

**DISPOSITIVO PARA EL MONITOREO DE LA ARTICULACIÓN DEL TOBILLO
PARA AGRICULTORES DE PAPA EN EL MUNICIPIO DE TAUSA DURANTE LA
LABOR DE LABRADO**

YESICA ALEJANDRA VELASCO GUERRERO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERIA MECATRÓNICA

BOGOTÁ D.C

2023

**DISPOSITIVO PARA EL MONITOREO DE LA ARTICULACIÓN DEL TOBILLO
PARA AGRICULTORES DE PAPA EN EL MUNICIPIO DE TAUSA DURANTE LA
LABOR DE LABRADO**

YESICA ALEJANDRA VELASCO GUERRERO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO
INGENIERO MECATRÓNICO

ASESOR:

MSc. NYDIA CAROLINA CHAVES

DOCENTE MEDIO TIEMPO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERIA MECATRÓNICA

BOGOTÁ D.C

2023

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3. OBJETIVOS.....	15
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MARCO REFERENCIAL	16
2.1. MARCO GEOGRÁFICO	16
2.2. ESTADO DEL ARTE	18
2.3. MARCO HISTÓRICO.....	20
2.4. MARCO TEÓRICO	21
2.4.1. Anatomía del tobillo	21
2.4.2. Biomecánica del tobillo	25
2.4.3. Lesión del tobillo	26
2.4.4. Unidad de medición inercial IMU	28
2.4.5. Microcontrolador	28
2.4.6. Protocolo de comunicación I2C	29
2.4.7. Protocolo de comunicación RS232.....	29
2.4.8. Filtro digital FIR (Finite Impulse Response)	29
2.4.8.1. Filtro Pasa Bajas.....	30
2.4.8.1. Filtro Pasa Altas.....	30
2.4.8.2. Filtro Pasa Bandas	31
2.4.8.3. Filtro Rechaza Bandas	31
2.4.8.4. Filtro complementario.....	32
2.5. MARCO CONCEPTUAL	33
2.5.1. Sistema de monitoreo.....	33
2.5.2. Cultivo de papa.....	33

2.5.2.1.	Importancia en el cultivo de papa	33
2.5.2.2.	Condiciones climáticas	34
2.5.3.	Bioseñales.....	36
2.5.4.	Señales Biomecánicas	37
2.5.5.	Sensores MEMS.....	37
2.5.6.	Giroscopio- acelerómetro	37
2.6.	MARCO LEGAL.....	38
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	39
3.1.	Tipo investigación.....	39
3.2.	Enfoque de la investigación	39
3.3.	Población	39
3.4.	Muestra.....	39
3.5.	Hipótesis	39
3.6.	Fases del proyecto.....	40
4.	INICIO.....	41
5.	PLANIFICACIÓN.....	43
5.1.	REQUERIMIENTOS	43
5.1.1.	Parámetros de selección del microcontrolador	43
5.1.2.	Parámetros de selección del sensor	45
5.1.3.	Parámetros de selección del protocolo de comunicación	47
5.1.4.	Parámetros de selección para el módulo de recepción de datos	48
5.1.5.	Batería.....	48
5.1.6.	Módulo de carga	49
5.2.	DISEÑO ELECTRÓNICO	49
5.2.1.	Caracterización del sensor	50
5.2.2.	Etapa de filtrado	53
5.2.2.1.	Análisis frecuencial.....	53
5.2.2.2.	Diseño filtro pasa alta	56
5.2.2.3.	Filtro complementario.....	57
5.3.	DISEÑO MECÁNICO.....	58
6.	EJECUCIÓN.....	63

6.1. Ensamble de los componentes	63
6.2. Pruebas.....	65
6.3. Algoritmo.....	66
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
8. CONCLUSIONES.....	76
9. RECOMENDACIONES	77
10. BIBLIOGRAFÍA.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Anatomía ósea del tobillo.	22
Figura 2.	Vista lateral del tobillo.....	23
Figura 3.	Vista lateral donde se aprecian los ligamentos externos del tobillo.....	24
Figura 4.	Ligamentos del tobillo, donde se resaltan las cuatro porciones pertenecientes al ligamento deltoideo.....	24
Figura 5.	Movimiento del tobillo.....	25
Figura 6.	Movimientos angulares del tobillo con respecto a los tres ejes.....	26
Figura 7.	Articulaciones del tobillo.	27
Figura 8.	Respuesta ideal y real de un filtro pasa bajas.....	30
Figura 9.	Respuesta ideal y real de un filtro pasa altas.....	31
Figura 10.	Respuesta ideal y real de un filtro pasa banda.....	31
Figura 11.	Respuesta ideal y real de un filtro rechaza banda.....	32
Figura 12.	Estructura filtro complementario.....	33
Figura 13.	PIC 18F2455.....	44
Figura 14.	Sensor MPU6050 GY-521.....	47
Figura 15.	Módulo HW-474.....	48
Figura 16.	Batería de litio LQ-S1.....	48
Figura 17.	Módulo de carga FC-75.....	49
Figura 18.	Esquema electrónico del dispositivo de monitoreo del tobillo.....	50
Figura 19.	Graficas de caracterización del sensor..	51
Figura 20.	Graficas de frecuencia del acelerómetro.....	54
Figura 21.	Graficas de frecuencia del giroscopio.....	55
Figura 22.	Filtro tipo ventana por el método de Haming.....	57
Figura 23.	Dimensiones pieza lateral 1.....	58
Figura 24.	Dimensiones pieza lateral 2.....	59
Figura 25.	Dimensiones pieza soporte.....	59
Figura 26.	Dimensiones ensamble vista inferior izquierda.....	60

Figura 27.	Dimensiones ensamble vista inferior derecha.	60
Figura 28.	Dimensiones ensamble vista superior.....	61
Figura 29.	Dimensiones ensamble vista derecha.	61
Figura 30.	Modelo CAD.....	62
Figura 31.	Ensamble de los componentes electrónicos lado 1.	63
Figura 32.	Ensamble de los componentes electrónicos lado 2.	63
Figura 33.	Piezas impresas.....	64
Figura 34.	Acople del PCB.....	64
Figura 35.	Ensamble final.....	65
Figura 36.	Terreno del cultivo de papa.	65
Figura 37.	Pruebas con el dispositivo de monitoreo.....	66
Figura 38.	Algoritmo implementado.	67
Figura 39.	Datos de inclinación del tobillo, persona 1.....	69
Figura 40.	Datos de inclinación del tobillo, persona 2.....	69
Figura 41.	Datos de inclinación del tobillo, persona 3.....	70
Figura 42.	Datos de inclinación del tobillo, persona 4.....	70
Figura 43.	Datos de inclinación del tobillo, persona 5.....	71
Figura 44.	Datos de inclinación del tobillo, persona 6.....	71
Figura 45.	Datos de inclinación del tobillo, persona 7.....	72
Figura 46.	Datos de inclinación del tobillo, persona 8.....	72
Figura 47.	Datos de inclinación del tobillo, persona 9.....	73
Figura 47.	Datos de inclinación del tobillo, persona 10.....	73

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.	Función en el tiempo acelerómetro eje Y	51
Ecuación 2.	Función de transferencia acelerómetro eje Y	51
Ecuación 3.	Función en el tiempo giroscopio eje Y	51
Ecuación 4.	Función de transferencia giroscopio eje Y	52
Ecuación 5.	Función en el tiempo acelerómetro eje X	52
Ecuación 6.	Función de transferencia acelerómetro eje X	52
Ecuación 7.	Función en el tiempo giroscopio eje X	52
Ecuación 8.	Función de transferencia giroscopio eje X	52
Ecuación 9.	Filtro complementario	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad para los dispositivos médicos	38
Tabla 2. Parámetros biomecánicos del tobillo..	41
Tabla 3. Requerimientos electrónicos para el dispositivo de monitoreo.	41
Tabla 4. Requerimientos estructurales para el dispositivo de monitoreo.....	42
Tabla 5. Tabla de decisiones del microcontrolador.....	44
Tabla 6. Datos del Microcontrolador.....	44
Tabla 7. Características del dispositivo PIC18F4550.....	45
Tabla 8. Tabla de decisiones del sensor..	46
Tabla 9. Datos del sensor.....	47
Tabla 10. Características diagrama de Bode acelerómetro y giroscopio.....	55
Tabla 11. Características eléctricas MPU-6050...	56
Tabla 12. Parámetros de diseño del filtro.....	57
Tabla 13. Número de muestras de cada agricultor....	68
Tabla 14. Datos promedio de inclinación en el eje XY....	74

RESUMEN

La agricultura es una actividad intensiva que presenta una serie de riesgos para la salud de los trabajadores, incluidas lesiones musculares y articulares causadas por posturas y movimientos repetitivos. Los agricultores de papa, en particular son propensos a condiciones de trabajo que pueden afectar la articulación del tobillo, como caminar sobre terrenos irregulares y levantar cargas pesadas. Por esta razón, en el presente trabajo se presentó el desarrollo de un dispositivo mecatrónico en el municipio de Tausa, capaz de monitorear la articulación del tobillo en agricultores de papa, ya que el trabajador está expuesto a sufrir de alguna lesión, debido a que realizan trabajos de manera repetitiva y el tipo de terreno para el cultivo suele ser arenoso-arcilloso.

Se realizó una investigación exhaustiva sobre la anatomía y biomecánica de tobillo, así como de las lesiones y las condiciones geográficas del terreno con el fin de generar conocimientos para posteriormente realizar el diseño eléctrico y mecánico. Una vez finalizado el diseño, se procedió a la programación del microcontrolador y al ensamble del dispositivo, el cual fue sometido a pruebas experimentales para verificar su correcto funcionamiento y precisión en la medición de los movimientos de la articulación del tobillo.

Los resultados obtenidos indican que los movimientos medidos se encuentran dentro de los rangos biomecánicos, aunque en algunas ocasiones se acercan al límite, lo que podría generar futuras lesiones. Por tanto, el dispositivo podría ser de gran utilidad para monitorear y prevenir lesiones en los agricultores de papa del municipio de Tausa.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia, la salud opera de manera centralizada, es decir que la mayoría de los recursos están dirigidos principalmente donde hay mayor demanda por el servicio. Las poblaciones que habitan en las zonas rurales no cuentan con la suficiente demanda, lo que genera que se encuentren en situación de vulnerabilidad geográfica, por tal razón se ven limitados los recursos y equipos especializados en sus centros de salud, lo que obliga que se tengan que movilizar a las zonas urbanas donde cuentan con el servicio médico necesario. Los habitantes de las zonas rurales por lo general tienen como manera de sustento económico el trabajo en la agricultura, el cual exige gran actividad física, en donde realizan trabajos de manera repetitiva, lo que causa en muchas ocasiones lesiones para el trabajador (Ándica, 2015).

La lesión de tobillo se presenta en un 85% de la población mundial, siendo una de las causas por las que se acude usualmente a los servicios médicos. Así mismo, el 75% de la población colombiana presenta las mismas lesiones debido a que esta articulación se encuentra en una de las áreas de mayor movilidad, y es de gran importancia para el apoyo del pie en el suelo, por ende, es el que se encarga de la estabilidad y marcha en el cuerpo (Rincón, 2015). Las lesiones se pueden presentar por distintos motivos y entornos, por apoyarse en una superficie irregular, por contusiones que desplazan la articulación con respecto a su eje rotatorio o por cambios de factores antropométricos (Andica, 2015).

En cuanto al ámbito laboral específicamente del sector agropecuario, los trabajos de cultivo, ganadería, piscicultura y demás labores, representan el 12% del uso del servicio de urgencias por alguna lesión en el tobillo (I. Salcedo Joven, A. Sánchez Gonzales, B. Carretero, M. Herrero, C. Mascías, F. Panadero Carlavilla, 2000).

El cultivo de papa presenta ciertos requerimientos, en donde el suelo debe tener una textura liviana, preferentemente suelos franco-arenosos, franco-limosos y franco-arcillosos, con un buen drenaje y ventilación para la cosecha, además necesita de una buena retención y captación del agua. En cuanto a la pendiente del terreno se recomienda que sea de 0% a un 4% de inclinación, lo que ocasiona que, en dicho cultivo de papa se tenga que trabajar en terrenos irregulares, teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se aumenta el riesgo de lesiones de tobillo en los agricultores (Intagri, 2017).

Por otra parte, se tiene en cuenta la organización y distribución de la tierra en la cultivación, en donde están los agricultores quienes trabajan en dicha tierra para todo el proceso del cultivo, va desde la siembra hasta la cosecha. Los agricultores en todas las etapas, en especial y recalcando el arado y la cosecha, pasan la mayor parte del tiempo agachados y en una posición firme, para mantener la estabilidad del cuerpo durante largas jornadas de trabajo, en terrenos irregulares ya mencionados; precediendo así que, los agricultores ocupan el mayor tiempo en una posición baja o flexionada, lo que genera que se presenten dolores articulares al momento de adoptar la postura, ha de tenerse en cuenta que las rodillas no superen la punta de los pies, y la espalda se mantenga erguida de manera que forme un ángulo de 90° con respecto a las rodillas (ricolto, 2017).

En este caso se plantea la realización de un sistema de monitoreo con el fin de recopilar datos de la articulación del tobillo en los agricultores de papa en el municipio de Tausa en Colombia, realizando un seguimiento continuo, analizando los cambios y comportamientos en el tobillo, que dé a un dictamen final en el impacto de la articulación durante las diferentes etapas de cultivo a las que se somete dicho agricultor.

A partir de lo expuesto anteriormente y pensando en el bienestar del agricultor, se concluyó que la articulación del tobillo está expuesta a sufrir alguna lesión, es por ello por lo que se plantea la pregunta: ¿Cómo se puede monitorear la articulación del tobillo durante la labor de labrado en agricultores de papa del municipio de Tausa?

1.2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia uno de los cultivos más importantes es el de la papa, con un consumo per cápita de 57kg por persona, por año. La producción promedio de papa en Colombia es de 21,5 toneladas, en donde los pequeños productores son el eje de la producción nacional, por esta razón tiene gran importancia para la economía rural dado que 90 mil familias se dedican a este cultivo. Por lo tanto, los agricultores juegan un papel fundamental en la producción de la papa, por lo que hay que tener en cuenta la salud y el bienestar de ellos. Una de las articulaciones que está en constante movimiento durante todo el proceso del cultivo es el tobillo, es por esto por lo que se pretende estudiar y analizar las lesiones que se pueden provocar si no se realizan los movimientos pertinentes en esta articulación (Agro Bayer, 2020).

Los agricultores por encontrarse en terrenos inestables están expuestos a tener un esguince, una de las lesiones más frecuentes en el tobillo, ocupando cerca del 85% de todas las lesiones del complejo articular, que ocurre cuando se dobla, se tuerce o se gira el tobillo de manera irregular. Por lo tanto, esto genera que se estire o desgarre las bandas resistentes del tejido que ayudan a mantener los huesos del tobillo unidos (Mayo Clinic, 2020).

Además del esguince, también se puede producir la fractura de tobillo, la cual es una de las patologías más comunes en el área de urgencias, y es frecuente en consulta externa. En México se reporta una incidencia anual de 122 fracturas por cada 100.000 personas, y es predominante en el sexo masculino, adicionalmente, esta fractura se ha ubicado como una causa importante de incapacidad laboral, en donde según un estudio realizado en China la mayoría de las personas que sufren de esta fractura son agricultores y trabajadores administrativos (Mayné, y otros, 2020). Cabe resaltar, que la lesión de tobillo es una lesión en el hueso, puede ser causada por torsión a causa de un simple paso en falso o una caída, o por traumatismo directo. Las fracturas pueden comprender con pequeñas fisuras en los huesos o quebraduras que perforan la piel, debido a la fractura de tobillo se pueden tener algunos síntomas, como dolor inmediato, hematomas, hinchazón, sensibilidad y dificultad al caminar o cargar peso (Mayo Clinic, 2021).

Por otra parte, la tendinopatía aquilea es una alteración muy frecuente del sistema musculoesquelético que también la pueden padecer algunos agricultores, se produce cuando se forman pequeños desgarros en las fibras que forman el tendón, también se denomina tendinitis aquilea. La tendinopatía aquilea suele estar provocada por un uso excesivo y es una lesión común en los deportes que requieren correr y saltar. La tensión repetida sobre el tendón hace que se produzcan daños microscópicos (Sanitas, 2021).

Asimismo, se encuentra la rotura del tendón de Aquiles que representa el 20% de todas las lesiones de tendones largos del cuerpo humano, la dorsiflexión forzada con el pie en plantiflexión es el mecanismo más frecuente, siendo el resultado de una fuerza de contracción combinadas con las fuerzas de reacción del piso (García, Brunicardi, Graziano, Marulanda, & Polo, 2015). La rotura del tendón de Aquiles es una lesión que afecta la parte trasera de la pantorrilla, la zona más habitual de lesión ocurre entre los 3 y los 6 cm de su inserción en el calcáneo. El tendón de Aquiles es un fuerte cordón fibroso que conecta los músculos de la parte trasera de la pantorrilla con el hueso del talón. Si se estira excesivamente el tendón de Aquiles, puede desgarrarse total o parcialmente (Mayo Clinic, 2021).

De igual modo, la Fascitis plantar consiste en la inflamación del tejido en la parte anterior del tubérculo interno del calcáneo. La inflamación ocurre cuando la banda gruesa de tejido en la planta del pie (fascia) se estira o se sobrecarga demasiado. Esto puede ser doloroso y hacer más difícil el hecho de caminar (MedlinePlus, 2021). Algunos factores de riesgo son la edad que altera la anatomía de la fascia, y por eso el desorden aparece entre los 40 y 60 años. Algunos tipos de ejercicios o actividades causan mucho estrés en el talón y el tejido adherido, por lo general asociado a ocupaciones en donde las personas se mantienen de pie (Ortiz, 2018).

A partir de las diferentes lesiones mencionadas con anterioridad y entendiendo el impacto que pueden crear estas en los agricultores de papa, se busca generar un entorno de monitoreo en la articulación del tobillo que ayude al campesino a conocer el estado en que se encuentra la articulación durante el proceso del arado, ya que, en esta etapa de labranza el suelo se encuentra inestable debido a la textura arenosa requerida para este cultivo.

Después de todo, y partiendo de las políticas institucionales de Uniagraria y el programa de ingeniería mecatrónica, el estudio hace uso del desarrollo tecnológico mediante la investigación, en pro del desarrollo sostenible, para así mismo, aportar a la mejora de la calidad de vida del campesino colombiano. Se implementan competencias propias de la carrera, como lo son la electrónica, la mecánica y la programación, desarrollando de esta manera un sistema funcional en base a los problemas expuestos para aportar al bienestar tanto del agricultor como de la sociedad en general.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un dispositivo de monitoreo de la articulación del tobillo para los agricultores de papa del municipio de Tausa durante la labor de labrado.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los requerimientos del sistema con base a la anatomía de la articulación del tobillo y las condiciones geográficas del terreno, para un correcto monitoreo durante la fase de arado en la cosecha de papa.
- Diseñar el sistema eléctrico y mecánico para la adquisición y procesamiento de los datos.
- Validar el funcionamiento del prototipo a partir de las pruebas realizadas en los agricultores y del comportamiento de las variables.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO GEOGRÁFICO

El proyecto fue implementado en el municipio de Tausa, en el departamento de Cundinamarca, Colombia. A continuación, se muestran sus características geográficas, las cuales serán de ayuda para los requerimientos en la construcción del dispositivo.

- **Temperatura.** El municipio se encuentra dentro de los pisos térmicos frío y paramo, con una temperatura que oscila entre 7°C a 12°C dependiendo de la época del año. Los meses más fríos tienden a ser los periodos con tendencia seca, pero en este caso son los meses de julio y agosto, que son los meses de los vientos. En estos meses la temperatura promedio mensual varía entre 9.6°C y 9.8°C siendo menor a la temperatura adecuada para el cultivo de papa, ya que exige una temperatura mínima de 10°C (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW, 2006).
- **Precipitaciones.** Se presentan de manera general dos periodos de lluvia intercalados con periodos de tendencia seca; en los meses de abril y mayo se presenta para la mayoría del área municipal el primer periodo lluvioso, exceptuando el sector central que corresponde al embalse del Neusa, cuyo periodo lluvioso se extiende hasta el mes de junio; el segundo periodo ocurre entre octubre y noviembre con máximos de precipitación en el mes de octubre.
Los periodos que presentan tendencia seca ocurren en el primer semestre del año en los meses de enero y febrero y también en el segundo semestre entre junio a septiembre y en diciembre, esto es crítico para el oriente del municipio, donde suceden en promedio lluvias mensuales menores a 40mm, alcanzando a 15mm promedio mensual en enero. La precipitación oscila entre 650 y 900 mm (**Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW, 2006**).
- **Humedad relativa.** Se presenta una menor humedad en los meses de menores lluvias y una mayor humedad en los meses de mayores lluvias, el valor promedio de la humedad en la zona húmeda es de 81% y en la zona semiárida del oriente del municipio es del 80% (**Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW, 2006**).

