

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de sistema analizador de presión
plantar para marcha atlética**

Trabajo de graduación presentado por Julio Octavio González González
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



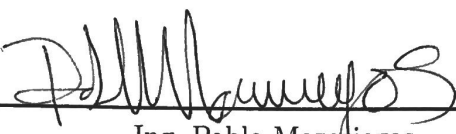
**Diseño e implementación de sistema analizador de presión
plantar para marcha atlética**

Trabajo de graduación presentado por Julio Octavio González González
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

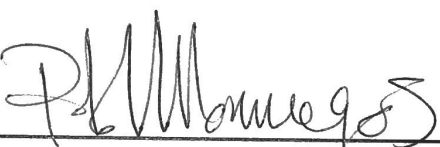
Guatemala,

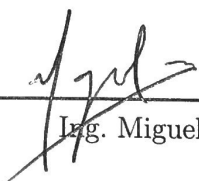
2019

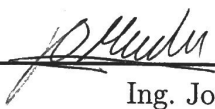
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

(f) 
Ing. Miguel Zea

(f) 
Ing. Jose Morales

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de diciembre de 2018. ✓

Este trabajo de graduación surgió de la idea de ayudar a los atletas de disciplinas de atletismo, en específico de la marcha atlética en Guatemala, a mejorar su rendimiento de una manera efectiva y significativa. Para ello se investigó de las tecnologías disponibles hoy en día en el mercado. Analizando todos los dispositivos disponibles se observó que resultaban costosos o no cubrían las necesidades enfocadas en un aspecto deportivos. En concreto se enfocó en la marcha atlética debido a que es un deporte que tomó relevancia en Guatemala a partir de la medalla de plata obtenida por el deportista olímpico Erick Barrondo en los juegos olímpicos de verano Londres 2012.

Se enfocó en tomar lectura de los puntos de presión en los pies de los atletas y de esta manera permitir tener una idea clara de como colocan los pies durante el desarrollo de la disciplina. En la marcha atlética esto tiene relevancia debido a que se requiere de una técnica específica para la competencia y cualquier falla en el desarrollo de esta durante la competición puede llevar a la descalificación.

Por esto mismo resulta importante tanto para el entrenador y deportista mantener un registro y control de la técnica y el progreso del atleta durante el entrenamiento.

Prefacio	v
Lista de figuras	XIII
Lista de cuadros	XV
Resumen	XVIII
Abstract	XIX
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
6.1. Marcha atlética	13
6.1.1. Técnica para la marcha atlética	14
6.2. Ciencia aplicada al deporte	16
6.2.1. Biofeedback	17
6.2.2. Psicología del deporte	17
6.2.3. Biomecánica	17
6.3. El pie	17
6.4. FSR	18
6.5. NRF24L01	19
6.6. Microcontroladores	19
6.7. Serial Peripheral Interface	20

6.8.	Tarjetas SD	20
6.9.	Convertor de analógico a digital	22
6.10.	Python	22
6.10.1.	Tkinter	22
6.10.2.	Matplotlib	23
6.10.3.	Pygubu	23
6.11.	Placas de circuito impresas	23
6.12.	Altium	24
6.13.	MPlab	24
6.13.1.	XC8	24
6.14.	Diseño mecánico	24
7.	Metodología	27
7.1.	Selección de microcontrolador o procesador	27
7.2.	Selección de módulo de comunicación inalámbrica	28
7.3.	Selección de sensor FSR	29
7.3.1.	Número de sensores necesarios para el registro de presiones	30
7.4.	Análisis del consumo de potencia del dispositivo	30
7.4.1.	Selección de batería para el dispositivo	31
7.5.	Selección de envío de datos en tiempo real o almacenamiento	31
7.6.	Protocolo lectura y escritura SD	32
7.7.	Protocolo para uso de módulos NRF24L01	33
7.8.	Diseño y fabricación de PCB	33
7.9.	Diseño de funda para placas	35
7.9.1.	Selección de material para fabricación del dispositivo	36
7.10.	Programación de microcontroladores	37
7.11.	Diseño interfaz gráfica	37
8.	Resultados	43
8.1.	Implementación de módulo tarjeta SD	43
8.2.	Implementación del módulo NRF24L01	44
8.3.	Lista de componentes a utilizar para la fabricación del dispositivo	44
8.4.	Interfaz gráfica	45
8.5.	Diseño y fabricación de PCB	46
8.6.	Fabricación de las fundas del dispositivo	46
8.7.	Velocidad de funcionamiento del dispositivo	46
8.8.	Pruebas de módulos	48
9.	Discusión	75
9.1.	Sensores FSR	75
9.2.	Interfaz gráfica	75
9.3.	Comunicación inalámbrica	76
9.4.	Almacenamiento de datos	76
9.5.	Diseño y fabricación del dispositivo	77
9.6.	Costo del prototipo	78
9.7.	Resultados del funcionamiento del dispositivo	78
10.	Conclusiones	83

11.Recomendaciones	85
12.Bibliografía	87
13.Anexos	91
13.1. Esquemáticos de placas fabricadas	91
13.2. Planos de construcción	92
13.3. Imágenes del prototipo	95
14.Glosario	103

Lista de figuras

1.	Presiones en pie durante marcha atlética	3
2.	Posiciones utilizadas para extracción de datos con tres sensores	4
3.	Prototipo número uno propuesto	4
4.	Prototipo número dos propuesto	5
5.	Prototipo número tres propuesto	5
6.	Competición de marcha	13
7.	Indicadores de faltas	14
8.	Apoyo simple	15
9.	Fase de impulso	15
10.	Apoyo doble	16
11.	Fase de oscilación	16
12.	Figuras de estructura del pie	18
13.	Sensor FSR	18
14.	Módulo NRF24L01	19
15.	Diferentes empaquetados para microcontrolador	19
16.	Diagrama de comunicación SPI	20
17.	Diagrama de tarjeta SD y MicroSD	21
18.	Diagrama de funcionamiento de módulo ADC	22
19.	Placa de circuito impresa	23
20.	Fuerzas aproximadas en el pie dependiendo de actividad	29
21.	Modo de funcionamiento de sensores FSR según resistencia del divisor de voltaje	30
22.	Primera versión de PCB	34
23.	Versión final de PCB	34
27.	Separadores	36
28.	Algoritmo placa maestra	38
29.	Algoritmo placa esclava	39
30.	Versión 1 del programa creado	40
31.	Mapa de color creado	40
32.	Mapa de presión diseñado	40
33.	Algoritmo interfaz gráfica	42

34.	Interfaz final del programa	46
35.	Placas finales	47
36.	Prototipos finales	47
37.	Prototipo final	48
38.	Usuario apoyado en antepié	49
39.	Usuario apoyado en retropié	49
40.	Usuario parado	50
41.	Usuario en movimiento	50
42.	Posición de sensores en pié de usuario	51
43.	Gráfico de resultados de pie apoyado en talón	51
44.	Mapa de color de resultados de pie apoyado en talón	52
45.	Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié	52
46.	Mapa de color de resultados de pie apoyado en antepié	53
47.	Gráfico de resultados de pie apoyado en forma uniforme	53
48.	Mapa de color de resultados de pie apoyado en forma uniforme	54
49.	Gráfico de resultados de pie en movimiento	54
50.	Mapa de color de resultados de pie en movimiento	55
51.	Figura de individuo 1 Apoyo	55
52.	Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 1	56
53.	Figura de individuo 1 Talón	56
54.	Gráfico de resultados de pie apoyado en talón individuo 1	57
55.	Figura de individuo 1 Antepié	57
56.	Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 1	58
57.	Figura de individuo 1 Movimiento	58
58.	Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 1	59
59.	Figura de individuo 2 Apoyo	59
60.	Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 2	60
61.	Figura de individuo 2 Talón	60
62.	Gráfico de resultados de pie apoyado en talón individuo 2	61
63.	Figura de individuo 2 Antepié	61
64.	Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 2	62
65.	Figura de individuo 2 Movimiento	62
66.	Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 2	63
67.	Figura de individuo 3 Apoyo	64
68.	Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 3	64
69.	Figura de individuo 3 Movimiento	65
70.	Figura de individuo 3 Movimiento	65
71.	Figura de individuo 3 Antepié	66
72.	Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 3	66
73.	Figura de individuo 3 Talón	67
74.	Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 3	67
75.	Figura de individuo 4 Apoyo	68
76.	Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 4	68
77.	Figura de individuo 4 Talón	69
78.	Gráfico de resultados de pie apoyado en talón individuo 4	69
79.	Figura de individuo 4 Antepié	70
80.	Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 4	70
81.	Figura de individuo 4 Movimiento	71

