir o renovar un permiso de portación, trabajadores de seguridad, practicantes de tiro aficionado, deportistas de tiro profesional, policías y militares. La esencia principal de un polígono de tiro radica en los equipos de entrenamiento que posee debido a que estos determinan los niveles de destreza que desarrollarán los tiradores.

En Nicaragua, los polígonos abiertos a la población civil y la FENATIRO poseen limitantes en los equipos de entrenamiento, usan mayoritariamente blancos que no ofrecen condiciones cambiantes y el registro, evaluación y control de los impactos se efectúa de forma manual, lo que conlleva a que se presenten muchas situaciones indeseadas, por ejemplo: las habilidades que logran adquirir los tiradores al realizar prácticas en estas instalaciones resultan reducidas y de efectividad engañosa al ponerlas a prueba en entornos reales; en algunos casos para llevar el registro de los impactos es necesario acercarse hasta el blanco ocasionando que se ponga en riesgo la vida humana por la posibilidad de presentarse un disparo accidental; si la distancia entre el blanco y el punto de disparo es considerablemente larga se debe utilizar un medio de transporte auxiliar para completar el proceso de registro de los resultados; hay pérdidas de tiempo que limitan el número de rondas que se pueden alcanzar en una jornada de prácticas y a su vez crean interferencia en la concentración de los tiradores.

Se quiere adquirir nuevos sistemas de entrenamiento como los que ofrecen las siguientes empresas internacionales: SIUS, MEGALIK, Oakwood Control, Polytronic Internacional, entre otras. Existen ciertas barreras que impiden lo anterior, entre ellas se pueden mencionar las siguientes: la inversión requerida es muy alta, las empresas que lo fabrican se encuentran en el extranjero, no se podría realizar un adecuado mantenimiento y reparación con personal nacional.

El desarrollo del prototipo busca incentivar a los polígonos abiertos a la población civil y la FENATIRO a invertir en proyectos locales como este que en futuras fases podrían garantizar mejoras en las condiciones para la realización de entrenamientos de disparo. Al contar con un blanco que se mueve sobre una pista variando su dirección y velocidad de desplazamiento permite a los usuarios, que buscan efectuar prácticas con altos niveles de exigencia, alcanzar una destreza en el tiro que los llenará de mayor satisfacción y que resultará más eficiente al ponerla a prueba en la realidad. El control, local o remoto inalámbrico, ofrece la posibilidad de que el instructor pueda manipular el movimiento del blanco de tiro de manera segura y a como mejor considere, manual o con rutinas automáticas, en base a como ha sido la evolución de cada usuario en las prácticas. La localización de los impactos y la capacidad de que el tirador pueda ver en tiempo real sus resultados reducen: la probabilidad de que se presente un accidente, las pérdidas de tiempo y la interferencia en la concentración de los tiradores. Finalmente, la base de datos que almacena la información relacionada al desempeño de los usuarios, complementada con una interfaz que muestra gráficos de las curvas de aprendizaje facilita la tarea del análisis y evaluación de los resultados.

Este tipo proyecto con el trabajo y seguimiento adecuado al llevarse a una etapa de implementación en entornos de entrenamiento reales contribuirá indirectamente a que en el país crezca la práctica de tiro, a niveles aficionados y profesionales, debido a que los polígonos abiertos a la población civil podrán contar con prácticas más atractivas para sus clientes; la FENATIRO, por su parte, podrá preparar en un mejor entorno a sus deportistas para su participación en eventos nacionales e internacionales. Con los ajustes necesarios el prototipo de sistema de entrenamiento en tiro a desarrollar podría ser también utilizado por instituciones nacionales como la policía y el ejército; para los miembros de estas entidades es clave contar con excelentes habilidades en tiro y dominar el uso de una gran variedad de armas; las exigencias requeridas se deben a que en la mayoría de los casos su labor está vinculada con la sociedad y un error puede resultar en algo grave y fatal.

Al haber desarrollado e implementado un prototipo de sistema para entrenamiento en tiro que cumple con los requerimientos establecidos llena de satisfacción a los autores dado que le permite plantear una posible solución a un problema que afecta a un sector de la población nacional, así como culminar los estudios y obtener el título de ingeniero electrónico. Se debe destacar que con la realización de este trabajo monográfico fueron afianzados muchos de los conocimientos obtenidos durante el transcurso de la carrera de ingeniería electrónica, y se adquirieron nuevos conocimientos y desarrollaron nuevas habilidades técnicas, en las áreas de: metodología de la investigación, electrónica analógica y digital, programación, microcontroladores, sistemas de comunicación, sistemas de medición, sistemas de control, y electrónica de potencia.

Los resultados del trabajo monográfico son muy importantes y serán de mucho beneficio para otros proyectistas o monografiantes. Toda la información recopilada y generada, durante el desarrollo del trabajo, estará a disposición de la comunidad universitaria de la UNI. Al no haber en el país antecedentes relacionados con el propósito del presente trabajo, los resultados obtenidos sientan las bases para futuros proyectos e investigaciones dirigidos a la construcción y estudio de sistemas que permitan ofrecer mejores condiciones para el entrenamiento en tiro, ya sea, insertando mejoras a este o expandiéndose a otras áreas que tengan vinculación con los conocimientos acá expuestos.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1 Prototipo de sistema para entrenamiento en tiro

El prototipo de sistema para entrenamiento en tiro desarrollado, para que cumpla con los requerimientos establecidos, está compuesto por los siguientes subsistemas: el sistema de puntuación automática para el blanco; el sistema de control movimiento; la interfaz local; la comunicación inalámbrica, la interfaz remota; y la base de datos. En la Figura 1.1 se muestra un diagrama de bloques que representa de forma general como interactuarán los subsistemas entre sí.

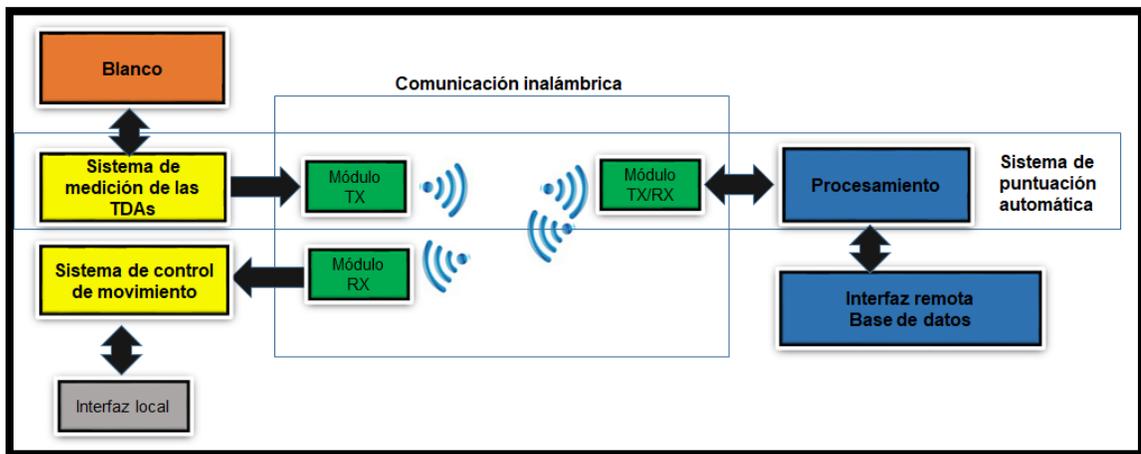


Figura 1.1: Diagrama de bloques del sistema para entrenamiento en tiro

El sistema de puntuación automática para el blanco se divide en dos bloques, unidos por la comunicación inalámbrica, el primero es un subsistema que se encarga de medir las diferencias de tiempo en el arribo (TDAs, por sus siglas en inglés) de la onda de choque de impacto a un arreglo de sensores piezoeléctricos, el segundo es una unidad de procesamiento que recibe las TDAs y determina la ubicación y puntaje correspondiente del punto de impacto en el blanco. En los siguientes apartados se describen de forma general cada una de las alternativas consideradas para la ubicación y puntuación de los impactos en el blanco, el porqué de la seleccionada, junto con aspectos de los otros subsistemas.

1.1 Sistemas de puntuación automática para blancos

Los sistemas de puntuación automática para blancos, tal como fue mencionado, trabajan en establecer de forma automática los puntos en que los proyectiles impactan en el blanco y en base a los resultados obtenidos asignan un puntaje. Los más comunes encontrados en la revisión de literatura fueron los siguientes:

1.1.1 Segmentación y detección por área

Este sistema se basa en dividir el blanco de tiro en zonas o áreas a las que se le asigna un puntaje, cuando un proyectil impacta en una de ellas el tirador obtiene el puntaje que le corresponde a dicha zona. En la Figura 1.2 se muestra un blanco de ejemplo que fue desarrollado como proyecto previo a la obtención del título de ingeniero en mecatrónica (Saona, 2014). Para monitorear cada zona y poder reportar de forma automática el puntaje obtenido al presentarse un impacto se requiere de un arreglo de sensores montados sobre el blanco con la circuitería electrónica correspondiente. Estos sensores pueden ser sensores de fuerza resistivos (FSR), sensores de malla metálica, galgas extensiométricas e inclusive sensores de impacto/vibración.

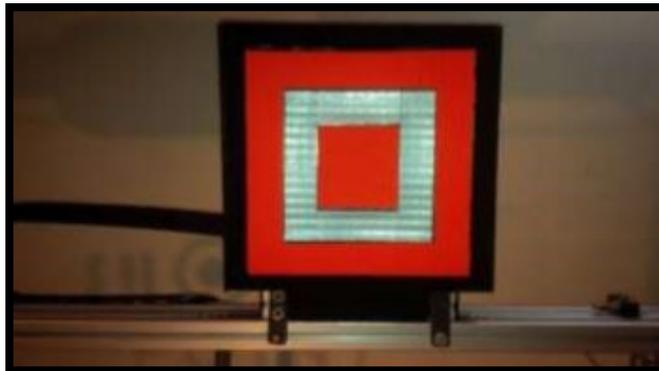


Figura 1.2: Blanco de tiro dividido en tres zonas de puntaje(Rojas y blanca). Tomado de Saona(2014)

La desventaja de este sistema de detección es que determina la zona de impacto, pero no puede determinar el punto. Se conoce el área en que se dan los impactos, pero no puntos específicos como tal, lo que repercute de manera negativa en el proceso de análisis de los resultados obtenidos en los entrenamientos de disparo.

Es un sistema útil para situaciones en las que localizar el punto de impacto no tiene gran relevancia e importa más conocer un área; por ejemplo, en los blancos con formas de silueta humana interesa saber si el disparo impactó en la cabeza, pecho, brazos, etc., no en un punto específico como tal.

1.1.2 Usando láseres y fotodiodos

Este sistema determina la ubicación de impacto y puntaje correspondiente utilizando láseres y fotodiodos que se colocan en los bordes del blanco. Los láseres se colocan en dos lados perpendiculares y los fotodiodos en los lados opuestos a los láseres. Los láseres emiten una señal a los fotodiodos con el objetivo de realizar un monitoreo constante. Cuando el proyectil impacta en el blanco se interrumpe el haz luminoso que deben recibir el par de fotodiodos. La interrupción generada, con la electrónica correspondiente, permite obtener las coordenadas X, Y del punto de impacto y a partir de ello asignar un puntaje. En la Figura 1.3 se aprecia el diseño propuesto por Daware, Kale & Salunkhe (2017) para un sistema de este tipo.

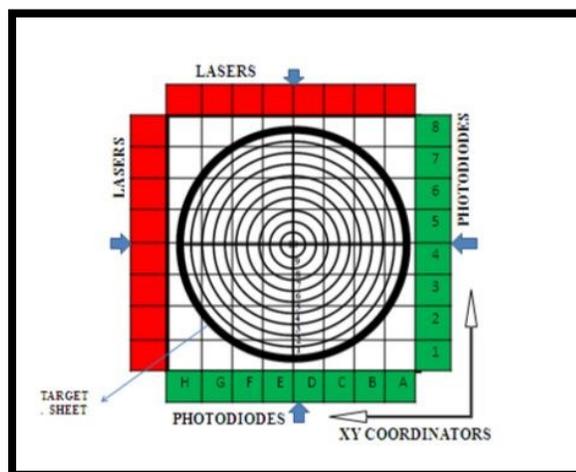


Figura 1.3: Arreglo de láseres y fotodiodos. Tomado de Daware et al (2017)

Este sistema de ubicación y puntaje de impactos requiere de una gran cantidad de láseres y fotodiodos lo que se vuelve un inconveniente al tener que considerar como parte del diseño un dispositivo electrónico con una gran cantidad de terminales para poder manejarlos; además, aunque los láseres se coloquen sin

separación entre ellos el diámetro que poseen es mayor al de la luz que emiten, por lo tanto, siempre hay espacios sin monitorear que limitan la capacidad de detección del sistema. El costo de implementar esta técnica es elevado dada la gran cantidad de hardware que se necesita.

1.1.3 Visión artificial

Hay sistemas de ubicación y puntuación de impactos basados en una técnica de procesamiento de vídeo llamada visión artificial. Su componente principal es una cámara que genera imágenes, del blanco, las cuales son analizadas para determinar la posición de los agujeros generados por los impactos de los tiros en el blanco. El auge de estos sistemas se debe a que con una cámara que cuente con millones de píxeles es posible obtener niveles de exactitud ajustados a los requerimientos de competencias internacionales. La unidad de procesamiento es otra parte fundamental de la visión artificial ya que en esta etapa se ejecutan los algoritmos que sacan provecho de la información obtenida por la cámara, la mayoría de las compañías e instituciones que se han dedicado a la investigación y desarrollo de esta aplicación usan una PC para dicha tarea. El inconveniente de este tipo de sistemas es que no son confiables para ambientes externos o condiciones especiales de entrenamiento del ejército o policía (Yang, Li, & Zhao, 2006). En la Figura 5.4 se observa la ubicación de los puntos de impacto en un blanco usando visión artificial.



Figura 1.4: Determinación de los puntos de impacto en un blanco usando visión artificial. Tomado de Enríquez & Ortega (2015)

1.1.4 Ondas acústicas

Este tipo de sistema de ubicación y puntuación de impactos tiene dos variantes, ambas relacionadas a fenómenos de la propagación de la energía acústica. La primera se basa en lo que se conoce como «onda de choque supersónica», este tipo de onda se presenta en los proyectiles que se desplazan a velocidades que sobrepasan la barrera del sonido y se genera constantemente a lo largo de su trayectoria, una imagen ilustrativa se muestra en la Figura 1.5. La segunda variante se basa en lo que se denomina «onda de choque de impacto» la cual se produce en el momento en que el proyectil impacta en el blanco y genera una onda de presión que se propaga sobre este último, se aprecia en la Figura 1.6.

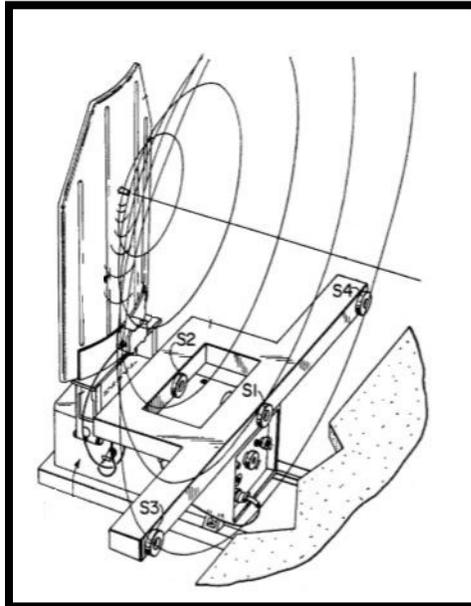


Figura 1.5: Onda de choque supersónica. Tomado de US nº 4349729(1982)

Para los dos casos, de ubicación y puntaje de los impactos usando ondas acústicas, se requiere de un arreglo de sensores capaces de detectar la onda de choque a utilizar, un sistema de medición para obtener las diferencias de tiempo de arribo (TDAs, por sus siglas en inglés) de la onda a cada uno de los sensores y finalmente un procesamiento matemático de las TDAs para determinar los puntos de impacto de los proyectiles y asignar los correspondientes puntajes.

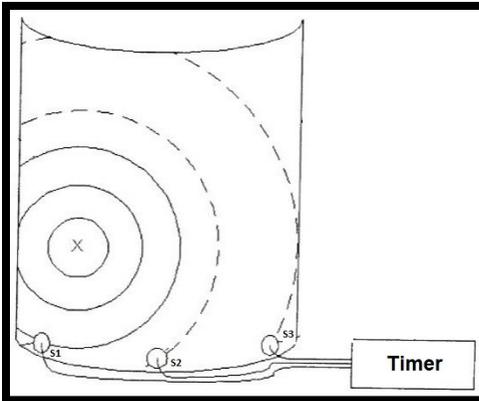


Figura 1.6: Onda de choque de impacto. Tomado de US nº 20090102129A1(2009)

A los sistemas que funcionan a partir de las mediciones sobre la onda de choque supersónica se les denomina «Soft Target», a aquellos otros que involucran el uso de la onda de choque de impacto se les conoce como «Hard Target». La implementación de estos sistemas es de bajo costo porque comúnmente usan sensores piezoeléctricos para la detección de las ondas y microcontroladores para la temporización, ambos dispositivos son fáciles encontrar y además son de bajo costo. En el diseño y desarrollo de los dos tipos de sistemas basados en ondas acústicas hay algunas diferencias por lo que a continuación se presentan con más detalles.

- **Sistemas Soft Target:** Involucra el uso de sensores piezoeléctricos capaces de detectar una onda de sonido que se propaga a través del aire. Los sensores deben estar aislados de la superficie del blanco de tal modo que cuando se produzca el impacto no interfiera o introduzca ruido. Gracias a que el material del que se construye el blanco no influye en el funcionamiento del equipo es posible usar materiales ligeros, descartables y baratos. La complejidad de estos sistemas está en que la onda se propaga en forma de cono y el procesamiento matemático para la ubicación de los impactos debe basarse en ecuaciones que tengan en consideración ese fenómeno físico. Para finalizar, otro punto negativo en estos sistemas es que tienen la limitante de funcionar solo con armas de fuego que disparan a velocidades supersónicas.

- **Sistemas Hard Target:** Utiliza sensores piezoeléctricos que se ubican montados directamente sobre el blanco con el objetivo de detectar una onda de sonido que se propaga a través de este. Es importante saber escoger un material adecuado para la construcción del blanco ya que de ello depende la velocidad con que se propaga la onda. Waterman & Salazar (2011) proponen como mejores candidatos el foam board y el acrílico por el equilibrio que poseen entre el peso, robustez y uniformidad. La onda de choque de impacto se propaga de forma radial sobre el material del blanco por lo que es posible plantear un algoritmo de localización basado en física y geometría. Otro punto a favor es que pueden ser usados tanto con armas supersónicas y subsónicas.

De los cinco tipos de sistemas de puntuación automática para blancos encontrados en la revisión de literatura los que se basan en ondas acústicas destacan por ofrecer una buena exactitud en la determinación de los puntos de impacto, involucran componentes de bajo costo y son aptos para ambientes internos y externos. Analizando las alternativas que se basan en ondas acústicas es relevante tener en cuenta que la implementación del método Soft Target tiene elevados costos ya que involucra el alquiler o compra de un arma de fuego con sus correspondientes municiones; además, se necesita de instalaciones especiales para las pruebas y verificación de su funcionamiento. Por otra parte, el método Hard Target es posible probarlo usando armas de aire comprimido de venta libre que disparan balines metálicos, siendo el calibre más popular de 4,5mm, y tienen un amplio uso en el tiro deportivo. Con las razones expuesta se consideró el método Hard Target como el más adecuado para la implementación en este trabajo monográfico.

1.2 Sistema Hard Target

Establecido el sistema de puntuación automática, para el blanco a implementar, se prosiguió a abordarlo con más detalles, se muestra un diagrama de bloques en la Figura 1.7 con las diferentes etapas que lo conforman.

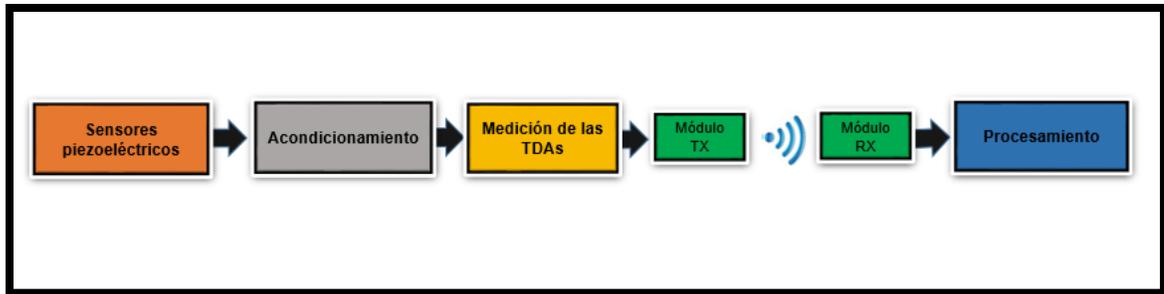


Figura 1. 7: Diagrama de bloques de un sistema Hard Target

1.2.1 Sensores piezoeléctricos

Los dispositivos encargados de recibir de manera directa la onda de choque de impacto y transformarla en una señal eléctrica son los sensores piezoeléctricos. Estos dispositivos transforman la energía acústica (ondas mecánicas) en eléctrica, su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico descubierto por Pierre y Jacques Curie a finales del siglo XIX. Dichos científicos descubrieron que ciertos minerales como la turmalina y el cuarzo pueden transformar la energía mecánica en eléctrica.

1.2.2 Acondicionamiento

Según (Morris., 2001.), el acondicionamiento de señales es un proceso vital en los sistemas de medición para mejorar la calidad de la salida. El módulo más básico para el acondicionamiento de señales es el amplificador electrónico, muy importante en los transductores primarios o sensores con una salida muy baja porque amplifica la amplitud de la señal, mejorando así la sensibilidad y la resolución de la medición. Existe otra gran variedad de elementos para el acondicionamiento de señales, entre ellos sobresalen los filtros que eliminan el ruido inducido con el propósito de depurar la señal de interés. Para el desarrollo del sistema de medición de las TDAs de la onda de choque de impacto se usaron elementos de amplificación y filtrado para el acondicionamiento con el propósito de garantizar que las señales recibidas puedan ser manejadas correctamente por la siguiente etapa.

1.2.3 Medición de las TDAs

La medición de las diferencias de tiempo de arribo (TDA, por sus siglas en inglés) de la onda de choque de impacto está conformada por dos elementos, primeramente, la detección de los arribos a los sensores y segundo la temporización. Son dos procesos muy interrelacionados porque son los arribos los que indican en que momento iniciar la temporización, en que momento almacenar los valores de la temporización y al final en que momento detenerla.

1.2.3.1 Detección de los arribos de la onda de choque

Según Waterman & Salazar (2011) existen tres técnicas dirigidas a detectar el preciso momento en que la onda de choque arriba a los sensores.

- Análisis por umbral: Esta técnica consiste en que cuando la señal de entrada sobrepasa un voltaje umbral establecido se activa un evento. Se puede implementar utilizando la lectura de un conversor analógico-digital o simplemente mediante un circuito comparador que proporcionará una salida en alto o bajo. No es la técnica más confiable debido a que el valor de la amplitud de la onda cuando alcanza a un sensor puede ser significativamente diferente al que tiene cuando llega a otro.
- Detección de cruce por cero: Representa el punto de comparación más confiable ya que ocurre cuando las ondas experimentan el mayor cambio. Al igual que el análisis por umbral puede implementarse mediante un conversor analógico-digital o con un circuito comparador, en ambos casos la referencia a tomar es de 0V. Este método no se pone en práctica solo debido a que tiene el defecto de que los cruces por cero ocurren de forma errática y continua cuando el blanco no está activo, se suele implementar en un esquema de dos etapas donde los cruces se analizan con un umbral de voltaje luego que se activan.

- **Análisis delta:** es una técnica que comparada con el de análisis de umbral busca mejorar la respuesta y confiabilidad en la activación de los eventos que permiten la medición de las diferencias de tiempo en la llegada de la onda de choque a los sensores. Se basa en el análisis de los cambios en la amplitud(delta) para detectar los eventos de forma más rápida y consistentemente. La obtención de esos buenos resultados implica un aumento del costo y la complejidad del sistema ya que deben utilizarse conversores analógico-digitales de alta velocidad de respuesta.

De las tres técnicas descritas, seleccionamos el análisis por umbral porque su implementación es fácil y se basa en el uso de comparadores los cuales, además de ser altamente disponibles, son de bajo costo. Otra alternativa para la implementación del análisis por umbral son los microcontroladores cuentan con una buena cantidad de comparadores de alta velocidad, lo cual simplifica el desarrollo del sistema. Seleccionando el microcontrolador adecuado es posible realizar la detección de los arribos y temporización en una sola unidad que reduce el hardware y el costo. Waterman y Salazar (2011) demuestran que es una técnica confiable al usarla en su trabajo titulado "Electronic Target".

1.2.3.2 Temporización

La cantidad mínima de sensores con los que debe contar el blanco para realizar una determinación del punto de impacto en base a la medición de las TDAs son tres, como ejemplificación si tenemos en mente que usamos esta cantidad de sensores la temporización funciona del siguiente modo: cuando el blanco recibe el golpe de un proyectil se genera una onda de choque de impacto que se propaga sobre el material alcanzando al sensor que se encuentre más cercano, en ese instante inicia la temporización, la onda continua propagándose hasta alcanzar a un segundo sensor, momento en el que se obtiene la primera diferencia de tiempo $\Delta 1$ y se continua con la temporización, finalmente cuando la onda llega al tercer sensor S3 se obtiene una segunda diferencia de tiempo $\Delta 2$ y se detiene la temporización. La cantidad de diferencias de tiempo a medir aumenta si se usan más sensores.