- **Vientos.** Los vientos dominantes provienen del sureste y del sur, aunque en el registro histórico a nivel mensual el 18 % de los vientos provienen del Este. La velocidad media del viento es de 1.3 m/s, pero cerca del 25% de la temporada los vientos soplan a velocidades, entre 1.6 y 2.0 m/s. Los vientos se tornan más fuertes a mediados del año y son más débiles en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre. La máxima velocidad alcanzada por el viento es de 20 m/s (**Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW, 2006**).
- **Incidencia solar.** se registra un total anual de 1.347 horas sol lo que equivalen a poco menos de 4 h/día, y puede variar a 1.672 horas equivalentes a 4,6 h/día. La máxima insolación ocurre en el mes de enero con un promedio de 167 a 238 equivalentes a 5,5 y 7,6 horas por día en promedio respectivamente y la menor durante el mes de junio con 82 y 106 horas (**Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW, 2006**).
- **Tipo de terreno.** El municipio cuenta con crestas, las cuales forman una unidad estructural que componen una intercalación de arenitas cuarzosas, arcillosas y lutitas; en estas últimas se acumula agua y materia orgánica y se forman suelos más profundos que favorecen el crecimiento de vegetación arbustiva y arbórea. También cuenta con cuestras, las cuales se caracterizan porque la pendiente en su conjunto no supera el 25%. En Tausa la cuesta forma una pendiente general entre 3% y el 7%. Están conformadas por un substrato rocoso misceláneo, donde predomina en las partes más altas, areniscas cuarzosas, en las más inclinadas lodolitas y arcillolitas limosas y las más onduladas o planas arcillolitas y lutitas con mantos de carbón. Así mientras en las cuestras inclinadas y altas predomina la cobertura de pastizales no manejados, en las áreas bajas, onduladas a planas se nota la alta intensidad del uso agropecuario favorecido por la presencia de un suelo negro, más profundo con gran cantidad de materia orgánica (**Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW, 2006**).

Las zonas de alta productividad agropecuaria se encuentran en las lomas, cuestras y laderas fluvio-glaciares en tierras con características y cualidades biofísicas y socioeconómicas apropiadas para la actividad agropecuaria. Predomina el cultivo de papa especialmente de la variedad parda pastusa, en rotación con variedades de pastos mejorados, dedicados al pastoreo semi-intensivo (**Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW, 2006**).

El área ondulada de la vereda La Florida es una de las mejores tierras, siendo apta, para la mayor cantidad de tipos de utilización como lo son el pastoreo, la agricultura y la ubicación de asentamientos. Además, son marginalmente aptas para la conservación la rehabilitación, la minería y la industria **(Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW, 2006)**.

2.2. ESTADO DEL ARTE

Estado del arte			
Nombre del documento/ artículo	Autor/es	Año	Aspectos relevantes
Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo: TobiBot	Cesar Humberto Guzmán Valdivia, José Luis Carrera Escobedo, Andrés Blanco Ortega, Marco Antonio Oliver Salazar, Fabio Abel Gómez Becerra	2014	A partir del análisis biomecánico del tobillo, se diseñó un dispositivo con el fin de inducir un movimiento básico de dorsiflexión/plantarflexión. Se propone el diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación del tobillo, en donde se proporcionan movimientos de rehabilitación pasivos y activos mediante la combinación de una interfaz interactiva y el uso de videojuegos. Además, se presenta el diseño mecatrónico de un sistema de 1 gdl, teniendo la ventaja de ser simple y funcional para la rehabilitación del esguince de tobillo. Se implementaron dos controladores, un PID y uno por impedancia para gobernar el mecanismo, ambos se mostraron con buen desempeño (Guzmán, Carrera, Ortega, Oliver & Gómez, 2014)

<p>Diseño de un entrenador electrónico para monitoreo de postura en ejercicios de halterofilia</p>	<p>Jorge Alejandro Cajas Ochoa</p>	<p>2017</p>	<p>En el diseño del sistema se requirió sensores de movimiento, en donde por costo y robustez se escogieron los sensores MEMS por lo que permiten tener microcomponentes y nanotecnología en un sensor. Se utilizaron los sensores para medir ángulos, realizando las pruebas con la programación del PIC 18F45k22 y comunicándose por medio del protocolo I²C, esto con el fin de comunicarse con el sensor y poder obtener sus datos. En cuanto al análisis de los ángulos captados por los sensores para encontrar la fuerza y la velocidad con el que se ejecutan los movimientos se evidencia si existe algún fallo en la forma en la que se ejecutan y ayuda a prevenir lesiones y corregir posturas (Cajas, 2017).</p>
<p>Diseño y construcción de dispositivo técnico de ayuda para rehabilitación en tobillo</p>	<p>Juan Manuel Andica Sánchez</p>	<p>2015</p>	<p>Los habitantes de las zonas rurales tienen como forma de sustento económico el trabajo que exige una gran actividad física, esta actividad de manera repetitiva causa muchas veces lesiones al trabajador, teniendo en cuenta que las lesiones en los tobillos son muy frecuentes tanto en la vida deportiva como en la cotidiana. Por lo mencionado anteriormente, se diseñó una estructura mecatrónica integrando sistemas, electrónicos e informáticos, se realizaron técnicas de modelado para las componentes a implementar, como métodos de elementos finitos, IDEF0 y UML permitiendo así, realizar las especificaciones de los elementos (Andica, 2015).</p>

<p>Sistema de monitoreo de tobillo en marcha por técnica de visión de computadora</p>	<p>Paola Castillo Irene</p>	<p>2019</p>	<p>Se propone la creación de un sistema integral, basado en hardware y software, que permita evaluar la marcha utilizando marcadores de colores elaborado con un material blando y aceptable al contorno del tobillo, colocados acorde al protocolo Davis, la cual será detectada por medio de técnicas de visión y algoritmos de inteligencia artificial, a partir de los resultados se obtiene los parámetros como el porcentaje de fase de apoyo y balanceo, ángulo de flexo extensión del tobillo, entre otros (Castillo, 2019).</p>
---	-----------------------------	-------------	--

A partir de los aspectos relevantes mencionados anteriormente, se puede evidenciar la importancia de estos dispositivos para la prevención y monitoreo del tobillo de los trabajadores del campo, ya que el sobreesfuerzo y trabajo constante de esta articulación puede causar problemas mayores, arriesgar la integridad y la forma de sustento de estas personas si se llega a fracturar. Recopilando todo esto, se pueden implementar los sensores MEMS para la construcción del dispositivo, además, para la programación es posible integrar un PIC debido la necesidad de tener un control en la articulación del agricultor, que permita la adquisición de los datos para su posterior análisis.

2.3. MARCO HISTÓRICO

Con el paso del tiempo, no se ha esclarecido científicamente una causa en concreto a una lesión en el tobillo, ya que se puede producir en la práctica de actividad deportiva, en cualquier actividad cotidiana desde caminar, trabajar, ya sea por la edad de la persona, el terreno en donde se encuentre, entre otras causas. En Colombia en zonas rurales donde hay práctica agrícola, se cuenta con gran exigencia de actividad física, además del trabajo en zonas o superficies irregulares llega a causar lesiones articulares de manera repetitiva en los trabajadores (Andica, 2015).

Históricamente en el tratamiento y prevención de lesiones en el ámbito laboral, el Instituto Nacional para la Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) creada en el año 1970 en Estados Unidos, es quien regula mediante una serie de normas y

estrategias de prevención de riesgos en accidentes que comprometen al trabajador donde en este caso se resalta la publicación N° 2001-111 de febrero de 2001, que habla de los riesgos del trabajo en el campo agrícola, en California, EE. UU. Así dando datos estadísticos de personas con problemas articulares y otros problemas de salud; esta publicación da a conocer estrategias en la acción y prevención de accidentes, desde el uso de maquinarias, insecticidas e incluso posturas de los agricultores en el trabajo en cultivos para prevención de lesiones articulares en la espalda, las rodillas y los tobillos (NIOSH, 2012).

Acerca de las formas de diagnóstico de lesiones de tobillo, la que más se ha usado con frecuencia a través del tiempo es la exploración física, que incluye la palpación de las estructuras óseas y tendinosas. Es habitual encontrar el tobillo inflamado y doloroso, en donde la inestabilidad no es aparente, sin embargo, durante la exploración física se puede pasar por alto otras lesiones asociadas. En este caso, se lleva a cabo una exploración radiográfica, para descartar lesiones ocultas, siguiendo las normas de OTTAWA (un instrumento con criterio clínico para decidir la necesidad o no de solicitar una radiografía). Por último, se encuentra la resonancia magnética (R.M) que es usada para descartar lesiones ocultas con indicios crónicos que no se evidencian en los estudios radiográficos (Nuez García, Caballero Martel, Romero Pérez, Barahona Lorenzo, & Navarro García, 2012).

2.4. MARCO TEÓRICO

2.4.1. Anatomía del tobillo

La articulación del tobillo es una de las más congruentes, debido a su configuración anatómica, es por esto por lo que se categoriza como una de las articulaciones más estables de la extremidad inferior. Esta articulación, está formada por la tróclea astragalina y por la mortaja tibioperonea, las cuales poseen características anatómicas que condicionan la biomecánica de esta (Puentes, 2011).

La tróclea astragalina tiene forma de un segmento de cilindro de unos 105° (Figura 1). En el plano horizontal es de 4 a 6mm más ancha por delante que por detrás. Por otra parte, la mortaja tibioperonea tiene una forma de un semicilindro de unos 65°, cubriendo más de la mitad de la superficie troclear lo que confiere gran estabilidad a la articulación, además, encaja perfectamente con la tróclea astragalina (Puentes, 2011).

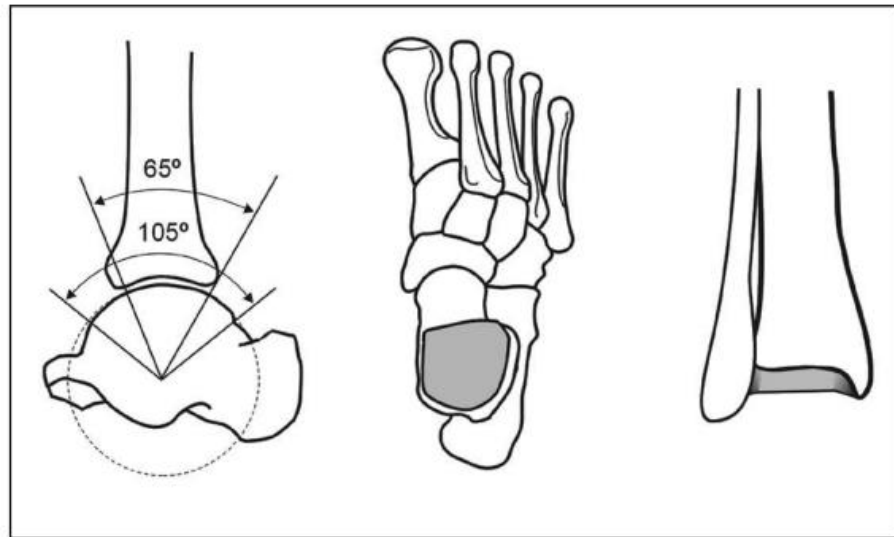


Figura 1. Anatomía ósea del tobillo (Puentes, 2011).

La anatomía del tobillo se conforma por tres huesos: la tibia, el peroné, el astrágalo y el calcáneo (Figura 2), los cuales se dividen en dos articulaciones, la primera se le conoce como la tibioastragalina y la subastragalina, esto porque es todo el conjunto que hace parte de dicha anatomía del tobillo; por lo cual son los principales actores en los movimientos de dorsiflexión y flexión plantar (Velasco & Fernández, 2013).

Como se mencionó anteriormente, la articulación del tobillo está formada por tres huesos, en donde el peroné y la tibia conforman una bóveda en la que se encaja la cúpula del astrágalo. Los cuales permiten movimiento de giro hacia delante y hacia atrás, que son movimientos de flexo extensión del pie. En el sentido lateral, los toques del maléolo peroneo y maléolo tibial, que son apéndices óseos impiden un movimiento completo de giro lateral, aunque si permiten su inicio. Por otra parte, el astrágalo se apoya sobre el calcáneo, formando una articulación plana, con poco movimiento. Esta articulación subastragalina soporta la transmisión de fuerzas del peso corporal y rige movimientos finos de estabilidad del pie, lo que genera que sea fuente de conflictos (BIOLASTER, s.f.).

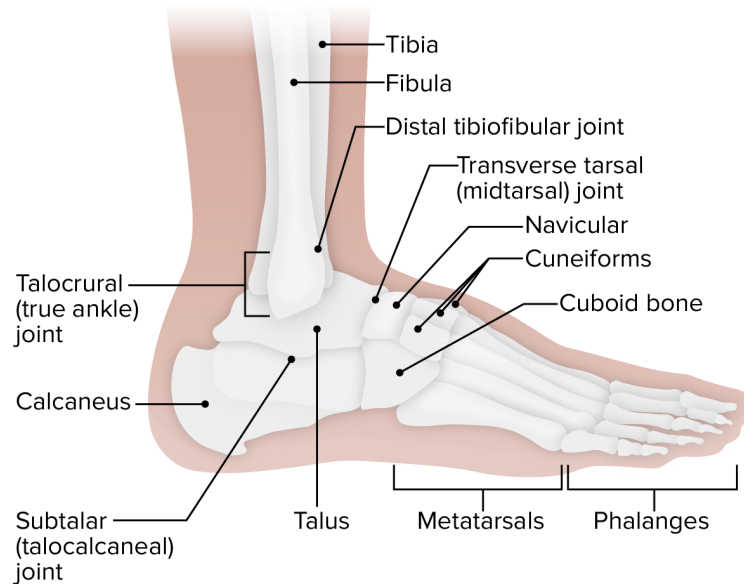


Figura 2. Vista lateral del tobillo (Puentes, 2011).

Al hablar de la anatomía, no solo se trata de los huesos que incorporan, también tienen que entrar otros factores que se encuentran dentro de la composición del tobillo, por lo que también debe de haber una manera de que los huesos se conecten, y estos son los llamados ligamentos; en el tobillo existen dos categorías, los cuales son los ligamentos exteriores, e interiores como medios de unión de la anatomía del tobillo.

En los ligamentos exteriores se encuentran, el Peroneoastragalino anterior y superior, y el ligamento Calcáneooperoneo Figura 3.

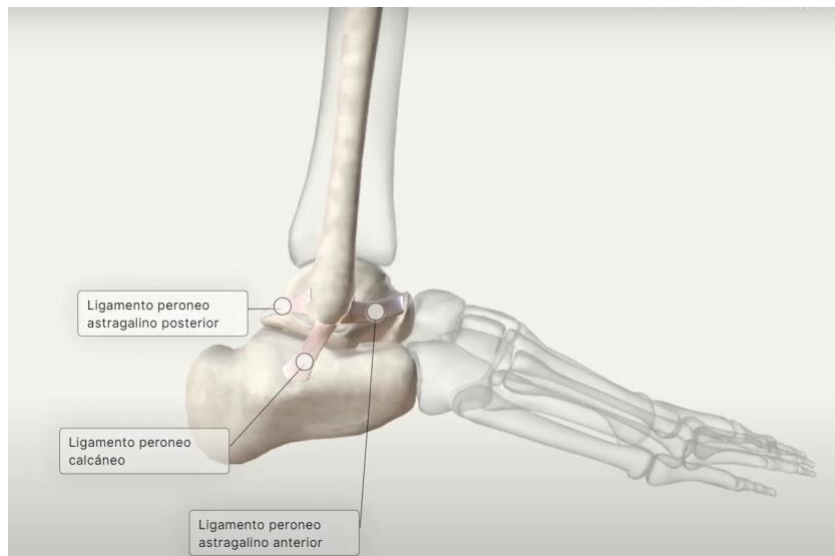


Figura 3. Vista lateral donde se aprecian los ligamentos externos del tobillo (FisioOnline, 2021).

Y por otro lado se encuentran los ligamentos internos como se muestra en la Figura 4, que básicamente se resume a un solo ligamento, llamado ligamento deltoideo, separado en 4 porciones, las cuales son la Tibioastragalina Posterior, Anterior, Tibiocalcánea y la Tibionavicular.



Figura 4. Ligamentos del tobillo, donde se resaltan las cuatro porciones pertenecientes al ligamento deltoideo (Padelstar. 2007).

2.4.2. Biomecánica del tobillo

La articulación del tobillo es considerada la reina de las articulaciones ya que es muy singular y no admite comparación con el resto de las articulaciones del miembro inferior. El grosor medio del cartílago articular del tobillo es de unos 1.6 mm, y soporta mucha más carga que ninguna otra en el cuerpo humano, soportando de 5-7 veces el peso corporal, comparado con las 3-4 veces en la rodilla y 2-3 veces la cadera (Puentes, Artículo biomecánica de pue, 2011).

La movilidad primaria de la articulación del tobillo se desarrolla en el plano sagital, en donde el rango de flexo-extensión medio es de 43° y solo 30° de este arco son necesarios para una marcha estable. La rotación del astrágalo dentro de la mortaja del tobillo también se considera importante para la comprensión de la biomecánica articular, por lo que esta rotación convierte el tobillo en una articulación biplanar (Monteagudo & Villardefrancos, 2007).

Los movimientos más importantes para el movimiento equilibrado y fluido de todo el cuerpo son el movimiento de dorsiflexión o flexión dorsal como se ilustra en la figura 5. Movimientos propios del ser humano como la flexo-extensión del miembro inferior, la marcha y la carrera precisan una óptima dorsiflexión del tobillo, así mismo consigue un movimiento equilibrado y funcional que garantice la eficiencia de este, además de la prevención de posibles lesiones (Fisioterapia, 2013). En el plano longitudinal se acepta para el movimiento de dorsiflexión entre $20-30^\circ$ y para la flexión plantar de $40-50^\circ$ (Puentes, Artículo biomecánica de pue, 2011).

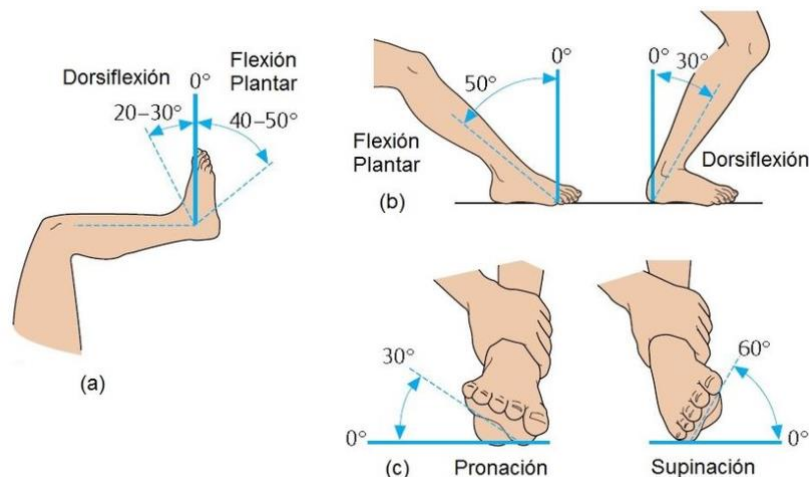


Figura 5. Movimiento del tobillo (Cifuentes, 2019).

Por otra parte, se muestran los tres ejes principales del tobillo, los cuales se interrumpen aproximadamente en el retropié. En el eje y se encuentra el movimiento de dorsiflexión/flexión plantar, en el eje x inversión/eversión, y por último en el eje z los movimientos de abducción/aducción, así como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Movimientos angulares del tobillo con respecto a los tres ejes (Blanco, 2013).

2.4.3. Lesión del tobillo

El tobillo es una articulación parte fundamental de la bipedestación, con lo que otorga rigidez y estabilidad, y distribución del peso corporal, lo cual se resume en la capacidad de una persona para poder mantenerse erguido (Velasco & Fernández, 2013).

Por motivo mismo de la importante función que cumple el tobillo, el comprender su anatomía, da lugar a estudiar aquellos factores que intervienen principalmente en este (ligamentos), y el papel que desempeña cada parte presente en la articulación, al fin y al cabo, como cualquier otra articulación presente en el cuerpo humano, frente a factores de riesgo, las lesiones siempre están presentes.

En la articulación del tobillo, básicamente se resume en que el astrágalo, junto al extremo inferior de los dos huesos de la pierna son lo que conforman dicha articulación, y que a su vez está subdividida en otras tres articulaciones, la

tibioperonea-astragalina, y las subastragalinas (superior e inferior), como se muestra en la Imagen 7 (Efisioterapia, 2011).