82.	Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 4	71
83.	Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 5	72
84.	Gráfico de resultados de pie apoyado en talón individuo 5	72
85.	Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 5	73
86.	Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 5	73
87.	Configuración de sensores en interfaz gráfica	76
88.	Resultados desplegados por interfaz gráfica	77
89.	Figura de individuo 5 Apoyo	79
90.	Figura de individuo 5 Talón	80
91.	Figura de individuo 5 Antepié	81
92.	Figura de individuo 5 Movimiento	81
93.	Placa maestra	91
94.	Placa esclava	92
95.	Planos funda superior placa esclava	92
96.	Planos funda inferior placa esclava	93
97.	Planos cilindros de retención	93
98.	Planos funda superior placa maestra	94
99.	Planos funda inferior placa maestra	94
100.	Prototipo versión 1	95
101.	Prototipo versión 1 vista 2	95
102.	Prototipo versión 2	96
103.	Prototipo versión 2 vista 2	96
104.	Prototipo versión 3	97
105.	Prototipo versión 3 vista 2	97
106.	Prototipo versión final dispositivo esclavo vista lateral 1	98
107.	Prototipo versión final dispositivo esclavo vista lateral 2	98
108.	Prototipo versión final dispositivo esclavo vista lateral 3	99
109.	Prototipo versión final dispositivo esclavo vista superior	99
110.	Prototipo versión final dispositivo maestro vista lateral 1	100
111.	Prototipo versión final dispositivo maestro vista superior	100
112.	Prototipo versión final dispositivo maestro vista lateral 2	101
113.	Prototipo versión final dispositivo maestro vista lateral 3	101
114.	Prototipo versión final dispositivo maestro vista inferior	102
115.	Prototipo versión final dispositivo esclavo vista inferior	102

Lista de cuadros

1.	Criterios de evaluación de selección	28
2.	Selección se microcontrolador o procesador	28
3.	Comunicación inalámbrica	28
4.	Selección de módulos en tiempo real o almacenamiento	32
5.	Datos guardados en archivo .txt en la tarjeta microSD	44
6.	BOM	45

La marcha atlética es una modalidad del atletismo en el cual se intenta caminar lo más rápido posible sin correr. La diferencia entre correr y caminar se denota por medio de si el atleta tiene ambos pies en contacto con el suelo o no. La marcha atlética posee una técnica específica de brazos y pies que debe de cumplir. Debe existir un movimiento de cadera que facilite el desplazamiento, donde los brazos se mueven y las rodillas no deben de flexionarse de lo contrario se descalifica al atleta de la competencia al cometer tres faltas.

Para ello se propuso un sistema que permite a los atletas mejorar su rendimiento y perfeccionar su técnica mediante un análisis de la presión de sus pies. Para ellos se realizó un análisis de sistemas similares existentes y los precios en que rondan, los cuales resultan entre el rango de los USD \$2,000. Conocer la existencia de estos dispositivos permite tener una idea de lo que se presenta en la actualidad y que se puede ofrecer adicional o a un menor precio.

El sistema que se diseñó consiste en el uso de sensores de presión FSR en las plantas de los pies. Luego mediante cable plano flexible o FFC se llega a módulos transmisores colocados en cada uno de los tobillos del atleta. Los módulos se encargan de enviar los datos de la presión de cada sensor en la planta del pie. La información es almacenada en el módulo maestro y luego es escrita en una tarjeta MicroSD o “Secure Digital”. Al haber guardado los datos en la tarjeta MicroSD se procedió a analizarlos y presentarlos al usuario en un programa con interfaz gráfica. La interfaz gráfica presenta un modelo de los pies mostrando al atleta los mayores puntos de presión de acuerdo a los sensores seleccionados o disponibles en los dispositivos, la presión de cada sensor en el tiempo del entrenamiento, el número de veces que el dispositivo detecta que el atleta no tiene ninguno de los dos pies en el suelo.

Por último se comprobó el funcionamiento del dispositivo y las características de este, en donde se obtuvo que la recolección de datos se da en un tiempo aproximado de un segundo. La batería fue diseñada para que durara un mínimo de tres horas de forma continua con posibilidad de cargar los módulos por cable micro USB. Al momento de emplear el dispositivo de forma estática los resultados son constantes, pero al desplazarse el usuario los resultados encontrados varían dependiendo del ritmo de cada usuario debido al tiempo entre cada dato recolectado. Cabe mencionar que se tuvo complicaciones en el acople entre los sensores FSR y los cables FFC ya que no quedaban fijos y al momento de colocarlos en el pie del atleta

estos perdían por momentos el contacto perdiendo mediciones de las presiones en los pies de los atletas.

Race Walking is a form of athletics in which you try to walk as fast as possible without running. The difference between running and walking is denoted by whether or not the athlete has both feet in contact with the ground. Race Walking has a specific technique of arms and feet that must be complied with. There must be a hip movement that facilitates displacement, where the arms move and the knees must not bend, otherwise the athlete is disqualified from competition by committing three faults.

For this purpose, a system was proposed that allows athletes to improve their performance and perfect their technique by analyzing the pressure of their feet. To do this, an analysis was made of similar existing systems and the prices they cost, which are in the range of USD \$2,000. Knowing the existence of these devices allows to have an idea of what is currently available and what can be offered additional or at a lower price.

The system that was designed consists of the use of pressure sensors FSR on the soles of the feet. Then, by using a flexible flat cable or FFC, transmitter modules are placed in each of the athlete's ankles. The modules are responsible for sending the pressure data from each sensor on the sole of the foot. The information is stored in the master module and then written on a MicroSD or "Secure Digital card. Once the data had been saved on the MicroSD card, they were analyzed and presented to the user in a program with a graphic user interface. The graphic user interface presents a model of the feet showing the athlete the highest pressure points according to the sensors selected or available in the devices, the pressure of each sensor in the time of training, the number of times the device detects that the athlete does not have either foot on the ground.

At last, the performance of the device and its characteristics were checked, where it was obtained that data gathering takes approximately one second. The battery life was designed to last a minimum of three hours continuously with the possibility of charging the modules by micro cable USB. At the moment of using the device in a static way the results are constant but when moving the user the results found vary depending on the rhythm of each user due to the time between each data collected. It is worth mentioning that there were complications in the coupling between the FSR sensors and the FFC cables as they were not fixed and when they were placed on the athlete's foot they lost contact at times losing measurements of pressure in the feet of athletes.

La marcha atlética es una disciplina del atletismo que se define como una progresión de pasos ejecutados de manera que el atleta siempre mantenga uno de los pies en contacto con el suelo y la rodilla del pie que avanza no este flexionada. El incumplimiento de estas normas lleva a las advertencias de que, al acumular tres de ellas, lleva a la descalificación del atleta de la competencia.

El siguiente trabajo consiste en la documentación del diseño e implementación de un dispositivo que mida la presión en distintos puntos del pie de un atleta de marcha atlética. Para ello se siguió el proceso de implementar un circuito funcional, realizando la programación necesaria para el microcontrolador utilizado que fue un PIC 18F45K22, investigar los componentes necesarios para su construcción y cotizar el precio estimado. Al tener toda la información requerida se procedió al diseño de la placa, fabricación y las pruebas correspondientes para verificar el funcionamiento de este. Por último se fabricó una funda para las placas que conforman el dispositivo que van en cada uno de los tobillos del usuario. De esta manera ya con los dispositivos realizados se pasó a comprobar su funcionalidad y obtener resultados con este.

El dispositivo final logró medir las presiones en los pies de los atletas, almacenar los datos y graficarlos en un programa con interfaz gráfica. Los resultados se encuentran descritos en el presente trabajo de manera detallada indicando y validando el funcionamiento. El dispositivo final fue construido por un precio de alrededor de USD \$200.

Entre los trabajos que se utilizaron como antecedentes para este trabajo de graduación se encuentra el trabajo *Análisis biomecánico del apoyo plantar en la marcha atlética. Relación entre la huella plantar, ángulos de la articulación subastragalina y presiones plantares* [1]. Este trabajo estudia el comportamiento del pie durante la práctica de la marcha atlética y hacer una correlación entre la huella plantar y el comportamiento del pies y sus articulaciones. Entre lo resultados más relevantes para este trabajo se encuentran las presiones alcanzadas en distintos puntos del pies, en donde la zona con mayor presión durante la práctica de la marcha es el retropié o talón como es conocido con mayor frecuencia. La presión alcanzada es de aproximadamente 21.02 kPa/Kg. En el antepié la presión alcanzada es de 13.12 kPa/Kg y el mediopié cpn 6.14 kPa/Kg. Cabe resaltar que la mayor presión alcanzada en el retropié y mediopié fueron en las zonas externas mientras que en el antepié fue en la zona interna.