1.2.3.3 Microcontroladores

Para la temporización se seleccionó a los microcontroladores ya que son dispositivos que pueden integrar en sí mismos comparadores y temporizadores realizando las mediciones de las TDAs con mínimo hardware y costo. El sitio web de Ingeniería Electrónica y Proyectos PICmicro (2018) define a un microcontrolador como una unidad capaz de procesar información e interactuar con el entorno mediante señales eléctricas; está constituida en un chip y contiene internamente los elementos de una computadora (CPU, unidades de memoria y unidades de entrada/salida) más componentes auxiliares como generadores de reloj, temporizadores, contadores, conversores analógico-digitales, comparadores, entre otros módulos. La ventaja de estos dispositivos ante las computadoras personales (PC, por sus siglas en inglés) es que al estar encapsulados en circuitos integrados su costo es menor, consumen menos energía y pueden agregarse con facilidad en un circuito impreso.

IEPP (2018) también resalta que todo microcontrolador requiere de un programa que garantice el comportamiento deseado del sistema. La programación, por lo tanto, es una actividad fundamental cuando se trabaja con estos dispositivos. Si bien es cierto que los microcontroladores solo entienden el denominado lenguaje de máquinas compuesto por 1's y 0's resulta complicado para el ser humano programarlos de esta manera; existen alternativas para su programación como el lenguaje ensamblador, formado por nemotécnicos que representan las instrucciones en lenguaje de máquina, y lenguajes de alto nivel (BASIC, PASCAL, C, etc.) que utilizan sentencias similares a nuestra manera de comunicarnos. Todo programa en lenguaje de alto nivel debe traducirse a lenguaje de máquina y, en el caso de los microcontroladores se cuenta con las herramientas tales como los compiladores y linkers para lograrlo.

1.2.4 Procesamiento

La parte final del diseño Hard Target que se propone involucra procesar las diferencias de tiempo medidas con el fin de poder establecer el punto de impacto. En la patente US nº 20090102129A1(2009) se especifica que para efectuar el proceso también se debe manejar el valor de la velocidad del sonido en el material del blanco, la cual corresponde a la velocidad de propagación de la onda de choque de impacto, y las distancias entre la ubicación de los diferentes sensores. Aplicando conocimientos de física y geometría se obtiene el algoritmo requerido para determinar las coordenadas del punto de impacto y asignar un puntaje.

El algoritmo de ubicación y puntaje se ejecutará en una PC debido a que, al utilizar gran cantidad de ecuaciones matemáticas, se requiere de una CPU con alto desempeño de procesamiento, lo que no se obtiene con mucha facilidad cuando se trabaja con otras tecnologías tales como los microcontroladores. Otro de los puntos que contribuyó a determinar el uso de una PC es que en esta misma se implementará la interfaz remota junto con la base de datos, se logrará de esa forma un mejor uso de los recursos.

1.3 Sistema de control de movimiento

El sistema de control de movimiento se encarga de mover el blanco de tiro de forma horizontal, así como también de variar la velocidad y cambiar la dirección de desplazamiento. Los elementos que lo conforman se aprecian en la Figura 1.8.

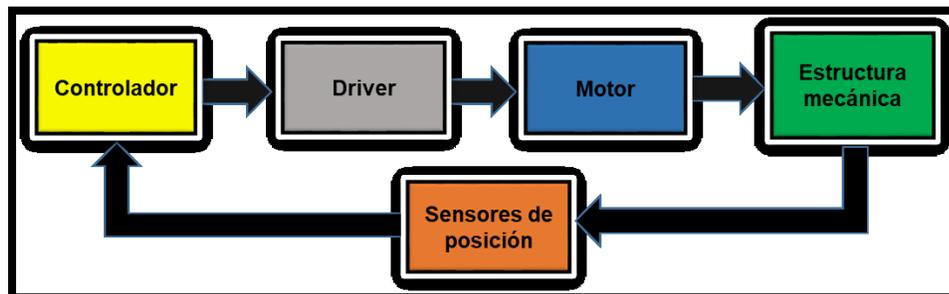


Figura 1. 8: Diagrama de bloques del sistema de control de movimiento

1.3.1 Estructura mecánica

La estructura mecánica es el medio físico que permite el desplazamiento horizontal del blanco, para su correcto funcionamiento debe tener en cuenta dos aspectos importantes, un sistema de transmisión de movimiento de rotatorio a lineal adecuado y el uso de guías lineales en la base del blanco que permiten su desplazamiento con poca fricción.

1.3.1.1 Sistema de transmisión de movimiento rotatorio a lineal

La fuente principal para generar el movimiento del blanco es un motor eléctrico con movimiento rotacional, dicho movimiento debe ser convertido en el desplazamiento horizontal del blanco el cual es catalogado como un movimiento lineal, es por eso que se requiere un sistema de este tipo. Las alternativas consideradas encontradas en la revisión de literatura fueron las siguientes:

- Cremallera-Piñón: este mecanismo convierte el movimiento rotacional en uno lineal continuo o viceversa. Para trabajar básicamente usa dos elementos, un piñón (rueda dentada) que engrana en una cremallera (*Saona, 2014*).
- Cadena-Piñón: esta segunda alternativa se caracteriza por producir un movimiento horizontal entre dos ejes paralelos. Es conformada por una cadena sin fin y piñones unidos a los dos ejes paralelos. (*Saona, 2014*)
- Banda-Polea: el mecanismo banda-polea es similar al de cadena-piñón ya que produce un movimiento horizontal entre dos ejes paralelos. La diferencia se encuentra en que se sustituye la cadena por una banda y los piñones por poleas. La transmisión de movimiento se efectúa por la fricción que existe entre las poleas y la banda. (*Bolton, 2013*)

La selección final se tomó en base a la sugerencia del ingeniero mecánico, Kenneth Pérez, quien indicó que la transmisión Banda-Polea era la más adecuada por ser más fácil de ensamblar, de bajo costo y ofrece una transmisión de potencia adecuada. La Figura 2.8 muestra un bosquejo de un sistema de transmisión banda-polea.

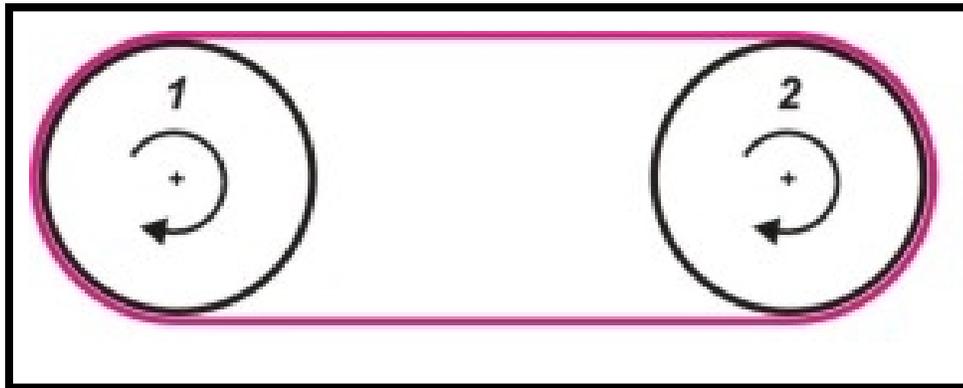


Figura 1. 9: Sistema de transmisión Banda-Polea. Tomado de Gutiérrez(s.f.)

1.3.1.2 Guías lineales

La base en la que estará ubicado el blanco necesita de un soporte que le permita deslizarse horizontalmente de un lado a otro sin ningún problema. A ese tipo de sistema que da firmeza y permite el movimiento se conoce comúnmente como guías lineales (Saona, 2014). El trabajo de las guías lineales es anular la fricción y aunque eso no se puede lograr en su totalidad se acercan mucho.

1.3.2 Motor

Un motor eléctrico se encarga de transformar energía eléctrica en un movimiento mecánico. Existen muchos tipos de motores, de todos ellos sobresalen dos grandes familias, motores de corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés) y motores de corriente directa (DC, por sus siglas en inglés). Para establecer el tipo de motor adecuado para esta aplicación se consideraron las siguientes características: cambio de giro, variación de velocidad, torque, costo y disponibilidad en el mercado.

Los motores AC son robustos y confiables pero su control de velocidad es más complejo y de mayor costo en comparación a los motores DC, es por ello que se seleccionó a estos últimos como mejor alternativa (Bolton, 2013). En la familia de motores DC hay diferentes tipos: motores DC con escobillas, motores DC sin escobillas, motores paso a paso, y servomotores. Cada tipo de motor DC tiene aspectos propios en las diferentes características mencionadas. Se estableció el uso de un motor paso a paso porque en comparación a los otros tipos de motores DC tiene un bajo costo, alta disponibilidad en el mercado y su variación de velocidad no se basa en técnicas de variación de potencia, como la modulación por ancho de pulso, que afectan el torque. Si bien es cierto que los motores paso a paso disminuyen su torque al aumentar su velocidad es una situación que se puede manejar al establecer un margen de seguridad que garantice su correcto funcionamiento. Se presenta a continuación un apartado que trata de forma más amplia lo que son los motores paso a paso, los diferentes tipos que existen y las especificaciones que se deben tener en cuenta cuando se desea establecer y operar adecuadamente un motor de este tipo.

1.3.3 Motores paso a paso

De acuerdo con IEEE GlobalSpec (2017) los motores paso a paso son motores eléctricos que se alimenta con corriente directa y están diseñados con el objetivo de realizar movimientos con gran precisión. Están compuesto de múltiples bobinas e imanes que permiten que el rotor se mueva dando pasos angulares.

1.3.3.1 Tipos de motores paso a paso

En dependencia de la estructura con la que fue construido un motor paso a paso puede clasificarse en: reluctancia variable, imán permanente e híbrido.

- **Motor paso a paso de reluctancia variable:** este tipo de motor se basa en un rotor de dientes múltiples construido con hierro dulce y un estator que tiene un número de polos mayor a la cantidad de dientes del rotor. IEEE GlobalSpec (2017) plantea que al energizar el devanado del estator los polos en este se magnetizan y generan una fuerza que atrae a los dientes

del rotor, lo que se traduce en una rotación. Los motores paso a paso de reluctancia variable, aunque son los más simples desde el punto de vista estructural se destacan porque no producen un torque residual y alcanzan velocidades de giro mayores a los motores paso a paso de imán permanente.

- Motor paso a paso de imán permanente: la estructura de este tipo de motor posee un estator similar al de los motores de reluctancia variable. IEEE GlobalSpec (2017) explica que el rotor, su componente más característico, es magnetizado en polos norte y sur al contar con imanes permanentes ubicados en una línea recta paralela al eje del mismo. Los polos proveen de un elevado flujo magnético que permite que este tipo de motor posea un torque mayor en comparación con los motores paso a paso de reluctancia variable.
- Motor paso a paso híbrido: según Robotyk System (2017), un motor paso a paso híbrido combina las mejores características de los motores de reluctancia variable e imán permanente. La estructura del estator es igual a la de los otros dos tipos de motores. El rotor cuenta con dientes múltiples y un imán concéntrico axialmente magnetizado alrededor del eje del rotor. Son los motores paso a paso de mayor costo en el mercado, pero a su vez ofrecen un mejor desempeño en velocidad y toque.

Se determinó el uso de un motor paso a paso híbrido ya que, aunque tienen un costo mayor, ofrece un mejor desempeño en velocidad y torque.

1.3.3.2 Especificaciones de un motor paso a paso

Los siguientes son términos muy usados cuando se hace referencia a las características técnicas de un motor paso a paso.

- Voltaje: tensión máxima de alimentación que indica la hoja de datos del motor en caso de que no se usen circuitos de control avanzados que incluyan limitación de corriente.

- Velocidad: Es la velocidad del eje del rotor. Al igual que en todos los motores DC la velocidad del eje es directamente proporcional al voltaje aplicado. Este valor puede ser dado en rps (revoluciones por segundo) o pps (pulsos por segundo).
- Torque: es la cantidad de fuerza de rotación producida por el motor expresada comúnmente en Nm (Newtons por Metros). El torque es proporcional a la cantidad de corriente que fluye por los devanados del motor.
- Inercia del rotor: Es la tendencia del rotor a continuar su movimiento una vez puesto en marcha. Es común expresarla en kgm^2 o gcm^2 y depende en gran manera del peso del motor. Los motores paso a paso tienen la característica que poseer inercias bajas.
- Ángulo de paso: Es el ángulo de rotación del eje para cada paso medido en grados.

1.3.4 Driver

El driver es el circuito que se encarga de alimentar directamente las bobinas del motor con el voltaje, corriente y polaridad apropiada. La estructura del driver varía principalmente de acuerdo al tipo de motor, unipolar o bipolar, que se desea manejar. Existen motores paso a paso a los cuales se debe aplicar una alimentación unipolar, se puede efectuar con circuitos de conmutación sencillos; y otros que requieren una alimentación bipolar, involucran un circuito electrónico como la configuración puente H por la necesidad de invertir la corriente en las fases del motor. La variedad de drivers es grande y es fácil encontrar alternativas que con tan solo recibir algunas señales digitales del controlador pueden hacer girar el motor, cambiar el sentido de giro, variar su velocidad, establecer técnicas de micropasos y realizar un control de corriente para no exceder los valores seguros. Por la importancia que tiene el tipo de alimentación de un motor paso a paso en la selección del driver se presenta a continuación una sección con más detalle.

1.3.4.1 Tipos de alimentación de los motores paso a paso

El tipo de alimentación de un motor paso a paso depende de cómo se encuentra configurada la estructura de sus bobinas. Según IEEEGlobalSpec (s.f), está se puede clasificar en unipolar y bipolar.

- Unipolar: Son motores que, Figura 1.11, poseen comúnmente 6 cables para su alimentación. El devanado se divide en dos fases que cuentan con un tap central dando resultado a 4 bobinas en total (2 por cada fase). Para su manejo se cambia la corriente suministrada de una bobina a otra en cada fase. Los motores con este tipo de alimentación son más sencillos de operar y tienen un menor costo, el punto en contra es que generan un 30% menos de torque en comparación a un motor bipolar equivalente ya que mientras trabaja se utiliza solo la mitad del devanado para cada fase.
- Bipolar: Son motores que cuentan con 4 cables para su alimentación, Figura 1. 11. Están conformados por dos fases y cada una de ellas por una bobina. La puesta en marcha y operación se logra al invertir la corriente en cada fase en una secuencia y orden específico, requieren dispositivos electrónicos más complejos y usualmente de mayor costo, pero su gran ventaja es que generan mayores cantidades de torque en comparación con un motor con alimentación unipolar.

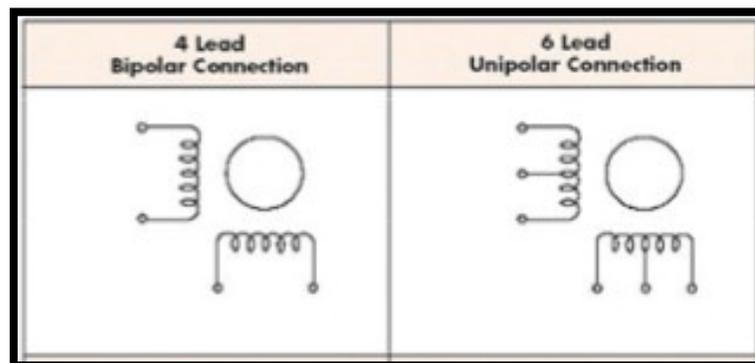


Figura 1. 10: Estructura de los motores paso a paso unipolares y bipolares. Tomado de IEEEGlobalSpec (s.f)

1.3.5 Controlador

El controlador es el circuito que se encarga de enviar las señales al driver para alimentar el motor de forma adecuada. En su operación debe tener en cuenta la entrada de los sensores de posición para saber en qué momento girar en un sentido u otro. También interactúa con la interfaz local y la interfaz remota, por medio de la comunicación inalámbrica, mediante las cuales el usuario indica la puesta en marcha o detención del sistema; cambios de giro, velocidad y en algunos casos el tipo de rutina automática que debe ser ejecutada.

La implementación del controlador requiere de un dispositivo que cuente con una unidad de procesamiento programable y que pueda manejar múltiples entradas y salidas. Aunque existe una gran variedad de alternativas como los PLCs, FPGAs y microcontroladores, se seleccionó a los últimos por ser de bajo costo, involucran bajo consumo de energía y pueden integrarse de forma compacta en un circuito impreso por el hecho de incluir periféricos que reducen el número de componentes y por ende el tamaño del circuito. Lo que son los microcontroladores se presentó de forma más amplia en la sección 1.2.3.3. Esta tecnología fue seleccionada para la medición de las TDAs.

1.3.6 Sensores de posición

Según Bolton (2013), los sensores de posición determinan la ubicación de un objeto respecto a un punto de referencia. En el sistema de control de movimiento desempeñan un papel importante ya que indican cuando el blanco ha alcanzado alguno de los extremos de la pista de desplazamiento y debe cambiar el sentido de giro. Su uso en aplicaciones de este tipo hace que a algunos de los sensores de posición en ocasiones se les llame «finales de carrera» o «interruptores de límite». Los finales de carrera más comunes son los electromecánicos y se seleccionaron por su alta disponibilidad en el mercado nacional y su bajo costo. Su funcionamiento es igual al de un interruptor eléctrico ya que cuando un objeto entra en contacto con el final de carrera este cierra, o abre, los contactos electromecánicos.

1.4 Interfaz local

Una interfaz es el medio que permite establecer comunicación entre dos elementos que no hablan el mismo lenguaje (Fernández, Angós, & Salvador, 2001), en este contexto, son dispositivos que permiten la interacción entre un usuario y una máquina. Las interfaces poseen dos tipos de elementos, los cuales se diferencian entre sí por el sentido de la comunicación con el controlador, estos son dispositivos de entrada y salida (Cervelló, Martínez, Ramírez, & Virgili, 2012), ambos se detallan a continuación:

- Usuario-Máquina: son los que se utilizan para introducir información al controlador; entre ellos tenemos interruptores, teclados y botones; estos transforman la información generada por el usuario en señales eléctricas que se envían al controlador para su interpretación. (Cervelló et al.)
- Máquina-Usuario: son los dispositivos (LCD, altavoces, leds, etc.) que luego de la interpretación que realiza el controlador, muestran o generan unidades de forma visual, auditiva, etc., con el objetivo de que el usuario pueda monitorear el desarrollo de un proceso. (Cervelló et al.)

El sistema propuesto tiene una mezcla de elementos Usuario-Máquina y Máquina-Usuario encargados de proporcionar los medios para el control local de los movimientos del prototipo de sistema para entrenamiento en tiro. De forma manual el instructor, o la persona que esté usando el sistema, podrá configurar y operar el sistema.

1.5 Comunicación inalámbrica.

La interfaz remota inalámbrica brinda la posibilidad de manipular el sistema a distancia y sin necesidad de una conexión por cables, además da lugar a que el tirador pueda apreciar en un PC, sin moverse de la zona de disparo, los puntos de impacto. Para lograr lo anterior la interfaz remota se complementa con un medio de comunicación inalámbrica que permite unir los dos grandes bloques del sistema de puntuación automática (Medición de las TDAs y Procesamiento) e intercambiar información con el sistema de control de movimiento.

Las comunicaciones inalámbricas son aquellas que se establecen entre dos o más sistemas sin necesidad de un medio cableado. Las técnicas de comunicación inalámbrica empleadas son: por infrarrojos (IR) y por radiofrecuencia (RF) (Mayné, 2005). La comunicación por infrarrojos permite crear enlaces a pequeñas distancias para lo cual también es indispensable que los puntos de conexión sean siempre visibles entre sí, es una técnica muy sensible a objetos móviles que puedan provocar interferencia entre el emisor y receptor, posee restricciones en la potencia de transmisión que limitan la cobertura a unas cuantas decenas de metros, sus desventajas hacen que su campo de aplicación sea limitado. Las comunicaciones por radiofrecuencia pueden tener alcances cortos y largos, siendo lo anterior una de las razones por la cual es el tipo de comunicación inalámbrico más implementado en la actualidad (Mayné, 2005).

Aunque los orígenes de la comunicación inalámbrica por radiofrecuencia están vinculados con el telégrafo, la radio y la telefonía; hoy en día han evolucionado para adaptarse a aplicaciones en las que se requiere que se comuniquen diferentes dispositivos electrónicos. Algunas de las tecnologías inalámbricas que permiten esa función se presentan a continuación. Estas fueron encontradas durante la revisión de literatura como parte de las alternativas que se tomaron en cuenta en los antecedentes y en una indagación adicional llevada a cabo con el objetivo de poder seleccionar la más adecuada para su uso en este trabajo monográfico.

- **Bluetooth:** Es un protocolo de comunicación de corto alcance muy particularmente usado para crear redes de área personal (WPA, por sus siglas en inglés). Ocupa un espacio muy importante en la computación y otros productos de consumo ya que fue una tecnología que surgió con el objetivo de sustituir enlaces cableados de periféricos. En la actualidad se destaca porque ofrece comunicación inalámbrica a un bajo costo y con un bajo consumo de energía, opera en la banda no licenciada de 2.4 GHz, y ofrece un alcance para una buena conexión de aproximadamente 100 metros. Su uso está restringido para enlaces punto a punto.

- **ZigBee:** Es un protocolo de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.4. Opera en tres bandas de radiofrecuencia (2.4 GHz, 868MHz y 915MHz) y se caracteriza por consumir baja potencia, tiene un alto nivel de seguridad, es robusto y posee una alta escalabilidad en la creación de redes inalámbricas. ZigBee es considerado como un protocolo con un desempeño intermedio entre el Bluetooth y Wifi. Está destinado para aplicaciones que requieren relativamente bajas tasas de transmisión de datos como los sistemas con control inalámbrico o las redes de sensores. La velocidad de transmisión máxima alcanzada es de 250Kbps y cubre un rango de cobertura que puede llegar hasta los 300 metros o más.
- **Wifi:** Es la tecnología de comunicación inalámbrica más conocida y la más usada en los hogares. Es un estándar (IEEE 802.11x) que implementa los niveles inferiores del modelo OSI, físico y de enlace, sobre un canal inalámbrico. Surgió con la intención de sustituir al ethernet y por ello es muy usado en la creación de redes de área local (LAN, por sus siglas en inglés). Existen varias versiones del estándar y las más comunes son IEEE 802.11 a/b y g. La diferencia entre ellas radica principalmente en la banda de frecuencia en que operan (2.4 GHz o 5GHz) y la velocidad de transmisión máxima que pueden alcanzar. Aunque existen módulos para desarrollar sistemas electrónicos con comunicación Wifi se le considera como una tecnología sobre dimensionada para las aplicaciones de IoT (Internet of Things).
- **Z-Wave:** Es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada principalmente para domótica, dentro de sus aplicaciones más comunes están el control remoto de dispositivos como lámparas y sensores. Su estructura es muy fiable, necesita poca energía y poco ancho de banda; utiliza frecuencias inferiores a la banda de 1GHz por lo cual no existe el riesgo de interferencia con otras tecnologías inalámbricas como Wifi, ZigBee o Bluetooth, que operan a los 2.4 GHz. Su protocolo se caracteriza por no tener alta complejidad técnica, permitiendo un desarrollo más rápido. Un inconveniente presente es que el único fabricante de módulos para integrar este tipo de comunicación es Sigma Desings.

- **6LowPAN:** Es una tecnología basada en IP (Internet Protocol). Su nombre se deriva de la abreviación en inglés de «IPv6 Low-power wireless Personal Area Network» que en español significa, red de área personal inalámbrica de baja potencia IPv6. Es un protocolo que no se enfoca en la capa de aplicaciones, como Bluetooth o ZigBee, se ocupa de los detalles de la red al definir mecanismos de encapsulación y cabecera de compresión. Opera en varias bandas de frecuencia y su capa física se puede utilizar en otras plataformas de comunicación, entre ellas Ethernet, Wifi e ISM (Industrial Scientific and Medical) Sub-1GHz. Al basarse en IPv6 ofrece aproximadamente $[5 \times 10]^{28}$ direcciones para cada persona en el mundo, permitiendo de esta forma que cualquier objeto o dispositivo tenga su propia dirección IP única y se conecte a internet. Esta tecnología fue desarrollada con el enfoque de potenciar el IoT en la automatización de viviendas y edificios.
- **Thread:** Es un protocolo de red que utiliza IPv6 dirigido al entorno de la domótica. Fue lanzado a mediados de 2014 por Thread Group, creado sin derechos de autor y basado en los estándares IEEE802.15.4, IPv6 y 6LoWPAN. Está diseñado como un complemento de Wifi para su uso en la configuración de la automatización del hogar, utiliza la banda de frecuencia ISM (2.4GHz) y admite una red en malla usando transceptores de radio IEEE802.15.4 capaz de manejar hasta 250 nodos con un alto nivel de confiabilidad.

Los criterios para la selección de la tecnología de comunicación inalámbrica son los siguientes:

- Comunicación inalámbrica en un rango mínimo de 50 metros.
- Capacidad de configuración en red para establecer tres nodos de comunicación inalámbrica que pertenecen al sistema de localización, el sistema mecatrónico y la PC con la interfaz de control remota.

Tabla 1.1: Tecnologías de comunicación inalámbrica

Tecnología	Standard	Frecuencia	Rango	Velocidad de transmisión	Observación
Bluetooth	Versión 4.2	2.4 GHz	50-150m	1Mbps	Es de bajo consumo
	Versión 5	2.4 GHz	200-600m	2Mbps	
ZigBee	ZigBee 3.0 basado en IEEE 802.15.4	868MHz	Hasta 75-100 metros interior Hasta 300+metros	20Kbps	Muy usado en aplicaciones de control y creación de redes de sensores
		915MHz		40 Kbps	
		2.4GHz		250Kbps	
Wifi	IEEE 802.11 a	5GHz	Aproximadamente 50m	54Mbps	Sobredimensionado para IoT
	IEEE 802.11 b	2.4 GHz		11Mbps	
	IEEE 802.11 g	2.4 GHz		54 Mbps	
Z-Wave	Z-Wave Alliance ZAD12837 / ITU-T G.9959	900MHz	30m	9.6/40/100kbit/s	Existe un único fabricante
6LowPAN	RFC6282	2.4 GHz/Sub 1GHZ ISM	N/A	N/A	No se enfoca en la capa de aplicaciones
Thread	Basado en IEEE802.15.4 and 6LowPAN	2.4 GHz	N/A	N/A	No se enfoca en la capa de aplicaciones

En la Tabla 5.2 se muestra una comparación de las características técnicas que poseen las diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica. Para este trabajo monográfico se utilizó la tecnología ZigBee porque cumple con el rango de cobertura necesario, es la que se encuentra posicionada de manera más sólida en el campo de control inalámbrico y la creación de redes de sensores, permitió la conexión de los tres nodos requeridos para este sistema, la velocidad de transmisión es apropiada ya que el flujo de información que se va a transmitir es relativamente bajo, y finalmente opera en las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical bands).