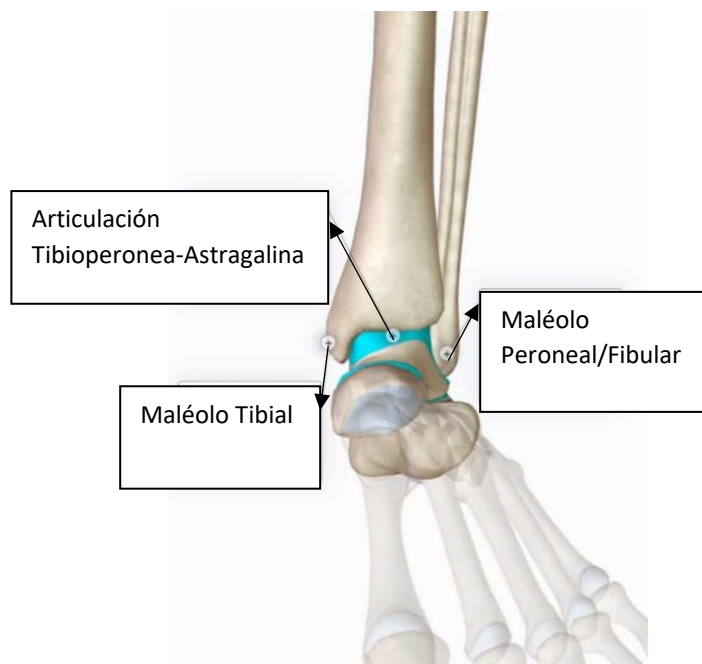


Figura 7. Articulaciones del tobillo.

Nota: Imagen que muestra las principales articulaciones del tobillo. Adaptado de Paradigmia, s.f.

Ahora específicamente el papel que cumplen estas dos articulaciones dentro del trabajo del tobillo va en, que la primera, es decir, la tibia peronea astragalina, es la que se encarga de darle al pie la firmeza para poder caminar y moverse, dándole así la versatilidad de acomodarse de la mejor forma ante diferentes inclinaciones e irregularidades en el suelo (Fisionline, 2021); las subastragalinas son las que se encargan de resumida manera de dar el trabajo de locomoción en la parte baja en la rotación del pie, también conocido como la pronosupinación (Avanfi, 2018).

Por otro lado, y consecuente a lo anterior explicado se habla de que, entre las lesiones más comunes causadas en el tobillo, se encuentra la fascitis plantar, la rotura del tendón de Aquiles, la fractura de tobillo, el esguince y muchas otras. Por dado, es necesario saber que el tobillo tiene una biomecánica, que la que permite la realización de diferentes movimientos del pie, y que a posterior si hay

una extensión de más podría causar alguna de las lesiones anteriormente mencionadas; la articulación tibia peroneoastragalina (ATPA), posee un movimiento oblicuo en relación con los planos anatómicos del pie, el cual está orientado de forma constituyente un ángulo de 8° con un plano transverso de 6° con el plano frontal. La cual va en función de la inclinación del eje a permitir realizar al tobillo un movimiento de flexión dorso plantar del pie. Desde esta postura, la flexión dorsal o dorsiflexión se define como el desplazamiento que aproxima el dorso del pie a la cara anterior de la pierna.

La expansión o flexión plantar de la articulación tibiotarsiana aleja el dorso del pie de la cara anterior de la pierna mientras tanto que el pie tiende a colocarse en la prolongación de la pierna (ver Imagen [2]). Ya en el estudio de la marcha se presenta que son necesarios por lo menos 10° de flexión dorsal y 20° de flexión sembrar para la usual funcionalidad del tobillo a lo largo de la marcha (Puentes D., 2011).

2.4.4. Unidad de medición inercial IMU

Una unidad de medición inercial es un dispositivo el cual integra múltiples ejes, giroscopios, acelerómetros y otros sensores para proporcionar una estimación de la orientación de un objeto en el espacio. Los sensores IMU incluyen la medición directa de la aceleración y la velocidad angular, están calibrados sobre la temperatura de funcionamiento y utilizan la tecnología de acelerómetro y giroscopio MEMS, con el fin de crear dispositivos livianos, pequeños y de alta precisión (Parker LORD).

2.4.5. Microcontrolador

Los microcontroladores PIC son circuitos integrados programables, capaces de realizar y controlar tareas las veces que sean necesarios, gracias a que cuenta con una memoria flash de alta resistencia. Tiene aplicaciones en la automatización y el control de procesos, comunicaciones, diseño embebido y desarrollo (UNIT ELECTRONICS, s.f.).

Todos los PIC utilizan una arquitectura Harvard, la cual está conectada a dos memorias, una con las instrucciones y otra con los datos por medio de buses diferentes. Esto permite, que el tamaño de las instrucciones no se relacione con el de los datos, por lo tanto, puede ser optimizado para que cualquier instrucción ocupe solo una posición de memoria de programa, permitiendo así mayor velocidad y menor longitud de programa (ECURED, 2019).

Estos microcontroladores incorporan un módulo interno de comunicación USB, es por esto, por lo que se pueden encontrar dentro de periféricos de computadoras o dispositivos comerciales e industriales que se conectan a través del bus. Al tener una comunicación USB, el PIC permite conectarse al computador y extraer los datos almacenados (RobotyPic, 2013).

2.4.6. Protocolo de comunicación I²C

El protocolo de comunicación I²C es una interfaz desarrollada con el fin de comunicar microcontroladores y periféricos en una comunicación Half-duplex, esta forma de comunicación reduce el cableado y el número de conexiones entre los microcontroladores (Electronic World, 2020).

Características:

- Velocidad de transmisión: 100Khz – 400Khz.
- Bus de comunicación: half dúplex, es decir que trae pasivos, son capaces de controlar la señal, para obtener una mayor potencia de esta (En este caso el amplificador operacional, que es el elemento usado para filtrar señales).

La función como se explica, de permitir el paso de señales en frecuencias determinadas, depende también de que tipo de filtro se esté utilizando y según las necesidades a ajustar cada tipo va a requerir una configuración u otra para cada uno de ellos (Ingeniería Mecafenix, 2013).

2.4.7. Protocolo de comunicación RS232

El protocolo RS232 es una norma de comunicación serial, y se encuentra presente en todos los ordenadores actuales, es usada comúnmente para realizar transmisiones de datos entre ordenadores. Este protocolo define especificaciones mecánicas, eléctricas, regula la transmisión de datos, las señales, el cableado y en los conectores en los que debe basarse. Este estándar se basa en la comunicación asíncrona, por lo que los datos pueden ser transmitidos en cualquier momento, por esto se deben tomar precauciones para sincronizar la transmisión y la recepción (Mijail, 2008).

2.4.8. Filtro digital FIR (Finite Impulse Response)

Los filtros FIR como su nombre lo indica tienen respuestas de impulso finitas, cuentan con la ventaja de que como su estructura es no recursiva son siempre estables, además son usados con facilidad por poseer fase lineal. Este filtro debe

ser causal, es decir que debe tener un retraso hacia los positivos y no debe existir señales en frecuencias negativas.

Existen tres tipos de técnicas de diseño de filtros FIR: la técnica de ventanas, la técnica de muestreo en frecuencia y la técnica de diseños con rizado uniforme.

El método de las ventanas se basa en truncar la respuesta impulsional infinita de un filtro ideal, esto se hace a través de la respuesta del filtro ya que se le aplica la ventana deseada por medio de una multiplicación de sus ecuaciones, generando que en el filtro diseñado se tengan menos variaciones de transición y supresión, logrando así un filtrado más efectivo (Martínez).

2.4.8.1. Filtro Pasa Bajas

Este filtro como dice permite el paso de frecuencias más bajas que la frecuencia de corte y según el filtro que se use puede atenuar la señal o directamente eliminarlas por completo.



Figura 8. Respuesta ideal y real de un filtro pasa bajas (Smith, 2011).

2.4.8.1. Filtro Pasa Altas

Al contrario del anterior filtro, es va a permitir el paso de frecuencias más altas por encima de la frecuencia de corte, y atenuará o eliminará lo demás según su configuración.

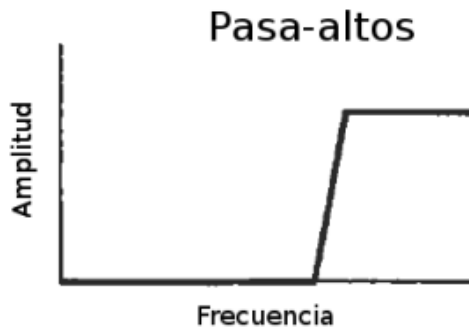


Figura 9. Respuesta ideal y real de un filtro pasa altas (Smith, 2011).

2.4.8.2. Filtro Pasa Bandas

El filtro pasa banda es una combinación de una pasa bajas con una pasa altas donde se definen dos frecuencias de corte, a un alta y una baja explícitamente, para que las frecuencias que estén dentro de este rango pueden pasar, y atenuar o eliminar la demás según su configuración.

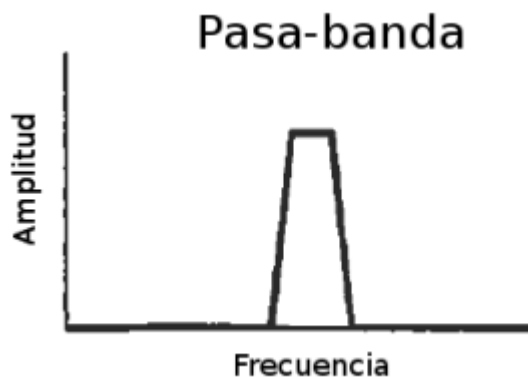


Figura 10. Respuesta ideal y real de un filtro pasa banda (Smith, 2011).

2.4.8.3. Filtro Rechaza Bandas

El rechaza bandas va a ser el opuesto a un pasa bandas donde en las señales de corte que se mencionaban en el anterior no van a ser las que delimiten el paso, sino son las que van a atenuar o eliminar la señal según la configuración utilizada.

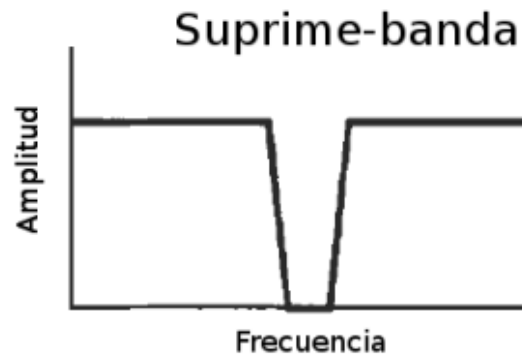


Figura 11. *Respuesta ideal y real de un filtro rechaza banda (Smith, 2011).*

2.4.8.4. Filtro complementario

Los sensores IMU presentan dos principales problemas, el ruido y los errores. El ruido son todas aquellas interferencias a todas las señales de origen eléctrico, no deseadas y que están unidas a la señal principal, lo que quiere decir que la puede alterar produciendo efectos más o menos perjudiciales (Huerta, 2015).

Las mediciones integrales acumulan errores de medición y ruido, lo que provoca deriva en la medición (drift). El mayor problema que se encuentran en los giroscopios de vibración es que a medio y largo plazo tienen deriva, lo que quiere decir es que la medida se va desviando progresivamente del valor real; por otra parte, los acelerómetros no tienen deriva a medio o largo plazo, sin embargo, se ven influenciados por los movimientos del sensor y el ruido por lo que no son fiables a corto plazo (Llamas, 2016).

Para poder tener las ventajas tanto del giroscopio como del acelerómetro, es necesario combinar y filtrar la señal registrada en bruto. Por esta razón, frecuentemente se implementa un filtro complementario, el cual consiste en una unión de dos filtros diferentes: un filtro pasa alto para el giroscopio y un filtro paso bajo para el acelerómetro como se observa en la figura 12 (Huerta, 2015).

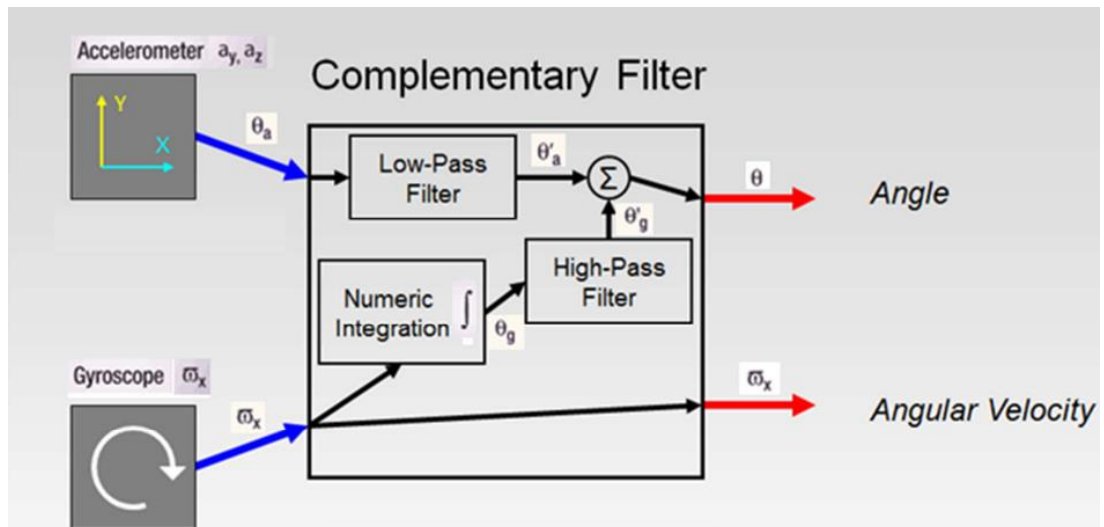


Figura 12. Estructura filtro complementario (Huerta, 2015).

Para el filtro paso alto del giroscopio, se dice que la respuesta en frecuencia se atenúan los componentes de baja frecuencia, dejando pasar los valores a partir de cierto limite. Para el filtro paso bajo del acelerómetro, permite pasar los valores que estén por debajo.

2.5. MARCO CONCEPTUAL

2.5.1. Sistema de monitoreo.

Los sistemas de monitoreo son responsables de proveer, tratar, analizar y difundir la información sobre el desempeño de algo, lo cual permite generar la toma de decisiones, y así mismo, generar intervenciones si es necesario. La información necesaria para el seguimiento se logra a partir de datos cualitativos y cuantitativos, capaces de alimentar los indicadores (Lauriac, 2016).

2.5.2. Cultivo de papa

2.5.2.1. Importancia en el cultivo de papa

La cultivación de papa es uno de los procesos más importantes a nivel nacional, ya que se cultiva alrededor de 9 departamentos y aproximadamente más de 300

municipios en el país, lo que representa un 93% destinado a consumo fresco, además que no solo existe un tipo de papa, sino que existen diferentes variedades, desde la pastusa, la parda, criolla, etc (Agro Bayer Colombia, 2020).

La producción de papa promedio es de aproximadamente 21.5 Toneladas, las cuales se encargan más de 90.000 familias dedicadas a este cultivo. Debido a que la papa es un tubérculo subterráneo, los agricultores pasan la mayoría de tiempo a estar en periodos largos en sus jornadas laborales a permanecer agachados, lo cual generan comúnmente diferentes problemas arteriales, por ejemplo, la artrosis, donde es un desgaste de las superficies articulares que conforman el tobillo, la cara articular de la tibia, del astrágalo y del peroné (ICC, 2018).

2.5.2.2. Condiciones climáticas

- **Suelo**

La ubicación debe estar en lugares que estén a la altura desde los 2700 hasta los 3400 metros sobre el nivel del mar donde, predominan suelos de tonalidad negro característica encontrada en paramos, conocidos como suelos negro-andinos (Intagri, 2017).

- **Clima**

El clima, como se habla de zonas de paramo, los climas más adecuados para el cultivo de papa son entre los 7 y 14°C, con precipitaciones lluviosas de alrededor de 700 a 1200 milímetros anuales (Intagri, 2017).

- **Preparación del suelo**

Arado: se realiza dos meses antes de la siembra, ese tiempo es ideal para que las malezas y residuos vegetales se descompongan.

Rastrada y nivelada: Se realiza de forma espaciada y cruzada hasta conseguir que el suelo bien mullido.

Drenajes: Dependiendo de la pendiente del suelo, se deben trazar zanjas para drenar los excesos de agua para evitar dañar al cultivo.

Elaboración de surcos: Se elaboran surcos, de manera que al caer el agua lluvia o el riego, el agua se deslice lentamente, así evita la erosión del suelo (Intagri, 2017).

- **Siembra**

Preparación de la semilla: Se somete la semilla al verdeo, esto evita el brote acelerado logrando:

- Brotes cortos.
- Control de insectos.
- Acorte del periodo vegetativo de la planta.

Distancias y densidades de siembra: La distancia depende de la variedad a cultivar y la pendiente del terreno:

- Al producir papa para el consumo la distancia entre surcos será mayor, según la pendiente del terreno, entre más inclinada, mayor distancia tendrá que haber.

Abonado de fondo: En el momento de sembrar, primero se agrega el abono al fondo del surco, siendo de la siguiente forma:

- Estiércol descompuesto: 1.5 Kg más 35 g de muriato de potasio más 53 g de roca fosfórica por cada metro lineal del surco.
- Compost: 1 Kg más 35 g de muriato de potasio más 53 g de roca fosfórica.

- **Manejo del cultivo**

Deshierbas: Las hierbas indeseadas son muchas veces un problema en el cultivo, ya que compiten por la obtención de agua y luz para crecer, aparte de alojar fácilmente plagas que afectan la cosecha, por lo que es importante dos veces seguidas (en la primera luna creciente y la segunda menguante), realizar la deshierba (Argenpapa, 2021).

Aporque: Se refiere a una labor que realiza ya después de los 100 días de cultivo hasta los 120 días máximo, y consiste en llevar la tierra de la base del surco hasta el cuello de la planta para:

- Aislar el tubérculo de la plaga.
- Mejorar el drenaje de agua en los surcos.
- Facilita una mejor formación en el tubérculo.

Riego: En el riego hay varias etapas donde, la primera vez se realiza días antes de la siembra para uniformar la humedad en el suelo, luego cada 12-15 días hasta la floración y luego de esta cada 8-10 días. Además, en cosechas a una altura sobre los 3000 metros sobre el nivel del mar, se necesita de entre 600 a 700 milímetros de agua distribuida de manera uniforme durante su ciclo vegetativo.

Rotaciones del cultivo: Con el propósito de evitar agotamiento de fertilidad en los suelos, es importante realizar rotaciones en el cultivo (Argenpapa, 2021).

- **Defoliación y Cosecha**

Defoliación: Cuando se ha comprobado la madurez fisiológica en la planta, se procede a realizar la defoliación o deshoje, con el objetivo de eliminar el follaje existente en el cultivo, además que la piel de la papa tenga una buena consistencia, para que al momento de la cosecha no se desprenda del tubérculo, es decir, que no se vaya a pelar.

Cosecha: Según las características geográficas donde se cultive (altitud), se produce de 6 a 7 meses luego de la siembra de la papa; al momento de la cosecha se toman varias muestras aleatorias, que serán examinadas realizando frotos sobre estos para verificar la madurez del tubérculo (la cascara de la papa no ha de desprenderse).

Ya conociendo la madurez de la papa en el cultivo, se realiza un proceso llamado cave, el cual realiza una labor manual o con ayuda de herramientas como azadones o palas, con el fin de sacar todos los tubérculos, separando los tubérculos que salieron dañados con los que no (Argenpapa, 2021).

2.5.3. Bioseñales

Son señales biológicas que registran en un determinado espacio-tiempo eventos biológicos tales como los latidos cardiovasculares, pulsos del cerebro o contracciones musculares. La actividad eléctrica, química o mecánica que llegan a ocurrir suele generar señales, que pueden ser medidas y analizadas, obtenidas de diferentes formas (Siderio, 2013).

2.5.4. Señales Biomecánicas

Como bien dicen son el resultado de las funciones mecánicas en el cuerpo tales como, el movimiento, el desplazamiento, tensión fuerza, presión y flujo, del sistema biológico.

Para la medición de este sistema se suelen utilizar diferentes transductores de desplazamiento para medir el movimiento de un objeto en una dirección y magnitud a lo largo del eje de acción. Un ejemplo de un componente es el potenciómetro, que convierte el desplazamiento lineal o angular en valores de voltaje (Siderio, 2013).

2.5.5. Sensores MEMS

Los sensores MEMS (Sistemas Micro Electro-Mecánicos) son dispositivos diminutos, en donde albergan estructuras microscópicas de silicio, estos sensores utilizan esas estructuras para medir la aceleración, la presión del aire, el campo geomagnético, el sonido, la velocidad de giro, la temperatura, la humedad y la calidad del aire (Eurofach Electrónica, 2015).

Los acelerómetros y giroscopios son los sensores MEMS elegidos para proporcionar información de rotación y aceleración de drones, teléfonos celulares, aviones y automóviles. El acelerómetro como el giroscopio ofrecen varias ventajas sustanciales al sistema de navegación, ambos sensores recopilan datos sobre el mismo fenómeno fusionando sus datos de salida, siendo así, una opción apropiada en varias aplicaciones (MordorIntelligence, 2021).