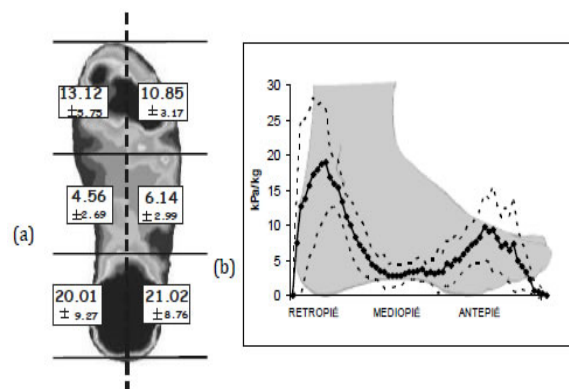


Figura 1: Presiones alcanzadas en distintos puntos del pie durante la práctica de la marcha atlética [1]

Otro trabajo que se utilizó de referencia fue *Foot Modeling and Smart Plantar Pressure Reconstruction from Three Sensors* [2]. Este trabajo investiga y propone la reconstrucción

de un mapa de presión planar con tres sensores para el modelado de un pie. Este trabajo muestra ecuaciones para el modelado del pie y las fuerzas que actúan sobre este, la altura promedio de distintas zonas del pie y la extrapolación de datos de presión en el pie utilizando tres sensores, las posiciones ideales para la máxima obtención de datos relevantes.

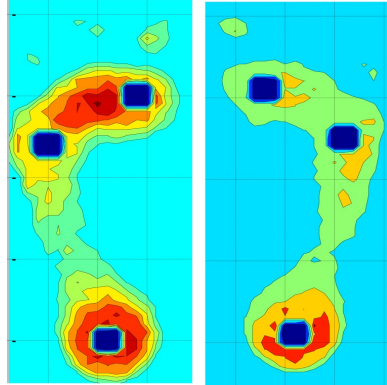


Figura 2: Posiciones utilizadas para extracción de datos con tres sensores [2]

El siguiente trabajo *Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review*. [3] se utilizó como antecedente debido a que en este se detalla la fabricación de un dispositivo que permite la obtención de datos mediante sensores en la planta del pie para luego analizarlos. También muestra distintos prototipos para colocar en el individuo de estudio, desde uso del zapato, tobillo o cintura para colocar el dispositivo principal y también distintos modos de enviar los datos a un ordenador utilizando comunicación Bluetooth o de radiofrecuencia. Por último, también muestra resultados de los datos obtenidos en las pruebas y la potencia aproximada que el prototipo consumía durante su uso. En las figuras 3, 4, 5 se pueden observar los distintos prototipos.



Figura 3: Prototipo número uno propuesto [3]



Figura 4: Prototipo número dos propuesto [3]

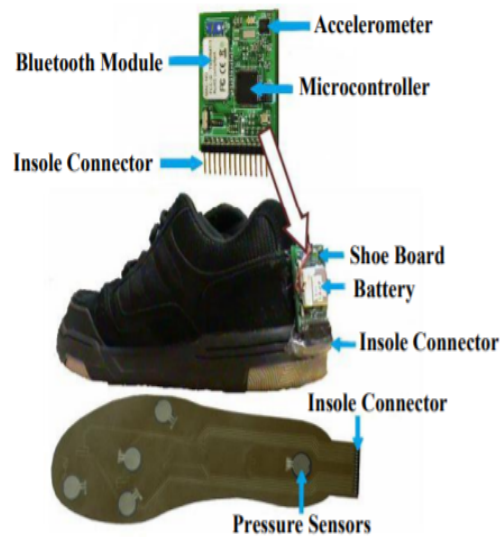


Figura 5: Prototipo número tres propuesto [3]

Por último se evaluaron los trabajos *Repeatability of the Pedar-X1 in-shoe pressure measuring system* [4] y *Request for Proposals Archives-PMR Supplements* [5]. En estos trabajos se habla se la confiabilidad de los sistemas para mediciones de las presiones en los pies y las formas de obtención de estos resultados para sus respectivas comparaciones y validaciones. Además de esto también aplican los sistemas de medición de presiones en los pies para otro sectores como el médico donde lo emplean principalmente para evaluación de pacientes diabéticos.

La marcha atlética es un deporte de auge en Guatemala, este deporte se popularizó desde las olimpiadas del 2012 en Londres cuando el deportista Erick Barrondo ganó la primera medalla olímpica. Desde entonces la atención presentada al deporte aumento, se invirtió más en el desarrollo de los atletas que practican esta modalidad debido a los resultados obtenido tanto de manera olímpica, mundial, regional y nacional [6].

Este deporte depende mucho de la técnica debido a que penalizan si la técnica de los pies y brazos no es correcta, y al tener tres penalizaciones automáticamente se descalifica al competidor de la competencia. Por este motivo se plantea el desarrollo de una herramienta que permita a los atletas que practican este deporte mejorar su rendimiento manteniendo la técnica correcta [7]

El mercado actual cuenta con dispositivos que permiten la detección de esfuerzos en las plantas de los pies pero resultan sumamente costosos o con funciones distintas a las requeridas específicamente para la aplicación buscada que en este caso es la marcha atlética. Entre los sistemas existentes si tiene el primer dispositivo analizado que se enfoca en el análisis de la presión plantar en personas con un enfoque médico [3]. Luego se tiene un sistema que hace una relación entre en el análisis de la presión del pie de un atleta de marcha atlética y el ángulo de la articulación subastragalina [1]. Por último, se encontró un sistema con el nombre “F-Scan, In-Shoe Pressure Measurement System” de la compañía Tekscan que se enfoca en un análisis general y mapeo de la presión en los pies con un precio de aproximadamente USD \$7,000 [8].

Por estos motivos se plantea el desarrollo de una solución en donde se detecten los esfuerzos realizados en los pies para poder observar qué tan correcta es la técnica empleada por los deportistas y, de esta manera, mejorar su rendimiento sin descuidar la técnica. Se pretende que el dispositivo se coloque en las plantas de los pies y se sujete de los atletas sin incomodarlos en su entrenamiento mientras el dispositivo envía constantemente la información a un módulo receptor para el análisis de la información y posteriormente la interpretación por los atletas y entrenadores [1].

4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un dispositivo que mida la presión en los puntos de apoyo del pie de un atleta de marcha atlética.

4.2. Objetivos específicos

- Investigar los puntos específicos de presión en el pie de un atleta de marcha atlética.
- Seleccionar un sensor que permita la detección de los esfuerzos realizados por los pies del atleta.
- Implementar una interfaz gráfica que permita mostrar los resultados obtenidos por el dispositivo a los atletas y entrenadores para su debida interpretación.
- Investigar e implementar la comunicación inalámbrica entre el módulo transmisor y receptor.
- Determinar si es necesario un envío en tiempo real de los datos o almacenamiento para un procesamiento posterior.
- Diseñar una estructura para el módulo transmisor que no incomode al atleta durante el entrenamiento.
- Construir el sistema completo a un costo menor a un dispositivo de funciones similares como F-Scan “In-Shoe Pressure Measurement System” de Tekscan que tiene un costo de alrededor de USD \$7,200.

El siguiente trabajo consiste de diseñar e implementar un dispositivo que permita la lectura de la presión en puntos específicos de los pies de atletas por medio de sensores FSR y su debida interpretación de resultados para uso de los usuarios.

Los sensores FSR se conectan a un microcontrolador PIC18f45k22 que realiza la lectura de los datos de los sensores. Luego los datos son enviados a un dispositivo por medio de comunicación inalámbrica implementada por los módulos NRF24L01. Uno de los dispositivos funciona únicamente como esclavo y captura datos para enviarlos al dispositivo maestro que se encarga de juntar todos los datos para su posterior almacenamiento.

Al contener la información en un solo microcontrolador se procede inmediatamente al almacenaje de los datos compilados en un módulo de tarjeta microSD donde se guardan con un formato específico. El formato seleccionado permite desplegar la información relevante en un programa en la computadora codificado en el software Python con ayuda de la librería Tkinter para la interfaz gráfica, Numpy y Matplotlib. El programa muestra los resultados obtenidos de las veces que el atleta comete infracción por flotar, la presión en los sensores en el tiempo y mantendrá un registro de la presión en cada sensor para ver en que puntos de cada pie hubo una mayor presión durante el entrenamiento.