1.6 Interfaz remota

La interfaz remota está constituida por una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) que se ejecuta en una PC. Las GUIs en general son un medio de comunicación entre un humano y un sistema informático (Fernández, Angós, & Salvador, 2001). Según Fernández et al (2001) una GUI implica la presencia de un monitor o pantalla que mediante una serie de menús e iconos representa las opciones que el usuario puede escoger dentro del sistema. Las GUIs han estado evolucionando en el transcurso de los años, incorporando dentro de ellas distintos tipos de entornos gráficos como imágenes, iconos, animaciones y otros recursos diseñados para potenciar la interacción entre el usuario y el sistema informático. En la actualidad las GUIs tienen muchas aplicaciones y se ajustan a las necesidades requeridas en muchos tipos de proyectos con el fin de establecer un mejor control y manipulación del sistema desarrollado.

El desarrollo de las interfaces graficas de usuario obedece a los requerimientos técnicos impuestos al sistema y al grado de conocimientos del tipo de usuarios que harán uso de la misma. Existen distintas plataformas que facilitan el diseño y desarrollo de estas GUI, entre ellas se seleccionó Microsoft Visual Studio Community, versión que se caracteriza principalmente por ser no licenciada lo cual contribuyó en la reducción de los costos del desarrollo del prototipo.

1.6.1 Visual Studio Community

Según el sitio web de Microsoft (s.f), Visual Studio Community es un ambiente de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) con el que se puede desarrollar mediante su panel creativo cualquier tipo de aplicaciones para móviles, la nube, escritorio y la web. Se caracteriza por ser multiplataforma, por lo cual es posible realizar trabajos para dispositivos Android, iOS, Linux y la plataforma universal de Windows. Soporta múltiples lenguajes de programación como C++, Python, Visual Basic, ASP.net, JavaScript, C#, etc. Lo anterior facilita en gran medida el desarrollo de software al tener la disposición de trabajar con el lenguaje de programación sobre el cual se tenga mejor dominio. Esta plataforma fue seleccionada por la gran cantidad de herramientas y características que posee para el desarrollo de una GUI, además que esta versión no requiere la adquisición de una licencia para su utilización.

1.7 Base de datos.

Según Fuentes (2013), las bases de datos son una colección de datos ordenados lógicamente e interrelacionados entre sí, los cuales requieren de una serie de programas para su administración con el objetivo proporcionar una forma de almacenar y recuperar la información de forma eficiente. Una base de datos es un conjunto de información relacionada que se encuentra agrupada o estructurada.

Un Sistemas de Gestión de Bases de Datos (SGBD) es aquel que está diseñado para trabajar con grandes cantidades de información. La gestión de los datos implica tanto la definición de estructuras para almacenarlos como la provisión de mecanismos para su manipulación. Además, las bases de datos deben proporcionar la fiabilidad de la información almacenada a pesar de las caídas del sistema o los intentos de acceso sin autorización. Dentro de los distintos SGBD uno que se destaca en particular es MySQL Community.

1.7.1 MySQL Community

MySQL es el sistema de gestión de base de datos SQL (Structured Query Language) multiusuario, multiplataforma y open source más popular, diseñado para entornos de producción críticos, con alta carga de trabajo. Almacena datos en tablas separadas en lugar de poner todos los datos en un gran almacén, añadiendo de esta forma mayor velocidad y flexibilidad. Lo distribuye y soporta MySQL AB, compañía comercial de Suecia. (MySQL Documentation Library).

MySQL al ser open source permite que cualquiera pueda usar y modificar el software sin pagar nada, si así se desea, se puede estudiar el código fuente y cambiarlo para adaptarlo a las necesidades del desarrollador. El software usa la licencia GPL (General Public License), que define lo que se puede y no puede hacer con el software en diferentes situaciones (MySQL Documentation Library). Lo anterior es una característica muy relevante, porque nos da la ventaja de minimizar la inversión para la implementación del prototipo presentado.

CAPÍTULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE SISTEMA PARA ENTRENAMIENTO EN TIRO

2 Modelo del prototipo de sistema para entrenamiento en tiro

En este capítulo se abordan los aspectos relacionados al diseño e implementación de los diferentes subsistemas que conforman el prototipo de sistema para entrenamiento en tiro, los cuales se aprecian con más detalles en la Figura 2.1.

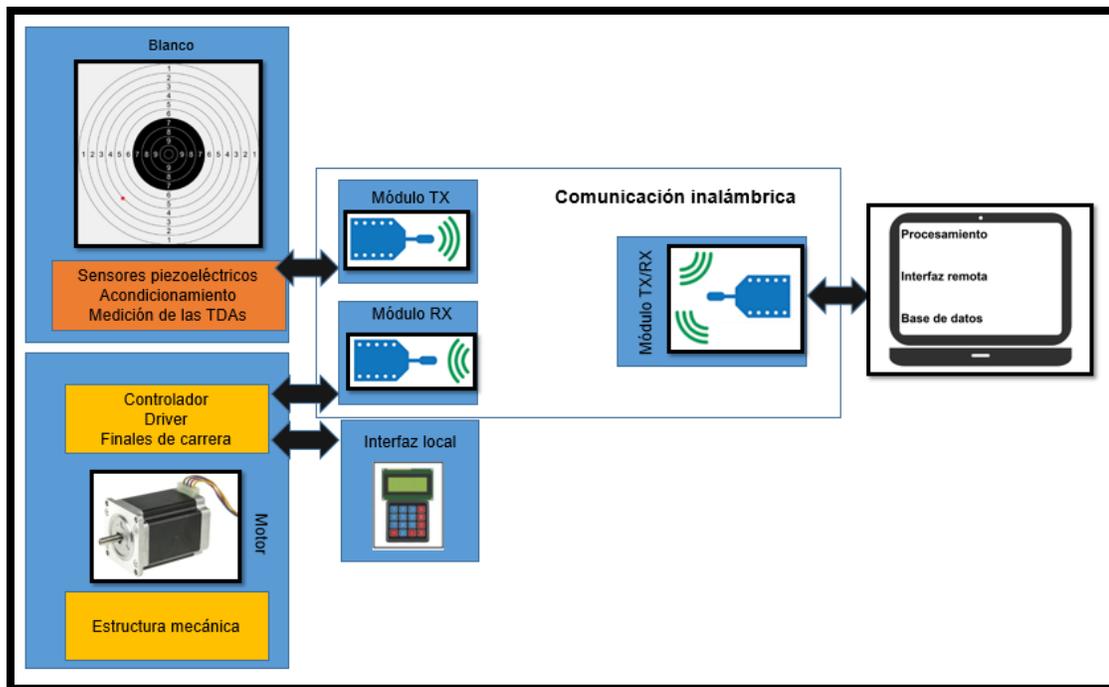


Figura 2.1: Prototipo de sistema para entrenamiento en tiro implementado

El sistema de puntuación automática cuenta con una primera etapa cercana al blanco que posee sensores piezoeléctricos, circuitos de acondicionamiento, y un microcontrolador que se encarga de realizar la medición de las TDAs; los datos obtenidos se transmiten mediante módulos de comunicación inalámbrica hacia una segunda etapa(PC) donde se efectúa un procesamiento final y se muestra en la interfaz remota, con una imagen ilustrativa del blanco, los puntos de impacto de cada disparo. La información referente a la ubicación y puntaje de los impactos en el blanco es almacenada, junto con información personal de cada tirador, en una base de datos alojada en la misma PC con la interfaz gráfica.

El sistema de control de movimiento gestiona un motor paso a paso acompañado de una estructura mecánica que transforma el movimiento rotacional del motor en un movimiento lineal, dando lugar al desplazamiento horizontal del blanco. Se usa un driver y un controlador para poner en marcha el motor y efectuar los cambios de dirección y velocidad de desplazamiento. La operación del sistema de control de movimiento puede ser realizada por el usuario desde la interfaz local o la interfaz remota, en el segundo caso se auxilia de los módulos de comunicación inalámbrica.

A continuación, se presentan los aspectos más relevantes del diseño e implementación de los subsistemas, entre los que sobresalen: determinación de los componentes, diagramas esquemáticos de los circuitos, diseño de circuitos impresos, flujogramas y máquinas de estado finito de los algoritmos desarrollados.

2.1 Sistema de puntuación automática

2.1.1 Determinación de los sensores piezoeléctricos

Existe una gran variedad de sensores piezoeléctricos que transforman la energía de las vibraciones producidas por impactos en señales eléctricas. Para este trabajo se determinó el uso del dispositivo SEN-10293, Figura 2.2, particularmente por su bajo costo, disponibilidad en el mercado local y su forma de disco que permite que sea adherido con facilidad en la superficie del blanco. En la Tabla 2.2 se detallan las características técnicas del modelo de sensor piezoeléctrico seleccionado. Según el trabajo de Waterman y Salazar (2011), y pruebas realizadas con los dispositivos, este tipo de sensores produce un voltaje de salida máximo que ronda los 500mV para una onda de choque de impacto en el blanco y más de 5V con impactos que son recibidos directamente en la superficie del sensor, ambos son aspectos que se tomaron en cuenta en la parte del acondicionamiento de las señales de salida de los sensores.

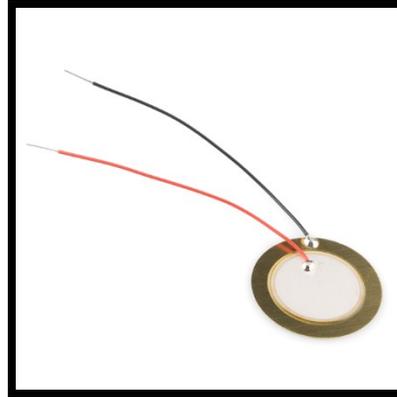


Figura 2. 2: Dispositivo SEN-10293. Tomado de Sparkfun (s.f)

Tabla 2. 1: *Características técnicas del sensor piezoeléctrico seleccionado*

Sensor piezoeléctrico seleccionado	
Modelo	SEN-10293
Frecuencia de resonancia(kHz)	6.3
Impedancia de resonancia(ohm)	1000
Capacitancia (nF)	10
Alambre	AWG32

2.1.2 Acondicionamiento

El blog ScienceProg (2013) explica que este tipo de sensor piezoeléctrico está estructurado por una fuente de voltaje ideal y un condensador en serie, Figura 2.3. La Tabla 2.2 indica que la capacitancia del dispositivo SEN-10293 es de 10nF. Al conectar el sensor a una carga externa se obtiene un filtro pasa alto, situación de la que se saca provecho haciendo que el valor de R1 en el circuito de la Figura 2.6 forme un filtro que elimine todas las señales en las frecuencias inferiores al rango deseado. Dado a que las vibraciones de estos impactos se encuentran en la banda de frecuencia audible (20Hz-20KHz) se determinó la frecuencia de corte en 20 Hz. Conociendo la capacitancia y frecuencia de corte, se procedió a calcular el valor de R.

$$R1 = \frac{1}{2\pi FC} = \frac{1}{2\pi * 20Hz * 10nF} \approx 820K\Omega$$

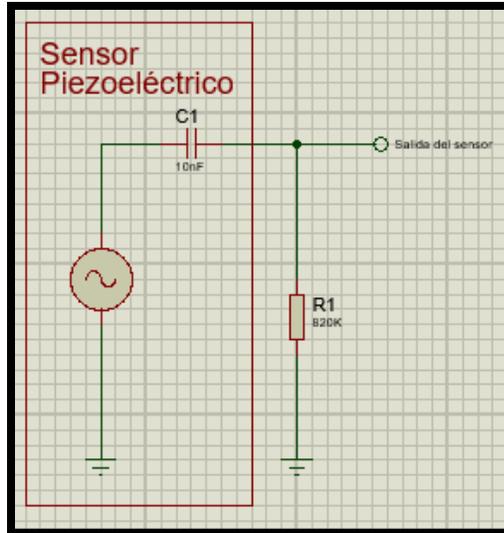


Figura 2. 3: Estructura del sensor piezoeléctrico. (Captura de Pantalla)

La resistencia de 820K que acompaña al sensor se vuelve un problema cuando queremos que sea la entrada a un comparador analógico de un microcontrolador. Los comparadores de un microcontrolador siguen el modelo de entrada analógico que se detalla en la Figura 2.4. En la imagen se logra apreciar que la impedancia de la fuente que se conecta al pin analógico de entrada debe ser menor que 10K, requisito que no se cumple al haber conectado una resistencia de 820K.

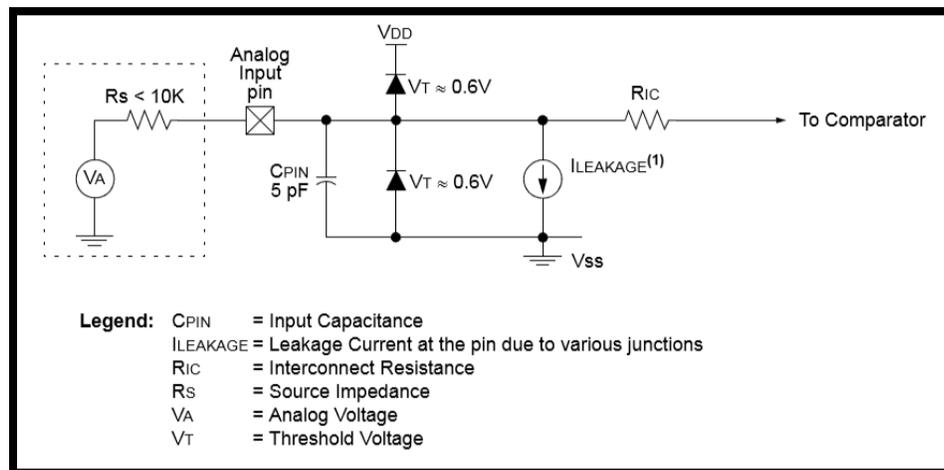


Figura 2. 4: Modelo de entrada analógico para el comparador de un microcontrolador. Tomado de la hoja de datos PIC16F1786(s.f)

La solución al problema de la alta impedancia de entrada se encuentra en un acoplamiento que pueda manejar una alta impedancia en su entrada pero que ofrezca una muy baja impedancia en su salida. Existen muchas formas de implementar un acoplamiento de impedancias, hoy en día sobresalen los que se basan en amplificadores operaciones por la facilidad de construirlos a partir de un circuito integrado y algunos componentes discretos; además, es muy fácil agregar una amplificación a la señal a la señal manejada, o invertirla, en caso que lo requiera. En el acondicionamiento a implementar se agregó una amplificación porque la señal de salida de los sensores piezoeléctricos correspondiente a una onda de choque de impacto es baja, su valor máximo es aproximadamente de 500mV. El circuito que logra los resultados deseados es el amplificador no inversor de la Figura 2.5, en el modelo ideal su impedancia de entrada tiende al infinito, en los dispositivos reales es un valor muy alto por lo que puede manejar la resistencia de 820K, y su impedancia de salida tiende a cero, un valor muy pequeño en dispositivos reales, permitiendo la conexión al microcontrolador.

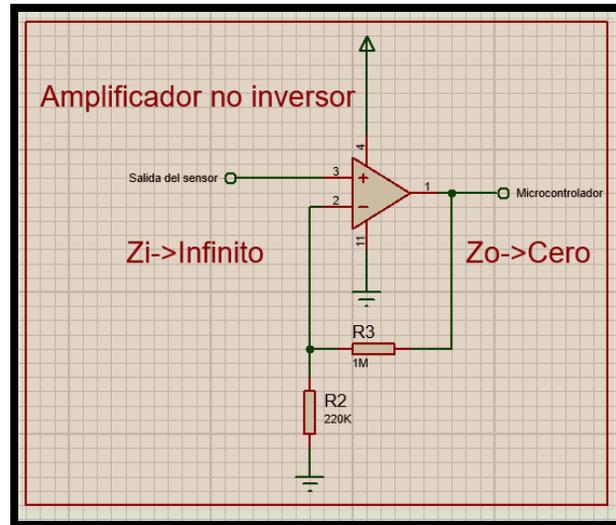


Figura 2. 5: Amplificador no inversor.(Captura de Pantalla)

La ganancia se configuró en 5.5 con las resistencias R2=220K y R3=1M de acuerdo a como lo rigen las siguientes ecuaciones.

$$Ganancia = 1 + \frac{R3}{R2} = 1 + \frac{1M}{220K} = 1 + 4.5 = 5.5$$

Con la ganancia introducida la salida de voltaje máxima para una onda de choque de impacto ahora es aproximadamente de 2.5V. Otro caso que llama la atención es cuando se presenta un golpe fuerte en la superficie de los sensores piezoeléctricos, el voltaje de salida de estos puede alcanzar valores muy altos que causen daños en las siguientes etapas que trabajan con voltajes digitales. Como protección a lo anterior se colocó un diodo zener de 2.7V (D2 en Figura 2.6) que limita todos los voltajes generados por los sensores que superen los 2.7V.

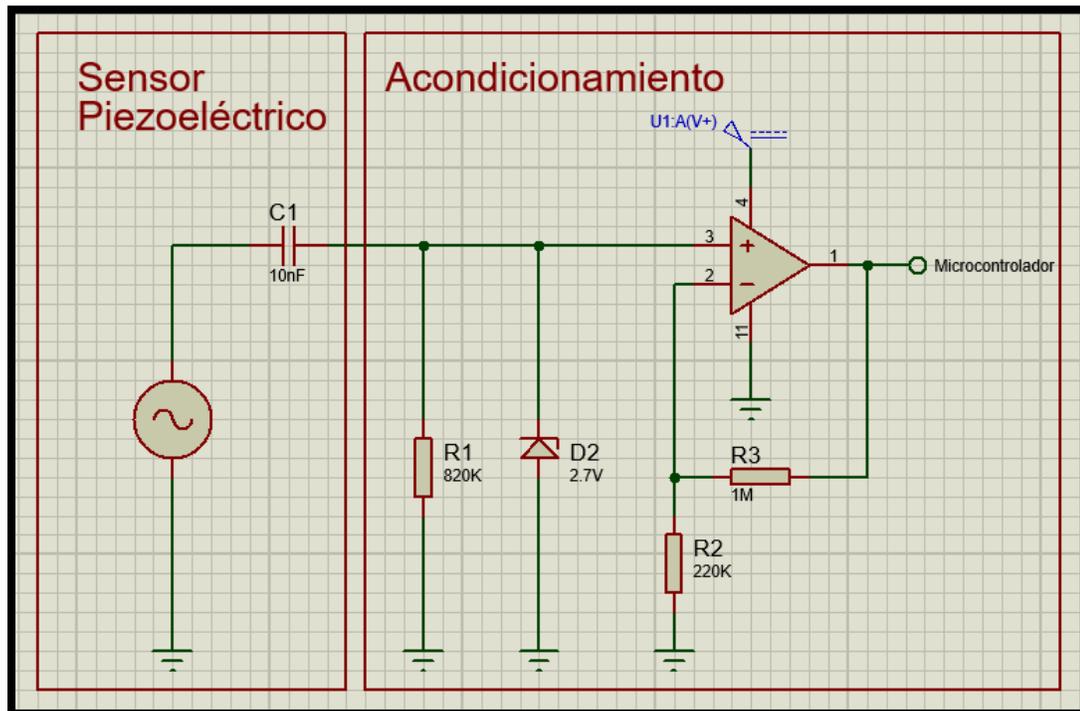


Figura 2. 6:Circuito de acondicionamiento.(Captura de Pantalla)

El sistema involucra cuatro sensores piezoeléctricos, y cada sensor debe llevar una etapa de acondicionamiento igual al circuito de la Figura 2.9, se necesitan por tanto cuatro amplificadores operacionales y para ello se utilizó el circuito integrado LM324. Este dispositivo encapsula cuatro amplificadores operacionales compensados en frecuencia aptos para ser usados en circuitos amplificadores convencionales con la ventaja de poder trabajar con una fuente de alimentación simple (Desde 3V hasta 32V). Otras de sus ventajas son su bajo consumo de energía, siendo aproximadamente 1/5 de otros amplificadores operacionales convencionales como el LM741, y su bajo voltaje de offset de entrada (2mV).

2.1.3 Diseño del blanco

El elemento más importante a considerar en el diseño del blanco es el material que se utilizará para su construcción, este define la velocidad de propagación de la onda de choque de impacto. Waterman y Salazar (2011), no recomiendan el uso de materiales metálicos porque resultan muy pesados y el parámetro de velocidad del sonido que poseen es tan elevada que complica el proceso de medición de las diferencias de tiempo en el arribo de la onda de choque de impacto a los sensores de vibración. Otras alternativas como la madera, o derivados, no ofrecen una superficie de propagación uniforme. En un equilibrio entre el peso y la robustez para la resistencia de impactos proponen como mejores candidatos el foam board y el acrílico. Se seleccionó el acrílico, Figura 2.7, porque en comparación con el foam board es un material más fuerte y capaz de resistir más impactos de disparos con armas de aire comprimido. La velocidad de propagación del sonido teórica en el acrílico es de 2730 m/s.

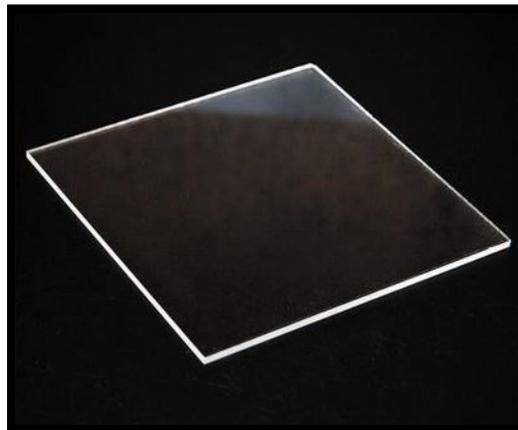


Figura 2. 7: Lámina de Acrílico. Tomado de Trademe (s.f)

Según Enríquez y Ortega (2015), los blancos más usados en los entrenamientos de tiro son los de anillos, también conocidos con el nombre de diana, este tipo de blanco posee diferentes zonas de puntaje divididas por circunferencias concéntricas las cuales tienen valores impresos que van del 1 al 9. La zona de mayor puntuación (10) se ubica en la parte central de la diana y se distingue de las demás porque no lleva ninguna marcación impresa.

El tamaño de la diana y los círculos se rigen de acuerdo a las normas establecidas por la ISSF (International Shooting Sport Federation). Las dimensiones que se usaron para este trabajo son las de un blanco cuadra de 500mm de largo x 500mm de ancho, el diámetro del círculo mayor es de 500mm y el ancho de cada zona entre los anillos concéntricos es de 25mm. Los diámetros de las circunferencias de cada zona se muestran en la Tabla 2.2 y una imagen del blanco en la Figura 2.8. Algo característico es que el centro lo conforman cuatro zonas de color negro que representan los lugares de mayor puntuación.

Tabla 2.2: *Diámetros de las zonas de puntuación del blanco*

Zonas	Diámetros	Zonas	Diámetros
10	50 mm	5	300 mm
9	100 mm	4	350 mm
8	150 mm	3	400 mm
7	200 mm	2	450 mm
6	250 mm	1	500 mm

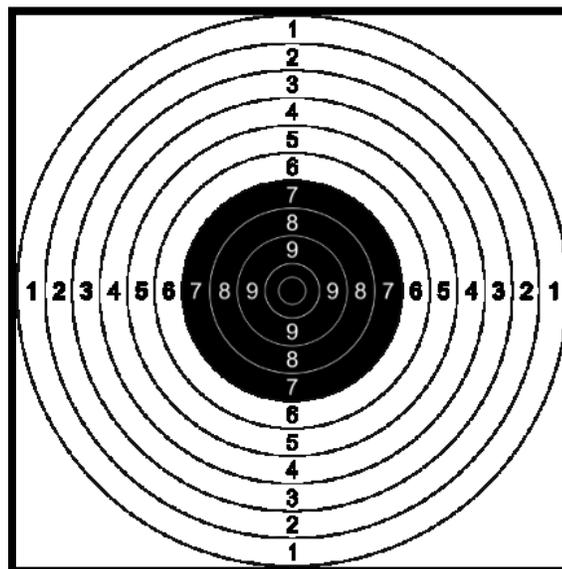


Figura 2. 8: *Blanco para entrenamiento en tiro seleccionado*

Otro factor importante en el diseño del blanco es la cantidad de sensores piezoeléctricos a usar y la posición que tendrá cada uno de ellos. Según la patente US n° 20090102129A1(2009), tres sensores, que generan 2 diferencias de tiempo en el arribo de la onda de choque, son la cantidad mínima necesaria para establecer el punto de impacto en el blanco. Es usual que en algunos diseños se usen más sensores para obtener mayor información referente al punto de impacto y mejorar la exactitud de los resultados, ejemplo de ello es uno de los diseños que se plantea en la patente US n° 20160305749A9(2016) donde se utilizan 8 sensores.

En la implementación de este prototipo se utilizaron 4 sensores piezoeléctricos colocados en las esquinas del blanco, igual que en el trabajo de Waterman y Salazar (2011). Se seleccionó esa forma de arreglar los sensores porque ofrece buenos resultados al contar con una cantidad de sensores mayor al mínimo requerido y es la alternativa de la cual se encontró información más clara, respecto a su implementación, en la revisión de literatura. En la Figura 2.9 se muestra como están ubicados los sensores (puntos rojos) en el blanco.