2.5.6. Giroscopio- acelerómetro

Los acelerómetros miden todas las fuerzas lineales que operan sobre un objeto con unidades en milivoltios/g (mv/g/g), esto lo realiza en los ejes X, Y, Z de manera independiente, lo que permite saber de manera simultánea la magnitud y dirección de la aceleración media. Además, permiten determinar el ángulo de desviación del objeto medido de la vertical, así como en mediciones de aceleración dinámica, movimiento o impacto de vibración de baja amplitud y frecuencia (Llamas, 2016).

El giroscopio es una herramienta mecánica que se puede utilizar para medir, mantener o cambiar la orientación en el espacio de algún objeto, aparato o vehículo. Gracias al ensamble de sus piezas, nunca pierde estabilidad, a pesar de estar sometida a alguna fuerza. A diferencia de los acelerómetros, los giroscopios son dispositivos puramente diferenciales, lo que quiere decir, que no

existe una referencia absoluta si no que siempre mide ángulos relativos a una referencia arbitraria (Llamas, 2016).

Los giroscopios que emplea MEMS se denominan giroscopios vibratorios de efecto Coriolis (CVG), su principio de funcionamiento es que un objeto vibratorio tiende a vibrar en el mismo plano incluso si está rota. El efecto Coriolis provoca que el objeto vibratorio ejerza una fuerza sobre él, y midiendo esa fuerza se puede determinar la rotación que está sometido el giroscopio (Llamas, 2016).

2.6. MARCO LEGAL

Resolución 434 de 2001: “Por lo cual se dictan normas para la evaluación e importación de tecnologías biomédicas, se define las de importación controlada y se dictan otras disposiciones”

Decreto 919 de 2004: “Por el cual se reglamentan las donaciones internacionales de medicamentos y dispositivos médicos”

Decreto 4725 de 2005: “Por el cual se reglamenta el régimen de registros sanitarios, permiso de comercialización y vigilancia sanitaria de los dispositivos médicos para uso humano.”

Resolución 4816 de 2008: “Por la cual se reglamenta el Programa Nacional de Tecnovigilancia”

Resolución 1319 de 2010: “Mediante la cual se adopta el manual de buenas prácticas de manufactura para la elaboración y adaptación de dispositivos médicos sobre medida de prótesis y ortesis ortopédica externa y se dictan otras disposiciones.”

Según el Invima los productos se clasifican de acuerdo con la certificación requerida, en la siguiente tabla se muestra la normatividad para los dos tipos de dispositivos médicos.

NORMATIVIDAD SEGÚN INVIMA

Dispositivo medico estándar	Dispositivo medico sobre medida
Resolución 4816 de 2008	Resolución 5491 de 2017
Resolución 4002 de 2 de noviembre de 2007	Resolución 2968 de 2015
Decreto 4725 de 21 de diciembre de 2005	Resolución 4396 de 2008
	Decreto 1030 de 2007

Tabla 1. Normatividad para los dispositivos médicos.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Tipo investigación

El proyecto en desarrollo es de tipo experimental, por lo que se realizó pruebas con el dispositivo para conocer el valor de la variable, en este caso el grado de inclinación del tobillo, para posteriormente observar los resultados arrojados y poder determinar si el tobillo se encuentra dentro de los rangos normales de inclinación.

Además, el proyecto se basa en un tipo de investigación aplicada, por lo cual se busca indagar a fondo acerca del problema y encontrar los principales factores que lo llevan a este, siendo finalmente aplicado a base del desarrollo de un prototipo que además la finalidad es que sea probado y analizado en el campo de estudio al que se está enfocando este proyecto, es decir, al sector campesino.

3.2. Enfoque de la investigación

El proyecto se enfoca en una investigación de tipo cuantitativa, en donde a través del monitoreo se realizará la recopilación de datos sobre el grado de inclinación del tobillo en los movimientos de dorsiflexión/flexión plantar, e inversión/eversión, que permita saber si se está superando o no este valor.

3.3. Población

Para el estudio del sistema de monitoreo, se establece a la población del sector rural, específicamente a los agricultores que se empeñan en la labor de la cultivación de papa, en el municipio de Tausa.

3.4. Muestra

Partiendo de la población expuesta y conocida en el municipio de Tausa se decidió tomar una muestra de 10 agricultores.

3.5. Hipótesis

La implementación de un dispositivo de monitoreo del tobillo para agricultores de papa permite conocer los grados de inclinación en los ejes X, Y, de esta

manera es posible saber si el tobillo se está moviendo dentro del rango de inclinación permitido por la articulación.

3.6. Fases del proyecto

Se plantea dividir el proyecto en 5 fases: inicio, planificación, ejecución, seguimiento y cierre. La fase de seguimiento se describe en los resultados y discusión, y la de cierre en las conclusiones.

4. INICIO

Se realizó una investigación exhaustiva identificando las distintas lesiones en el tobillo que pueden llegar a presentarse en los agricultores de papa, así como la anatomía y biomecánica del tobillo, esto con el fin de evidenciar los parámetros biomecánicos del tobillo, los cuales fueron de ayuda para delimitar los rangos de los movimientos que permite el dispositivo, como se muestra en la Tabla 2.

Parámetros biomecánicos

Movimiento	Eje	Límite mínimo	Límite máximo
Dorsiflexión	Y	20°	30°
Flexión plantar	Y	40°	50°
Inversión	X	15°	23°
Eversión	X	10°	17°
Abducción	Z	16°	26°
Aducción	Z	22°	36°

Tabla 2. Parámetros biomecánicos del tobillo.

Se plantearon algunas características para el dispositivo de monitoreo, las cuales se dividieron en requerimientos electrónicos y requerimientos estructurales como se observan en las tablas 3 y 4.

Tabla requerimientos electrónicos

Característica	
Corriente de operación	50mA
Batería	380mAh
Accesibilidad a los datos	Si
Módulo de carga	Si
Tolerancia	2%

Tabla 3. Requerimientos electrónicos para el dispositivo de monitoreo.

Tabla requerimientos estructurales

Característica	
Tamaño	7.6x3cmx 5.6cm
Peso aproximado	200g
Ajustable	Si
Resistente a la humedad	Si
Resistente al polvo	Si

Tabla 4. *Requerimientos estructurales para el dispositivo de monitoreo.*

5. PLANIFICACIÓN

5.1. REQUERIMIENTOS

Para la selección del sensor y microcontrolador del dispositivo de monitoreo, se tuvo en cuenta inicialmente los parámetros biomecánicos del tobillo (Tabla 1), así como algunos criterios relevantes para la selección de cada uno de los componentes. Adicionalmente, se escogió el protocolo de comunicación para recibir los datos tomados por el sensor.

A continuación, se muestran los parámetros de selección y datos de operación de los componentes seleccionados.

5.1.1. Parámetros de selección del microcontrolador

Según los parámetros establecidos en la tabla 3, se decidió usar el microcontrolador PIC, en vista de su operación y eficiencia en cuanto al código y familiarización con su lenguaje C++, ya que permiten gran compactación de los programas a la hora de ejecutar el código, además de la rapidez de ejecución a frecuencias mínimo de 20MHz, y de su rapidez en cuanto a la memoria RAM. Asimismo, se tuvo en cuenta su tamaño al ser menor de 5..cm, ya que al tener un tamaño pequeño el dispositivo genera comodidad al usuario, por lo que sí es mayor a 7.6cm será incómodo para el agricultor, complicando su labor en el proceso del cultivo de papa a la hora que se esté monitoreando la articulación.

En la tabla 5, se muestra las características que se tuvieron en cuenta para escoger el microcontrolador, el criterio de selección de los diferentes microcontroladores que se preseleccionaron para discutir sobre la opción más eficaz, con criterios de evaluación de 1 a 5, siendo 5 el mayor puntaje de calificación. Los criterios de evaluación se escogieron teniendo en cuenta el costo del componente, el tamaño ya que es una característica importante en el diseño y la operación englobando particularidades como la memoria de programa y la memoria de datos.

Tabla de decisiones

Factor	Costo	Tamaño	Rapidez	Operación	Total
PIC18F2455	2	4	5	5	16
PIC18F4550	4	3	5	5	17
PIC16F84	4	2	2	4	12
ARDUINO NANO	3	3	3	3	12

Tabla 5. Tabla de decisiones del microcontrolador.

A partir de los resultados de la tabla de decisiones, se obtuvo como resultado más alto el PIC18F4550, por consiguiente, se escogió este microcontrolador para la realización del proyecto ya que cuenta con más características que se acoplan a las necesidades del proyecto (Tabla 6).

MICROCONTROLADOR PIC18F4550

PIC	
Voltaje	2V-5.5V
Frecuencia de operación	31KHz - 48MHz
Corriente	25mA
Costo	\$38.000
Tamaño	5.3x1.47x0.5 cm
RAM	2048 bytes

Tabla 6. Datos del Microcontrolador.

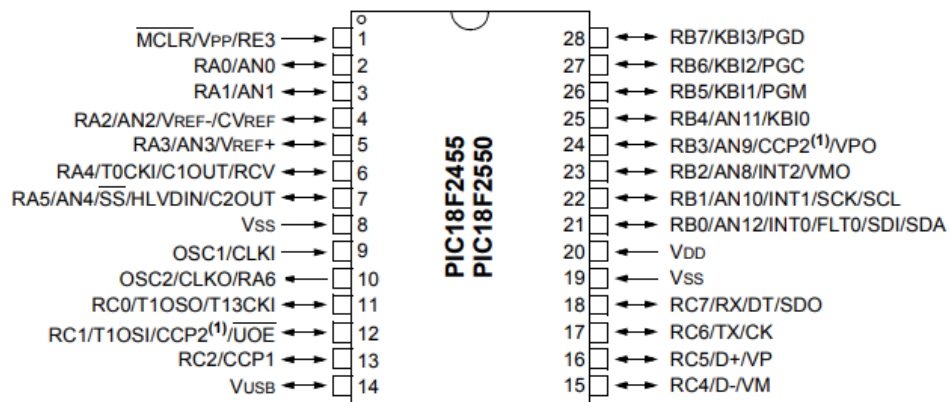


Figura 13. PIC 18F2455 (Microchip Technology Inc, 2009).

En la tabla 7 se presentan las características del dispositivo, las cuales describen el funcionamiento del microcontrolador PIC18F4550.

Características del dispositivo PIC18F4550

CARACTERÍSTICAS	PIC18F4550
Frecuencia de operación	DC- 48MHz
Memoria de programa (Bytes)	32768
Memoria de programa (Instrucciones)	16384
Memoria de datos (Bytes)	2048
Memoria EEPROM de datos (Bytes)	256
Fuentes de interrupción	20
Puertos I/O	A, B, C, D, E
Timers	4
Módulos de captura/comparación/PWM	1
Captura mejorada/ Módulos de comparación/PWM	1
Comunicación serial	MSSP, Enhanced USART
Modulo Bus Serial Universal (USB)	1
Puerto paralelo de transmisión (SPP)	SI
Modulo análogo a digital 10Bits	13 canales de entrada
Restablecimientos y retrasos	POR, BOR, RESET Instrucción, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (opcional), WDT
Conjunto de instrucciones	75 instrucciones; 83 con conjunto de Instrucciones extendido activado
Paquetes	40-Pin PDIP 44-Pin QFN 44-Pin TQFP

Tabla 7. Características del dispositivo PIC18F4550 (Microchip Technology Inc, 2009).

5.1.2. Parámetros de selección del sensor

El sensor utilizado fue un giroscopio-acelerómetro debido a que se buscaba obtener el ángulo de inclinación del tobillo de acuerdo con los movimientos generados por el mismo, en este caso el sensor se encarga de medir el movimiento rotacional en el espacio en los tres ejes X, Y, Z, como se muestra en la tabla 2, y presenta una gran ventaja gracias a que el acelerómetro como el giroscopio recopilan datos sobre el mismo fenómeno lo que permite que fusionen sus datos de salida y se acomode a las necesidades del proyecto.

Para la tabla de decisiones (Tabla 8) se tuvo en cuenta algunas características similares al del microcontrolador como el precio y el tamaño, otro factor importante para el sensor va en la operación donde se busca que, tenga buena precisión para la toma de datos, es decir este sensor busca tomar los movimientos en el plano tridimensional como se menciona anteriormente, que son el principio para monitorear los movimientos capaces de realizar el tobillo, así mismo se busca que tenga una buena operación en la comunicación I2C para la transmisión de los datos.

Tabla de decisiones

Factor	Costo	Tamaño	Precisión	Operación I2C	Total
OKY3230	3	5	3	2	13
Mpu6050 Gy-521	5	5	4	4	18
GY-291 ADXL345	3	5	4	4	16

Tabla 8. *Tabla de decisiones del sensor.*

Así, analizando las características buscadas para la implementación del sensor, se escoge el sensor giroscopio-acelerómetro MPU6050 GY-521, ya que este no solo brinda la posición en la que está el objeto, sino que también es capaz de detectar la dirección en la que gira. En la tabla 9 se observan algunos datos primordiales del sensor.

SENSOR ACELERÓMETRO-GIROSCOPIO

Acelerómetro Giroscopio	
Voltaje	3.3V-5V
Frecuencia	I2C a 100kHz-400kHz*
Corriente	3.6mA
Tamaño	2cm*1.6cm*0.3cm
Interfaz digital	I2C
Costo	\$15.000
Precisión	2g, ±4g, ±8g, ±16g
Frecuencia de operación I2C	400kHz

Tabla 9. Datos del sensor.



Figura 14. Sensor MPU6050 GY-521 (ssdielect, 2022).

5.1.3. Parámetros de selección del protocolo de comunicación

El PIC cuenta con un protocolo de comunicación I2C, el cual tiene una relación simple entre maestro y esclavo, donde el maestro es el controlador y el esclavo un sensor digital, el cual en este caso es un giroscopio – acelerómetro. Este protocolo de comunicación, gracias a su arquitectura permite tener una confirmación de los datos recibidos dentro de la misma trama, la cual incluye más bits en comparación con otros protocolos, lo que permite enviar mensajes más completos y detallados. Es por esto por lo que se seleccionó como protocolo de comunicación el I2C.

5.1.4. Parámetros de selección para el módulo de recepción de datos

Para la recepción de los datos se optó por usar el módulo HW-474, el cual utiliza la interfaz USB y convierte los datos RS232 a TTL, permitiendo una comunicación serial simple. El módulo cuenta con 5 pines en los cuales se encuentra el voltaje de salida de 3.3V y 5V, los pines de comunicación TXD y RXD y tierra.



Figura 15. Módulo HW-474 (alexnlid, s.f).

5.1.5. Batería

Se seleccionó la batería Lq-s1, ya que esta es usada en su mayoría para dispositivos Smart-watch lo que permite que su tamaño sea reducido (31mmx 24mmx 5mm) y cuenta con una capacidad de 380mAh, además, es una batería recargable de polímero de litio con una tensión de 3.7V.

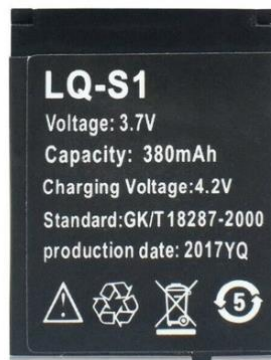


Figura 16. Batería de litio LQ-S1 (mercado libre, 2022).

5.1.6. Módulo de carga

De acuerdo con la batería de litio Lq-sq se eligió es módulo de carga TP4056 FC-75 especialmente por el tamaño reducido y ligero para la aplicación en si buscando reducir peso neto del dispositivo y la comodidad de carga mediante puerto micro USB voltajes nominales de entrada de 4.5V ~ 5.5V y tensión de carga completa de 4.2v.

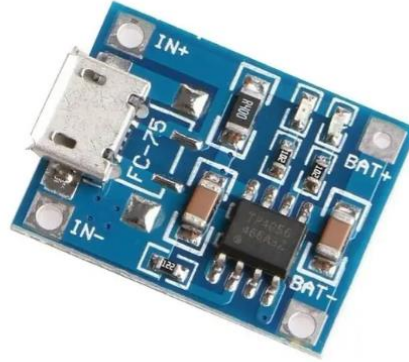


Figura 17. Módulo de carga FC-75 (mecatrónica, s.f).

5.2. DISEÑO ELECTRÓNICO

Dada la investigación previa, se pensó en que, el dispositivo de monitoreo ha de ser una montura sencilla, confortable y liviana para el usuario, es decir, que es un dispositivo compacto, el cual permite al agricultor ejercer su trabajo con normalidad. A continuación, se muestra en la figura 18 el esquema eléctrico que se diseñó para el dispositivo con los componentes seleccionados.

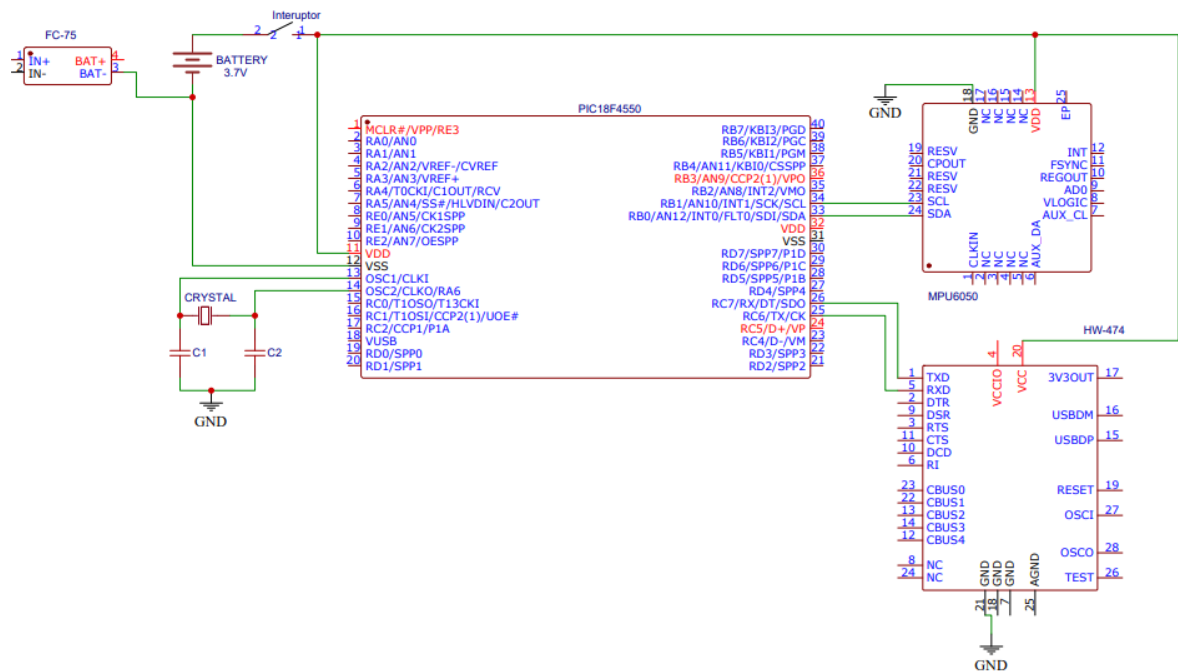
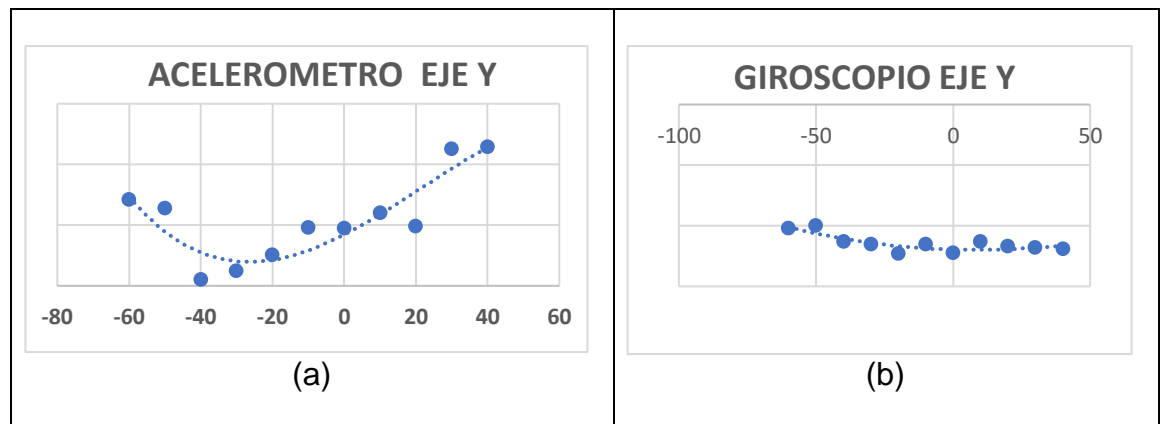


Figura 18. Esquema electrónico del dispositivo de monitoreo del tobillo.