6.1. Marcha atlética

La marcha atlética es una disciplina del atletismo que se define como una progresión de pasos ejecutados de manera que el atleta siempre mantenga uno de los pies en contacto con el suelo. El modo de dar un paso es manteniendo recta la pierna que avanza desde que es levantada hasta que vuelve hacer contacto con el suelo y esté en posición vertical [6].

La marcha atlética es una disciplina que en 1908 fue incluida entre los deportes de las olimpiadas. Esta cuenta con una rama femenina y otra masculina y dos modalidades que en este caso son los 20 km y los 50 km de marcha. Esta competencia se practica en pistas de atletismo si son menores de 10 km y, si es de una mayor distancia o es una competencia mundial u olímpica, esta debe de realizarse en un circuito que esté entre los 2-2.5 km [7].



Figura 6: Competición de marcha [6]

Entre las reglas básicas de esta disciplina se encuentran: los atletas no pueden perder el contacto con el suelo a simple vista y no pueden flexionar las rodillas al avanzar. Si los atletas incumplen con estas reglas se cuenta con un grupo de jueces y un juez jefe designado serán los encargados de advertirlos y en el caso de seguir incumpliendo se descalifican [7].

Los jueces durante la competición posee una tarjeta amarilla y otra roja, la amarilla la utilizan para dar un aviso al atleta de la falta que están incumpliendo y solo pueden dar el aviso una vez al atleta por juez, si el mismo juez vuelve a ver al atleta incumpliendo le muestra la tarjeta de aviso que al serle mostrada tres veces la tarjeta de aviso el atleta queda automáticamente descalificado de la competición siendo notificado con la tarjeta roja [9].



Figura 7: Indicadores de faltas [7]

6.1.1. Técnica para la marcha atlética

La técnica de la marcha atlética se caracteriza por realizar movimientos acoplados a una alta velocidad para aumentar la frecuencia de los movimientos y por lo tanto la velocidad de desplazamiento. Se requiere de mover la cadera durante la ejecución del movimiento y una brazada rítmica. Ambos movimientos permiten generar de manera mas sencilla el movimiento y permiten que este sea armónico y rítmico.

Debido a la técnica empleada durante la marcha atlética y el calor que genera esta durante su ejecución en tiempos prolongados los atletas requieren utilizar ropa cómoda. Además, la ropa debe permitir ver la parte inferior del atleta para el evaluó de la técnica.

Durante el desplazamiento los pasos se deben dar sin perder el contacto con el suelo en ningún momento. Además la pierna frontal debe avanzar recta y la rodilla no debe estar flexionada desde el contacto inicial con el suelo hasta que esté en posición totalmente vertical y alineada con el cuerpo.

La técnica principal de marcha empieza con el apoyo del pie en el suelo mediante el talón. La pierna debe de estar lo más recta posible, pero en competencias se permite una leve flexión antes del contacto. Luego se debe apoyar por completo el pie con la pierna extendida siendo la base de soporte del cuerpo. Después de este momento comienza la fase de impulso, esta comienza elevando el talón de la pierna de apoyo y apoyando gradualmente todo el peso del cuerpo en el dedo grande del pie o dedo halux mientras se eleva la pierna. Cuando la pierna

está elevada por completo se debe de bajar la siguiente pierna inmediatamente iniciando el ciclo de nuevo. Las fases del ciclo se pueden dividir en cuatro puntos básicos [10].

- Fase de apoyo simple
- Fase de impulso
- Fase de oscilación
- Fase de apoyo doble

Fase de apoyo simple

Es la fase donde el peso del cuerpo se encuentra apoyado sobre la pierna delantera mientras que la otra oscila para buscar un nuevo apoyo [10].

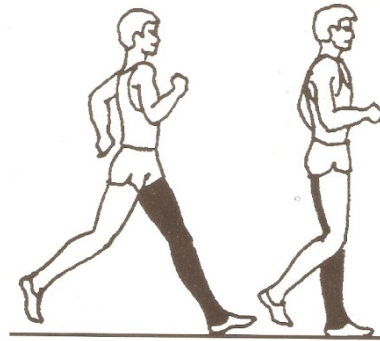


Figura 8: Apoyo simple [11]

Fase de impulso

Es la fase en la que el atleta se impulsa hacia adelante con la pierna apoyada [10].



Figura 9: Fase de impulso [11]

Fase de doble apoyo

Esta fase es cuando la pierna que viene oscilando de atrás se apoya adelante y se pone en contacto con el suelo sin que la otra pierna pierda el contacto con el suelo [10].

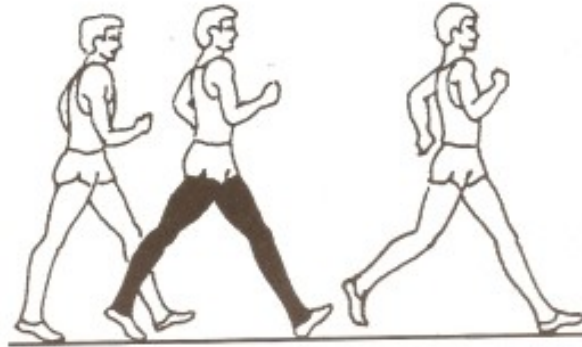


Figura 10: Apoyo doble [11]

Fase de oscilación

Es la fase donde la pierna libre regresa a la posición delantera para el inicio de un nuevo ciclo [10].

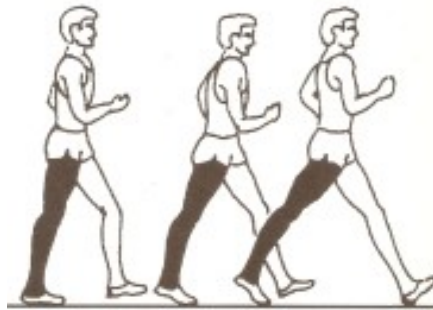


Figura 11: Fase de oscilación [11]

6.2. Ciencia aplicada al deporte

La ciencia aplicada al deporte es el conjunto de disciplinas del conocimiento que se orientan al estudio y comprensión del deporte y actividad física. Estas se encargan de buscar promover la salud y mejorar el rendimiento de un atleta desde diferentes perspectivas [12].

Existen tres sectores de principal estudio dirigido hacia los deportes que son: Biofeedback, psicología del deporte y la biomecánica.

6.2.1. Biofeedback

El biofeedback es una técnica para poder aprender a controlar procesos y funciones del cuerpo. La manera de llevar a cabo el biofeedback es emplear sensores que permiten recibir información del cuerpo y ayuda al usuario a centrarse en mejorar los aspectos que se desean mejorar en base al estudio [13].

6.2.2. Psicología del deporte

La psicología del deporte es la rama de la psicología que se encarga de estudiar los procesos mentales y psíquicos de un atleta durante la práctica de un deporte o cierta actividad física. Su propósito es conocer y optimizar las condiciones del atleta que permitan a este obtener su expresión máxima de potencia técnica, física y táctica. En la actualidad se utiliza principalmente para aspectos médicos como asma, estrés o ritmo cardíaco y para deportistas donde se busca relajación, controlar niveles cardíacos y controlar ciertos músculos [14].

6.2.3. Biomecánica

La biomecánica es una disciplina científica que se dedica al estudio de las actividades de nuestro cuerpo en ciertas situaciones y analizar las consecuencias mecánicas que ocurren a causa de estas. Generalmente se aplica en actividades de la vida cotidiana, deporte y el trabajo [15].

El principal objetivo de la biomecánica es resolver cualquier problema que surge de las condiciones a las que puede verse sometido el cuerpo del individuo. Esta busca resolver y plantear soluciones a los problemas que puedan derivarse de estas actividades y buscar alternativas más beneficiosas para llevar a cabo estas actividades de la mejor manera. Actualmente existen tres campos principales de la biomecánica: médico, deportivo y ocupacional [16].

6.3. El pie

El pie es la estructura del cuerpo de un organismo encargada de soportar el peso y también es la encargada de realizar los movimientos necesarios para la marcha ya sea caminando o corriendo. La estructura ósea está compuesta por 26 huesos, 33 articulaciones, 107 ligamentos y 19 músculos. Todos estos componentes forman una estructura a la que se le llama bóveda plantar que permite repartir el peso corporal en dos zonas principales de apoyo. Estas dos zonas de apoyo se denominan al metatarso en conjunto con los dedos y la zona del tarso posterior o talón [17].