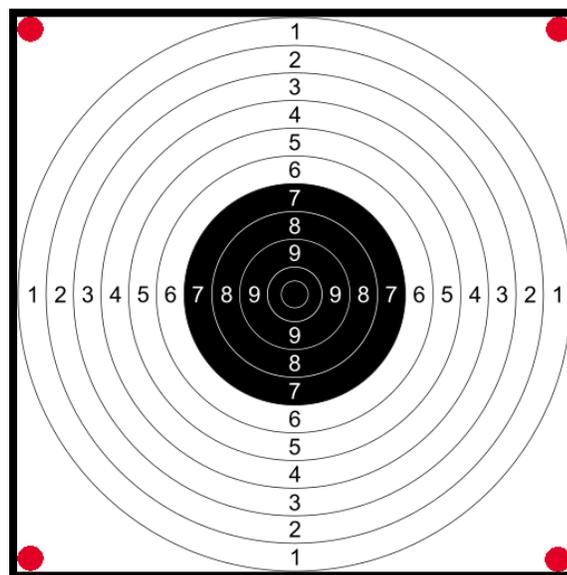


Figura 2. 9: Posición de los sensores piezoeléctricos

2.1.4 Determinación del microcontrolador para la medición de las TDAs

El microcontrolador recibe información, desde los sensores piezoeléctricos, del momento preciso en que la onda de choque de impacto arriba a cada uno de ellos y a partir de dicha información determina las correspondientes diferencias de tiempo en que se dan los arribos. Además, el microcontrolador tiene la función de enviar las diferencias de tiempo obtenidas, mediante comunicación serie usando el módulo UART, a un módulo XBee transmisor con el objetivo de que esa información llegue a la PC donde se realiza la determinación del punto de impacto y la asignación automática del puntaje correspondiente.

La exactitud en la determinación del punto de impacto depende de la velocidad de respuesta de los comparadores y la exactitud con la que se realizan las mediciones tiempo. Los temporizadores de un microcontrolador son unidades capaces de medir tiempo en base a una señal de reloj, comúnmente proviene del mismo oscilador interno o externo que se utiliza para el funcionamiento del microcontrolador. Las frecuencias de reloj elevadas ocasionan mayor consumo de energía, pero garantizan exactitud en las mediciones de tiempo por realizar con conteos en unidades más pequeñas. En el uso de un oscilador interno o externo también hay diferencias, los externos típicamente se implementan con un cristal de cuarzo y generan una señal de reloj más estable, favoreciendo a la exactitud de mediciones en tiempo, en comparación a los osciladores basados en un circuito RC que integran los microcontroladores. Para la adquisición y procesamiento efectiva de los resultados de la medición de las TDAs se requería un microcontrolador que contara con los siguientes recursos:

- 4 Comparadores internos.
- 1 Temporizador.
- Alta frecuencia de reloj.
- Oscilador externo.
- Comunicación UART.
- Bajo consumo de energía.

Existe una gran variedad de microcontroladores que cuentan con temporizadores de 8 y 16 bits, módulos de comunicación serie, tal como el módulo UART que son necesarios para implementación del sistema. El punto más sobresaliente que se tomó para la determinación del microcontrolador fueron los 4 comparadores internos que debía poseer. La familia de Microchip PIC16F178X son microcontroladores de 8 bits con núcleo de rango medio mejorado que se destaca particularmente por su gran variedad de periféricos analógicos. Específicamente se seleccionó el PIC16LF1786 por ser un microcontrolador de bajo consumo de energía que cuenta con 28 y en sus periféricos posee 4 comparadores internos con alta velocidad de respuesta (50ns), dos temporizadores de 8 bits y uno de 16 bits, un módulo de comunicación EUSART y soporta frecuencia de reloj externa de hasta 20MHz que puede ser elevada hasta 32MHz con un PLL interno del dispositivo.

2.1.5 Diagrama esquemático del circuito para medición de las TDAs

El circuito final encargado de realizar la medición de las diferencias de tiempo en el arribo de la onda de choque es mostrado en la Figura 2.10. Se compone de los terminal block J1, J2, J3 y J4 donde se conectan los sensores piezoeléctricos; también posee las cuatro etapas de acondicionamiento, una para cada sensor, basadas en el circuito integrado LM324 con las correspondientes resistencias y diodos zener; hay unos pin header etiquetados como DIN, DOUT, 5V y GND donde se conecta el módulo XBee transmisor de información; unos LED indicadores Enable, S1, S2, S3 y S4 que permiten monitorear la activación del sistema y de cada uno de los sensores al detectar un impacto; se incluye el cristal de cuarzo externo; finalmente, el microcontrolador seleccionado, PIC16LF1786, que incluye los comparadores, temporizador y módulo para comunicación UART.

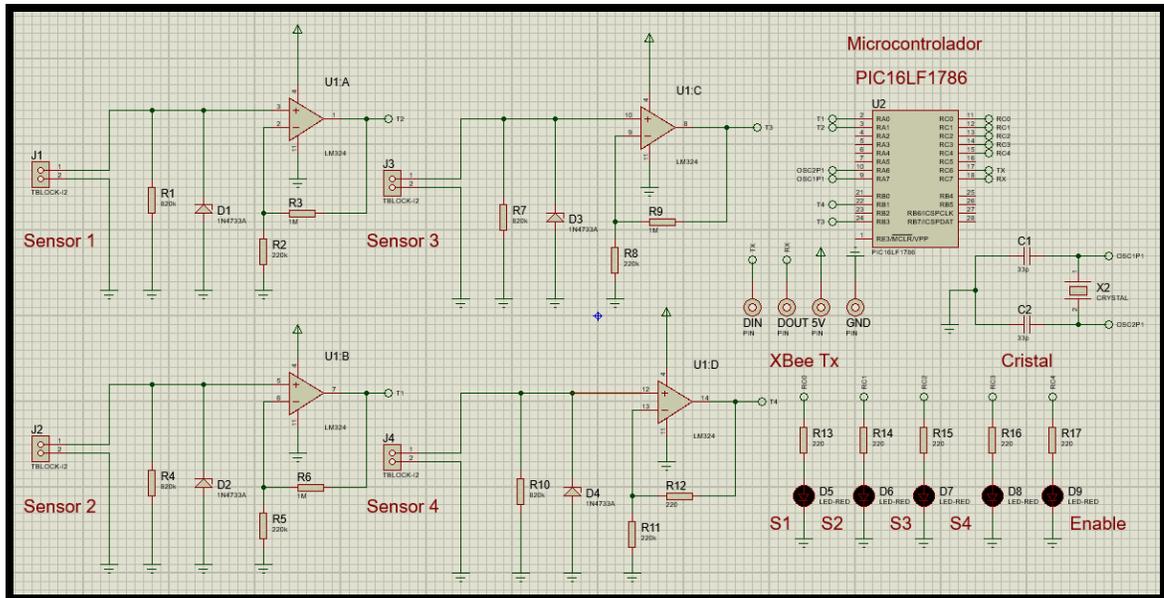


Figura 2. 10: Esquemático del circuito para medición de las TDAs.(Captura de Pantalla)

2.1.6 Fuente de alimentación para el circuito de medición de las TDAS

Un aspecto tomado en cuenta para la alimentación del circuito encargado de realizar las mediciones de las TDAs es que este se mueve junto con el blanco, se consideró por tanto un tipo de alimentación que le de independencia al sistema y evite inconvenientes a la hora de producirse el movimiento. De las alternativas a base de baterías se determinó como la más conveniente el uso de un **power bank**.

Los power bank son dispositivos que se han popularizado y masificado en producción por el hecho de ser muy usados para recargar la batería de equipos portátiles como smartphones y tablets. Se constituyen principalmente por una batería de litio acompañada de un circuito electrónico que regula el voltaje y corriente que suministra, pero que además permite recargar la batería. Las ventajas que más sobresalen de los power bank es que podemos encontrarlos en diseños pequeños y compactos, son fáciles de usar, y tienen un bajo costo en comparación a otras fuentes de alimentación con baterías recargables.

Los voltajes de operación de los componentes a usar en el circuito de medición de las TDAs son los que se muestran en la Tabla 2.3, con esa información se estableció suministrar un voltaje de 3.6V a todos los componentes por igual, ya que es un valor dentro de los tres rangos de la tabla. El voltaje de salida de un power bank es de 5V, por lo que fue necesaria un circuito regulador de voltaje para obtener en la salida el valor deseado.

Tabla 2. 3: *Voltaje de operación de componentes del circuito de medición de TDAs*

Componente	Voltaje de operación
PIC16LF1786	1.8V a 3.6V
LM324	Fuente simple: 3V a 32V
XBee ZB	2.7V a 3.6V

El regulador de voltaje se implementó usando el circuito integrado LM317, el diagrama esquemático se muestra en la Figura 2.11 donde las resistencias R1 y R2 configuran el voltaje de salida y los diodos D1 y D2 funcionan como protección ante cortocircuitos.

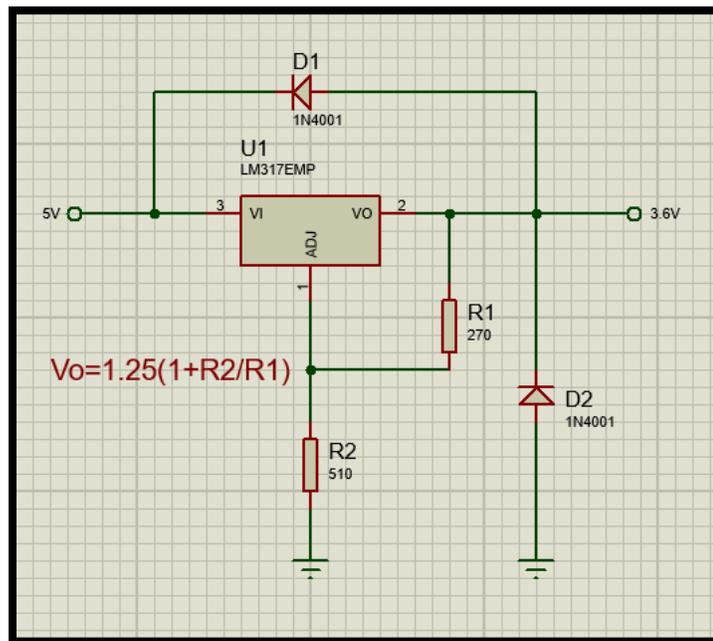


Figura 2. 11: *Circuito regulador de voltaje DC-3.6V.(Captura de Pantalla)*

2.1.7 Algoritmo para le medición de las TDAs

En la Figura 2.12 se muestra una imagen en la que el punto P representa el impacto de un proyectil en el blanco. Luego del impacto la onda de choque se propaga radialmente en la superficie y alcanza a los diferentes sensores piezoeléctricos, al alcanzar al sensor S1 inicia el proceso de temporización, cuando llega a S2 se obtiene la primera diferencia de tiempo $\Delta 1$ y se guarda, al llegar al sensor S4 se obtiene la segunda diferencia de tiempo $\Delta 2$ y se guarda, cuando llega al sensor S3 obtiene la tercera diferencia de tiempo $\Delta 3$ y se guarda, finalmente se detiene y retorna a cero el temporizador.

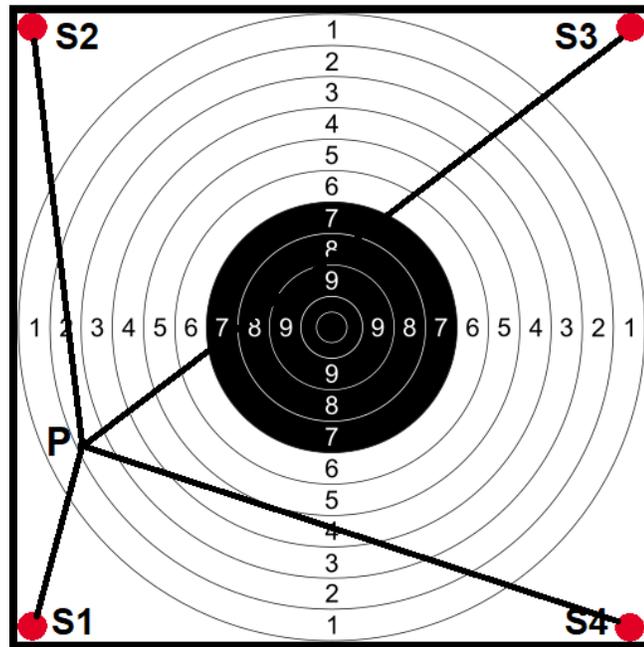


Figura 2. 12: Ejemplo de impacto de un proyectil en el blanco

Un aspecto en la detección de la onda de choque de impacto por los sensores es que este proceso no se hace en un orden específico y depende de la zona del blanco que recibe el impacto, en total hay ocho combinaciones en que pueden activarse los sensores. En la Figura 2.13 se resalta cada zona que genera un orden de activación específico para los sensores y en la Tabla 2.4 se detallan las combinaciones de activación de los sensores para cada zona.

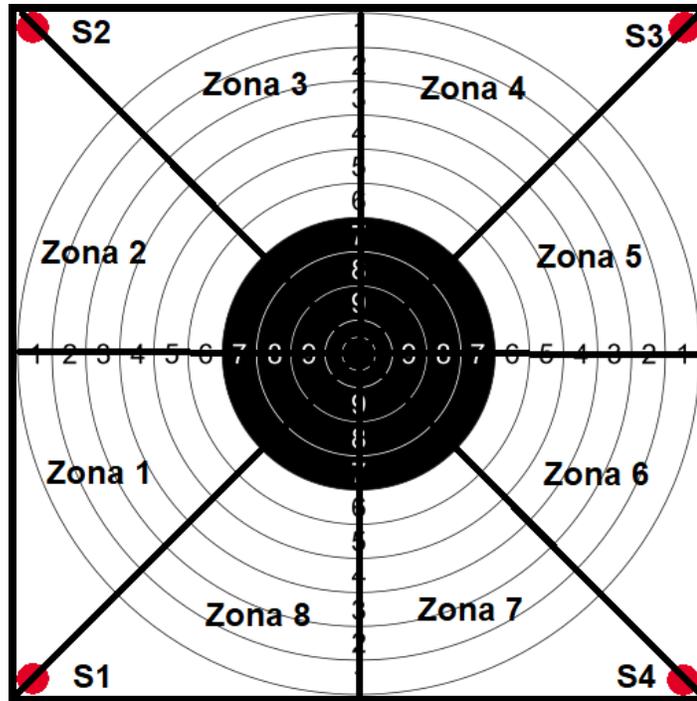


Figura 2. 13: Zonas de impacto en el blanco

Tabla 2. 4: *Combinaciones en la activación de los sensores para cada zona*

Zona	Orden de activación de los sensores
1	S1, S2, S4, S3
2	S2, S1, S3, S3
3	S2, S3, S1, S4
4	S3, S2, S4, S1
5	S3, S4, S2, S1
6	S4, S3, S1, S2
7	S4, S1, S3, S2
8	S1, S4, S2, S3

En la Figura 2.14 se muestra, mediante un flujograma, el algoritmo que ejecuta el programa que contiene el microcontrolador encargado realizar las mediciones de las TDAs. Luego del inicio se encuentra la configuración del dispositivo, puertos y periféricos que están en uso. Seguido a la configuración se hace la consulta de la activación de los diferentes comparadores y las acciones que se deben tomar

luego de la activación de cada uno de ellos. Para el primer comparador se usa el indicador C_i por el hecho de que cualquiera de los cuatro puede ser el primero en activarse y no existe un solo orden determinado. Los tres restantes comparadores también ocupan el indicador C_i porque son variables, pero se les va sumando una unidad para hacer referencia a que todos son diferentes y ninguno repite en activación.

Una de las últimas tareas del algoritmo es determinar la zona de impacto (de las 8 posibles) teniendo en cuenta el orden en que recibieron la señal los sensores S_1 , S_2 , S_3 y S_4 . Es un dato importante usado en la determinación del punto de impacto y por ello al final se transmite junto con las TDAs de forma inalámbrica hacia la PC donde se realiza el procesamiento final.

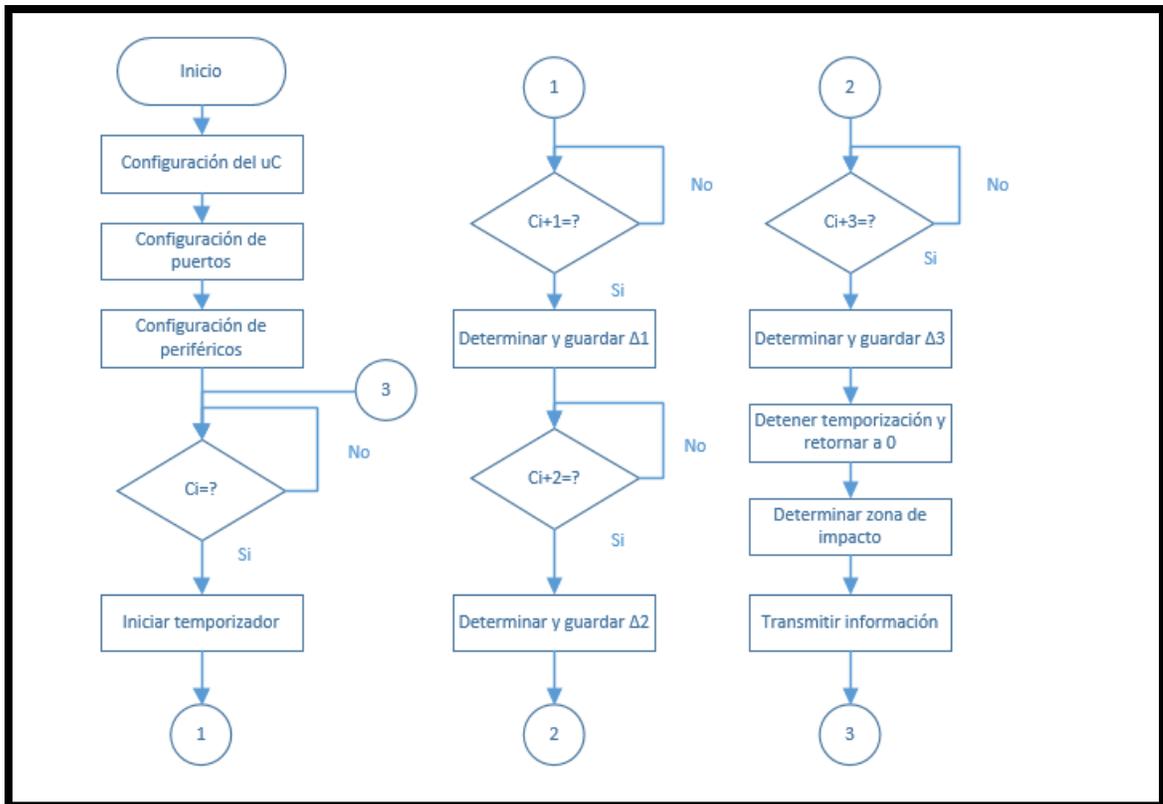


Figura 2. 14: Flujograma del programa encargado de la medición de las TDAs

2.1.8 Algoritmo para la determinación de los puntos de impacto

El algoritmo para la determinación de los puntos de impacto se basa en el flujograma de la Figura 2.15, es un programa que se ejecuta en una PC. Luego del inicio espera el momento en que se reciba la información proveniente del sistema de medición de las TDAs, al recibir esta información se establece la zona en la que se detectó el impacto del proyectil en el blanco. Las ecuaciones matemáticas que permiten determinar el punto de impacto (Anexo A) requieren ajustes específicos para cada zona y por eso es necesario efectuar el procedimiento anterior primero. Con la zona de impacto establecida se prosigue a ejecutar las ecuaciones matemáticas que determinan el punto de impacto con la correspondiente asignación de puntaje. La última fase es la visualización de los resultados y su almacenamiento en la base de datos, luego vuelve a repetirse el algoritmo.

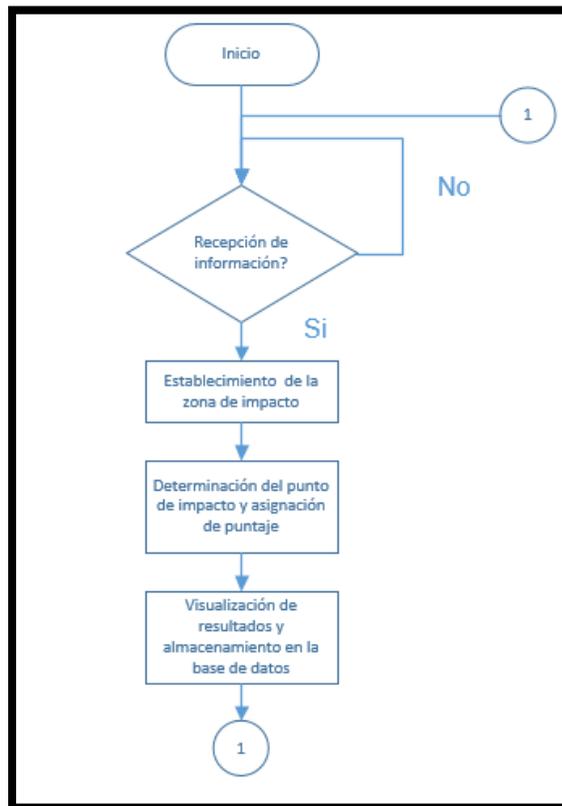


Figura 2 15: Flujograma del programa encargado de la determinación de los puntos de impacto y asignación de puntaje

2.1.9 Implementación del circuito impreso para la medición de las TDAs

El diseño del circuito impreso se realizó en el programa ARES del software Proteus. La ventaja de este programa es que se complementa con el ISIS de Proteus y permite que el PCB sea desarrollado a partir de los esquemáticos que también pueden ser usados para simulación. Las dimensiones de la tarjeta son de 11.5cm x 10cm, en la Figura 2.16 se aprecian las vista inferior y superior, tiene un tamaño compacto por ser una tarjeta que deberá moverse junto con el blanco. La implementación final fue hecha en una tarjeta de cobre a través del método de planchado para imprimir las pistas sobre la tarjeta y el uso de ácido nítrico para remover los excedentes de cobre.

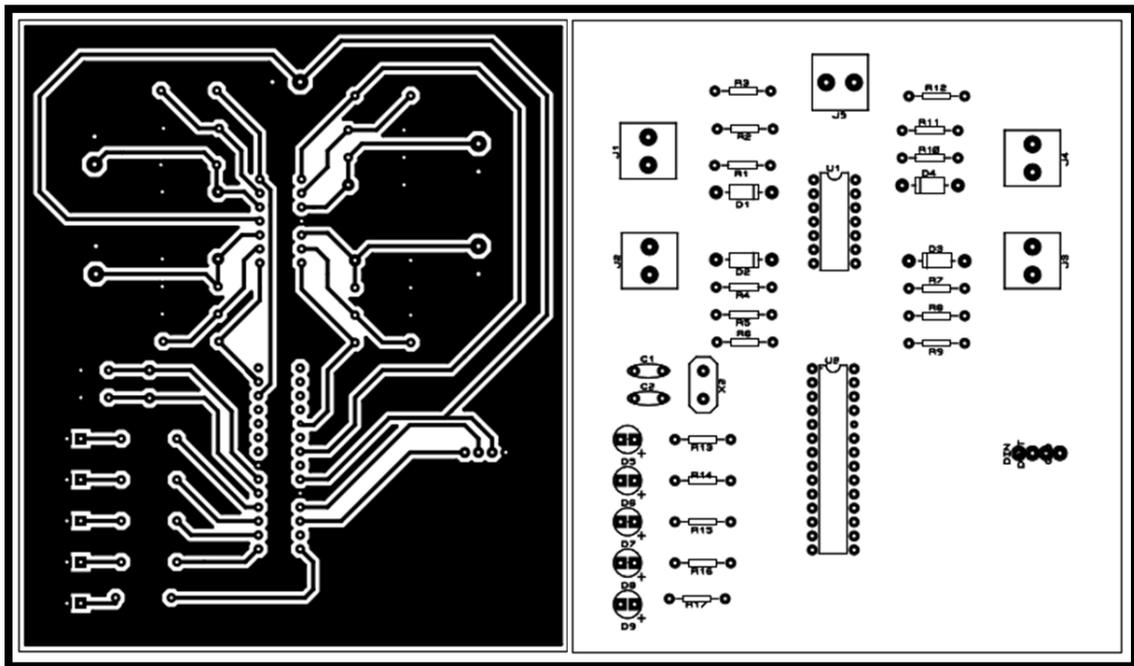


Figura 2. 16: Vista del plano inferior y superior del PCB para la medición de las TDAs.(Captura de Pantalla)

2.2 Sistema de control de movimiento

2.2.1 Estructura mecánica

La estructura mecánica mostrada en la Figura 2.17 está basada en su sistema de transmisión de movimiento rotatorio a lineal de tipo banda polea para el movimiento del blanco de forma horizontal y unas guías líneas a base de balineras de motocicleta para el soporte de blanco y reducción de la fricción en el desplazamiento.



Figura 2. 17: Estructura mecánica

2.2.2 Selección del motor PaP

La selección del motor PaP fue realizada de acuerdo con las siguientes condiciones y requerimientos de operación:

- Masa estimada de carga (Blanco, soporte, base, guías lineales) = 6Kg
- Velocidad máxima de operación = 1m/s
- Tiempo de aceleración =0.5s

En la Figura 2.18 se logra apreciar un diagrama en el que se representan las fuerzas que interactúan cuando se efectúa el movimiento del blanco, éstas son: la fuerza ejercida por el motor(F_M), la fuerza de fricción (F_f) y la fuerza de gravedad(F_g).