5.2.1. Caracterización del sensor

Para la caracterización del sensor, se tomaron los datos del comportamiento del giroscopio y acelerómetro de forma experimental para cada uno de los ejes. A continuación, se muestra las gráficas en la figura 19, y posteriormente se encuentra su respectiva ecuación característica, en donde el eje x es el tiempo en segundos. Además, se realizó la transformada de Laplace para cada una de las ecuaciones obtenidas en el tiempo, con el fin de obtener información del comportamiento del sistema en frecuencia.



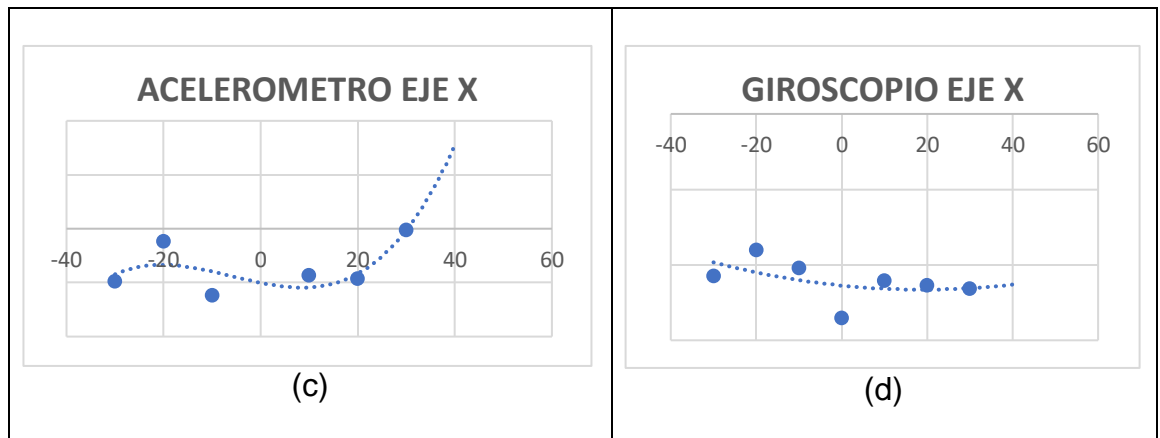


Figura 19. Graficas de caracterización del sensor. (a) Acelerómetro eje Y; (b) Giroscopio eje Y; (c) Acelerómetro eje X; (d) Giroscopio eje X. Graficas obtenidas en Excel.

Acelerómetro en el eje Y

Ecuación 1. Función en el tiempo acelerómetro eje Y:

$$y = -0.0027x^3 + 0.1781x^2 + 15.115x + 423.04$$

(1)

Ecuación 2. Función de transferencia acelerómetro eje Y:

$$\frac{423.04s^3 + 15.115s^2 + 0.3562s - 0.0162}{s^4}$$

(2)

Giroscopio en el eje Y

Ecuación 3. Función en el tiempo giroscopio eje Y:

$$y = 0.0039x^2 - 0.0689x - 119.67$$

(3)

Ecuación 4. Función de transferencia giroscopio eje Y:

$$\frac{119.67s^2 - 0.0689s - 0.0078}{s^3}$$

(4)

Acelerómetro en el eje X

Ecuación 5. Función en el tiempo acelerómetro eje X:

$$y = 0.0071x^3 + 0.1263x^2 - 3.6571x - 200.77$$

(5)

Ecuación 6. Función de transferencia acelerómetro eje X:

$$\frac{-200.77s^3 - 3.6571s^2 + 0.2526s + 0.0426}{s^4}$$

(6)

Giroscopio en el eje X

Ecuación 7. Función en el tiempo giroscopio eje X:

$$y = 0.0151x^2 - 0.5728x - 227.43$$

(7)

Ecuación 8. Función de transferencia giroscopio eje X:

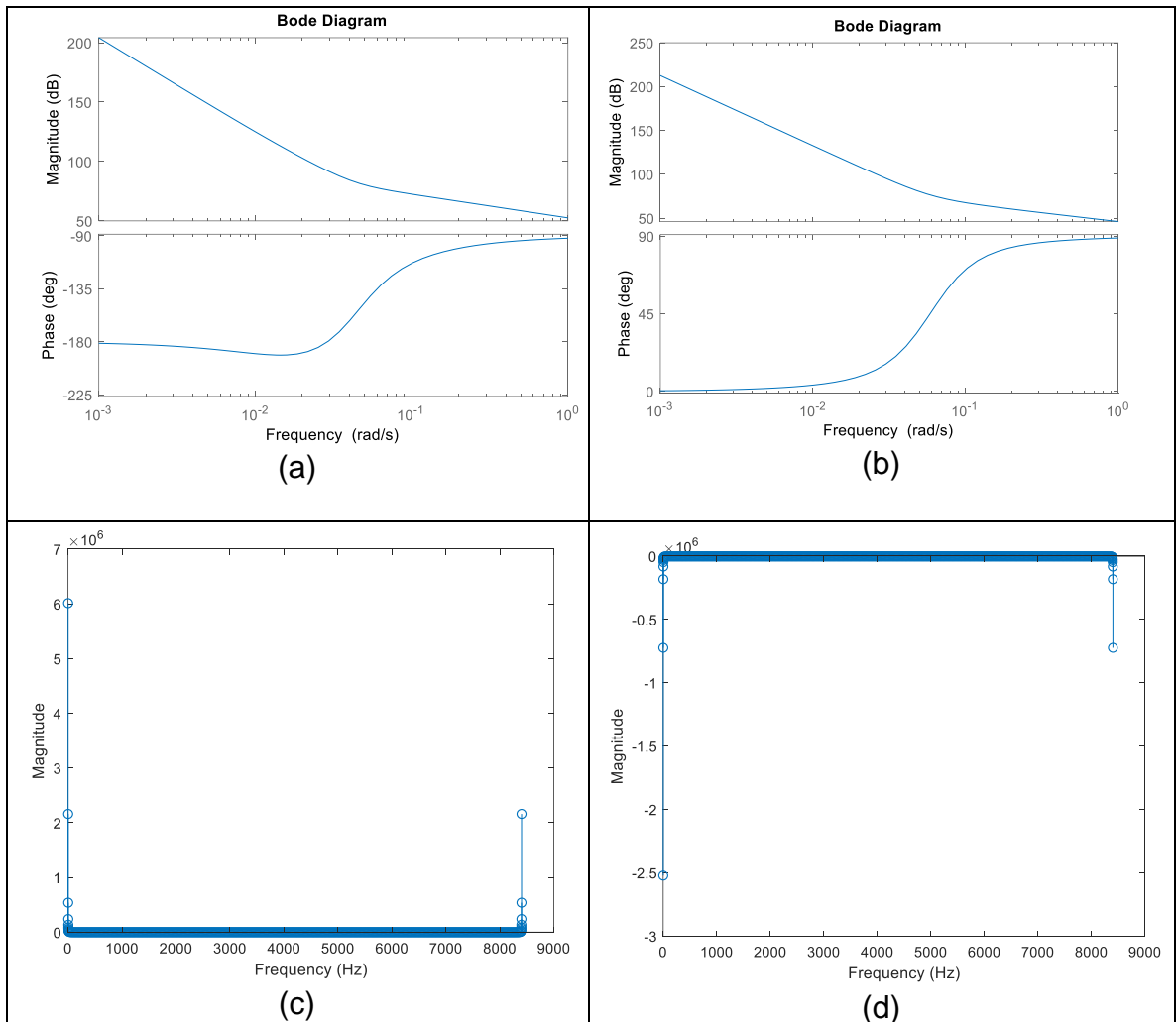
$$\frac{-227.43s^2 - 0.5728s + 0.0302}{s^3}$$

(8)

5.2.2. Etapa de filtrado

5.2.2.1. Análisis frecuencial

Se realizó el análisis de frecuencia a partir del diagrama de Bode, la transformada de Fourier y la densidad espectral de potencia, con el fin de observar en donde se encontraban las componentes de frecuencia que fueron útiles para saber qué tipo de utilizar. A continuación, se observa cada una de las gráficas obtenidas tanto para el giroscopio como el acelerómetro en los ejes X, Y.



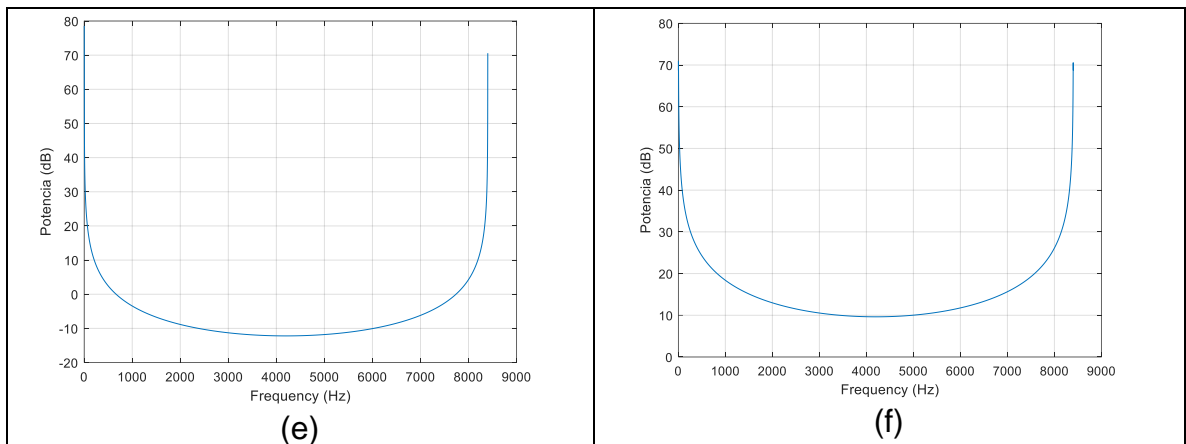
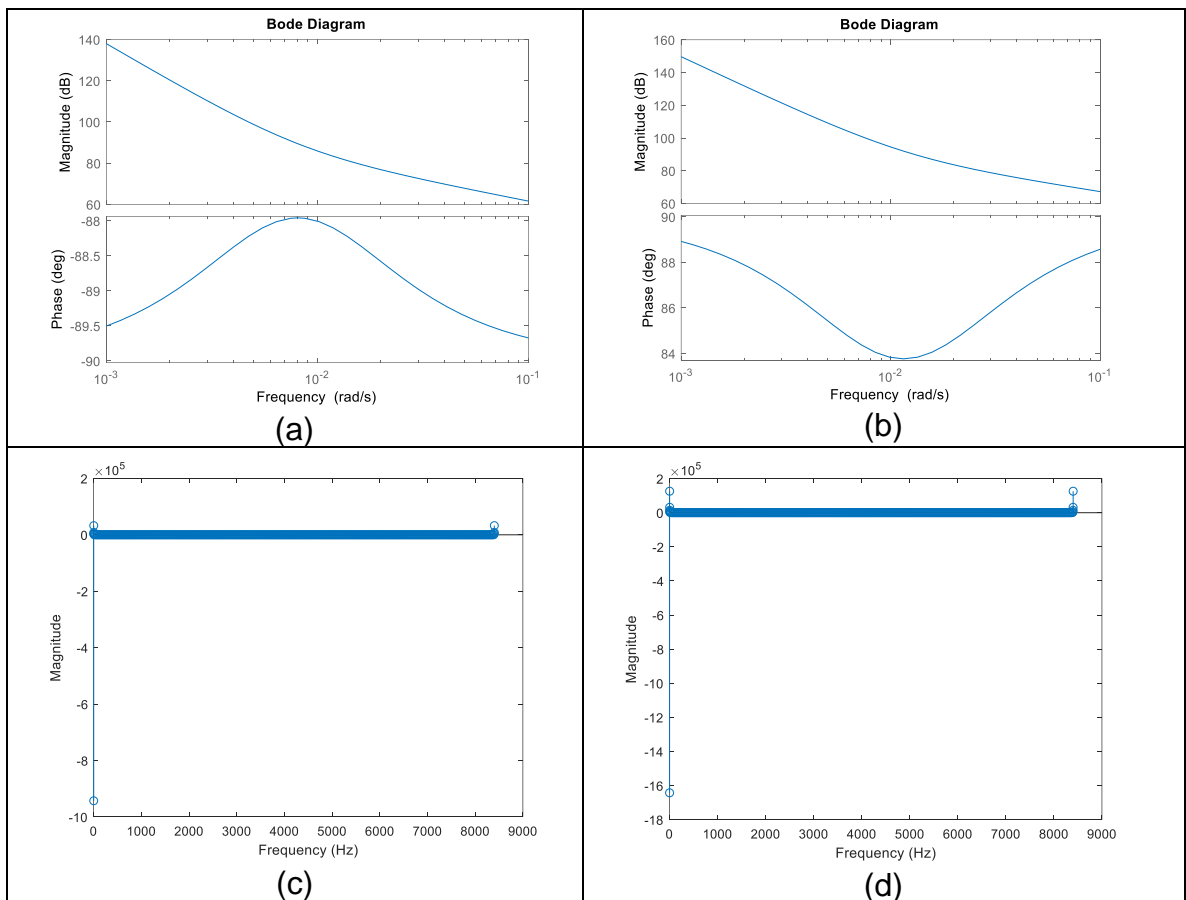


Figura 20. Gráficas de frecuencia del acelerómetro. (a) Diagrama de Bode, acelerómetro eje Y; (b) Diagrama de Bode, acelerómetro eje X; (c) Gráfica transformada de Fourier, acelerómetro eje Y; (d) Gráfica transformada de Fourier, acelerómetro eje X; (e) Gráfica densidad espectral de potencia, acelerómetro eje Y; (f) Gráfica densidad espectral de potencia, acelerómetro eje X.



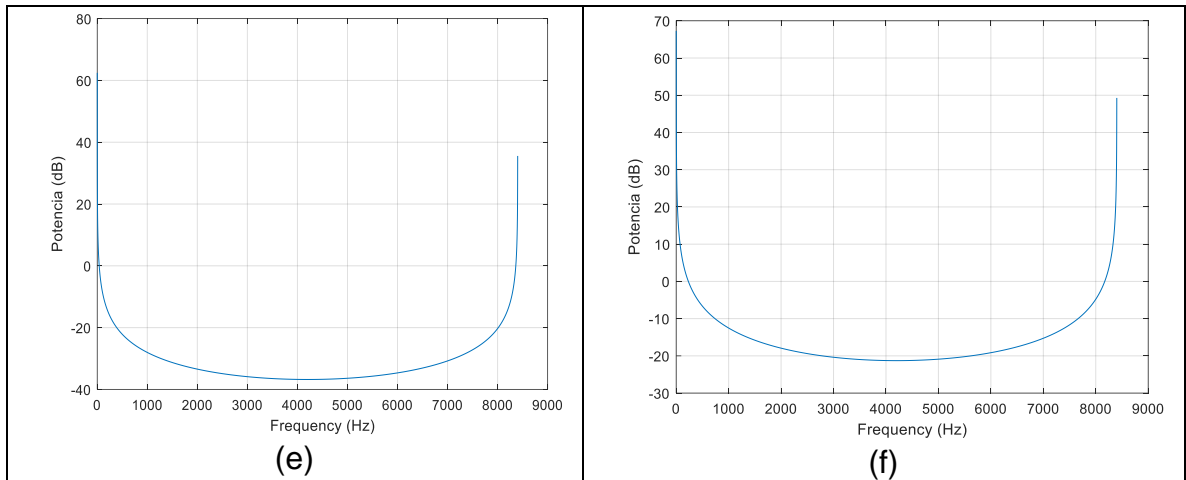


Figura 21. Gráficas de frecuencia del giroscopio. (a) Diagrama de Bode, giroscopio eje Y; (b) Diagrama de Bode, giroscopio eje X; (c) Gráfica transformada de Fourier, giroscopio eje Y; (d) Gráfica transformada de Fourier, giroscopio eje X; (e) Gráfica densidad espectral de potencia, giroscopio eje Y; (f) Gráfica densidad espectral de potencia, giroscopio eje X.

El diagrama de Bode es útil para analizar la estabilidad del sistema, en este caso del acelerómetro y el giroscopio en los diferentes ejes, gracias a las características que se pueden observar a continuación, en la tabla 10 donde se muestran los valores obtenidos en el diagrama de bode.

Características del diagrama de Bode

Característica	Acelerómetro eje Y	Giroscopio eje Y	Acelerómetro eje X	Giroscopio eje X
Pendiente	-0.02	-0.072	-0.0421	-0.037
Margen de fase	-90	-90	90	90
Margen de ganancia	$-\infty$	No	No	No
Frecuencia de corte (-3dB)	598 rad/s	170 rad/s	281 rad/s	321 rad/s
Ancho de banda	596.26	144.5	265.4	222

Tabla 10. Características diagrama de Bode acelerómetro y giroscopio.

Las diferentes pendientes que se observa en el diagrama de Bode de las figuras 20a, 20b, 21a y 21b, son pendientes con valores bajos, es decir que la capacidad para distinguir la señal del ruido también es baja en el sistema. Por otra parte, en el

ancho de banda se observan valores altos, lo que quiere decir que el tiempo de crecimiento es bajo, por tanto, es lento el sistema y baja la capacidad para reproducir la señal de entrada. Teniendo en cuenta esto, se puede concluir que es necesario realizar un filtro para obtener una señal limpia y con datos certeros para el usuario.

Con respecto a las gráficas de transformada de Fourier y densidad espectral, se observa que el rango de frecuencias donde se concentran las variaciones de potencia es en 0Hz y 8401Hz.

5.2.2.2. Diseño filtro pasa alta

En esta sección se tuvo en cuenta la parte teórica que suministra el datasheet, ya que es necesario tener conocimiento de las frecuencias de funcionamiento tanto para el giroscopio como para el acelerómetro, por lo que estos valores son parámetros fundamentales para el diseño del filtro, así como la señal de interés vistas anteriormente.

A continuación, se muestra la tabla 11 en donde se encuentran los datos de las frecuencias del sensor MPU-6050 obtenidos del datasheet.

CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS DE MPU-6050

PARÁMETRO	CONDICIÓN
Frecuencia de muestreo del giroscopio rápida	8kHz
Frecuencia de muestreo del giroscopio lenta	1kHz
Frecuencia de muestreo del acelerómetro	1 kHz
Ruido RMS de baja frecuencia: Ancho de banda	1 Hz a 10 Hz
Tasa de densidad espectral de ruido	10 Hz
Frecuencias mecánicas del giroscopio	
Eje X	30-36 kHz
Eje Y	27-33 kHz
Eje Z	24-30 kHz
Respuesta del filtro paso bajo del giroscopio	5 - 256 Hz
Respuesta del filtro paso bajo del acelerómetro	5 - 260 Hz

Tabla 11. Características eléctricas MPU-6050.

En la tabla 12 se observan los parámetros que se establecieron para el diseño del filtro, obtenidos a partir del análisis de frecuencia y de los datos de la hoja de datos del sensor.

PARÁMETROS DE DISEÑO

Frecuencia de corte	321 rad/s: 51,089Hz
Frecuencia de muestreo	1kHz
Tipo de filtro	FIR
Método de diseño	Ventana Hamming
Orden	10

Tabla 12. *Parámetros de diseño del filtro.*

Partiendo de los parámetros de diseño y con ayuda de Matlab se realizó el filtro pasa bajas de tipo ventana por el método Hamming como se observa en la figura 22, del cual se toman los coeficientes obtenidos por el software para luego añadirlos al código de programación.

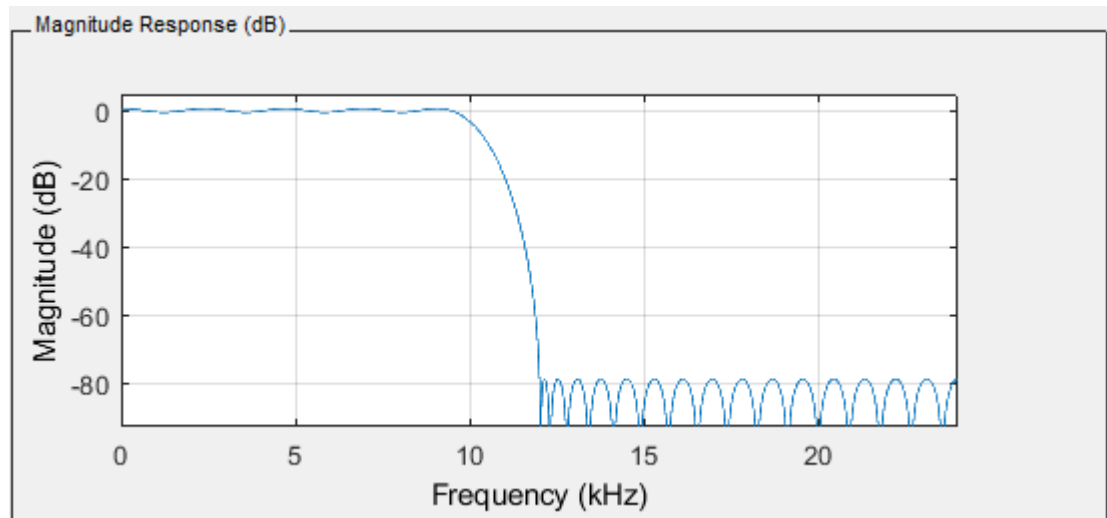


Figura 22. *Filtro tipo ventana por el método de Hamming.*

5.2.2.3. Filtro complementario

Existen varias formulaciones para un filtro complementario, en su expresión más sencilla, puede expresarse de la siguiente forma:

Ecuación 9. Filtro complementario

$$\theta = A \cdot (\theta_{prev} + \theta_{gyro}) + B \cdot \theta_{acel}$$

(9)

Donde A y B son constantes que pueden tomar los valores de 0.98 y 0.2 respectivamente. Se puede calibrar el filtro variando los valores de A y B siempre que cumpla la condición de que sumen 1.