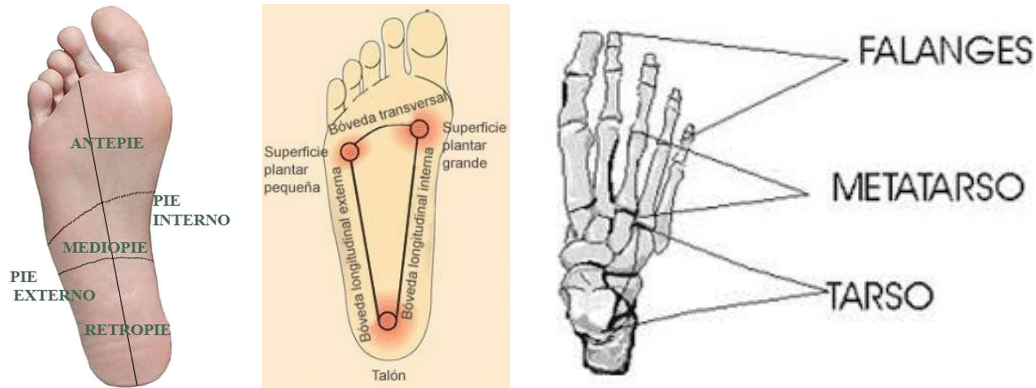


Figura 12: Izquierda: Parte del pie. [18] Centro: Bóveda plantar. [18] Derecha: División de apoyos del pie. [19]

6.4. FSR

Un FSR o Sensor de Fuerza Resistivo o Piezoresistivo es un dispositivo que permite detectar cambios de presión o peso. Entre sus principales características esta su facilidad para ser implementados y su bajo costo. Está compuesto por una película de un polímero PTF y dos capas separadas que al ser presionadas el semiconductor hace contacto y la resistencia disminuye. Entre sus principales desventajas es que son pocos precisos y tienen una baja exactitud por lo que generalmente se utilizan cuando se busca rangos de respuesta y no calcular pesos o fuerzas exactas [20].

Los FSR se utilizan de manera que entre mas presión se les aplica menor es la resistencia que presentan por lo que la manera comúnmente utilizada es colocándolos en un divisor de voltaje con otra resistencia y dependiendo de la presión que se le aplica es la resistencia que presenta y el voltaje de salida del circuito divisor [20].



Figura 13: Sensor FSR [20]

6.5. NRF24L01

Este módulo es un transceptor, lo cual implica que puede actuar tanto como un Receptor y un Transmisor mediante programación. Este es un módulo de radio de 2.4 GHz se caracteriza por ser de bajo consumo y de bajo precio [21].

La manera en que funciona es por medio de comunicación con el protocolo SPI, de esta manera logra transmitir datos a 2 Mbps, a distancias que varían entre los 8 a 40 metros según las condiciones en las que es empleado [21].

Según su tabla de especificaciones las corrientes en el módulo pueden llegar a ser más bajas de 14 mA y se alimenta desde 1.9 a 3.6 V [21].



Figura 14: Módulo NRF24L01 [21]

6.6. Microcontroladores

Los microcontroladores se pueden definir como un ordenador de tamaño reducido que contiene en su interior un CPU o unidad de procesamiento central que se encarga de ejecutar las instrucciones de operaciones lógicas, aritméticas y movimientos de datos [22]. Este circuito integrado contiene sistemas para controlar elementos de entrada y salidas, procesador y memoria para el programa y variables. Su propósito principal es el de automatizar procesos [23].

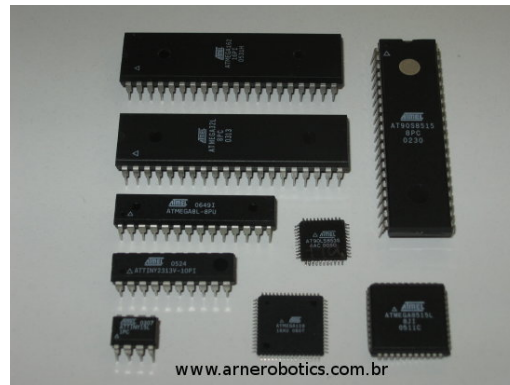


Figura 15: Diferentes empaquetados para microcontrolador[23]

6.7. Serial Peripheral Interface

Serial Peripheral Interface o SPI es de los protocolos mas utilizado para la comunicación microcontroladores y de los mas populares. Esto se debe a su simplicidad, velocidad de transmisión y funcionamiento confiable. Se utiliza para la comunicación con sensores, pantallas LCD, microcontroladores y cualquier dispositivo que pueda trabajar con el [24].

Este es un protocolo síncrono, esto quiere decir que trabaja conforme una señal de reloj y puede trabajar tanto para recibir y transmitir información por canales diferentes [24].

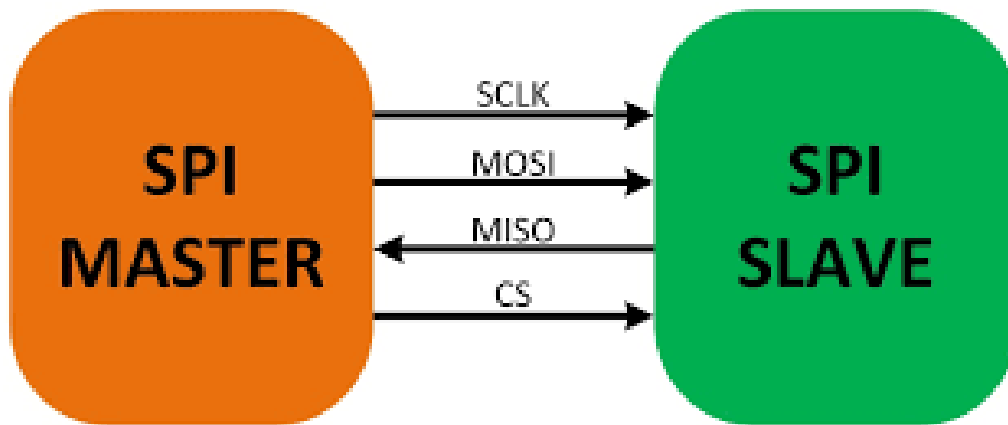


Figura 16: Diagrama de comunicación SPI [24]

Este protocolo se debe definir un dispositivo maestro y otro como esclavo. Los dispositivos esclavos son lo que se encargan de recibir la información que proviene del maestro y ejecutar lo sea su propósito. Para poder llevar a esto acabo cada canal debe contar con un registro de desplazamiento que se encarga de almacenar los bits para su transmisión o recepción [24].

Existen cuatro líneas lógicas que se encargan de realizar el proceso:

MOSI Master Out Slave In, esta línea se encarga de llevar los datos del maestro al esclavo.

MISO Master In Slave Out, esta línea se encarga de llevar los datos del esclavo al maestro.

CLK Clock, esta línea se encarga de enviar la señal de reloj del maestro a los esclavos.

SS Slave Select, esta línea se encarga de seleccionar uno de los esclavos [24].

6.8. Tarjetas SD

La Tarjeta SD o "Secure Digital" por sus siglas en inglés, consiste de una memoria no volátil que permite guardar información en dispositivos generalmente portátiles. Las tarjetas SD se caracterizan por su tamaño, capacidad y velocidad de transmisión [25].

Las tarjetas SD están compuestas por cuatro familias, que son SDSC que es para las de capacidad estándar, SDHC que son de capacidad alta, SDXC son las de capacidad extendida y SDIO que combina funciones de entrada y salida de los datos almacenados. Además vienen en cuatro tamaños que son el tamaño estándar, mini y micro. Esto fue con el fin de permitir las tarjetas SD adaptarse al uso en dispositivos de diferentes tamaños [25].