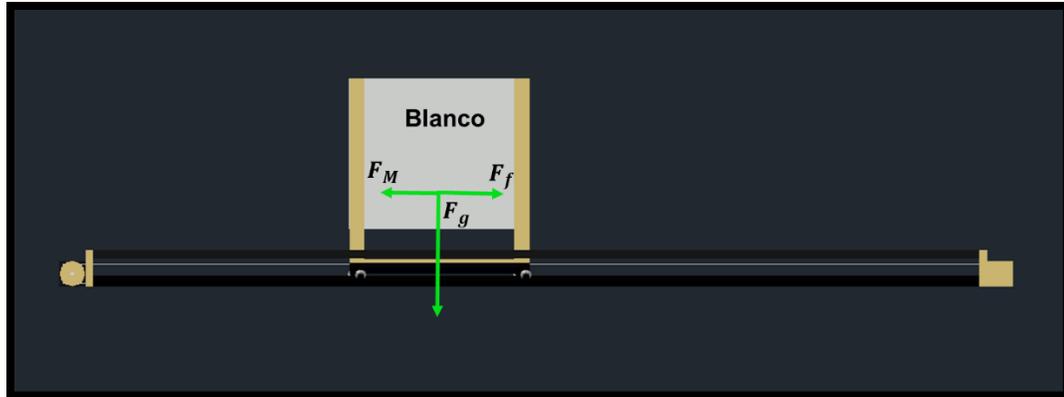


Figura 2. 18: Fuerzas que interactúan en el movimiento del blanco.(Captura de Pantalla)

El movimiento adecuado del blanco con los criterios de operación impuestos depende directamente de la cantidad de torque que el motor pueda suministrar. Para una selección correcta se procedió con el cálculo del torque que demanda esta aplicación. Según Oriental Motor(2018) la siguiente ecuación permite calcular el torque en este tipo de sistema de transmisión de movimiento.

$$T_M = (T_f + T_a)SF$$

T_M -Torque requerido.

T_f -Torque friccional.

T_a -Torque de aceleración.

SF -Factor de seguridad.

Los detalles del cálculo del torque son mostrados en el Anexo B. El resultado obtenido es que el torque requerido es de 3Nm. Se evaluaron los diferentes motores PaP disponibles en el mercado y se seleccionó el modelo 34HS31-5504S, Figura 2.19, que cumple de manera holgada con los requerimientos de torque buscados. En la Tabla 2. 5 están las características técnicas del motor. El margen de torque adicional que posee el motor lo hace útil para poder usarlo en alguna mejora donde el sistema mueva más peso de carga, alcanza mayor velocidad de operación y ofrezca un menor tiempo de aceleración.



Figura 2. 19: Motor paso a paso 34HS31-5504S. Tomado de STEPPERONLINE(s.f.)

Tabla 2. 5: *Características técnicas del motor PaP*

Motor PaP seleccionado	
Modelo	34HS31-5504S
Torque(Nm)	4.5
Corriente(A)	4.5
Voltaje (V)	2.2
Resistencia (Ohm/Fase)	0.4
Inductancia (mH/Fase)	3.5
Inercia(kg.cm ²)	1.4
Número de alambres	4
Peso(kg)	2.3
Longitud(mm)	80

2.2.3 Driver

El driver se estableció teniendo en cuenta las prestaciones del motor 34HS31-5504S. Al estudiar las ventajas y desventajas de las diferentes alternativas se concluyó que lo mejor era comprar uno de los que ya vienen listos para conectarlos y ponerlos a funcionar. Aunque no lo parezca termina siendo más barato y se reduce el tiempo de desarrollo del sistema. Se seleccionó específicamente el dispositivo ST-M5045, Figura 2.20, que cuenta con las siguientes características:

- Alimentación DC:24V-50V
- Corriente de salida: 1-4.5A
- Puede realizar micropasos.
- Protección contra: cortocircuito, sobrecalentamiento, sobretensión, sobrecorriente.
- Sistema limitador de corriente.
- Frecuencia máxima del pulso de entrada: 300KHz.
- Dimensiones: 120mm*92mm*33mm
- Peso: 280g
- Temperatura de trabajo:15-40°C
- Humedad de trabajo: <90%

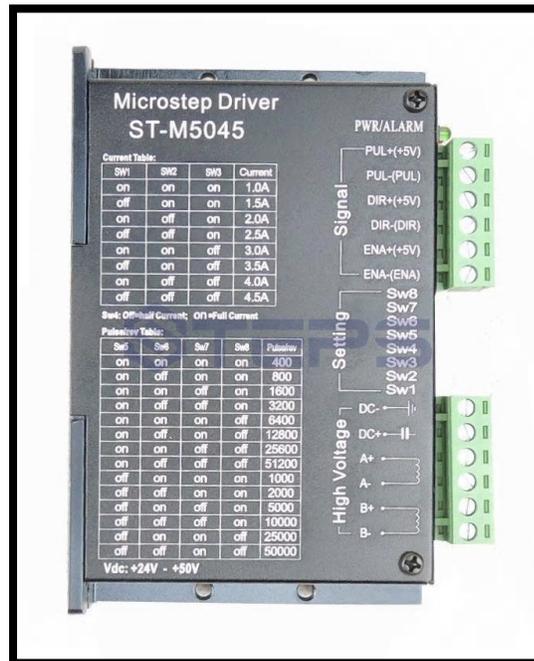


Figura 2. 20: Dispositivos ST-M5045. Tomado de AliExpress(s.f.)

El voltaje de alimentación del motor es de 2.2V y el ST-M5045 maneja valores en el rango de 24V a 50V. Aunque parece un problema, el driver con controlador integrado puede operar correctamente el motor ya que posee un sistema limitador de corriente. Bajo esas condiciones un motor paso a paso puede ser alimentado con tensiones mayores a las que su hoja de datos especifica (MCIElectronics, s.f.).

En la Figura 2.21 se muestra la forma de conectar el ST-M5045 con un microcontrolador para controlar un motor. Se destaca la fuente de alimentación DC, la conexión de las bobinas del motor (etiquetadas como bobina A y bobina B), y las siguientes entradas del driver con controlador integrado:

- PUL: frecuencia de reloj proveniente del microcontrolador que establece la velocidad de giro del motor.
- DIR: establece la dirección de giro del motor(+5V hacia un lado, 0V en reversa)
- ENA: habilitación del motor (+5V alimenta el motor, 0V no lo alimenta y queda libre)

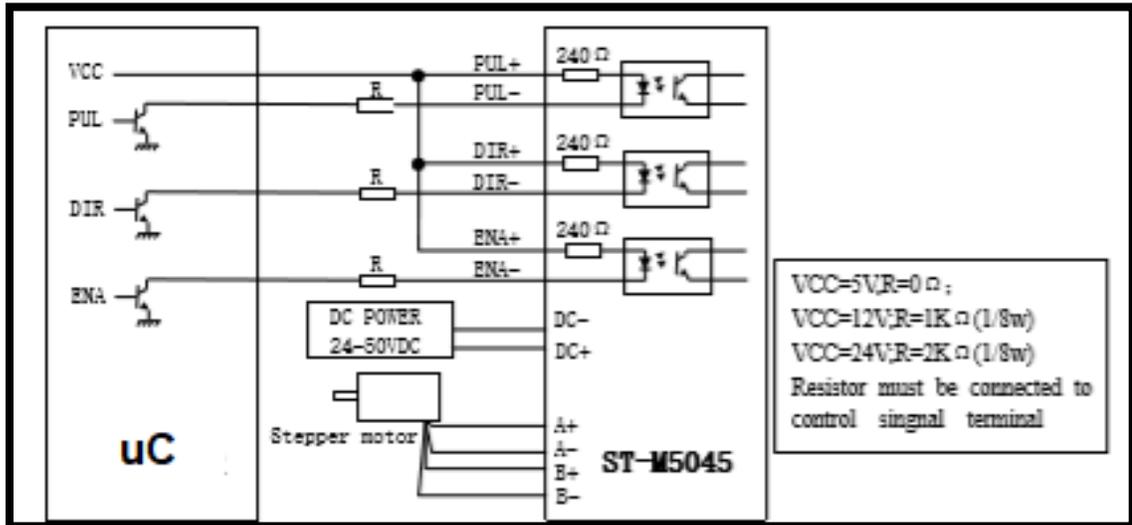


Figura 2. 21: Conexión de un microcontrolador con el ST-M5045

2.2.4 Determinación del microcontrolador para el control de movimiento

El microcontrolador es la unidad que define, de acuerdo con el programa que contiene, la forma en que trabaja el sistema de control de movimiento. Se encarga de generar las señales de control para el driver, interactúa con la interfaz local, recibe las señales de la interfaz remota por medio del módulo de comunicación inalámbrica y monitorea los finales de carrera. Para el manejo del driver debe generar dos señales digitales y una señal de reloj que establece la velocidad de

giro del motor. La interacción con la interfaz local requiere de 18 pines digitales disponibles para poder conectar los periféricos que la conforman, en la sección 2.3 se trata con más detalle esa etapa y se determina la utilización de una LCD20x4, un arreglo de 10 botones y un led indicador de activación del sistema. La comunicación inalámbrica involucra el establecimiento de una comunicación serial mediante el módulo UART con un módulo XBee. En el caso de los finales de carrera se necesitan dos entradas digitales. Una característica adicional para el microcontrolador seleccionado es que cuente con una alta capacidad de memoria porque debe contener rutinas de entrenamiento automáticas grabadas disponibles para ser usadas por los usuarios. En la siguiente lista se resumen los recursos con los que debe contar el microcontrolador seleccionado:

- 20 pines digitales
- Capacidad para generar una señal de reloj variable
- Módulo de comunicación UART
- Alta capacidad de memoria

De toda la gama de microcontroladores disponibles se seleccionó uno de Microchip por los conocimientos previos con los que se cuenta para manejarlos. Específicamente se determinó usar el PIC18F2520 que posee 28 pines de los cuales 25 pueden ser configurados como entradas o salidas digitales, un timer de 8 bits y 3 de 16 bits que pueden ser usados para generar señales de reloj variables mediante hardware, un módulo de comunicación UART y una capacidad de memoria de 32KB.

2.2.5 Finales de carrera

En la Figura 2.22 se presenta los finales de carrera electromecánicos que se utilizan en los extremos de la pista en la que se desplaza el blanco. Es un dispositivo de tres terminales con una común, otra normalmente abierta (NA) y una normalmente cerrada(NC).

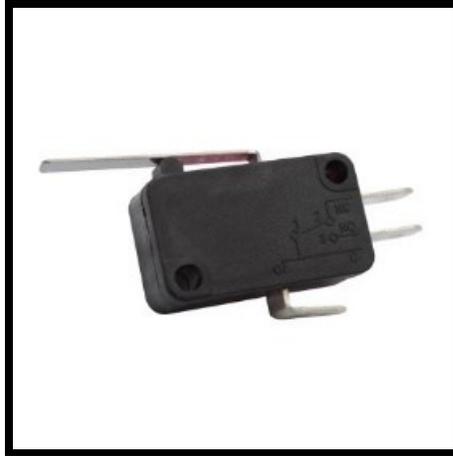


Figura 2. 22: Final de carrera electromecánico

Existen varias formas en que el final de carrera puede ser conectado al microcontrolador, en este caso se usa la mostrada en el diagrama esquemático de la Figura 2.23. El microcontrolador se encuentra conectado a una resistencia PULL UP de 10K y la terminal NC del final de carrera se encuentra libre por lo que el microcontrolador tiene en su entrada una señal digital en alto. El Terminal NA del final de carrera está conectado a tierra. Al activarse el final de carrera por la presencia del blanco y producirse la conmutación de NC a NA el microcontrolador tiene a su entrada una señal digital en bajo que es la que indica la realización de un cambio en la dirección de giro del motor.

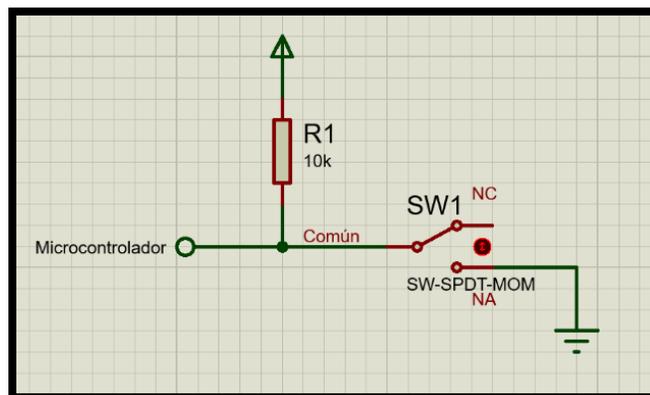


Figura 2. 23: Diagrama esquemático para la conexión de los finales de carrera.(Captura de Pantalla)

2.2.6 Diagrama esquemático del circuito de control de movimiento

El circuito final para el control de movimiento se aprecia en la Figura 2.24 y está dividido en varias secciones. La primera sección de la izquierda está dedicada a la conexión con los periféricos de la interfaz local, los pin headers de la parte superior son para conectarse a la LCD. Los pin headers restantes que no tienen nada que ver con la LCD tienen conexión con el circuito de la interfaz local (Sección 2.3) donde se encuentran los botones y el LED indicador de activación del sistema. Los pin header que cuentan con resistencias pull up son los que están dedicados para los botones, hay uno etiquetado con GND para la conexión de la tierra de los dos circuitos (Interfaz local y control), y la resistencia limitadora de corriente para el LED.

La sección superior central es para la comunicación por UART con el módulo XBee, se compone de 4 pin header que son para los datos de entrada, los datos de salida, VCC y GND. La sección de la derecha son 2 terminal blocks de 2 entradas conectados cada uno a tierra y al microcontrolador mediante resistencias pull up, se usan para la conexión de los finales de carrera. La sección inferior son 3 terminal block de 2 por donde se envían las señales de control para el driver, la conexión de cada uno de estos se basa en el diagrama de la Figura 2.21, una de las terminales se conecta a VCC y la otra al pin del microcontrolador.

En la parte central del esquemático se encuentra el microcontrolador PIC18F2520 el cual contiene el programa que define el funcionamiento del sistema. Este microcontrolador tiene la opción de funcionar con un oscilador interno, se utilizó esa opción para reducir hardware, aunque significa un aumento en el consumo de energía. La fuente de alimentación que se explica en la sección 2.2.7 no es una limitante para el uso del oscilador interno porque en este caso depende del suministro eléctrico comercial, no como cuando se utiliza baterías y se debe reducir al máximo el consumo energético.

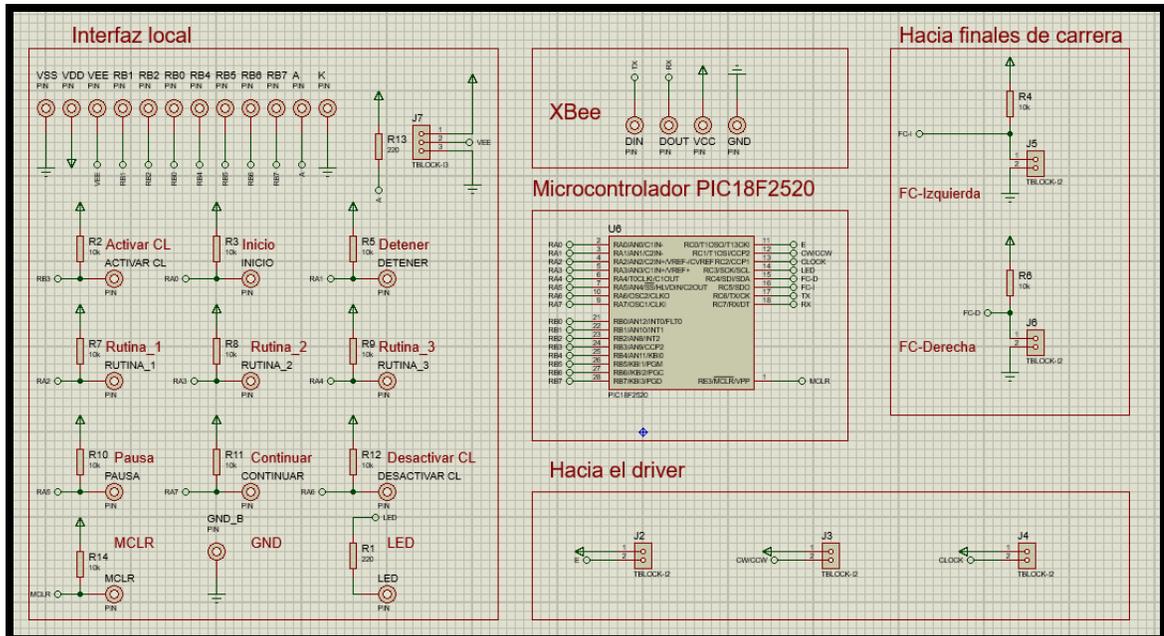


Figura 2. 24: Esquemático del circuito para el control de movimiento.(Captura de Pantalla)

2.2.7 Fuente de alimentación para el sistema de control de movimiento

La fuente de alimentación es una etapa que suministra la energía eléctrica para el funcionamiento del motor, driver y controlador. Las bobinas del motor se conectan al driver y es de este que reciben el voltaje y corriente apropiado para trabajar. Lo anterior quiere decir que suministrar energía eléctrica al driver también significa suministrar energía eléctrica al motor cuando ambos están conectados. El Driver ST-M5045 requiere un voltaje de entrada en el rango de 24V a 50V con una demanda de corriente máxima de 4.5A. En la circuitería de control por otra parte se deben suministrar 5V.

En este subsistema no se necesita de ningún tipo de fuente autónoma que le de independencia, se parte del suministro eléctrico comercial donde las tensiones de salida son de 120VAC o 220VAC. Para convertir el voltaje AC en DC hay diferentes tipos de convertidores y entre las más comunes se encuentran los convertidores lineales y los conmutados. En los dos tipos de fuente existe la posibilidad de desarrollarlo o comprarlo.

Se determinó usar una fuente comprada para minimizar el tiempo de desarrollo del sistema total, y por las ventajas que ofrece al contar con protección ante cortocircuitos y un sistema de control de temperatura on-off con un ventilador. Otro aspecto determinante en la selección es que construir un equipo con las mismas características de la fuente adquirida comercialmente tendría un costo mayor. El voltaje que suministra la fuente es de 24V, puede alimentar el driver sin problemas, un valor muy usado en la industria. La fuente se aprecia en la Figura 2.25 y sus características en la Tabla 2.6.



Figura 2. 25: Fuente DC de 24V

Tabla 2. 6: *Características de la fuente seleccionada*

Fuente DC seleccionada	
Voltaje de entrada	120VAC 60HZ Ó 220VAC 50Hz
Voltaje de salida	24VDC
Corriente de salida	15A
Número de salidas	3

Dado que los circuitos de control trabajan con 5VDC se implementó un circuito regulador de voltaje, Figura 2.26, usando el circuito integrado LM7805. Los diodos son protectores ante cortocircuitos y los capacitores eliminan ruido.

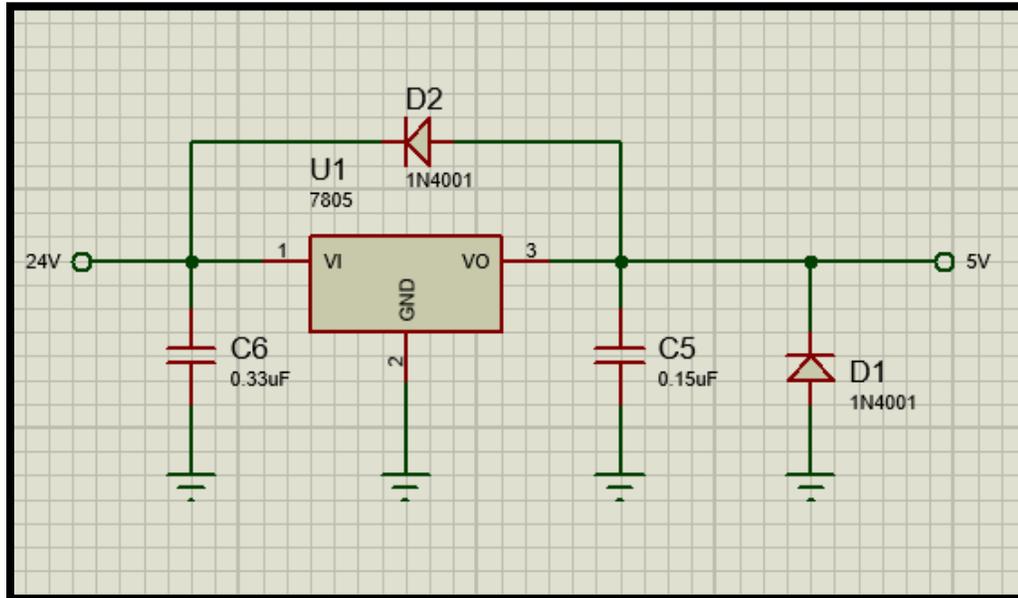


Figura 2. 26: Circuito regulador de voltaje DC-5V.(Captura de Pantalla)

2.2.8 Algoritmo de control de movimiento

El microcontrolador PIC18F2520 contiene el programa que define la funcionalidad del sistema de control de movimiento. El algoritmo de ese programa se muestra en el diagrama de la Figura 2.27. Luego del inicio, se debe seleccionar entre las dos alternativas; efectuar un control local o un control remoto, el primero a través de la interfaz local y el segundo mediante la comunicación inalámbrica con la interfaz remota. Al escoger el control local hay tres rutinas automáticas que se pueden ejecutar. El objetivo de esas rutinas es poner en marcha el sistema sin que estén personas manipulándolo y garantizar así la seguridad de estas mismas. Después de seleccionar cualquiera de las tres rutinas se requiere que se dé la orden de inicio y mientras la rutina se ejecuta es posible ponerla en pausa, en este caso se debe presionar continuar para proseguir con la ejecución, o detenerla y regresar al menú de selección de rutinas. Estando en este último menú se puede dar una orden para regresar al inicio.

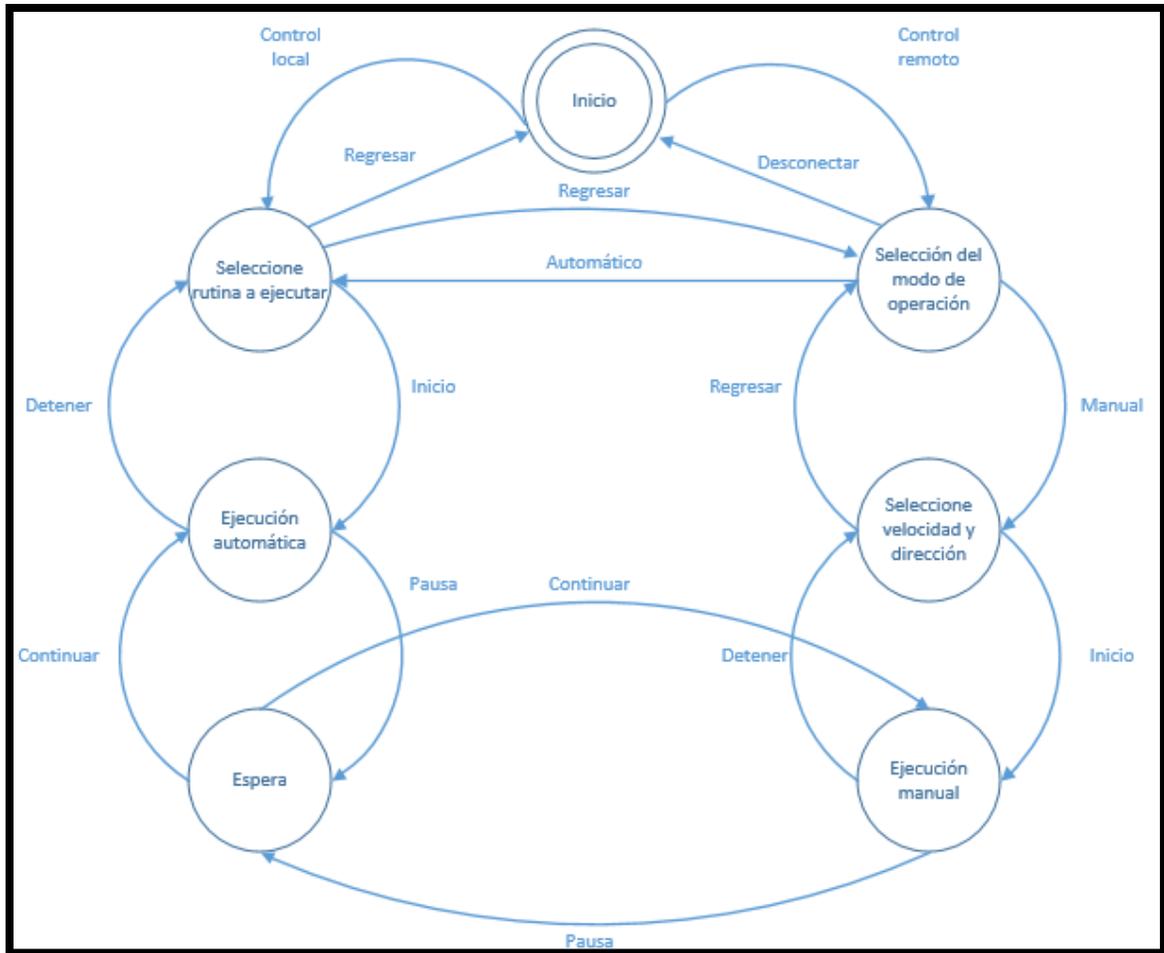


Figura 2. 27: Diagrama del programa para el control de movimiento

Si se escoge el control remoto se puede operar con el modo automático, al igual que en el control local, o en modo manual. En el modo de operación manual el usuario debe seleccionar la velocidad, de tres disponibles, y dirección de desplazamiento. Con la orden de inicio se pone a trabajar el sistema, manteniendo siempre la posibilidad de cambiar la dirección y velocidad de desplazamiento en cualquier momento, el propósito es poder ejecutar rutinas totalmente aleatorias y a como el usuario lo desee. Durante la ejecución manual también puede establecerse una pausa o detenerse para regresar al menú de selección de velocidad y dirección de inicio. En este último punto se puede dar la orden regresar para volver a escoger el modo de operación y finalmente después de regresar se puede dar la orden de desconectar para retornar al inicio.

2.2.9 Implementación del circuito impreso para el control de movimiento

El diseño de esta tarjeta también se elaboró en el programa ARES de Proteus. En la Figura 2. 28 se observa la vista inferior y superior de la tarjeta. El tamaño es de 10cm x 15cm, suficiente espacio para la distribución de los diversos componentes. Los terminal block y pin headers se ubicaron de tal forma que se facilitara la conexión con el motor, finales de carrera, LCD, botones, LED de activación del sistema y fuente de alimentación. Para la implementación se recurrió nuevamente al método de planchado para imprimir las pistas sobre la tarjeta y el uso de ácido nítrico para remover los excedentes de cobre.