5.3. DISEÑO MECÁNICO

Se diseñaron las piezas del dispositivo en SolidWorks, como se muestra en las figuras 23 a la 30, para posteriormente realizar la impresión de las piezas en 3D.

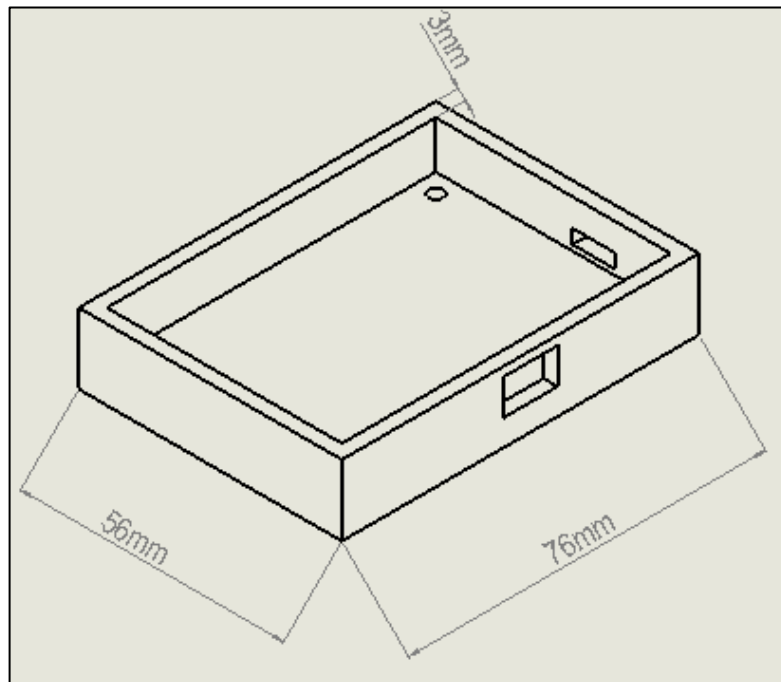


Figura 23. Dimensiones pieza lateral 1.

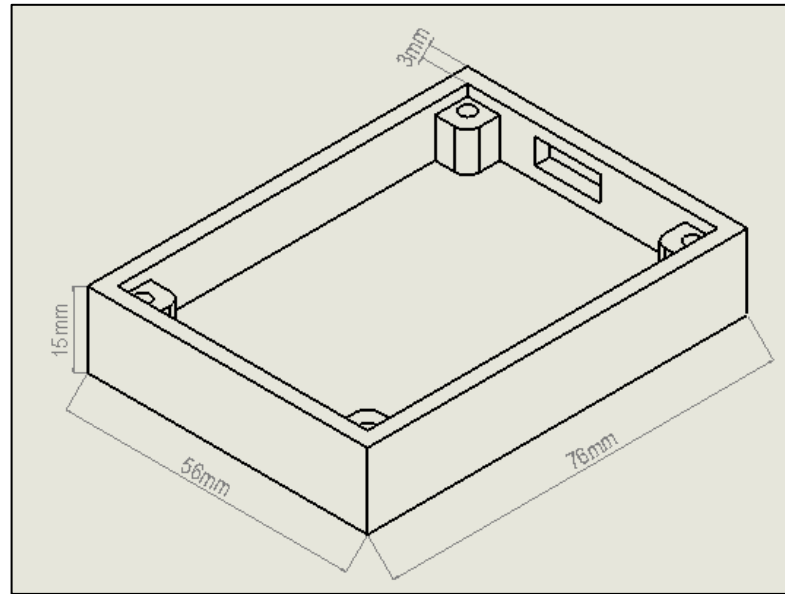


Figura 24. Dimensiones pieza lateral 2.

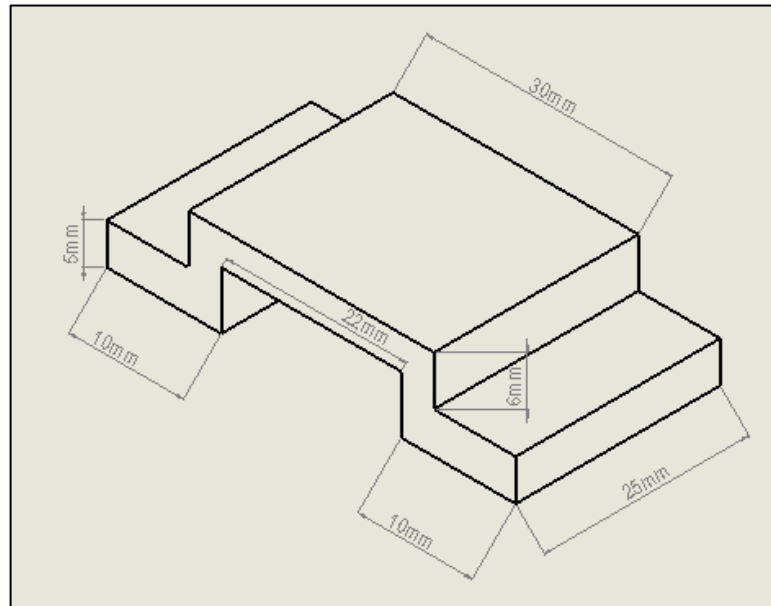


Figura 25. Dimensiones pieza soporte.

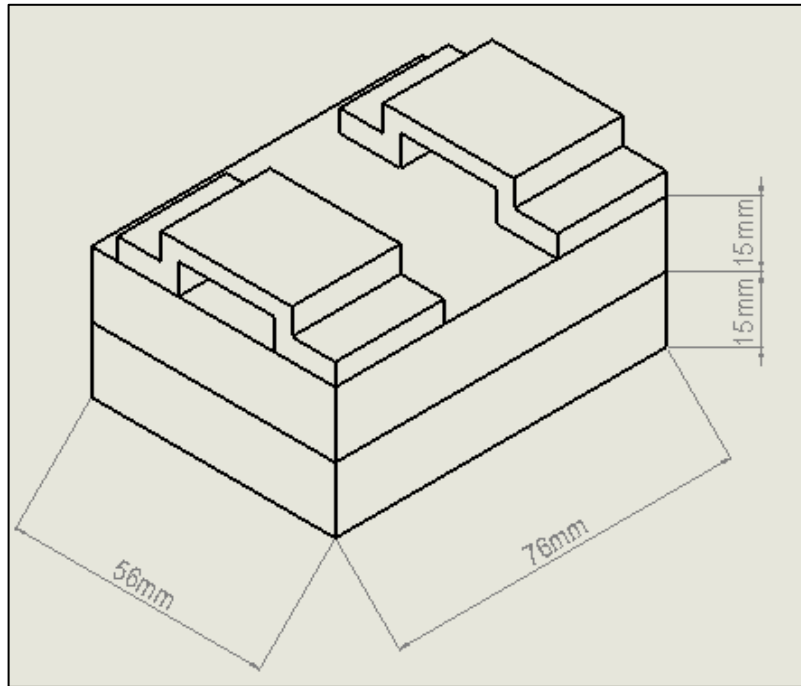


Figura 26. Dimensiones ensamble vista inferior izquierda.

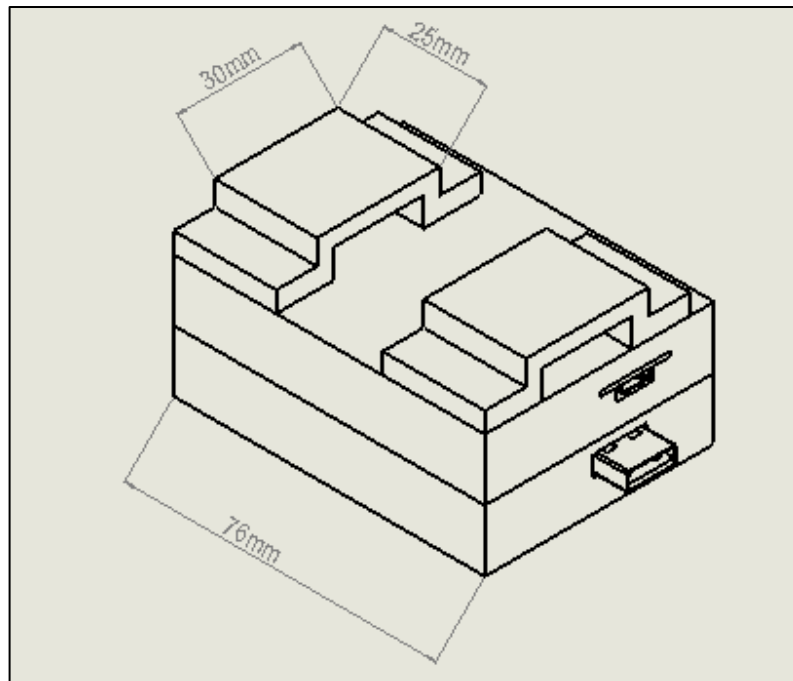


Figura 27. Dimensiones ensamble vista inferior derecha.

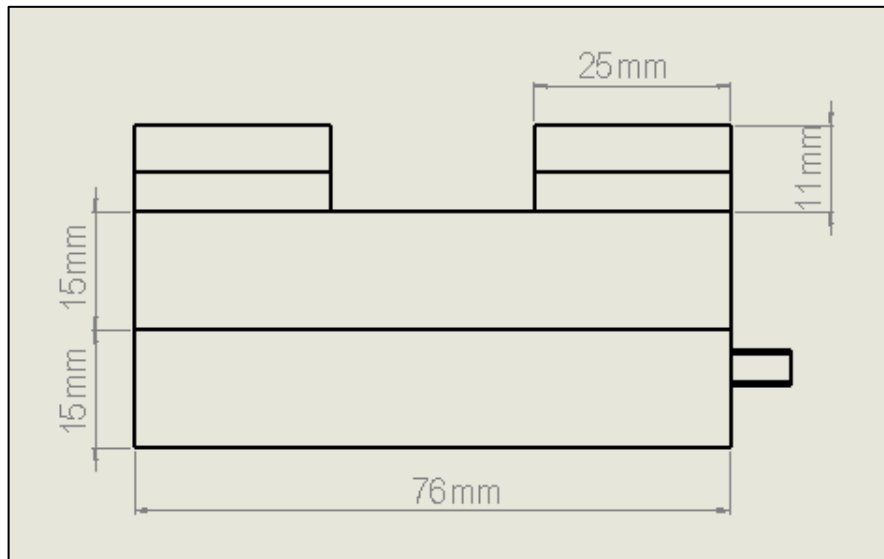


Figura 28. Dimensiones *ensamble vista superior.*

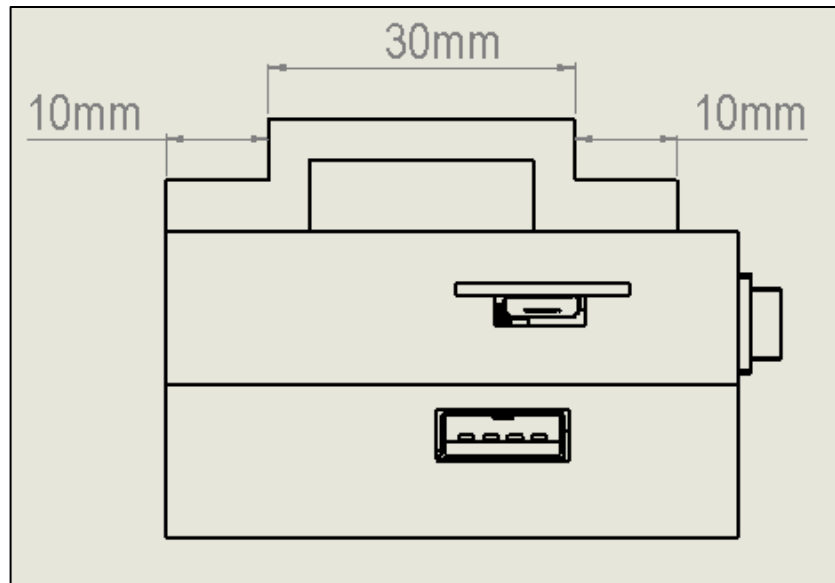


Figura 29. Dimensiones *ensamble vista derecha.*

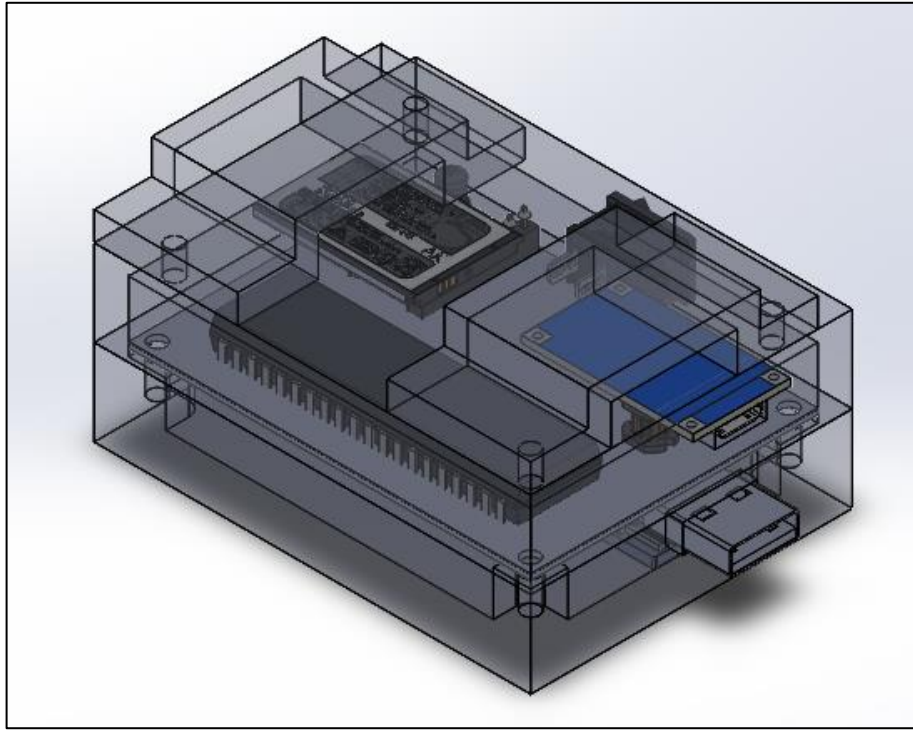


Figura 30.Modelo CAD.

6. EJECUCIÓN

En esta etapa del proyecto se llevó a cabo el ensamble de los componentes, como se mostró con anterioridad en los diseños electrónico y mecánico y la programación para el microcontrolador.

6.1. Ensamble de los componentes

Primeramente, se soldaron los componentes electrónicos por ambos lados del PCB, como se observa en las figuras 31 y 32, esto se hizo para optimizar espacio debido a los requerimientos ergonómicos del dispositivo. Al PIC 18F4550 se le añadió un oscilador de 4MHz.

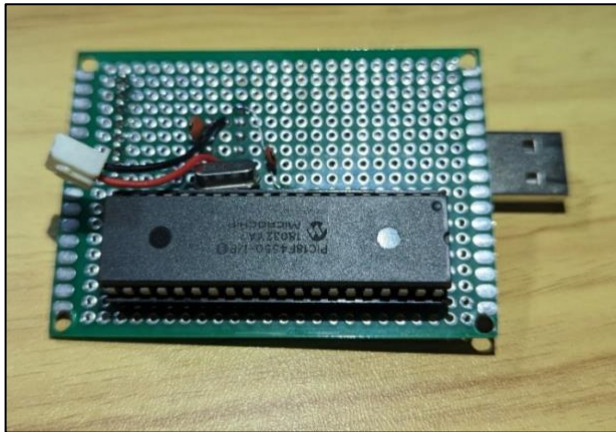


Figura 31. Ensamble de los componentes electrónicos lado 1.

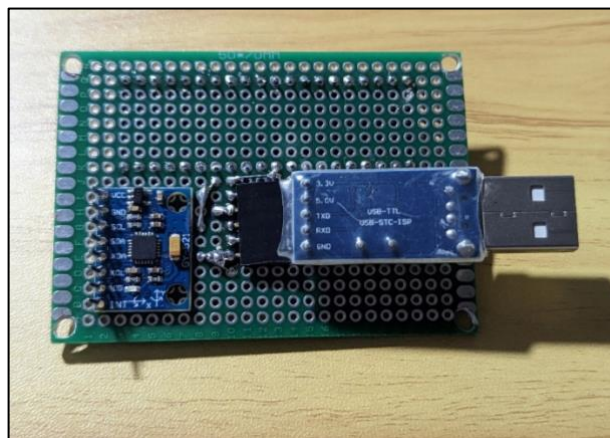


Figura 32. Ensamble de los componentes electrónicos lado 2.

Se realizó la impresión de las piezas 3D del diseño mecánico en el material PLA, como se muestra en la Figura 33.

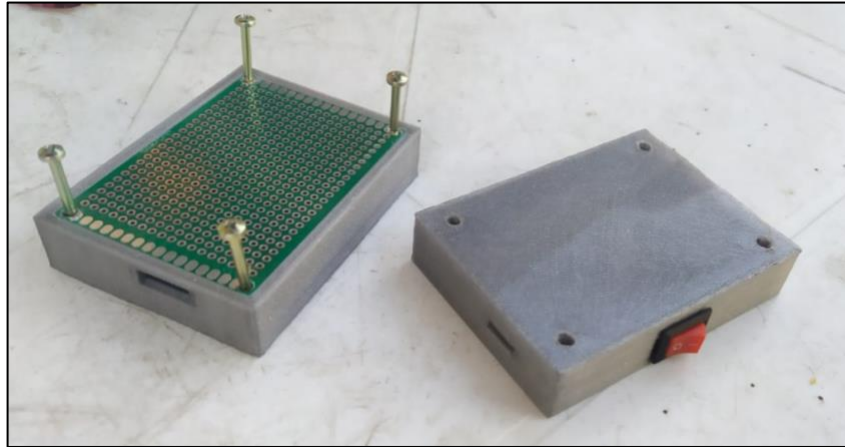


Figura 33. Piezas impresas 3D.

Se terminaron de ensamblar los componentes faltantes, como lo es la batería, el módulo de carga y el interruptor Figura 34, para finalmente hacer el acople del PCB. Por último, se añadió un velcro para poder ajustar el dispositivo y adaptarlo a cada uno de los tobillos de los agricultores Figura 35.



Figura 34. Acople del PCB.



Figura 35. *Ensamble final.*

6.2. Pruebas

Las pruebas del funcionamiento del dispositivo se llevaron a cabo en el terreno destinado para el cultivo de papa en el municipio de Tausa Figura 36. Cada uno de los agricultores caminó por el terreno con el dispositivo en el tobillo por un tiempo de 10-12 minutos, ya que este es el tiempo requerido para realizar la actividad de monitoreo del tobillo Figura 37.



Figura 36. *Terreno del cultivo de papa.*



Figura 37. Pruebas con el dispositivo de monitoreo.

6.3. Algoritmo

En cuanto al algoritmo se realizó la lectura del sensor MPU6050, mediante la comunicación I2C, se incluyeron los coeficientes para el sensor digital pasa bajas, además se incluyó el protocolo de comunicación rs232 para transferir los datos del PIC al PC. En la figura 38 se presenta el algoritmo implementado para el funcionamiento del dispositivo.