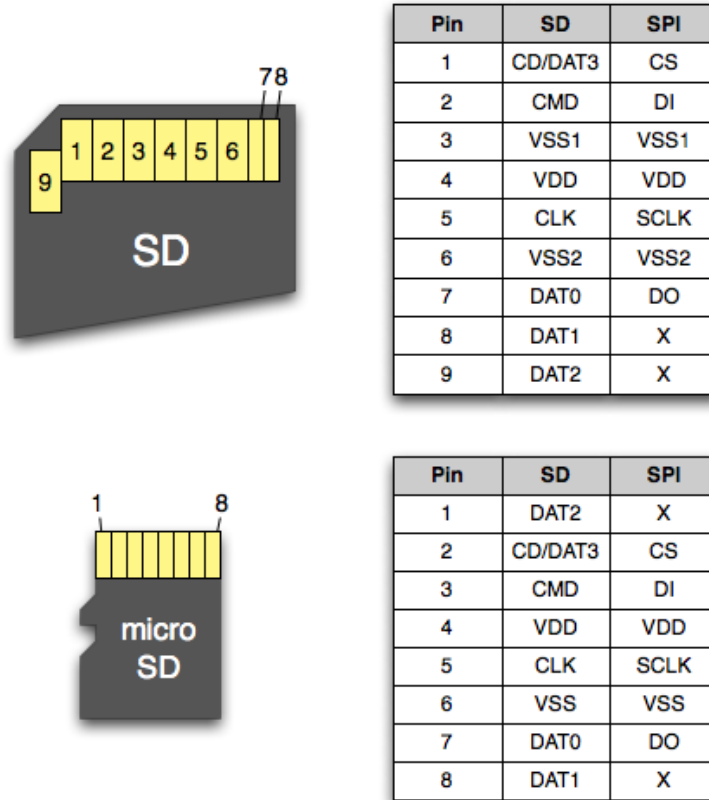


Figura 17: Diagrama de tarjeta SD y MicroSD [25]

Las velocidades de escritura y lectura están reguladas y se clasifican a las tarjetas SD por su desempeño secuencial. La velocidad estándar es de 12.5 MByte/s y puede llegar hasta los 624 MByte/s [26].

Las tarjetas SD posee distintos modos de transferencia de los datos. Los principales son los siguientes: SPI, Un bit, Cuatro bits y de dos líneas diferenciales. En el modo SPI es el usado principalmente por microcontroladores y soporta únicamente voltajes de 3.3V, este es el único modo que no requiere una licencia de huésped. En el modo de un bit se tiene un canal distinto para comando y datos y el formato de transferencia. En el modo de cuatro bits es el mismo protocolo que en el de un bit solo que se cuenta con cuatro líneas para datos. Y por último el diferencial de dos líneas usa bajos voltajes diferenciales para transferir comandos y datos [26].

6.9. Conversor de analógico a digital

Los conversores de analógico a digital o ADC es un dispositivo electrónico que es capaz de convertir una entrada analógica de voltaje a un valor binario capaz de ser procesado en microcontroladores y otros equipos electrónicos [27].

Su funcionamiento consiste en conectar la señal analógica que varía en el tiempo de forma continua al dispositivo y someter esta señal a un muestreo de velocidad fija y realizar el proceso de digitalización. Esta consiste en realizar de forma periódica la mediciones de la amplitud de la señal y guardar un valor entero preestablecido a es magnitud del voltaje de la señal [27]. En la Figura 18 se puede ver una breve explicación de cómo se observa este proceso.

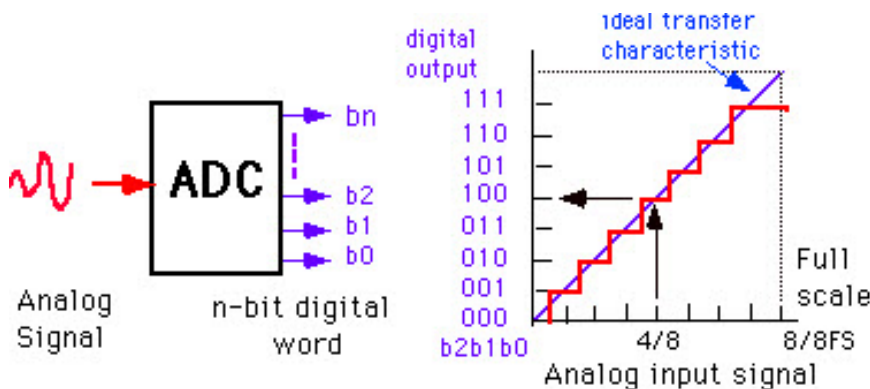


Figura 18: Diagrama de funcionamiento de módulo ADC [28]

6.10. Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel que fue creado en 1992 por Guido van Rossum [29].

Es un lenguaje de programación orientado a objetos y entre sus principales características esta una sintaxis sencilla para facilitar su lectura, cuenta con múltiples librerías para distintas aplicaciones, puede ser extendido a otros módulos implementados en C o C++, puede ser utilizado para el desarrollo de aplicaciones para interfaces programables, puede ser empleado en distintas plataformas como Mac OS X, Windows, Linux, Unix y Android. Por último este es un software gratis con licencia Open Source [29].

6.10.1. Tkinter

Tkinter es la interfaz gráfica estándar de Python, es una biblioteca gráfica que viene por defecto con el sistema operativo Windows facilita su uso debido a que no se requiere ninguna instalación adicional ademas que es plataforma. Su soporte y documentación es extenso [30].

6.10.2. Matplotlib

Matplotlib es una biblioteca de Python para la generación de gráficos utilizando datos que se encuentran guardados en listas [31].

6.10.3. Pygubu

Pygubu es una herramienta de desarrollo rápido que permite crear interfaces con Tkinter de manera estructurada. La interfaz es guardada en un archivo XML y utilizando el constructor de Pygubu se carga para su uso [32].

6.11. Placas de circuito impresas

Las placas de circuito impresas o PCB por sus siglas en inglés, es un método de fabricación de circuitos que surgió luego de las placas cableadas. Estas últimas tenían la desventaja que el cable presenta fallas de aislamiento o de fractura por la vejez de los cables [33].

Con el transcurso de los años los componentes y materiales comenzaron a disminuir de precio y tamaño por lo cual y se buscaron nuevas alternativas que se pudieran desarrollar con estas ventajas abriendo paso a los PCB. Los PCB están compuestos por caminos o "tracks", agujeros, componentes y vías entre los principales elementos. Los caminos permiten la conducción de las señales eléctricas para conectar entre componentes, los agujeros permiten colocar componentes de pines y las vías permiten conectar trayectos en capas distintas del PCB. Para fijar componentes se utiliza un metal para soldar, en la mayoría de casos este metal resulta ser estaño y a veces una aleación entre estaño y plomo [33].

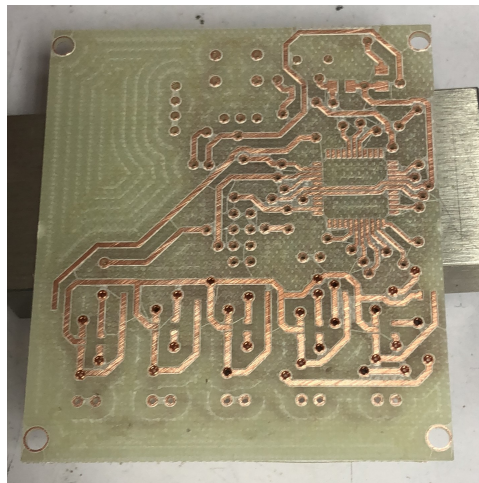


Figura 19: Placa de circuito impresa

La composición de las placas consiste en múltiples placas que son calentadas y pegadas formando un solo objeto. La base es generalmente fibra de vidrio llamada FR4, este material

le da un grosor y rigidez a la placa, cabe mencionar que existen placas que utilizan un plástico flexible y otras metálicas. Luego tienen capas de cobre laminado, estas se encargan de conducir las señales eléctricas y pueden existir de una capa hasta de 16 o más capas. Luego se encuentra la máscara de soldar o "Soldermask", esta capa se encarga de aislar las capas de cobre de contactos con el exterior, generalmente tienen un color verde aunque puede ser de otros colores. Por último se tiene el Silkscreen que es una capa blanca que se aplica sobre la máscara de soldar y esta se encarga de colocar símbolos y terminología que permita soldar con mayor facilidad la placa y entender que componentes contiene. Para el diseño de PCB existen múltiples programas que se encargan de esto [33].

6.12. Altium

Altium Designer es un software para el diseño de PCB y componentes electrónicos. Entre sus características principales esta la creación de esquemáticos, diseño 3D de PCB, desarrollo de FPGA y la captura y salida del manejo de datos. Además que permite la interacción entre estas funciones por lo que aumenta su utilidad al poder ejecutar todo esto en el mismo software [34].

6.13. MPLab

MPLAB es un editor integrado de desarrollo gratuito que se enfoca a productos de la marca Microchip. Este software permite la selección de distintos modelos de microcontroladores dependiendo de las características requeridas para las distintas aplicaciones. [35].

Este programa puede correr tanto para plataforma Windows, Linux y Mac OS. Entre las funciones más características del programa esta editor de texto, compilador y simulador [35].

6.13.1. XC8

XC8 es un compilador para microcontroladores de 8 bits que permite la programación de estos en el lenguaje de programación C. Este compilador permite editar errores y agregar puntos de quiebre para analizar los códigos escritos. Entre las principales ventajas de este compilador se encuentra que permite la optimización de recursos, permite la escritura de códigos amplios y velocidades de desempeño altas. [36].