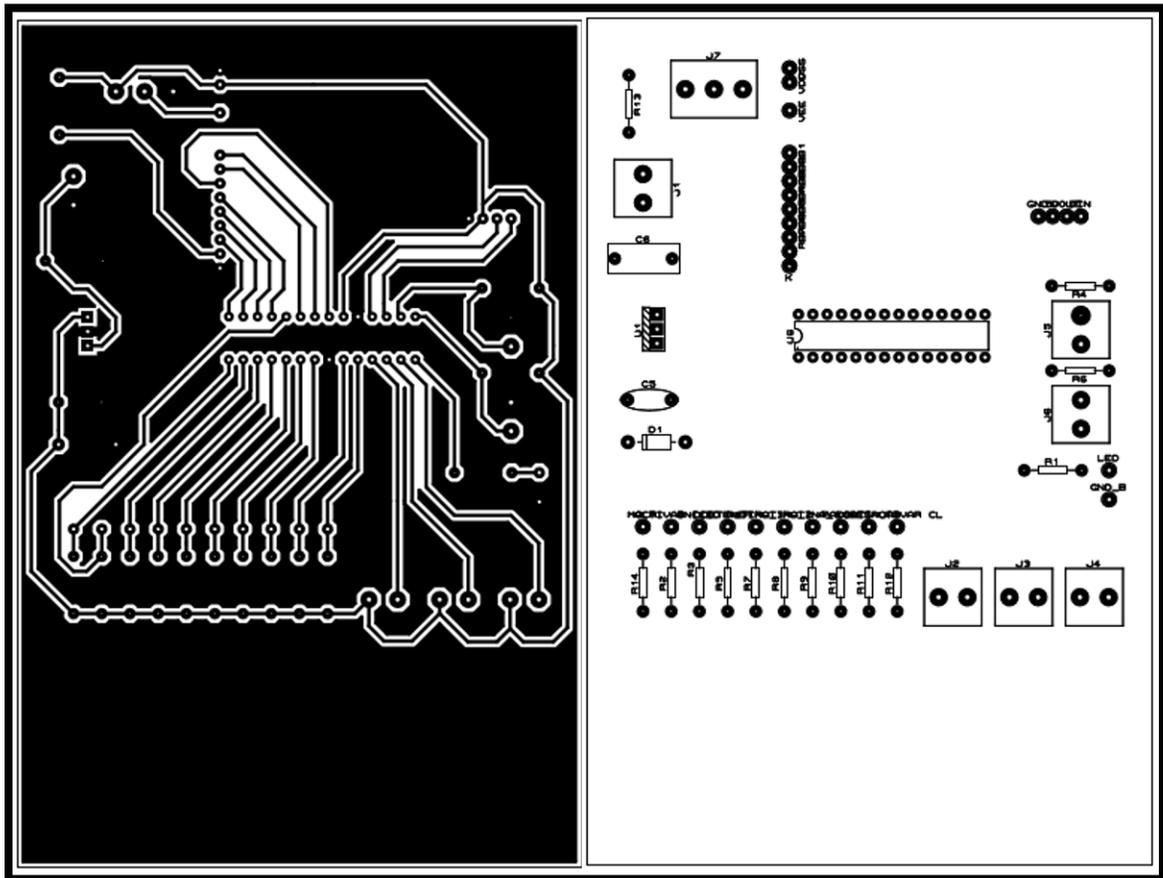


Figura 2. 28: Vista del plano inferior y superior del PCB para el control de movimiento.(Captura de Pantalla)

2.3 Interfaz Local

La interfaz local es el medio que permite el control del sistema a través de un panel donde están integrados 10 pulsadores, un led indicador de encendido del sistema y una LCD. Todos interactúan con el controlador del sistema de control de movimiento enviando o recibiendo información para establecer la configuración requerida.

Es un respaldo ante la situación de no contar con una PC en ese momento. El sistema de control de movimiento funcionará con rutinas automáticas programadas para tres niveles de complejidad, tomando como consideración principalmente la velocidad y dirección de desplazamiento del blanco sobre la pista.

2.3.1 LCD

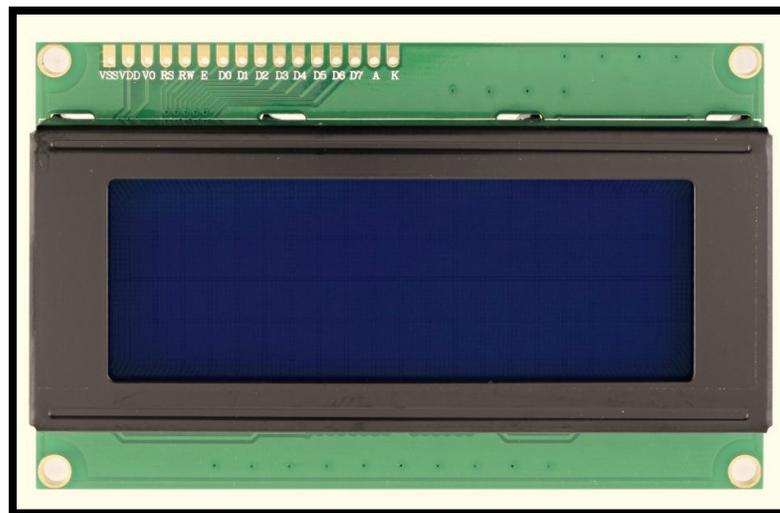


Figura 2. 29: LCD

La LCD, Figura 2.29, se usa para configurar el prototipo y monitorear su funcionamiento. Se muestran varios mensajes, inicialmente el modo de control seleccionado (remoto o local) que es el primer factor a considerar para continuar con la configuración. Se seleccionó una pantalla de cristal líquido de 20 caracteres por 4 líneas, configurada en modo de 4 bits que requiere el uso de 11 de sus 16 pines, Figura 2.30, para la alimentación, habilitación, datos, lectura y escritura.

PIN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
NAME	VSS	VDD	VO	RS	R/W	E	DB0	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	A	K

Figura 2. 30: Asignación de pines de la LCD

Parameter	Symbol	Condition	Stand value			UNIT
			Min.	Typ.	Max.	
Supply Voltage for Logic	$V_{DD}-V_{SS}$	-	4.5	5.0	5.5	V
Supply Voltage for LCD	$V_{DD}-V_o$	-	-	4.7	-	V
Input Logic HIGH	V_{IH}	-	2.2	-	V_{DD}	V
Input Logic LOW	V_{IL}	-	-0.3	-	0.6	V
Output Logic HIGH	V_{OH}	$-I_{OH}=0.2mA$	2.4	-	-	V
Output Logic LOW	V_{OL}	$I_{OL}=1.2mA$	-	-	0.4	V
Power Supply Current without backlight	V_{DD}	$V_{DD}=5.0V$	-	2.0	5	mA
Power Supply Current with backlight	I_{LED}	$V_{LED}=5.0V$	-	72	80	mA

Figura 2. 31: Parámetros eléctricos de la LCD

La Figura 2.31 muestra los parámetros eléctricos que se encuentran en la hoja de datos del fabricante, tomados en consideración para un buen funcionamiento del dispositivo. La LCD está conectada en el puerto B del microcontrolador, tal como se observa en la Figura 2.32.

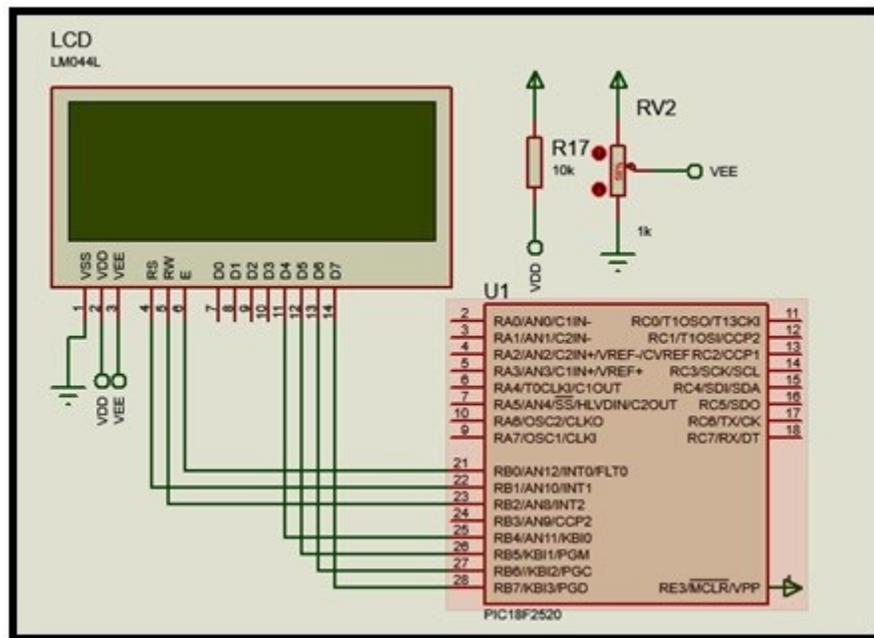


Figura 2. 32: Esquemático de conexión de la LCD con el controlador.(Captura de Pantalla)

2.3.2 Botones

Para establecer la configuración del sistema de control de movimiento se requirió de 10 botones. Se usan para habilitar o deshabitar el modo de control local como primer parámetro, para seleccionar las rutinas automáticas e igualmente para iniciar, pausar o detener el desplazamiento del blanco sobre la estructura. El botón restante es el master clear que está habilitado para reiniciar el microcontrolador en caso de que se presente alguna falla durante la ejecución del programa.

En el esquemático, ver Figura 2.33, se puede notar que los botones están conectados al controlador utilizando resistores de pull up externos, un método muy usado en electrónica digital que en nuestro prototipo es importante para definir correctamente el voltaje de entrada en los pines del microcontrolador donde se conectan los botones y así obtener una lectura correcta.

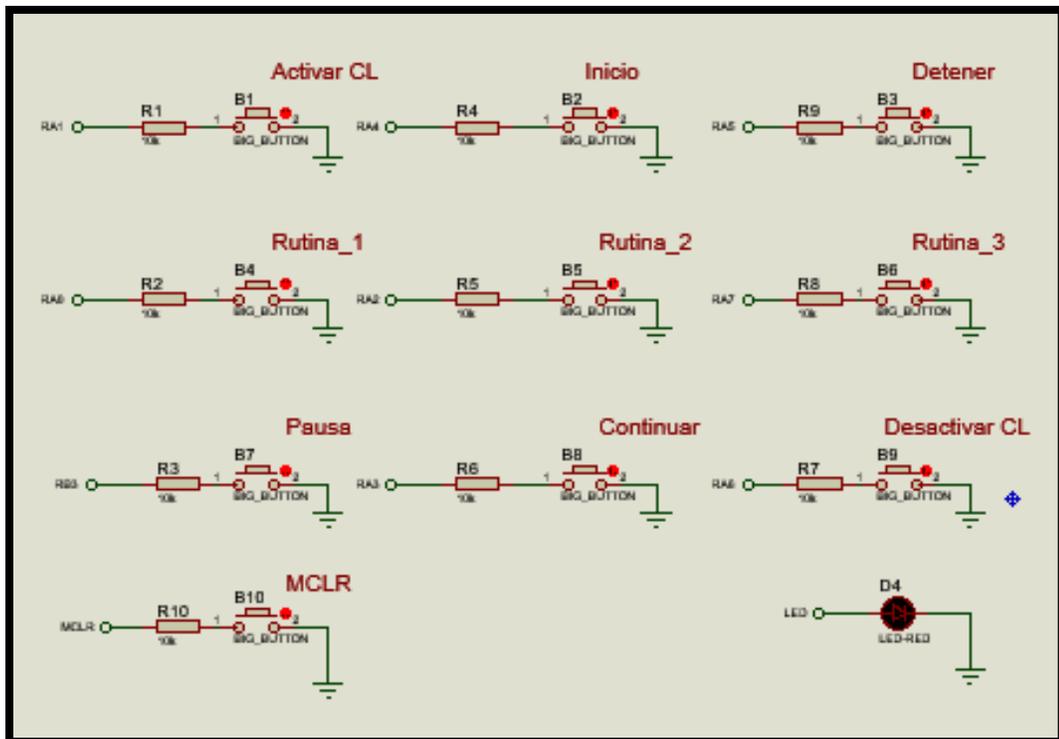


Figura 2. 33: Esquemático de conexiones de los pulsadores.(Captura de Pantalla)

2.3.3 Implementación del circuito impreso de la interfaz local

La interfaz local fue implementada en una placa de circuito impreso desarrollado en el software de diseño de PCB y herramientas de simulación integradas, Proteus 8 Professional que está formado por dos programas principales, ISIS y ARES. La tarjeta tiene un tamaño de 10 cm x 10 cm, ver Figura 2.34, donde están distribuidos los 10 pulsadores y el diodo indicador de encendido del sistema de control de movimiento. La construcción de la PCB se efectuó mediante el método del planchado, posteriormente se ubicaron los componentes para soldar sus terminales. Una vez completado este paso se realizaron las pruebas mediante su conexión a los pines de entrada del microcontrolador y a la vez visualizando en la LCD los parámetros ajustados para determinar su correcto funcionamiento.

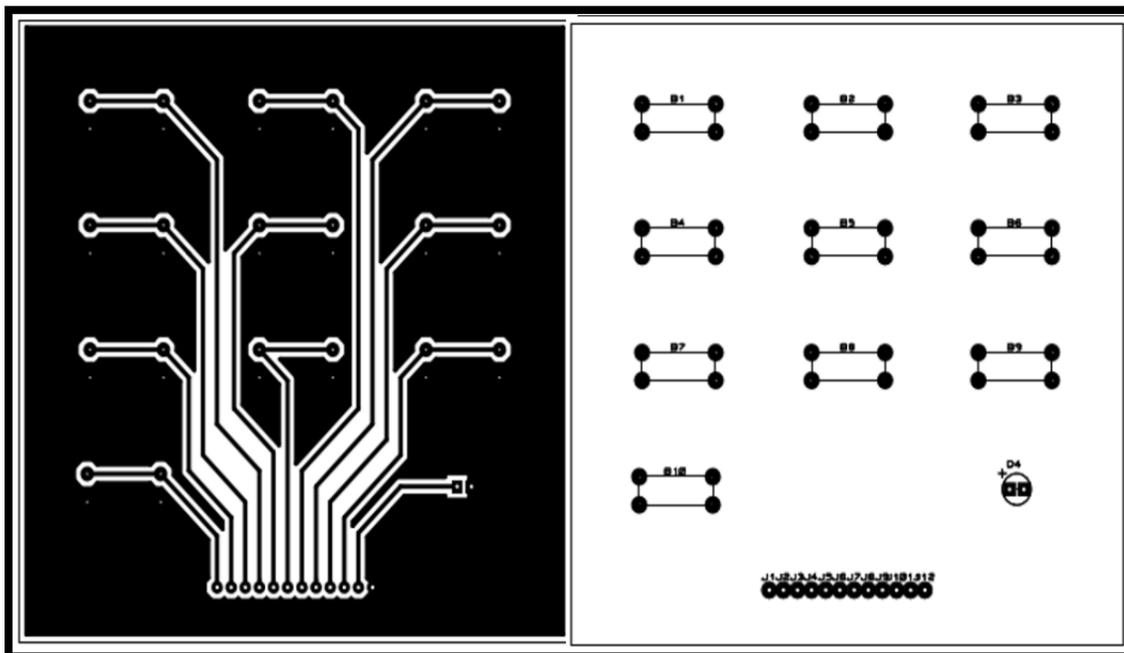


Figura 2. 34: Vista del plano superior e inferior de la PCB de la interfaz local.(Captura de Pantalla)

2.4 Comunicación Inalámbrica

2.4.1 Módulos XBee

Para el sistema de comunicación inalámbrica se usaron módulos XBee de la empresa Digi, que, según su descripción en la hoja de datos, son soluciones integradas que brindan un medio inalámbrico para la interconexión entre dispositivos, algunos de ellos basados en el protocolo ZigBee IEEE 802.15.4, para crear redes punto a multipunto o bien para redes punto a punto. Están diseñados para aplicaciones que requieren un buen tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible. El protocolo ZigBee facilita a los dispositivos electrónicos realizar sus comunicaciones inalámbricas con un bajo consumo de energía siendo muy útil para redes de sensores en entornos industriales, médicos y de domótica.

Considerando las múltiples ventajas del protocolo, se realizó un análisis de los módulos XBee basados en ZigBee, estos se clasifican en series o familias las cuales son: serie 1, serie 2 (XBee Znet 2.5, ZB, 2B), serie 3 y 900MHz (XSC). Una ventaja es que todos los dispositivos tienen la misma configuración de pines, la alimentación, tierra y los pines de comunicación TX/RX se encuentran en el mismo lugar permitiendo que puedan intercambiarse en la mayoría de aplicaciones básicas, siempre que sean de la misma familia. Para la implementación del sistema fue seleccionado el módulo XBee ZB, Figura 2.35, de la serie 2. Sus características principales son las siguientes:

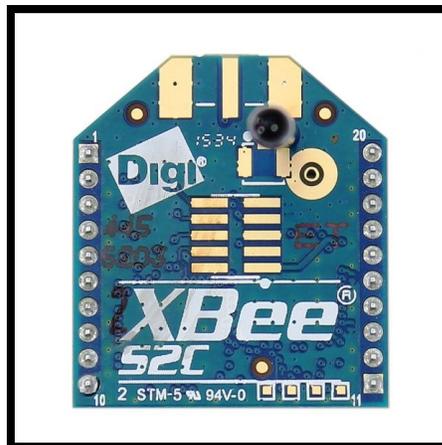


Figura 2. 35: Módulo XBee ZB

- Velocidad de transmisión de datos: 250 kbps
- Potencia de transmisión: 3.1 mW (+5 dBm) / 6.3 mW (+8 dBm) boost mode
- Voltaje de alimentación: 2.1V a 3.6V
- Rango: hasta 60 m en interiores/zonas urbanas – hasta 1200m en áreas despejadas con línea de vista.

Para utilizar estos módulos se usaron otros elementos auxiliares para que interactuaran con el resto del sistema y para que se pudieran configurar utilizando el software X-CTU. Los elementos auxiliares son los siguientes:

- El XBee Explorer Regulated, Figura 2.36, garantiza los 3.3 V con los que trabaja el XBee y además posee indicadores de actividades básicas (Encendido, LEDs de actividad en los pines DIN/DOU).

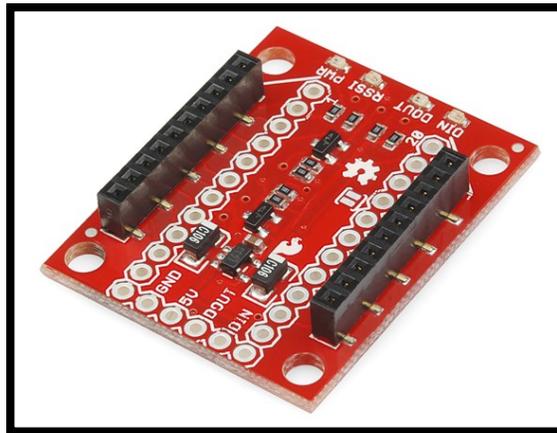


Figura 2. 36: XBee Explorer Regulated. Obtenido de SparkFun Electronics

- El XBee Explorer Dongle, Figura 2.37, que permitió conectar un módulo XBee directamente en un puerto USB del PC. Esta tarjeta posee un convertidor de datos USB a TTL que traduce los datos entre la computadora y el módulo XBee.

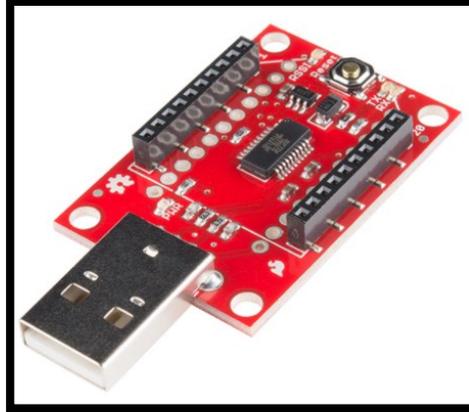


Figura 2. 37: XBee Explorer Dongle. Obtenido de SparkFun Electronics

2.4.2 Elementos de la Red

Una red ZigBee está formada por 3 tipos de elementos, un dispositivo coordinador, dispositivos router y dispositivos finales (end devices), a continuación, se explica la función de cada elemento.

Coordinador: Es el encargado de crear la red, establecer el canal de comunicaciones y el identificador de red (PAN ID), donde luego de haber establecido esos parámetros pueden unirse a la red dispositivos router y end devices. Una vez ya formada la red el coordinador participa en el enrutador de paquetes y es fuente y/o destino de información (Oyarce, Aguayo, & Eduard, 2010).

Router: Crea, mantiene información sobre la red y determina la mejor ruta para transmitir un paquete de información. Para lo anterior es preciso que el router este unido a la red y actuar como enlace retransmitiendo paquetes para otros routers o end devices (Oyarce, Aguayo, & Eduard, 2010).

End Device: Son los módulos que se conectan con nuestros sensores o actuadores, se caracterizan porque no pueden enviar información directamente a otro end device por no tener la capacidad de enrutar paquetes. Siempre interactúan a través de su nodo padre ya sea un coordinador o un router (Oyarce, Aguayo, & Eduard, 2010).

El sistema de comunicación inalámbrica del prototipo, Figura 2.38, está formado por un módulo coordinador ubicado en la PC y dos módulos end devices, el que está ubicado cerca del blanco transmite los datos del sistema de medición de las TDAs hacia la PC y el otro módulo ubicado en el sistema de control de movimiento, recibe desde la PC los ajustes para poner en marcha el movimiento del blanco sobre la pista.

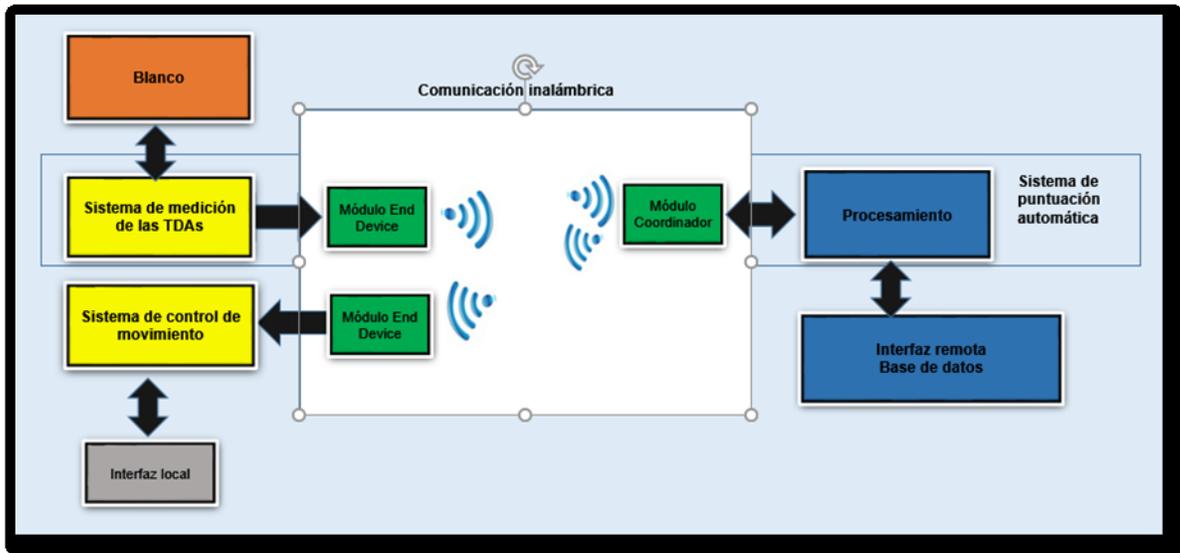


Figura 2. 38: Red inalámbrica del prototipo

2.4.3 Parámetros de configuración

Para la red establecida tenemos un módulo coordinador, un módulo end device transmisor (ubicado en el sistema de medición de las TDAs) y otro módulo end device receptor (ubicado en el sistema de control de movimiento), ver Figura 2.39. Según la descripción anterior la topología de red diseñada para el prototipo son 2 conexiones punto a punto que se conforman entre el coordinador y los dispositivos finales.

Para establecer la comunicación se usó el programa XBee Configuration and Test Utility (XCTU), que permite interactuar con los módulos mediante una interfaz gráfica, ver Figura 2.40. Esta aplicación incluye herramientas que hacen muy sencillo configurar y probar los módulos XBee.

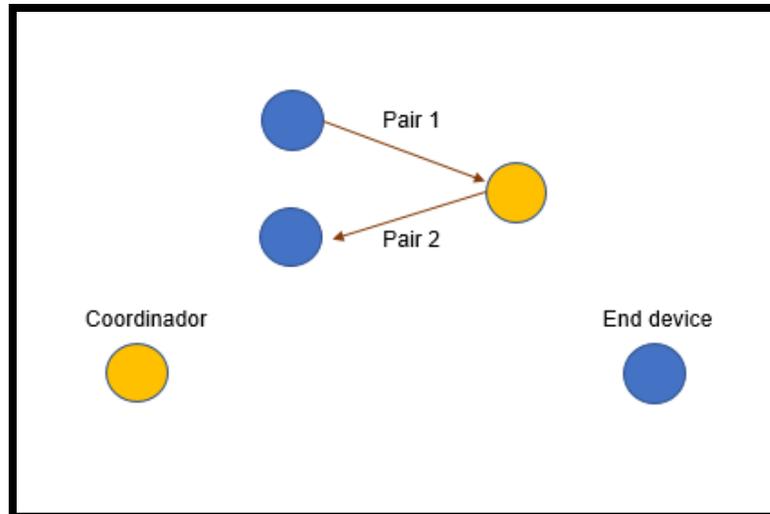


Figura 2. 39: Topología de la red inalámbrica

Existe una gran cantidad de parámetros para configurar la red, pero dentro de ellos de mayor importancia para establecer la conexión entre los módulos son el PAN ID (ID) que es el identificador de red, el canal (CH), ambos establecidos por el módulo coordinador al crear la red y en la configuración del direccionamiento de red, ver Figura 2.40, está la parte alta de la dirección de destino (DH) y la parte baja de la dirección de destino (DL) con los que se especifica el módulo hacia donde se transmitirán los datos. Lo anterior se efectúa para evitar interferencias de otras transmisiones.