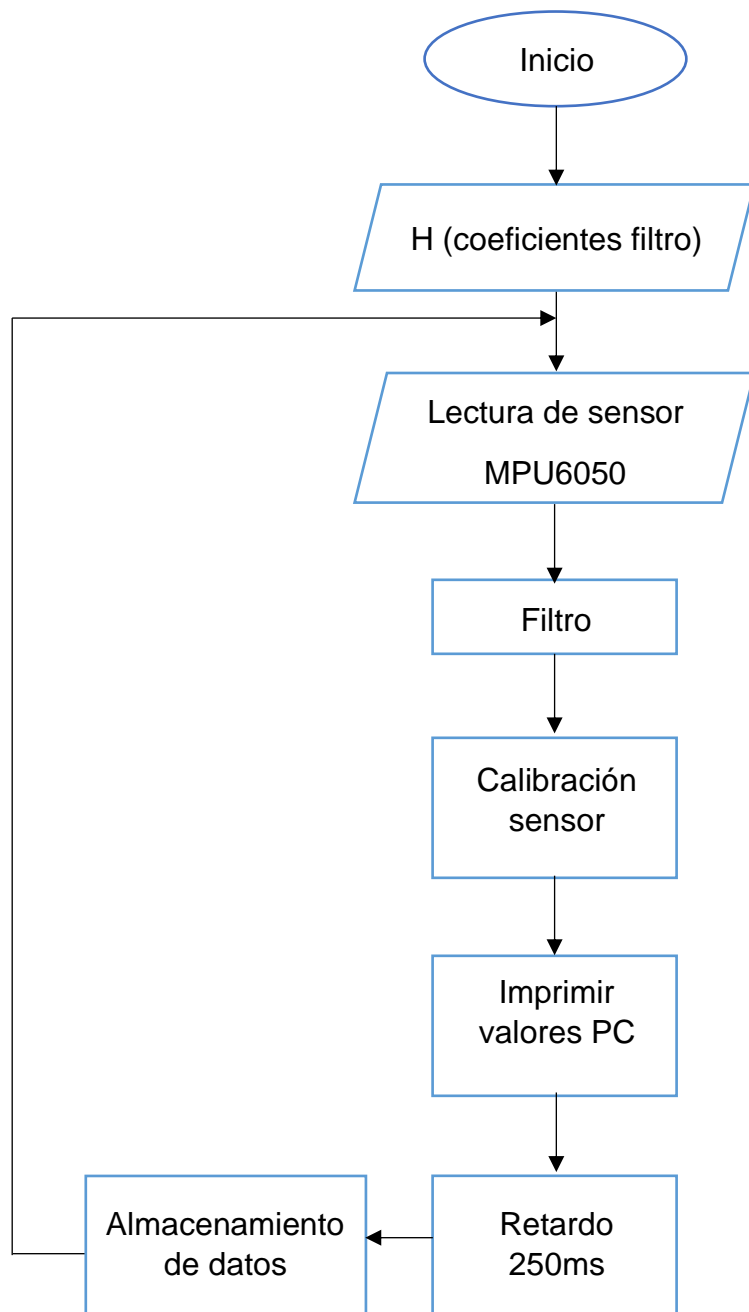


Figura 38. Algoritmo implementado.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

¿Cómo se puede monitorear la articulación del tobillo durante la labor de labrado en agricultores de papa del municipio de Tausa?

Para responder la pregunta de investigación, se desarrolló un dispositivo mecatrónico como se describe en los capítulos 5 y 6, a partir de esto se realizaron pruebas con el dispositivo de monitoreo, para comprobar que estuviera midiendo la inclinación del tobillo de manera correcta, con el fin de conocer el estado de la articulación del agricultor de papa durante el proceso de labrado.

A partir de las pruebas realizadas con el dispositivo a los 10 agricultores se generó una tabla especificando el número de muestras que se obtuvieron, así como el tiempo total en que se realizó el ensayo para cada uno de los agricultores Tabla 13. Posterior a esto se generaron las gráficas con los datos obtenidos por el sensor en cada uno de los ejes en el software Hércules, posterior a esto se generaron las gráficas correspondientes a los datos en los ejes XY para cada persona como se observa en las Figuras 39 a 48.

NUMERO DE MUESTRAS

Persona	N° de muestras	Tiempo (s)
1	2.563	640,75
2	2.659	664,75
3	2.765	691,25
4	2.412	603
5	3.060	765
6	2.845	711,25
7	2.814	703,5
8	2.873	718,25
9	3.035	758,75
10	3.072	768

Tabla 13. Numero de muestras de cada agricultor.

En la tabla 13 se observa el número de muestras tomadas por el sensor para cada una de las personas, cabe resaltar que el sensor tomaba muestras cada 250ms. Se realizaron pruebas de 10 a 12 minutos, para poder probar el funcionamiento del dispositivo en un tiempo que permitiera realizar un mejor análisis de los movimientos de los agricultores.

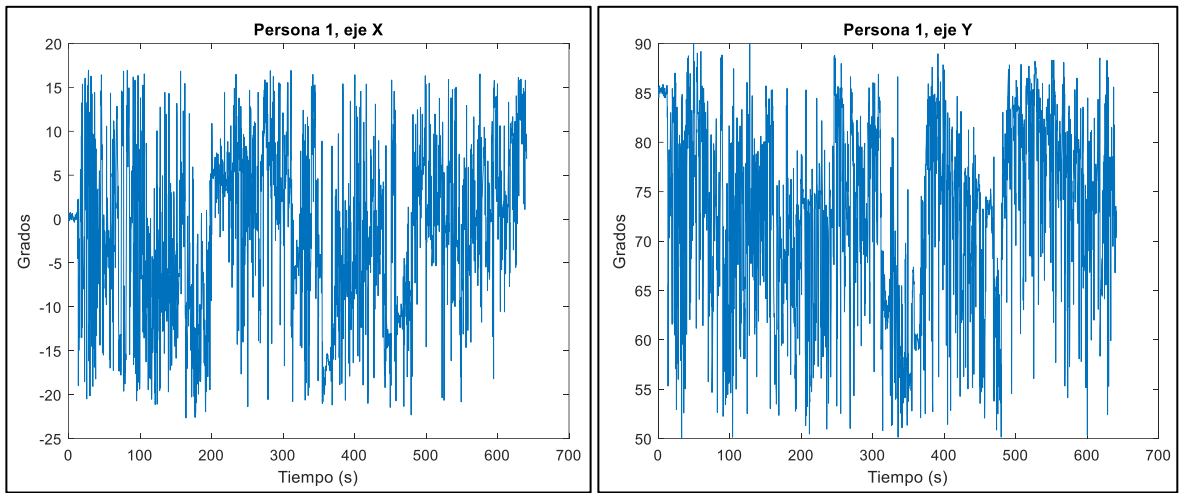


Figura 39. Datos de inclinación del tobillo, persona 1.

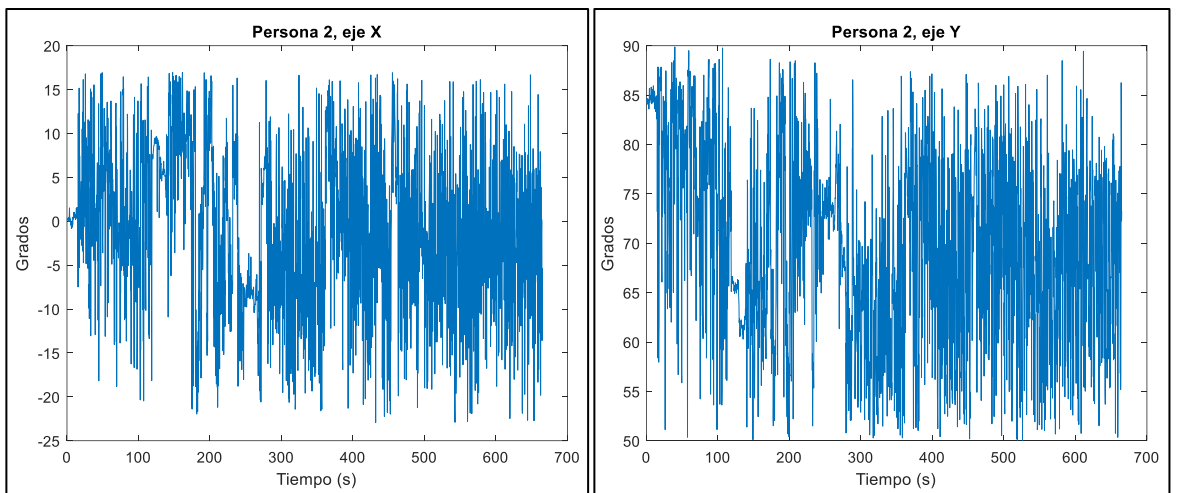


Figura 40. Datos de inclinación del tobillo, persona 2.

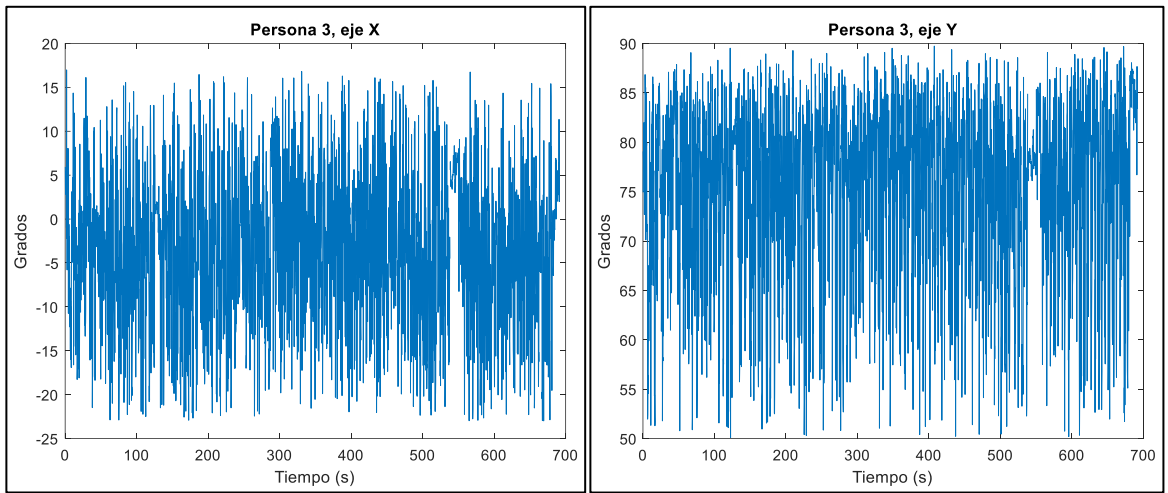


Figura 41. Datos de inclinación del tobillo, persona 3.

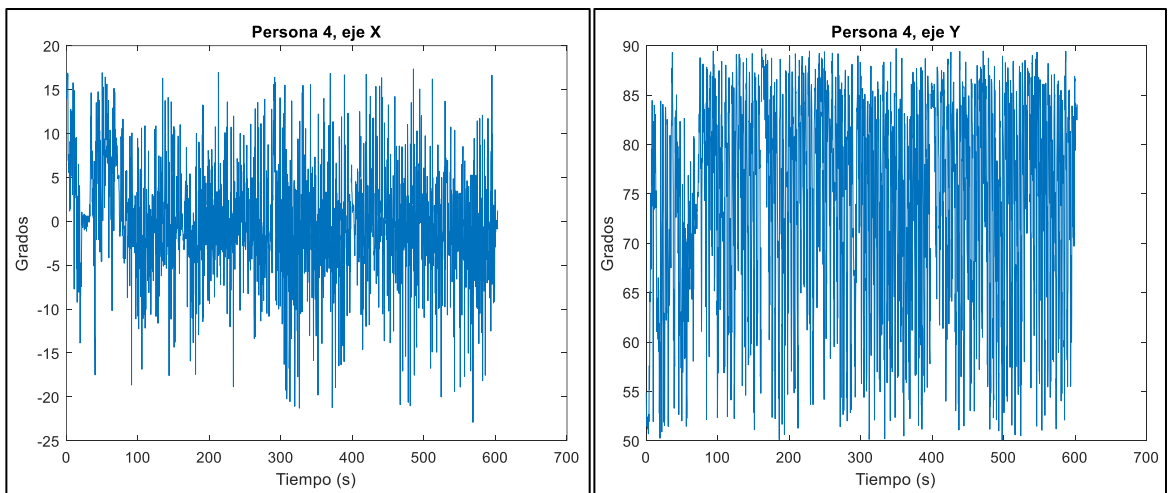


Figura 42. Datos de inclinación del tobillo, persona 4.

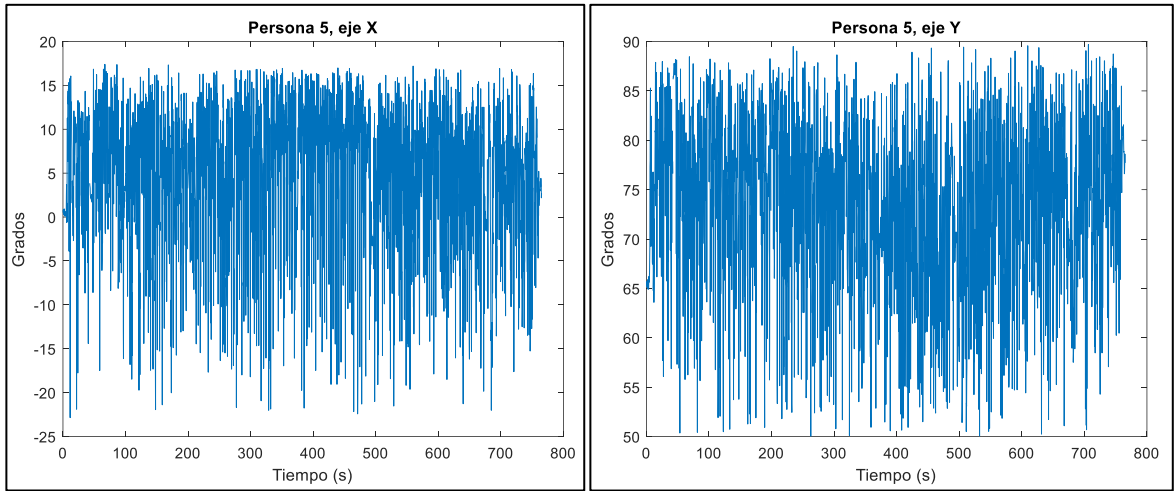


Figura 43. Datos de inclinación del tobillo, persona 5.

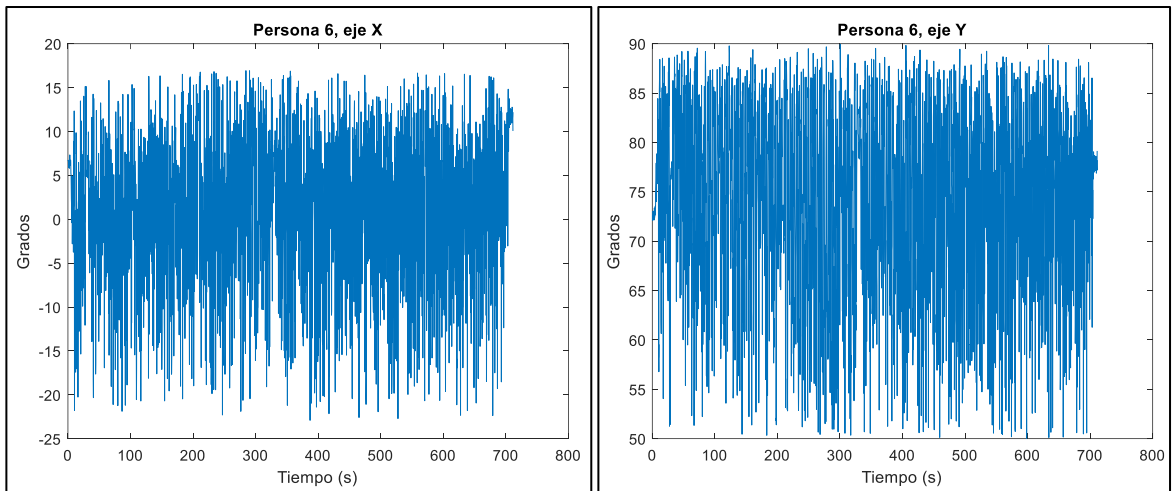


Figura 44. Datos de inclinación del tobillo, persona 6.

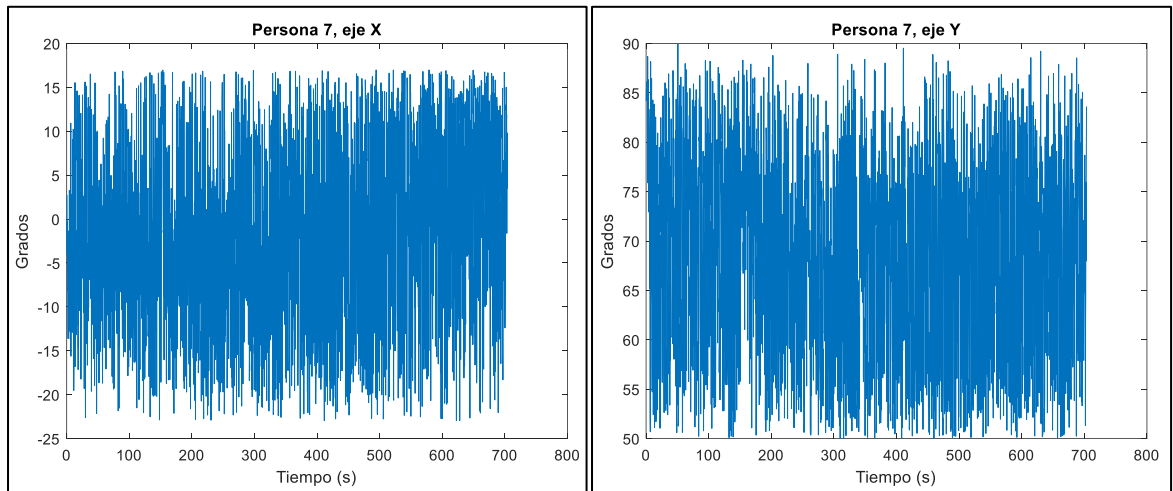


Figura 45. Datos de inclinación del tobillo, persona 7.

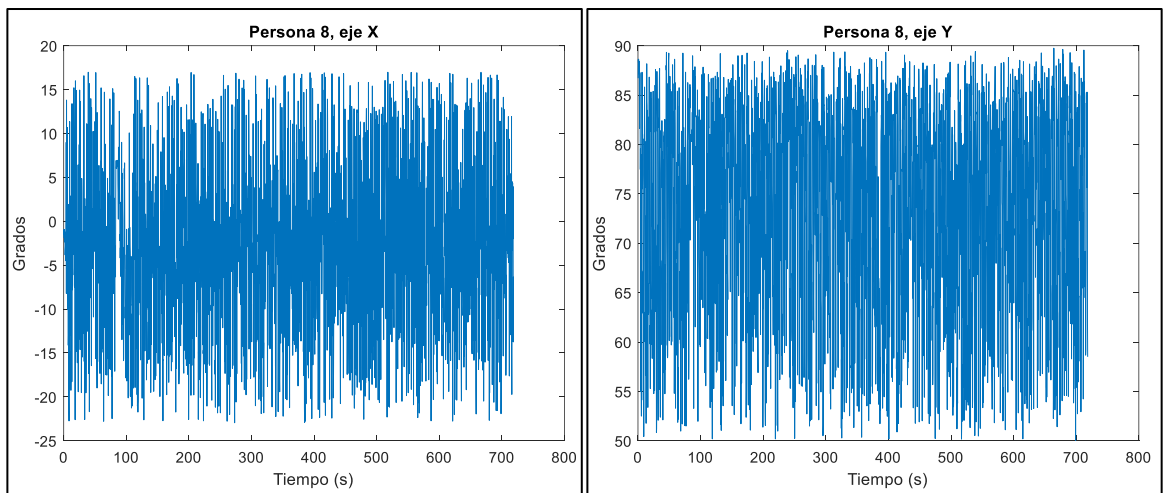


Figura 46. Datos de inclinación del tobillo, persona 8.

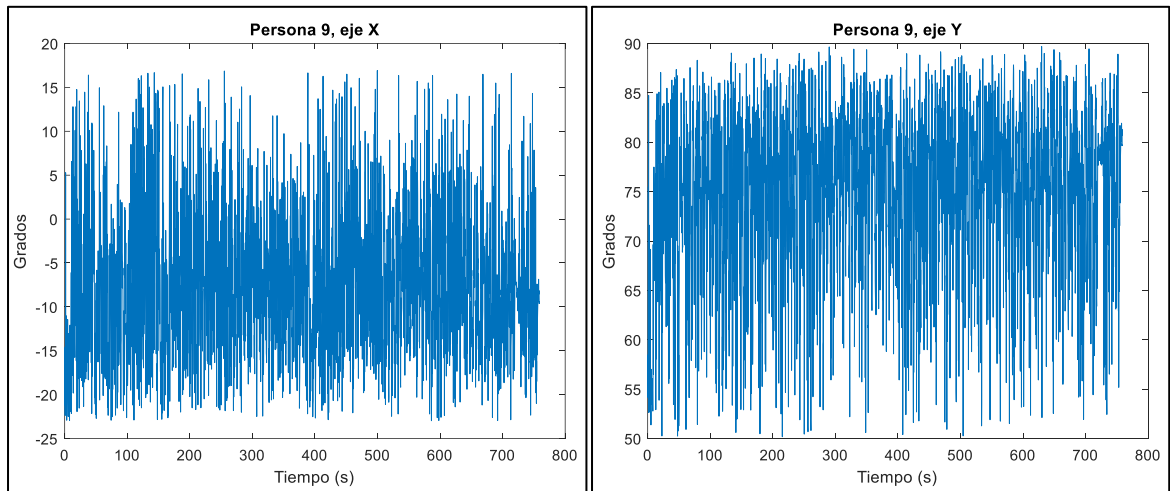


Figura 47. Datos de inclinación del tobillo, persona 9.