6.14. Diseño mecánico

Diseño mecánico se define como el proceso que se debe de llevar a cabo para dar cierta forma y dimensiones a un objeto con el fin que cumpla con el funcionamiento deseado y describa el proceso de fabricación para llevarlo a cabo [37].

El producto debe ser la unión de diferentes elementos donde su integración supera el funcionamiento de cada parte por individual [37].

7.1. Selección de microcontrolador o procesador

Para la selección del microcontrolador a utilizar se investigó de posibles alternativas con distintas características y se encontraron tres posibles soluciones: Bluno Nano, este es un microcontrolador de Arduino que incluye un módulo bluetooth para la comunicación entre otros Blunos. PIC18F45K22, este es un microcontrolador de 16 bits que cuenta con una modalidad de bajo consumo de potencia y dos interfaces de comunicación SPI. Y por último el uso de un ARM cortex M0, este es un microprocesador ARM de bajo consumo de potencia de 32 Bits.

Para la evaluación de alternativas se utilizo de criterios un conjunto de requisitos basado en los objetivos específicos y generales establecidos. Basado en esto se determinó que los criterios de mayor importancia son el costo, tamaño, peso y el consumo de potencia. Adicional se tomó en cuenta la documentación disponible para la implementación del dispositivo, esto con la finalidad de garantizar que tan factible era el uso de dispositivo para la tarea requerida.

En el siguiente cuadro se puede ver los criterios exactos evaluados y el factor de importancia que se le asignó a cada uno de estos. Cada criterio se va a evaluar en una escala de 1-10 donde 1 es que no cumple con el criterio y 10 que cumple con el criterio.

Habiendo establecido los criterios de evaluación para la selección del microcontrolador se procedió a evaluar cada uno de estos como se muestra en el siguiente cuadro. Como se puede observar basado en los criterios evaluados el PIC 18F45K22 fue el de mejor puntuación según los criterios evaluados. En este caso se le dio importancia también al hecho de contar con instrumentos para la programación del microcontrolador, además también se tomó en cuenta que la implementación de un microprocesador requiere de otros dispositivos que asistan a

Criterios	Factor
Costo	1
Documentación disponible	0.6
Tamaño	0.8
Peso	0.7
Consumo de potencia	0.9

Cuadro 1: Criterios de evaluación de selección

Criterios	Bluno Nano	18F45K22	ARM Cortex M0
Costo	4	9	7
Documentación disponible	6	4.8	3
Tamaño	6.4	5.6	5.6
Peso	5.6	4.9	4.9
Consumo de potencia	6.3	8.1	9
Total	28.3	32.4	30.4

Cuadro 2: Selección se microcontrolador o procesador

este a efectuar la tarea mientras que el controlador puede trabajar con mayor independencia por lo que puede llevar a cabo el mismo proceso a un menor costo [35].

7.2. Selección de módulo de comunicación inalámbrica

Al haber definido que microcontrolador se va utilizar se procedió a determinar el módulo de comunicación inalámbrica a emplear en el dispositivo. Para ello se realizó una investigación preliminar de la cual se llegó a tres alternativas, las cuales fueron los módulos Xbee, bluetooth y NRF24L01.

Para la evaluación de las tres alternativas posibles se utilizó los mismos criterios empleados para determinar el microcontrolador a utilizar. Siendo estos el costo, peso, tamaño, documentación disponible y consumo de potencia. En el Cuadro 3 se puede observar la evaluación de los criterios.

Basado en los criterios evaluados la alternativa que resultó con mayor beneficios es el uso del módulo NRF24L01.

Criterios	Bluetooth	XBee	NRF24L01
Costo	6	5	10
Documentación disponible	4.8	5.4	4.8
Tamaño	5.6	5.6	6.4
Peso	4.9	5.6	5.6
Consumo de potencia	7.2	6.3	7.2
Total	25.8	27.9	34.0

Cuadro 3: Comunicación inalámbrica

7.3. Selección de sensor FSR

Para la selección del sensor FSR a utilizar para la implementación del dispositivo se aprovecho que el Departamento de Electrónica y Mecatrónica de la Universidad del Valle de Guatemala contaba con los sensores FSR de Interlink Electronics modelo 402. Conociendo el modelo de los sensores se procedió a buscar todos los datos disponibles de los sensores en su hoja de datos. Los datos encontrados fueron los siguientes:

- Fuerza de actuación 0.1 Newtons
- Rango de fuerza 0.1-10.0³
- Tamaño de 18.3 mm
- Tiempo de pulso de subida <3 us
- Temperatura de operación de -30 - 70 grados centigrados
- Resolución continua

Al conocer las características de lo sensores se procedió a verificar las fuerzas aproximadas que los pies de atletas soportan durante la práctica de la marcha atlética. Basado en el siguiente artículo *Biomechanics of Running and Walking* [38] se encontraron que las fuerzas aproximadas en el pie las cuales dependiendo de la actividad realizada varían desde 200 a 2500 Newtons. Los valores se pueden observar en la Figura número 20. El máximo de marcha alcanza aproximadamente 1200 Newtons.

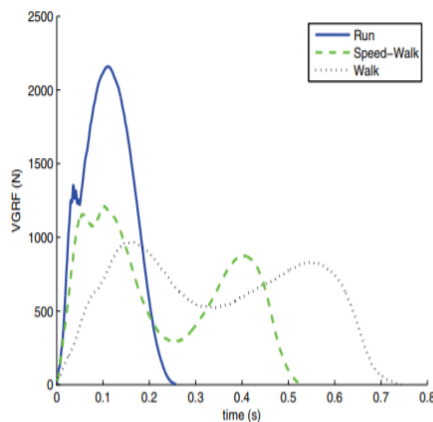


Figura 20: Fuerzas aproximadas en el pie dependiendo de actividad [38]

Basado en las características que presentan los sensores y las fuerzas aproximadas que pueden actuar en el pie, se llegó a la conclusión que eran suficientemente cercanos para una aproximación cercana. Además se evitó retrasos con la solicitud de compra de estos. Por

último la diferencia en costo por un sensor de resolución más alta y mayor rango de fuerzas era muy alto como para justificar la adquisición de otros sensores FSR.

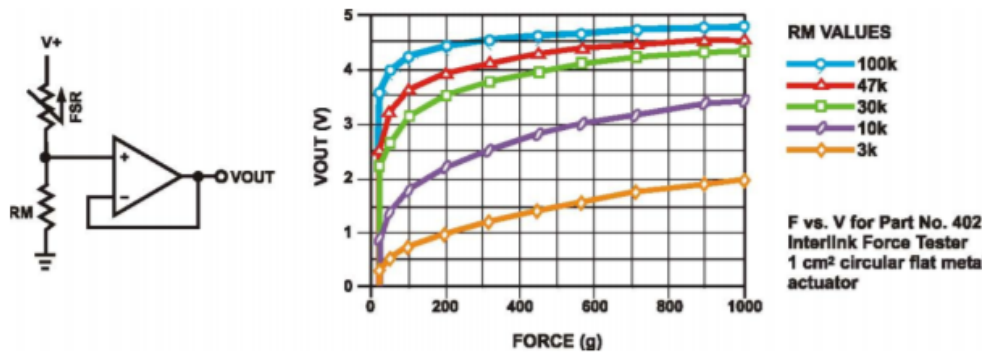


Figura 21: Modo de funcionamiento de sensores FSR según resistencia del divisor de voltaje [39]

Por último, para el uso de los sensores FSR es necesario el uso de un divisor de voltaje y un seguidor de voltaje el cual de acuerdo a la Figura 21 se tomó la decisión de realizarlo con resistencias de 10 k Ohms para una mayor diferencia entre los valores recolectados por los canales ADC en el rango de 0 a 3.7 Volts que operara el dispositivo.

7.3.1. Número de sensores necesarios para el registro de presiones

Para determinar el número de sensores necesarios para tomar una recolección de datos representativa y confiable se investigaron distintos trabajos existentes donde se hayan utilizado plantillas enteras o trabajos similares y los resultados obtenidos como lo fue para *análisis biomecánico del apoyo plantar en la marcha atlética. Relación entre la huella plantar, ángulos de la articulación subastragalina y presiones plantares* [1] y *Foot Modeling and Smart Plantar Pressure Reconstruction from Three Sensors* [2] en donde se muestra un mapeo de puntos de presión durante distintas actividades y en ellas se puede observar que estos se encuentran principalmente en el antepié interno, mediopié y retropié externo. Basado en estos resultados de la investigación se determinó con un sensor colocado en el dedo Hallux o grueso, dos sensores en el antepié uno en el mediopié y uno en el retropié se podía lograr mediciones fiables.