En la Figura 2.40 se observa la configuración del módulo coordinador, usado como referencia en las configuraciones para los módulos siguientes, donde se establece el mismo identificador de red (ID PAN), el mismo canal (CH), en este caso es el canal 19, y el Parámetro Coordinator Enable (CE) para definir al módulo como coordinador de red, se deshabilita por ser dispositivos finales (end device). En la Figura 2.41 se muestra el direccionamiento de red establecido para el módulo coordinador, donde se configura para transmitir información hacia el módulo end device ubicado en el sistema de control de movimiento, aquí se establece el primer enlace punto a punto

Así mismo el direccionamiento de red configurado en el módulo end device transmisor del sistema de medición de las TDAs, ver Figura 2.42, se establece el segundo enlace punto a punto, direccionando los datos hacia el modulo coordinador ubicado en la PC.

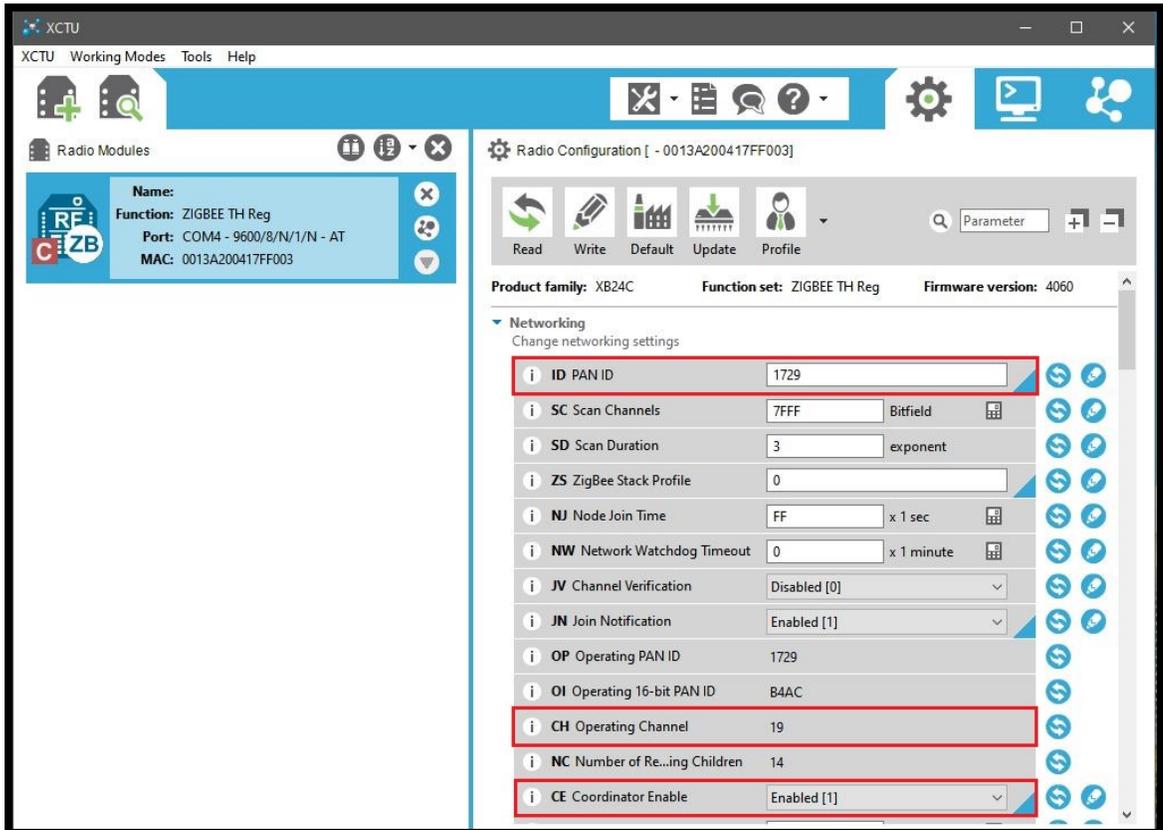


Figura 2. 40: Creación de la red mediante el módulo coordinador(Captura de pantalla)

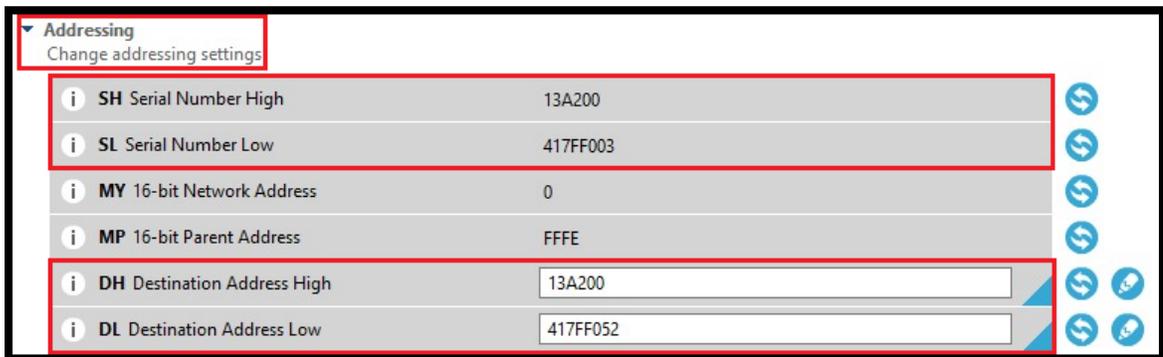


Figura 2. 41: Direccionamiento de la red en el módulo coordinador(Captura de pantalla)

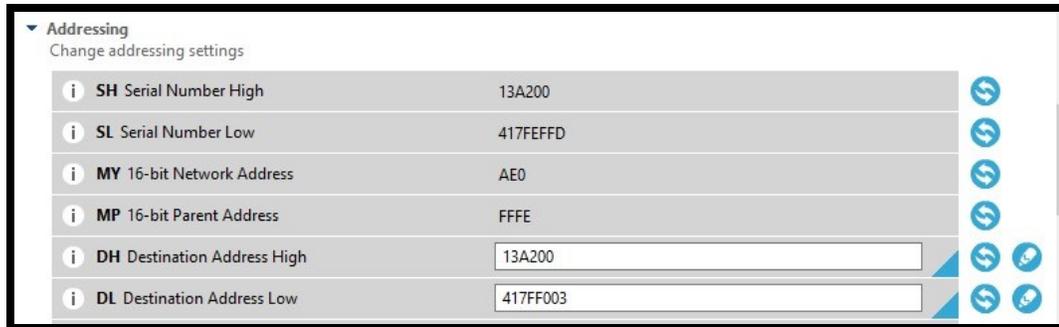


Figura 2. 42: Direcccionamiento de la red en el módulo end device del sistema de medición de las TDAs(Captura de Pantalla)

En las imágenes anteriores se observa que los módulos trabajan con el modo de conexión transparente que viene por defecto y es la más sencilla de configurar, básicamente todo lo que pasa por el puerto UART (DIN, Pin3) se envía al módulo deseado, y lo recibido en el módulo, es enviado devuelta por el mismo puerto UART (DOUT, pin 2).

2.5 Interfaz Remota y Base de Datos

La interfaz remota fue desarrollada con los siguientes objetivos:

- Permitir a los usuarios configurar el sistema de control de movimiento.
- Crear y/o administrar cuentas de usuarios.
- Visualizar en tiempo real los impactos sobre el blanco en la PC.
- Crear un historial para observar la curva de aprendizaje del tirador según los resultados obtenidos durante cada sesión de entrenamiento.

La interfaz remota tiene una ventana de inicio de sesión donde el usuario debe usar sus credenciales usuario y contraseña para acceder a todas las funciones, si no tiene una cuenta, en la misma ventana esta un elemento LinkLabel, ver Figura 2.43, con el nombre Crear Cuenta, con el que se abre una nueva ventana que contiene los campos para crear la cuenta de usuario, Figura 2.44. Esto es necesario porque para usar la interfaz, la persona debe estar registrado en la base de datos. Los datos para crear la cuenta se almacenan en una tabla llamada “users” que se encuentra en el esquema “database”. La Figura 2.45 muestra la tabla mencionada anteriormente.



Figura 2. 43: Ventana de inicio de sesión. (Captura de pantalla)



Figura 2. 44: Ventana para crear cuenta de usuario.(Captura de pantalla)

	id	usuario	contraseña	tipodeu	nombre	apellidos	ag
▶	1	yader	2019	a	Yader	Ortiz Cerda	22
	2	Luis	2019	a	Luis	Guevara Cerda	22
	3	AM	123	A	Alejandro	Mendez	57
	4	ceci2019	81871510	U	Cecilia	Cruz	14
	6	angelor	2019	u	Angel	Ortiz	17

Figura 2. 45: Tabla de usuarios registrados en la base de datos.(Captura de Pantalla)

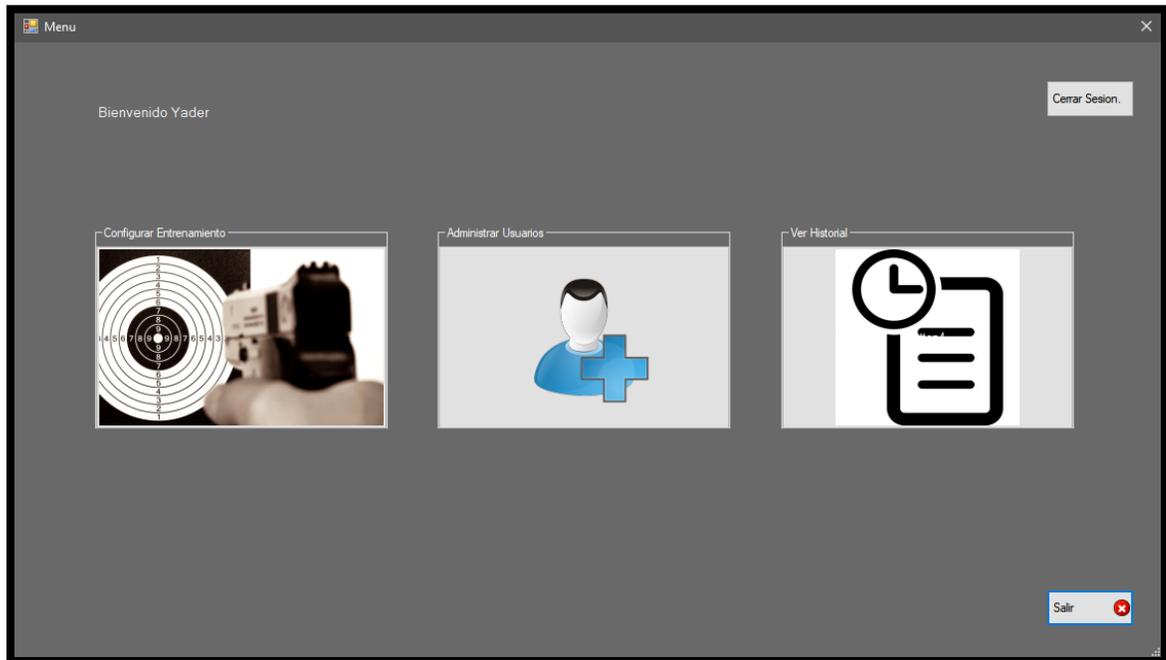


Figura 2. 46: Menú principal.(Captura de Pantalla)

Tras iniciar sesión se accede al menú principal, aquí se observan 3 iconos que representan una función diferente, ver Figura 2.46. A continuación se describen las funciones que poseen. Al hacer clic sobre el icono Configurar Entrenamiento se abre una nueva ventana, ver Figura 2.47, donde en primer lugar debe elegirse al usuario que entrenará, posteriormente mediante el botón conectar se habilita el control remoto. Una vez habilitado se procede a elegir el modo de control de preferencia. Después de establecer la configuración de velocidad/dirección de desplazamiento o la rutina automática, según el modo de control, se pone en marcha al sistema de control de movimiento con el botón iniciar. Puesto en marcha

el sistema, los impactos sobre el blanco se muestran en un gráfico de una diana a escala, ver Figura 2.47, así mismo en los 3 Textbox y en el Datagridview se muestran las coordenadas X,Y y el puntaje según la ubicación donde se da el impacto en la superficie del blanco.

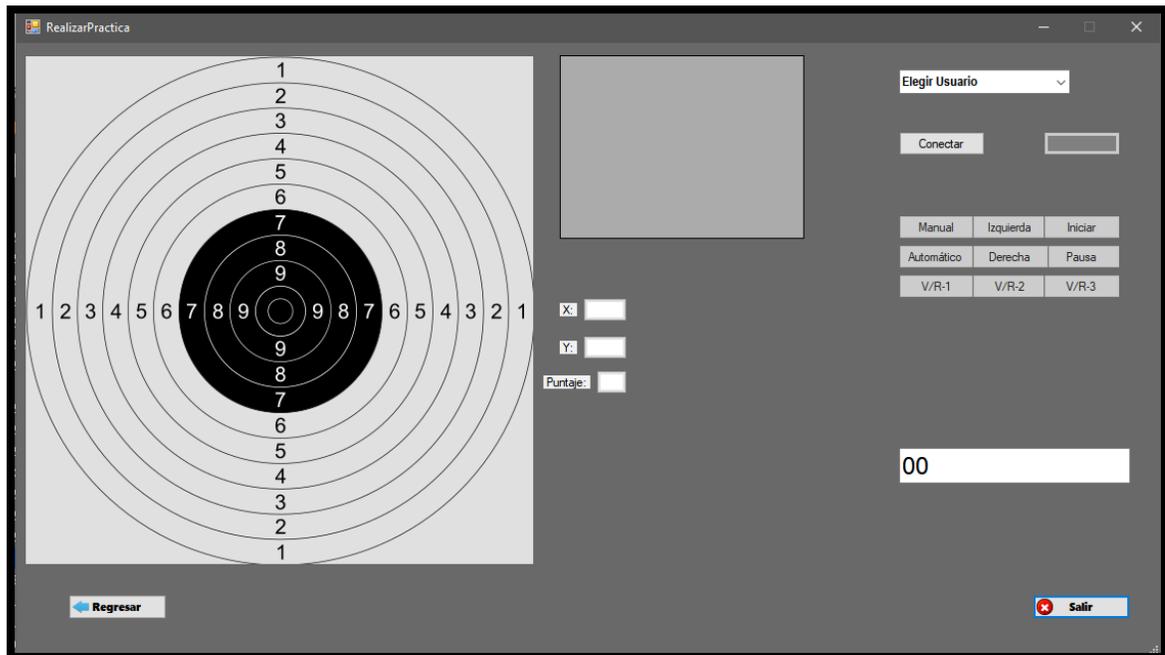


Figura 2. 47: Ventana para configurar el entrenamiento. (Captura de Pantalla)

La segunda función, Administrar Usuarios, ver Figura 2.48, permite agregar, modificar o eliminar cuentas de usuarios registrados en la base de datos. Acá hay dos elementos principales, un datagridview donde se observa una tabla de todos los usuarios registrados en la base de datos y un groupbox donde están las herramientas para agregar una cuenta de usuario o para las modificaciones requeridas en las cuentas almacenadas en la base de datos.

La última función, Ver Historial, nos permite observar los resultados obtenidos durante los entrenamientos, ver Figura 2.49. En la ventana se encuentra un comboBox que contiene un menú desplegable para seleccionar al usuario que se desea evaluar. Cuando se selecciona el usuario los siguientes datos automáticamente se completan con la información guardada en la base de datos.

Los datos correspondientes a cada práctica se almacenan en unas tablas creadas en el esquema “historial”, donde para cada usuario hay una tabla con el mismo nombre de su credencial de usuario, ver Figura 2.50.

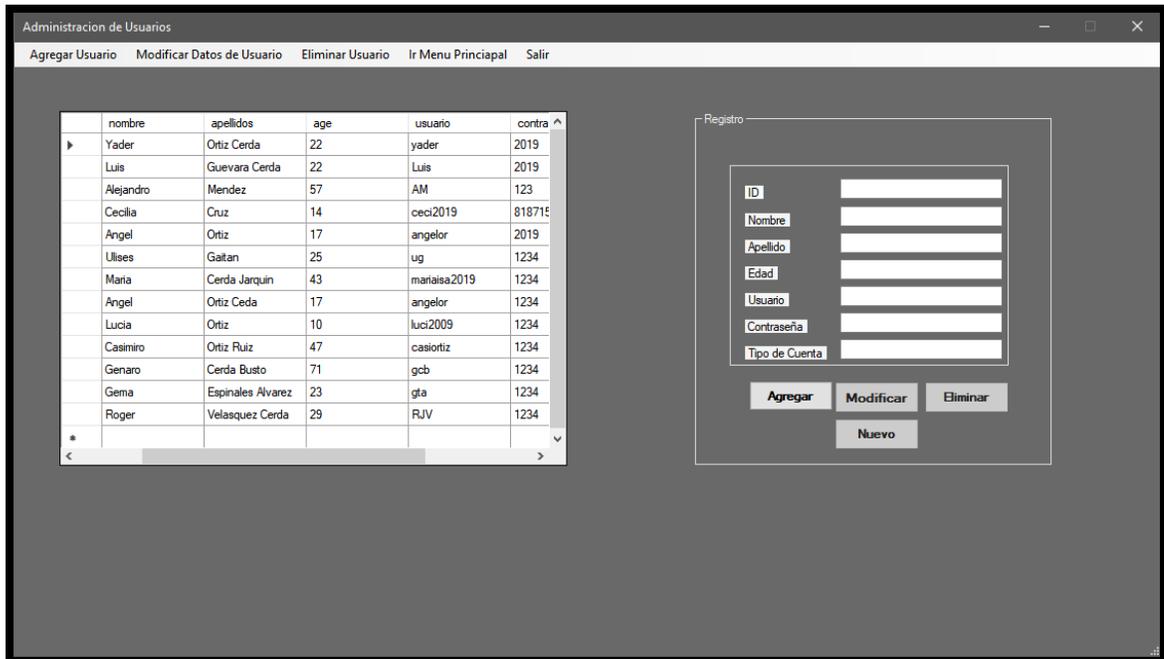


Figura 2. 48: Ventana de administración de usuarios.(Capturas de Pantalla)

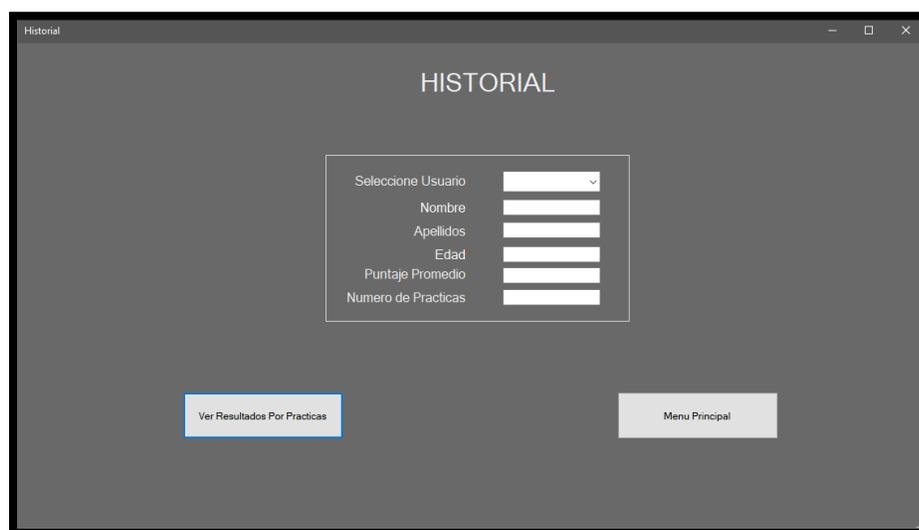


Figura 2. 49: Ventana del historial.(Captura de Pantalla)

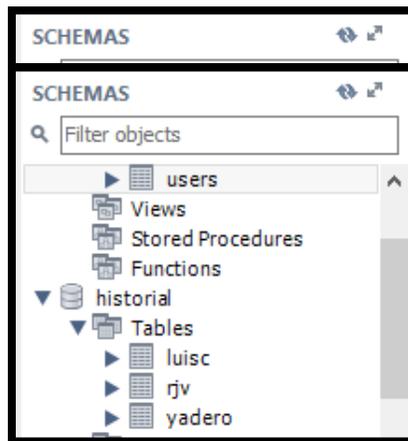


Figura 2. 50: Esquema historial de la base de datos.(Captura de Pantalla)

Otra funcionalidad que tenemos en el historial es ver la curva de aprendizaje a medida que se dan los entrenamientos. Ver Fig 2.51



Figura 2. 51: Ventana para visualizar el puntaje promedio por cada práctica.(Captura de Pantalla)

CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3 Pruebas para la verificación de la funcionalidad del sistema

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas al prototipo de sistema para entrenamiento en tiro, los resultados que se obtuvieron, análisis y ajustes que permitieron la funcionalidad del diseño y con ello el cumplimiento de los objetivos propuestos. Las pruebas realizadas se orientaron a la determinación de los puntos de impacto y asignación automática de puntajes, control local, control remoto y almacenamiento de resultados en la base de datos.

3.1 Determinación de los puntos de impacto y asignación automática de puntajes

En esta prueba se realizaron impactos en el blanco y se verificó la medición de las diferencias de tiempo y transmisión de la información por el microcontrolador. En la etapa final de la ejecución del algoritmo para determinación de los puntos de impacto y asignación automática de puntajes hubieron inconvenientes porque la velocidad de propagación del sonido real en el acrílico es diferente a la teórica, un factor que junto con la variación en la intensidad de los impactos y la zona en la que se dan, por la influencia que tiene el marco donde se soporta el blanco, hace que sea muy difícil establecer los puntos de impacto usando solamente física y geometría.

Para lograr la funcionalidad se realizó un proceso que se denominó “*calibración empírica*”. Se partió de que el blanco se divide en 8 zonas de dimensiones iguales, en dependencia de la activación de los sensores piezoeléctricos, en las cuales lo que varía es su ubicación respecto al eje de coordenadas X, Y, a como se aprecia en la Figura 3.1. De lo anterior es posible saber que la ecuación que se aplique en una zona es también válida para las otra haciendo ajustes en correspondencia con los ejes. Se seleccionó la zona 1 en el blanco real, Figura 3.2 y se dividió en pequeños segmentos cuadrados de 2cm x 2cm. En los bordes de los segmentos se realizaron impactos y para los diferentes valores de las 3 TDAs obtenidas se estableció, tendiendo el cuándo los valores mínimos y máximos registrados para

cada una, el rango dentro del cual se encontraban los tiempos. Con esos rangos se pudo establecer en el programa un condicional que nos permite asignar el valor del punto ya conocido cuando un impacto genera 3 TDAs que se encuentran dentro de los rangos establecidos. Como se mencionó anteriormente ese proceso es repetible para las otras zonas, incluso con los mismos rangos obtenidos en la zona 1, haciendo los correspondientes ajustes en los ejes.

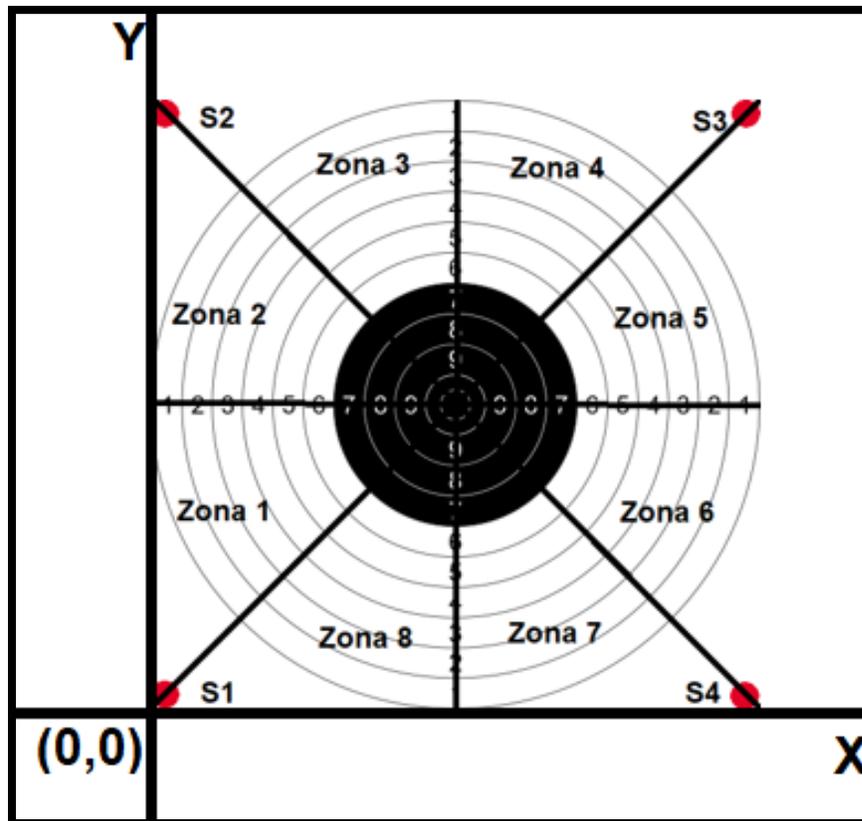


Figura 3. 1:Zonas de impacto y coordenadas X,Y.(Captura de Pantalla)

Una prueba que muestra la funcionalidad de lo planteado es que luego de realizar una calibración empírica basada en la zona 1 y seleccionar un punto por cada zona de impacto, resaltados en negro en la Figura 3.2, el programa fue capaz de establecerlos correctamente. Los resultados se aprecian en la Figura 3.3.



Figura 3. 2: Blanco del sistema.