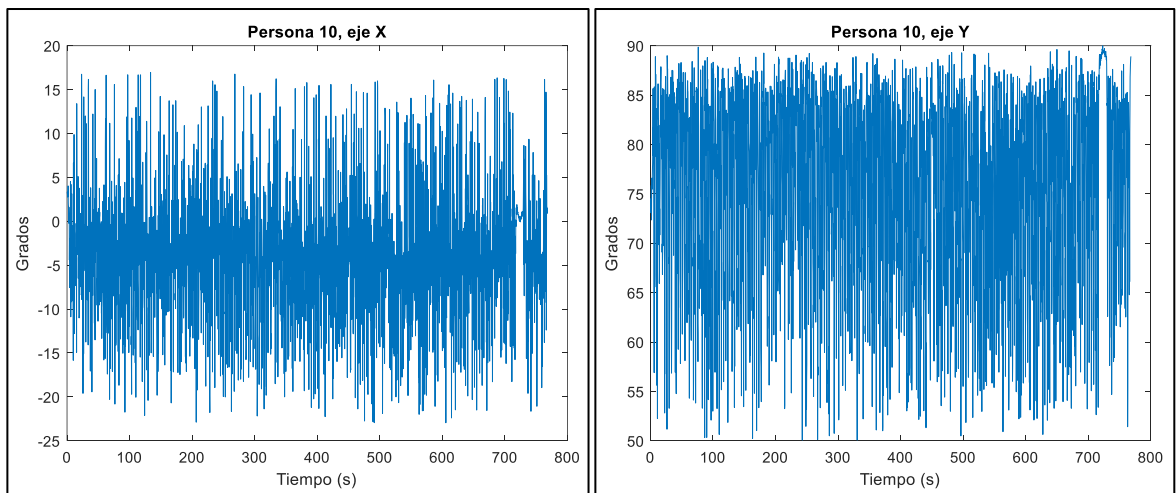


Figura 48. Datos de inclinación del tobillo, persona 10.

A continuación, se muestran el promedio de los datos obtenidos por el sensor, para cada persona de prueba en los ejes XY Tabla 14.

DATOS PROMEDIO

Agricultor	Promedio inclinación eje x	Promedio inclinación eje y	Movimiento
1	-1.27	72.74	Inversión
2	-1.08	69.74	Inversión
3	-3.88	74.78	Inversión
4	-0.11	74.27	Inversión
5	4.85	73.41	Eversión
6	0.52	74.38	Eversión
7	-2.36	68.51	Inversión
8	-3.45	73.74	Inversión
9	-7.50	74.64	Inversión
10	-4.14	75.48	Inversión

Tabla 14. Datos promedio de inclinación en el eje XY.

De acuerdo con los parámetros biomecánicos del tobillo, para el eje x los movimientos generados son inversión y eversión, de acuerdo con la ubicación del dispositivo para inversión se toma el eje negativo y para eversión el positivo. Con respecto a las gráficas se puede observar que el rango en que oscilan los datos es de -23° a 17° , además en la tabla 14 se observan que los valores promedio de inclinación están entre -7.50 y 4.85 , lo que indica que se encuentra dentro de los límites para cada uno de los movimientos en este eje, es decir que el sensor está midiendo de manera correcta según los parámetros establecidos.

Los movimientos de dorsiflexión y flexión plantar tienen un límite de movimiento de 30° y 50° respectivamente, para las gráficas en el eje Y hay que tener en cuenta que el sensor toma de referencia 90° cuando se encuentra la persona de pie y en estado de reposo ya que el grado de inclinación de la posición del dispositivo con respecto al suelo es de aproximadamente 90° , es por esto que en las gráficas se observa el rango de movimiento entre 90° y 50° . En la tabla 14 se observa que el ángulo mínimo observado en el eje Y es de 68.51° , lo que nos dice que el tobillo se movió 21.49° con respecto a la referencia inicial (90°), teniendo en cuenta los límites máximos se puede concluir que ninguna de las personas supero estos límites.

De acuerdo con los resultados arrojados y lo mencionado anteriormente, se puede determinar que el tobillo de los agricultores se encuentra dentro de los rangos biomecánicos normales, sin embargo, a partir de la observación de los movimientos en las gráficas, se puede apreciar que, aunque se mantienen dentro de los límites establecidos para cada uno de los movimientos, en algunos instantes se acercan peligrosamente a dichos límites. Esta situación se debe, en gran medida, a las

características del terreno en el que se desarrollan las actividades agrícolas, lo que hace que los agricultores estén expuestos a sufrir lesiones en el tobillo. Este problema se agrava aún más si se considera que los agricultores suelen trabajar largas horas en este tipo de terrenos, lo que aumenta el riesgo de lesiones.

8. CONCLUSIONES

Con la realización del presente trabajo, se ha logrado desarrollar un dispositivo de monitoreo de la articulación del tobillo para agricultores de papa en el municipio de Tausa, Cundinamarca durante el proceso de labrado, cumpliendo de esta manera con el objetivo general.

La identificación y el análisis de los parámetros biomecánicos del tobillo, así como las condiciones geográficas del terreno, representaron una parte fundamental en el proceso de definición de los requisitos y materiales para la creación del dispositivo mecatrónico. Estos datos permitieron seleccionar los componentes adecuados como lo fue el microcontrolador, el sensor, los protocolos de comunicación y la batería. Los parámetros biomecánicos del tobillo ayudaron a identificar los rangos de movimiento y las limitaciones de la articulación, esta información permitió definir los requisitos estructurales del dispositivo.

Con base en la información recopilada a través del datasheet y de la lectura del sensor MPU6050, se realizó un análisis frecuencial mediante el uso de herramientas como el diagrama de Bode, la transformada de Fourier y la densidad espectral. Este análisis permitió obtener información sobre el comportamiento en frecuencia del sensor, lo que a su vez facilitó la identificación de posibles fuentes de ruido y la señal de interés para el diseño del filtro. Por esta razón, se implementó el filtro digital FIR utilizando el método de ventana, con el objetivo de obtener una señal más limpia y datos más precisos.

La construcción del dispositivo fue un proceso que implicó la selección cuidadosa de componentes, el diseño mecánico y electrónico, además de la programación del microcontrolador, adquiriendo de esta manera datos precisos en tiempo real de los movimientos generados por el trabajador.

Luego de realizar ensayos rigurosos con el dispositivo, se ha logrado comprobar de manera efectiva su correcto funcionamiento y su capacidad para medir el grado de inclinación del tobillo en los ejes XY. Esta información aporta a la solución de la problemática planteada en el ámbito agrícola, ya que permite una posible evaluación del riesgo de lesiones en los tobillos de los agricultores. En este sentido, la implementación de este dispositivo contribuye a la promoción del desarrollo sostenible y a la mejora de la calidad de vida de los agricultores de papa.

9. RECOMENDACIONES

Una vez culminado el trabajo de investigación, y teniendo en cuenta que se podrían hacer algunas mejoras a la hora de implementar un dispositivo de monitoreo que se pueda comercializar y que a su vez sea más fácil visualizar los datos obtenidos, se presentan algunas recomendaciones.

En primer lugar, se podría cambiar el método de recepción de los datos, como por ejemplo usando un módulo Bluetooth con alguna aplicación móvil que permita al usuario monitorear desde su celular la articulación.

Además, se podría mejorar la manera de sensar los datos en el eje Y, en donde se pueda distinguir que movimiento se está generando (dorsiflexión/flexión plantar).

Finalmente, en cuanto al diseño mecánico también se podría realizar alguna modificación en cuanto a sus dimensiones, haciendo un diseño más compacto y de menor tamaño, sin embargo, el diseño implementado no tuvo inconvenientes para el agricultor.

10. BIBLIOGRAFÍA

- AgroBayer Colombia. (2020). *papa*. Obtenido de Agro Bayer:
<https://agro.bayer.co/cultivos/papa>
- Andica, J. (2015). *Diseño y construcción de dispositivo técnico de ayuda para rehabilitación en tobillo*. Obtenido de Universidad del Valle:
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/16470>
- Argenpapa. (26 de 02 de 2021). *Requerimientos de clima y suelo para el cultivo de papa*. Obtenido de Argenpapa: <https://www.argenpapa.com.ar/noticia/10299-informacion-tecnica-requerimientos-de-clima-y-suelo-para-el-cultivo-de-la-papa>
- Avanfi . (2018). *Artrosis Subastragalina*. Obtenido de [https://doctorvillanueva.com/artrosis-subastragalina/#:~:text=La%20articulaci%C3%B3n%20subastragalina%20\(ASA\)%20es,y%20el%20calc%C3%A1neo%20por%20debajo.&text=Entre%20ambas%20articulaciones%20queda%20un,la%20prono%2Dsupinaci%C3%B3n%20del%20pie](https://doctorvillanueva.com/artrosis-subastragalina/#:~:text=La%20articulaci%C3%B3n%20subastragalina%20(ASA)%20es,y%20el%20calc%C3%A1neo%20por%20debajo.&text=Entre%20ambas%20articulaciones%20queda%20un,la%20prono%2Dsupinaci%C3%B3n%20del%20pie).
- Baron, S. E. (2001). *Soluciones Simples: Ergonomía para trabajadores agrícolas. Departamento de salud y servicio humanos NIOSH*. Obtenido de https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/2001-111_sp/pdfs/2001-111sp.pdf
- BIOLASTER. (s.f.). *Anatomía del tobillo*. Obtenido de BIOLaster Apoyo Científico y Tecnológico para el Deporte:
<https://www.biolaster.com/traumatologia/tobillo/anatomia/>
- Blanco, A. V. (2013). Control de un prototipo virtual de una máquina de rehabilitación de tobillo. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 14.
- Cabrera, J. (s.f.). *Filtros activos*. Obtenido de Ingeniería en Automática y Electrónica Industrial-Sistemas Analógicos-Curso04/05:
<https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>
- Cajas, J. (agosto de 2017). *Diseño de un entrenador electrónico para monitoreo de postura en ejercicios de halterofilia*. Guatemala .
- Castillo, P. (2019). *Sistema de Monitoreo de Tobillo en Marcha por Técnicas de Visión por Computadora*. Obtenido de Universidad Guanajuato:
<http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/3742>
- Como funciona. (s.f.). *¿Qué Es Y Para Qué Sirve Un Giroscopio?* Obtenido de *¿Cómo funciona?*
- DANE. (2001). *censo nacional de cultivo de papa*. Obtenido de DANE:
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/papa_censo_cundinamarca.pdf

- ECURED. (07 de 2019). *Arquitectura Harvard (computación)*. Obtenido de ECURED: [https://www.ecured.cu/index.php?title=Arquitectura_Harvard_\(computaci%C3%B3n\)&oldid=3417769](https://www.ecured.cu/index.php?title=Arquitectura_Harvard_(computaci%C3%B3n)&oldid=3417769)
- Efisioterapia . (2011). *El Tobillo anatomía y lesiones más frecuentes*. Obtenido de <https://www.efisioterapia.net/articulos/el-tobillo-anatomia-y-lesiones-mas-frecuentes>
- Electronic World. (2020). *Protocolo de Comunicación I2C, PIC18F4550, PIC C Compiler*. Obtenido de electronicworld: <http://www.electronicworld.com.mx/electronica/protocolo-de-comunicacion-i2c-pic18f4550-pic-c-compiler/>
- Eurofach Electrónica. (23 de 02 de 2015). *Sensores MEMS de Bosch*. Obtenido de interempresas: <https://www.interempresas.net/Electronica/Articulos/170292-Sensores-MEMS-de-Bosch.html>
- Fisionline. (2021). *Definición - ¿Qué es la articulación tibioperoneastragalina?* Obtenido de <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/articulacion-tibioperoneostragalina>
- Fisioterapia. (03 de 11 de 2013). *La importancia de la Dorsiflexión de tobillo para la carrera y el Squat*. Obtenido de FSS: <http://fisioterapia.blogspot.com/2013/11/la-importancia-de-la-dorsiflexion-de.html>
- García, F., Brunicardi, R., Graciano, F., Marulanda, D., & Polo, J. (2015). Ruptura espontánea del tendón de Aquiles en paciente joven sin antecedentes patológicos. *Repertorio de Medicina y cirugía* , 148-151.
- Gertsner, J. (2017). *Esguince de tobillo. Diagnostico y Tratamiento*. Obtenido de Colombia Médica: <https://colombiamedica.univalle.edu.co/index.php/comedica/article/view/2890>
- Guzman, C., Carrera, J., Ortega, A., Oliver, M., & Gómez, F. (septiembre de 2014). *Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo: TobiBot*. Obtenido de SciELO: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-73812014000200003
- Hernan, V. (2020). *Lesiones más frecuentes de tobillo, tratamiento y recomendaciones* . Obtenido de Fisolution : <https://fisolution.com/lesiones-frecuentes-tobillo-tratamiento-recomendaciones/>
- huerta, j. (2015). *diseño y control de un sistema electromecanico inestable de dos grados de libertad: aplicación al caso de un pendulo invertido*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- I. Salcedo Jovena, A. S., & Carlavilla, F. P. (2000). *Esguince de Tobillo. Valoración en atención primaria*. Obtenido de Medicina integral Elsevier::

- <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-integral-63-articulo-esguince-tobillo-valoracion-atencion-primaria-11659>
- ICC. (13 de julio de 2018). *Los profesionales con mayor riesgo de lesiones de cartilago*. Obtenido de ICC implante de condrocitos:
<<https://www.iccimplantedecartilago.com/profesiones-y-lesiones-de-cartilago/>>
- Ingeniería Mecafenix. (14 de 10 de 2019). *¿Qué es un filtro d frecuencia y qué tipos existen?* Obtenido de Ingeniería Mecafenix: Ingeniería Mecafenix
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CAR, GTZ, KFW. (2006). *Plan de Ordenamiento Territorial Municipal de Tausa*. Tausa.
- Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional . (s.f.). *Agricultura*. Obtenido de <https://www.cdc.gov/spanish/niosh/topics/agriculture.html>
- Invima. (s.f.). *Dispositivos médicos y equipos biomédicos*. Obtenido de INVIMA:
<https://www.invima.gov.co/dispositivos-medicos-y-equipos-biomedicos>
- Lauriac, N. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo*. Obtenido de Terre des hommes:
https://www.tdh.ch/sites/default/files/161019_tdh_guidemonitoring_es_version_impresion.pdf
- Llamas, L. (07 de 09 de 2016). *MEDIR LA INCLINACIÓN CON IMU, ARDUINO Y FILTRO COMPLEMENTARIO*. Obtenido de luisllamas: <https://www.luisllamas.es/medir-la-inclinacion-imu-arduino-filtro-complementario/>
- M, C. (2019). *ANALISIS Y DISEÑO DE CONTROLADORES NO LINEALES SOBRE UN SISTEMA ROBOTICO BIPEDO*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira .
- Martínez, M. (s.f.). *DISEÑO DE FILTROS DIGITALES FIR MEDIANTE LA TECNICA DE VENTANAS*. Mexico.
- Mayné, B., Martínez, A., Romero, J., Quiñones, K., Dautt, J., & Magaña, A. (2020). REINTEGRACIÓN LABORAL DE PACIENTES CON FRACTURA DE TOBILLO POR RIESGO DE TRABAJO. *Revista Cubana de Salus y Trabajo*, 6.
- Mayo Clinic. (2022). *Esguince de tobillo*. Obtenido de <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/sprained-ankle/symptoms-causes/syc-20353225>
- MayoClinic. (2020). *Esguince de tobillo*. Obtenido de Mayo Clinic :
<https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/sprained-ankle/symptoms-causes/syc-20353225>
- MayoClinic. (2021). *Fractura de tobillo*. Obtenido de MayoClinic:
<https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/broken-ankle/symptoms-causes/syc-20450025>

- MayoClinic. (2021). *Rotura del tendón de Aquiles*. Obtenido de MayoClinic: <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/achilles-tendon-rupture/symptoms-causes/syc-20353234>
- MedlinePlus. (s.f.). *Fascitis plantar*. Obtenido de MedlinePlus: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/007021.htm>
- Microchip Technology Inc. (2009). *PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet*. Obtenido de Microchip Technology Inc: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632e.pdf>
- Mijail, R. (11 de 09 de 2008). *INTERFACE SERIAL RS232*. Obtenido de EL ESTÁNDAR RS-232 y V24: <http://interface-serial-rs232.blogspot.com/>
- Monteagudo, & Villardefrancos. (2007). Artrodesis frente a artroplastia en el tobillo traumático. *MC Medical*, 119-124.
- MordorIntelligence. (2021). *MERCADO DE ACELERÓMETROS Y GIROSCOPIOS MEMS: CRECIMIENTO, TENDENCIAS, IMPACTO DE COVID-19 Y PRONÓSTICOS*. Obtenido de mordorintelligence: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/mems-accelerometer-gyroscope-market#faqs>
- Nuez García, J., Caballero Martel, J., Romero Pérez, B., Barahona Lorenzo, D., & Navarro García, R. (2012). *Aproximación al diagnóstico y tratamiento de las Lesiones Agudas del Tobillo*. Gran Canaria: Canarias Médica y Quirúrgica.
- Ortiz, D. (18 de 12 de 2018). *Dolor en los talones: la fascitis plantar molesta e insidiosa*. Obtenido de Clínica Univerdidad de la Sabana: <https://www.clinicaunisabana.edu.co/noticias/detalle-de-noticias/noticia/dolor-en-los-talones-la-fascitis-plantar-molesta-e-insidiosa/>
- Parker LORD. (s.f.). *Sensores inerciales IMU*. Obtenido de Parker LORD: https://www.microstrain.com/inertial/imu?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=microstrain-inertial-namerica&sc=sensing-microstrain-google_adwords_fy22&utm_content=imu&gclid=Cj0KCQjw08aYBhDIARIsAA_gb0f9XkTD6r8mxjuxUlyGv37k0C458J54e8jFRwHIQlloCpTwE
- Pérez, A. (21 de 04 de 2021). *¿Cuáles son las etapas de un proyecto? Te lo contamos en esta infografía*. Obtenido de OBS Business School: <https://www.obsbusiness.school/blog/cuales-son-las-etapas-de-un-proyecto-te-lo-contamos-en-esta-infografia>
- Puentes, D. (2011). Anatomía funcional y biomecánica. *ACADEMIA*, 8.
- Puentes, D. (2011). Artículo biomecanica de pue. *ACADEMIA*, 9. Obtenido de Academia.

- Requerimientos de Clima y Suelo para el Cultivo de la Papa.* (2017). Obtenido de intagri : <https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/requerimientos-de-clima-y-suelo-para-el-cultivo-de-la-papa>
- Rikolto. (2017). *producción de papa con buenas prácticas agrícolas.* Obtenido de rikolto: https://assets.rikolto.org/paragraph/attachments/guia_papa_1.pdf
- Rincón, D. C. (2015). Abordaje del esguince de tobillo. *Revista de la Universidad Industrial de Santander*, 8.
- RobotyPic. (10 de 2013). *Comunicación PC-PIC por USB.* Obtenido de RobotyPic: <http://robotypic.blogspot.com/2013/02/comunicacion-pc-pic-por-usb.html>
- Sanitas. (s.f.). *Tendinopatía aquilea.* Obtenido de Sanitas: <https://www.sanitas.es/sanitas/seguros/es/particulares/biblioteca-de-salud/Lesiones/lesion-tendinosa/tendinopatia-aquilea.html>
- Siderio. (22 de 01 de 2013). *Bioseñales y Sensores.* Obtenido de Siderio: https://es.slideshare.net/siderio_orion/01-bioseales-y-sensores
- UNIT ELECTRONICS. (s.f.). *PIC18F4550 Microcontrolador.* Obtenido de UNIT ELECTRONICS: <https://uelectronics.com/producto/pic18f4550-microcontrolador/>
- Vargas, K. (7 de marzo de 2016). *La agricultura Colombiana en el contexto de la globalización .* Obtenido de el campesino.co: <https://elcampesino.co/la-agricultura-colombiana-en-el-contexto-de-la-globalizacion/>
- Velazco, I. (s.f.). *Normas legales a partir de la constitución política colombiana Dispositivos Médicos.* Obtenido de Salud Capital: [http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Tecnovigilancia/Normatividad%20en%20Dispositivos%20Medicos%20\[Modo%20de%20compatibilidad\].pdf](http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Tecnovigilancia/Normatividad%20en%20Dispositivos%20Medicos%20[Modo%20de%20compatibilidad].pdf)
- Zaragoza, K., & Fernández, S. (2013). Ligamentos y tendones del tobillo: anatomía y afecciones más frecuentes analizadas mediante resonancia . *Anales de Radiología México* , 14.