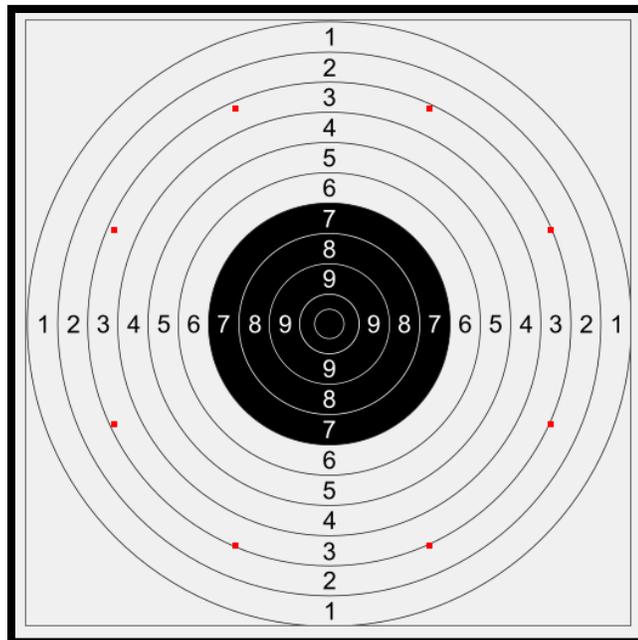


Figura 3. 3: Resultado de la determinación de los puntos de impacto.(Captura de Pantalla)

3.2 Control local

En la Figura 3.4 se muestra la instalación del sistema de control de movimiento con la interfaz local y el módulo de comunicación inalámbrica XBee configurado como transmisor. Se verificó la funcionalidad de la interfaz local como medio de interacción entre el usuario y el sistema de control de movimiento. Se ejecutaron las tres rutinas automáticas correctamente. El motor mueve el blanco de extremo a extremo cambiando el sentido de giro cuando llega a los finales de carrera y de velocidad según se indica en las rutinas. La primera rutina se desplaza 10 veces de extremo a extremo alternando con las velocidades 1 2 y 3. La segunda rutina también se desplaza 10 veces de extremo a extremo, al cambiar de sentido de giro inicia con la velocidad 2 y 1.5 segundos después, durante el recorrido al extremo opuesto, cambia a la velocidad 3. La rutina 3 es similar a la 2 pero además de cambiar de velocidad, durante el recorrido al extremo opuesto, también cambia la dirección de giro, regresa al extremo del que venía y al alcanzarlo vuelve a cambiar el giro hasta que llega al extremo al que se dirigía.



Figura 3. 4: Instalación de sistemas para el control local

3.3 Control remoto

El control remoto se habilita desde la interfaz gráfica que se ejecuta en la computadora. En la Figura 3.5 se muestra el segmento de la interfaz que se encarga del control remoto, contiene los botones para activar el modo manual o automático, cambios de dirección, selección de velocidad o rutina, inicio y pausa.



Figura 3. 5: Segmento de la interfaz para el control remoto.(Captura de Pantalla)

En el control remoto se verificó la ejecución de las rutinas automáticas y funcionaron correctamente, igual que con el control local. El modo manual también se verificó cambiando de dirección y velocidad de desplazamiento de acuerdo con las órdenes del usuario.

3.4 Almacenamiento de resultados en la base de datos

Para esta prueba se registró un usuario, Figura 3.6, en la base de datos, donde pudo comprobarse que automáticamente se creó la tabla en el esquema historial donde se almacenan los resultados de las prácticas. Luego se procedió a configurar el entrenamiento. Después de poner en marcha al sistema se procedió a generar impactos sobre el blanco y a medida que se impactaba una zona se podía ver el punto de impacto en la PC, Figura 3.7.

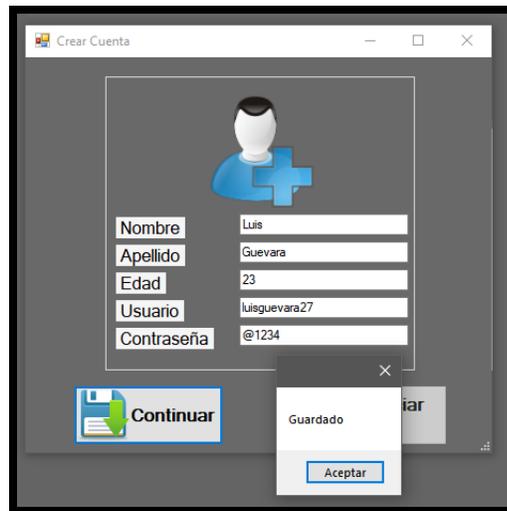


Figura 3. 6: Registro de usuario.(Captura de Pantalla)

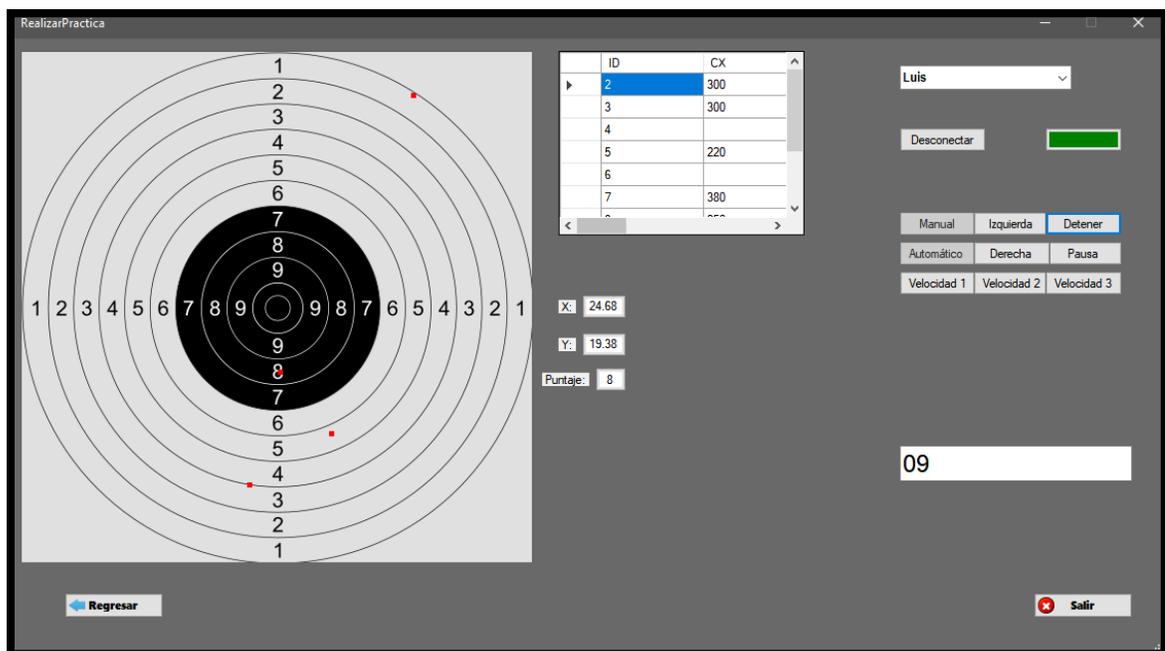


Figura 3. 7: Visualización de los impactos sobre el blanco de la interfaz.(Captura de pantalla)

Se generaron 8 impactos que se almacenaron en la base de datos de forma satisfactoria, en la Figura 3.8 se observa cómo se almacenan los datos en la tabla, los valores de interés son las coordenadas XY, el puntaje, la hora y fecha, de igual forma los identificadores del número de tiro (T) y numero de práctica (P).

ID	CX	CY	PUN	Fecha	T	P
1	300	370	5	2019-08-23 16:46:02	1	1
2	300	370	5	2019-08-23 16:48:45	2	1
3	220	420	3	2019-08-23 16:48:52	3	1
4	250	310	8	2019-08-23 16:49:08	4	1
5	250	310	8	2019-08-23 16:49:16	5	1
6	250	310	8	2019-08-23 16:49:25	1	2
7	250	310	8	2019-08-23 16:49:41	2	2
8	490	120	1	2019-08-23 16:49:52	3	2

Figura 3. 8: Almacenamiento de resultados por cada impacto

En la Figura 3.9 se muestra el reporte de la práctica que contiene una curva con la puntuación obtenida en cada disparo. También es posible obtener una gráfica basada en los promedios de cada sesión de entrenamiento ofreciendo la posibilidad de apreciar la curva aprendizaje de los tiradores. Esta última brinda la posibilidad de que el instructor de tiro realice un asesoramiento adecuado para cada tirador.

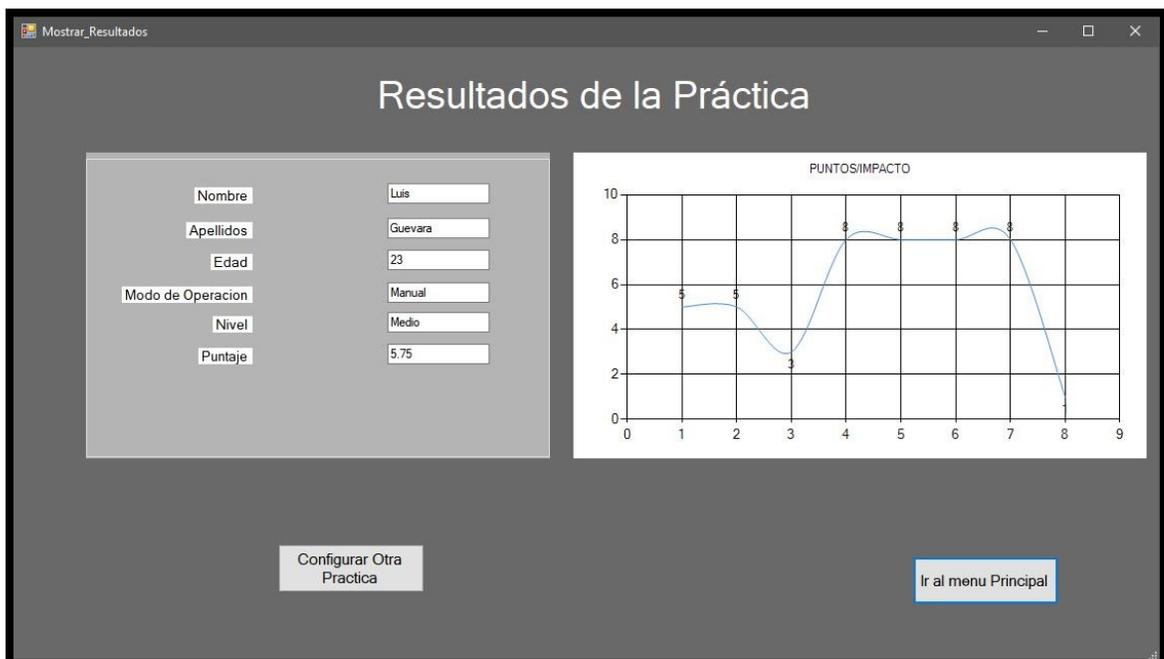


Figura 3. 9: Resultados de la práctica

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

A continuación, son presentadas las conclusiones sobre los objetivos específicos establecidos para lograr el objetivo general.

- Se logró establecer los requerimientos del sistema desarrollado a través de la revisión de literatura y conversaciones sostenidas con propietarios de polígonos nacionales, el presidente de la FENATIRO y nuestro tutor.
- Se logró desarrollar el sistema de localización de impactos y asignación automática de puntajes usando el método Hard Target basado en la onda de choque de impacto y la variante denominada calibración empírica.
- Se implementó el control local y remoto inalámbrico usando microcontroladores y módulos de comunicación XBee ZB.
- Se desarrolló una interfaz gráfica y una base de datos usando software libre que se complementan para realizar un control de acceso al sistema y almacenar los resultados que obtiene cada usuario en las sesiones de entrenamiento.
- Se comprobó el funcionamiento de cada uno de los subsistemas mediante pruebas, entre las cuales encontramos: determinación y asignación de puntajes, control local, control remoto, almacenamiento de resultados en la base de datos.
- Se comprobó que el prototipo de sistema para entrenamiento en tiro con control local, remoto, capacidad de localización y registro de impactos cumple con los requerimientos establecidos.

RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan algunas recomendaciones que pueden contribuir a mejorar las prestaciones del prototipo desarrollado en este proyecto.

- Adaptar el sistema de mediciones de tiempo para que también pueda trabajar con sensores que detecten la onda de choque supersónica y complementarlo con un segundo algoritmo disponible en la PC que de la posibilidad de usar el método Soft Target con blancos descartables y armas de fuego.
- Implementar una etapa de alimentación eléctrica usando paneles solares para garantizar el uso y disponibilidad del sistema en cualquier momento al no depender del suministro eléctrico comercial.
- Desarrollar la base de datos en un servidor con interfaz web para que se pueda acceder a la información del resultado de los tiradores desde cualquier punto con conexión a internet.

BIBLIOGRAFÍA

- AliExpress. (s.f.). *AliExpress*. Obtenido de ST-M5045 Stepper Motor Driver:
<https://es.aliexpress.com/item/Free-shipping-CNC-Kit-ST-M5045-Stepper-Motor-Driver-replace-M542-Controller-2-Phase-4-5A/1269780970.html>
- Bolton, W. (2013). *Mecatrónica*. México D.F.: Alfaomega.
- Cervelló, R., Martínez, D., Ramírez, D., & Virgili, J. (10 de Enero de 2012). *Interfaces Usuario-Maquina*. Obtenido de Universitat Oberta de Catalunya: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/9168>
- Daware, A., Kale, T., & Salunkhe, K. (2 de Febrero de 2017). *Rifle Shooting Target Detection*. Obtenido de International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET):
<https://www.irjet.net/archives/V4/i2/IRJET-V4I2141.pdf>
- Designspark. (20 de Abril de 2015). *11 Internet of Things (IoT) Protocols You Need to Know About*. Obtenido de Designspark: <https://www.rs-online.com/designspark/eleven-internet-of-things-iot-protocols-you-need-to-know-about>
- Enríquez, Á., & Ortega, C. (2015). *Automatización del proceso de seriamiento, puntuación y registro de tiro de armas livianas en un polígono de tiro*. Obtenido de Universidad Del Azuay:
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/5205>
- Fernández, M., Angós, J., & Salvador, J. (2001). *Diseño de la visualizacion de la informacion*. Madrid.: V congreso ISKO-España.
- Fuentes, M. (2013). *Bases de Datos*. Mexico D.F.: Universidad Autonoma Metropolitana.
- Gutierrez, A. (s.f.). *Máquinas*. Obtenido de Transmisión por correas y poleas:
<https://sites.google.com/site/358maquinas/transmision-por-correas-y-poleas>

- Hernández, L. (s.f.). *Sistemas de comunicación inalámbricas*. Obtenido de Programafacil.com: <https://programafacil.com/podcast/65-sistemas-de-comunicacion-inalambricas/>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico, Mexico: Mc Graw Hill.
- IEEE. (s.f.). *Stepper motors*. Obtenido de Engineering 360 Powered by IEEE GlobalSpec:
http://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/motors/stepper_motors
- IEEEGlobalSpec. (s.f.). *Engineering360*. Obtenido de Stepper Motor Drives Information:
https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/controls_drives/stepper_motor_drives
- Ingeniería Electrónica y Proyectos PICmicro. (17 de Abril de 2018). *¿Qué es un microcontrolador?* Obtenido de Electrónica Estudio:
<http://www.electronicaestudio.com/microcontrolador.htm>
- ISOZ, P., & Andren, R. (2009). *US Patente nº 20090102129A1*.
- Knight, L. (1982). *US Patente nº 4349729*.
- Maso, G. (2016). *US Patente nº 20160305749A9*.
- Mayné, J. (2005). *Estado actual de las comunicaciones inalámbricas*. Obtenido de SILICA An Avnet Division:
http://www.jcee.upc.es/JCEE2004/pdf/EstadoActual_WirelessRF_SILICA.pdf
- MCIElectronics. (s.f.). *MCICapacitación*. Obtenido de Motores paso a paso "stepper": <http://cursos.mcielectronics.cl/motores-paso-a-paso/>
- Microsoft. (s.f.). *IDE de Visual Studio*. Obtenido de IDE de Visual Studio:
<https://www.visualstudio.com/es/vs/>

Morris., A. S. (2001.). *Measurement & Instrumentation Principles*. Londres.: IOP Publishing.

MOTIONCONTROLTIPS. (s.f.). *MOTIONCONTROLTIPS*. Obtenido de Stepper motor or servomotor: Which should it be?:
<https://www.motioncontroltips.com/stepper-motor-servomotor/>

MySQL Documentation Library. (s.f.). Obtenido de MySQL Documentation Library: <http://dev.mysql.com/doc/mysql/en>

Neuroscience and Robotics Lab. (26 de Febrero de 2008). *Stepper Motor Circuits*. Obtenido de Neuroscience and Robotics Lab:
http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Stepper_Motor_Circuits

Oriental Motor. (16 de Febrero de 2018). *Oriental Motor*. Obtenido de Selecting a Stepping Motor:
<https://www.google.com.ni/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwivzYXypcHgAhWtUt8KHbFfCcMQFjADegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.oriental-motor.co.uk%2Fmedia%2Ffiles%2F17112005105315.pdf&usg=AOvVaw2WPFDSxaCwi3k0Tj2QUzPW>

Oyarce, A., Aguayo, P., & Eduard, M. (2010). *Guia del Usuario XBee series 1. Ingeniaria MCI Ltda.*

Pérez, A. (Junio de 2000). *Motores paso a paso, introducción a su funcionamiento y control en lazo abierto*. Obtenido de VivatAcademia:
<http://www.vivatacademia.net/index.php/vivat/article/view/476>

Puyo, J., & Vannesa, G. (28 de Febrero de 2017). *Automatización de un campo de tiro controlado y configurado mediante un dispositivo móvil*. Obtenido de Universidad Distrital Francisco José de Caldas:
<http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5235>

Robotik System. (1 de Diciembre de 2017). *Stepper motors*. Obtenido de Robotik System:

http://www.robotiksistem.com/stepper_motor_types_properties.html

Saona, M. (Febrero de 2014). *Diseño y construcción de un sistema mecatrónico, de detección de puntajes automatizado en "blancos o dianas" para un polígono de tiro*. Obtenido de Universidad Internacional del Ecuador:

<http://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/474>

ScienceProg. (22 de Febrero de 2013). *Thoughts on interfacing piezo vibration sensor*. Obtenido de ScienceProg: <https://scienceprog.com/thoughts-on-interfacing-piezo-vibration-sensor/>

Sparkfun. (s.f.). *Sparkfun*. Obtenido de Piezo Element:

<https://www.sparkfun.com/products/10293>

STEPPERONLINE. (s.f.). *STEPPERONLINE*. Obtenido de Nema 34 CNC

Stepper Motor 4.5Nm: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-34-cnc-stepper-motor-45nm-637ozin-55a-86x86x80mm-key-way-shaft-34hs31-5504s.html>

Trademe. (s.f.). *Trademe*. Obtenido de Clear Acrylic Sheet:

<https://www.trademe.co.nz/business-farming-industry/other/listing-1930824246.htm>

Waterman, M., & Salazar, D. (8 de Diciembre de 2011). *Electronic Target*.

Obtenido de E-Targ: <https://etarg.net/>

Yang, Y.-b., Li, Z., & Zhao, Y. (2006). *Automatic Scoring System*. Obtenido de Nios II Processor Design Contest Papers-Intel:

<https://www.intel.com/content/www/us/en/programmable/support/literature/dc/lit-design-contest.html>

Zigbee alliance. (s.f.). *Zigbee 3.0*. Obtenido de Zigbee alliance:

<https://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/zigbee-3-0/>

ANEXOS

A-Ecuaciones para la determinación de impactos y asignación automática de puntaje.

Las ecuaciones para el cálculo de los puntos de impacto dependen de la zona en que se den (de las 8 posible). Para su uso se toma como referencia que el eje de coordenadas tiene su origen en la esquina inferior izquierda, Figura A.1.

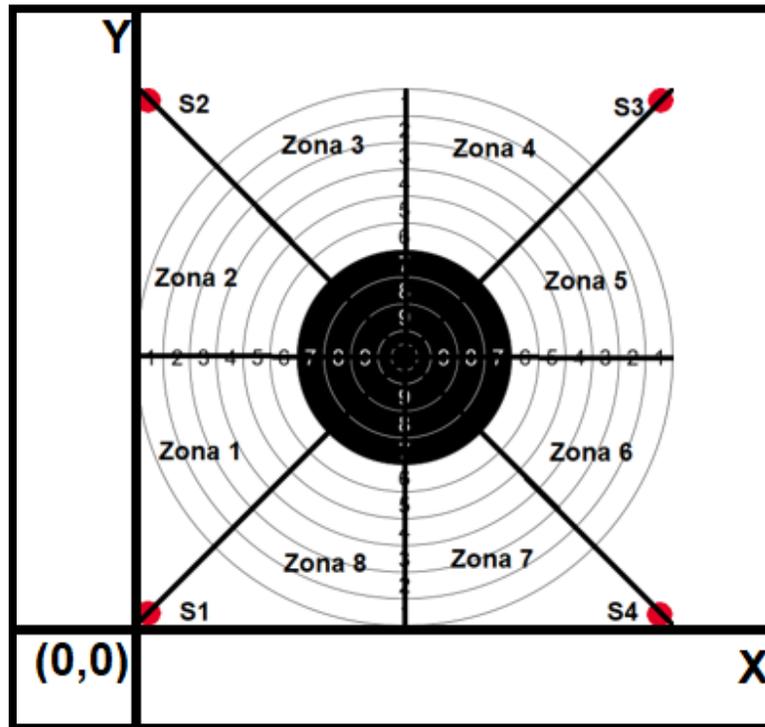


Figura A. 1: Ubicación de ejes de coordenadas para determinación de puntos de impactos

Las ecuaciones generales que son aplicables para la zona 1 son las siguientes:

V-Velocidad del sonido en el acrílico=2730.

XB-Ancho del blanco en metros=0.5

YB-Altura del blanco en metros=0.5

$$D1 = TDA1 * V$$

$$D2 = TDA2 * V$$

$$D3 = TDA3 * v$$

$$R = \frac{D2^2 - D1^2 - D3^2}{2(D3 - D2 - D1)}$$

$$X = \frac{XB^2 - 2 * R * D2 - D2^2}{2 * XB}$$

$$Y = \frac{YB^2 - 2 * R * D1 - D1^2}{2 * YB}$$

Para las zonas de 2 a 8 las ecuaciones generales también se aplican, pero involucran ajustes respecto al eje de coordenadas X, Y. Luego de usarlas se agrega lo siguiente por zona.

Zona 2:

$$Y = 0.5 - Y$$

Zona 3:

$$CX = Y$$

$$CY = X$$

$$X = CX$$

$$Y = 0.5 - CY$$

Zona 4:

$$CX = Y$$

$$CY = X$$

$$X = 0.5 - CX$$

$$Y = 0.5 - CY$$

Zona 5:

$$X = 0.5 - X$$

$$Y = 0.5 - Y$$

Zona 6:

$$X = 0.5 - C$$

Zona 7:

$$CX = Y$$

$$CY = X$$

$$X = 0.5 - CX$$

$$Y = CY$$

Zona 8:

$$CX = Y$$

$$CY = X$$

$$X = CX$$

$$Y = CY$$

Con el punto de impacto establecido se prosigue a determinar el puntaje.

D-Distancia entre el punto establecido y el centro del blanco.

P-Puntaje del 1 al 10.

$$D = \sqrt{(0.25 - X)^2 + (0.25 - Y)^2}$$

$$P = \frac{(0.25 - D)}{0.025}$$

B-Cálculo del torque requerido para la selección del motor.

1-Se plantea el cálculo del torque requerido.

$$T_M = (T_f + T_a)SF$$

T_M -Torque requerido.

T_f -Torque friccional.

T_a -Torque de aceleración.

SF -Factor de seguridad.

2-Se realiza el cálculo del torque friccional.

$$T_f = \frac{F_f r}{\eta} = \frac{\mu m g r}{\eta}$$

F_f -Fuerza de fricción.

r -Radio de la polea=4.2cm

η -Eficiencia (Típica 0.85~0.95), se asume el peor de los casos=0.85

μ -Coeficiente de fricción acero-hierro (Los rodamientos son de acero y la plataforma de deslizamiento de hierro) =0.19

m -Masa estimada de carga (Blanco, base, guías lineales) =6Kg

g -Gravedad=9.8 m/s²

$$T_f = \frac{(0.19)(6Kg) \left(\frac{9.8m}{s^2} \right) (0.042m)}{0.85} = 0.55Nm$$

3-Se realiza el cálculo del torque de aceleración.

$$Ta = JA$$

J -Momento de inercia.

A -Aceleración en rev/s.

$$J = J_L + J_P + J_o$$

J_L =Momento de inercia de la carga.

J_P =Momento de inercia de las poleas.

J_o =Momento de inercia del rotor.

$$J_L = mr^2 = (6Kg)(0.042m)^2 = 0.01Kgm^2$$

Para facilitar los cálculos el momento de inercia de las poleas y el motor($J_P + J_o$)se aumió también de $0.01Kgm^2$. Es un valor bastante holgado porque estos momentos de inercia suelen tener valores muy inferiores al de la carga. De esta forma.

$$J = 0.01Kgm^2 + 0.01Kgm^2 = 0.02Kgm^2$$

Ahora se procede con la aceleración.

$$A = \frac{Ns}{t_a} = \frac{Vm}{r t_a}$$

Ns -Velocidad máxima de operación en rev/s.

t_a -Tiempo de aceleración=0.5s

Vm -Velocidad máxima de operación en m/s=1m/s

$$A = \frac{\frac{1m/s}{0.042m}}{0.5s} = 47.62rev/s$$

Finalmente.

$$T_a = (0.02Kgm^2) \left(\frac{47.62rev}{s} \right) = 0.95Nm$$

4-Cálculo del torque requerido

Con los cálculos del torque friccional y el torque de aceleración realizados se procede ahora a calcular el torque total requerido, para este punto es importante establecer un factor de seguridad el cual en la revisión de literatura es recomendado de 1.5~2. Se tomó el valor máximo para asegurar que el torque con el que se establecerá el motor sea suficiente.

$$T_M = (0.55Nm + 0.95Nm)2 = 3Nm$$