7.4. Análisis del consumo de potencia del dispositivo

Para calcular el consumo de potencia del dispositivo y tener un cálculo preliminar de la cantidad aproximada de consumo se utilizó el PIC18F45K22. Este se conectó una fuente de voltaje en conjunto con divisores de voltaje con resistencias y potenciómetros debido a que no se contaba con los sensores FSR inicialmente. Estos funcionaban simulando las resistencias FSR y se colocó la fuente en modo de lectura de corriente demandada por el circuito. Inicialmente se probó únicamente un microcontrolador conectado a los cinco

divisores de voltaje con lo cual se obtuvo un consumo de 500 micro amperios.

Luego de esto se procedió a evaluar el consumo de potencia del dispositivo completo. Este incluye los microcontroladores con el programa final de comunicación inalámbrica, los divisores de voltaje con sensores FSR, cinco amplificadores operaciones, resistencias, módulo de carga de batería y el módulo de escritura en la tarjeta microSD. Para esta prueba se utilizó la programación del dispositivo maestro en conjunto con todos los módulos requeridos para el funcionamiento. Al tener esto completado se utilizó un multímetro y se realizó la misma medición en ambos casos conectando la fuente al multímetro y del este al circuito para observar la corriente que demanda. La corriente consumida varía dependiendo del uso de los ADC conectados a los divisores de voltaje a los sensores FSR. Los valores de corriente encontrados estaban en el rango de 70-40 mA.

7.4.1. Selección de batería para el dispositivo

Con la corriente obtenida en la sección anterior y procurando que el dispositivo fuera capaz de ser utilizado un mínimo de tres horas de uso continuo se seleccionó una batería de Litio-Ion de 3.7 Volts y 500 mAh. En el caso con mayor consumo de corriente el tiempo de funcionamiento obtenido es el siguiente:

$$500mAh/70mA = 7.14h \quad (1)$$

7.5. Selección de envío de datos en tiempo real o almacenamiento

Para determinar cual de las dos opciones se requería en este caso, se procedió a investigar las distintas formas de entrenamiento en marcha atlética [40]. Para ello, se observaron distintos vídeos de entrenamientos realizados por atletas en Guatemala y en otros países [41]. En estos vídeos los entrenamientos varían considerablemente en distancias que recorren y ejercicios que realizan [42]. Basado en esto se contempló que muchas de estas variantes dependen de los entrenadores y su preferencia en estilo de entrenamientos [43].

Por último, se contempló la posibilidad de implementar un módulo de largo alcance comparado con un módulo de escritura en SD. Para ello se comparó el módulo SenMod de escritura en tarjeta microSD HC con el módulo Adafruit RFM95W LoRa Radio Transceiver Breakout - 868 or 915 MHz - RadioFruit En el Cuadro 4 se hace una comparación entre ambos módulos. De los principales factores de diferenciación es el precio donde el módulo microSD tiene un precio de alrededor USD \$1.00 mientras que módulo de radio transductor tiene un precio de USD \$29.00. Por último, el uso de una antena en el módulo que lleva el usuario puede llegar a incomodar debido a que se requiere un mínimo de 4 km de alcance para garantizar un funcionamiento estable en los ejercicios y entrenos mas comunes en la marcha atlética.

Debido a estos factores analizados y la incertidumbre en los entrenamientos de los atletas se decidió que la mejor manera de crear un dispositivo que se acople a los entrenamiento y variaciones de los entrenadores sin importar la distancias de recorrido y el alcance que

Criterios	SenMod MicroSD HC	Adafruit RFM95W LoRa Radio
Costo	10	5
Documentación disponible	9	6
Peso	8	7
Tamaño	7	5
Consumo de Potencia	5	8
Total	39	31

Cuadro 4: Selección de módulos en tiempo real o almacenamiento

pueda tener el dispositivo la mejor manera de recolectar los datos es el almacenamiento de estos en una tarjeta microSD utilizando un módulo de escritura en tarjeta SD para que al terminar el entrenamiento se puedan analizar y revisar los datos obtenidos.

7.6. Protocolo lectura y escritura SD

Las tarjetas SD tienen una interfaz de huésped además del modo SPI para la comunicación con dispositivos maestros. Esta interfaz usa cuatro líneas de datos. Para la implementación en microcontroladores el modo recomendado es SPI [44].

Como se puede observar en el siguiente cuadro se tiene nueve pines para la tarjeta SD mientras que para la tarjeta microSD son ocho y la miniSD son once. Como se mencionó previo al trabajar con microcontroladores se prefiere trabajar en modo SPI, este modo al ser inicializado solo requiere de cuatro pines, CLK, CS, DI y DO [44].

La conexión entre la tarjeta SD y el microcontrolador va con una etapa reguladora de voltaje a 3.3V desde los 5V del micro y luego el pin MISO debe ir al pin SDI del microcontrolador, el pin MOSI al pin SDO, el pin CSK al SCK del microcontrolador y por último el pin CS también conectado a su equivalente en el microcontrolador [44].

Al conectar la tarjeta SD al microcontrolador de manera correcta se procede a inicializarla. Para ello se deben de mandar ciertos comandos para crear la estructura del programa. Cada uno de estos comandos debe ser 6 bytes de largo y el primer byte siempre es una suma del comando y 64. En la siguiente figura se puede observar paso por paso detallado la estructura a continuar para iniciar la SD. Cabe mencionar que luego de cada comando se envían cuatro bytes que son los argumentos, estos contienen generalmente una dirección o el largo del bloque [45].

El comando debe ser recibido en el pin D0 al ser cambiado a un uno lógico. El pin CS tiene que pasar un pulso descendente antes de enviar el comando y debe mantenerse en cero durante el envío. El tiempo durante el comando y la respuesta se conoce como tiempo de respuesta o N_{cr} , este depende de la frecuencia de reloj utilizada [45].

Al terminar la inicialización de la tarjeta SD se deben enviar ciertos bytes de tipo dummy con el único propósito de saber a la frecuencia que se está trabajando por lo que se debe llenar el buffer para que un pulso de reloj sea enviado del microcontrolador por lo que al mandar una serie de bytes dummies se garantiza un pulso constante que permita a la SD operar a la frecuencia deseada[45].

Al haber terminado con todo tipo de inicialización se procede a la escritura o lectura para ello se manda el comando 16, donde el argumento detalla el largo del bloque. Los comandos de lectura y escritura presentan en el argumento la dirección del sector de donde se escribe o lee la información[44].

7.7. Protocolo para uso de módulos NRF24L01

Los módulos NRF24L01 se comunican por medio del protocolo SPI, por lo que utilizando este protocolo se puede leer y escribir en los registros del NRF24L01. Según la hoja de datos [21] la comunicación puede llegar a una velocidad de transmisión de 10 Mbps [46].

Para la comunicación por medio de SPI primero se debe iniciar el pin CSN y colocar en uno, luego se debe de cambiar a cero y debe mantenerse en cero durante todo el proceso, esto es para indicar que se está a punto de iniciar comunicación. Luego se debe de enviar la instrucción de comando que se debe de enviar según sea lo que se desea realizar. Si se está recibiendo bytes por la instrucción se debe de enviar un byte al 24L01. Si se desea enviar datos al NRF24L01 solo se debe de enviar los datos sin importar lo que el módulo envíe de regreso. Al terminar la transmisión se debe de colocar el pin CSN en alto para terminar el proceso [46].

7.8. Diseño y fabricación de PCB

Al tener un circuito funcional y completo para la creación del dispositivo se procedió al diseño y fabricación de las placas. Para ellos se utilizó el software Altium. En este software se llevó a cabo la creación de las placas desde los esquemáticos, creación de las librerías, diseño de placas y exportación de los archivos necesarios para su fabricación.

El proyecto consiste en dos placas una placa maestra y una esclava. La placa esclava contiene los conectores para el cable FCC donde se colocan los sensores FSR, módulo para recargar la batería utilizada, PIC 18F45K22 y el módulo NRF24L01 para la comunicación entre ambas placas. La función de esta placa consiste en obtener los datos de los sensores almacenarlos en el PIC y luego enviarlos a la placa maestra.

La placa maestra realiza la misma función del esclavo de obtener los datos de los sensores a los que está unido, el módulo NRF24L01 para recibir los datos del esclavo, módulo para recargar la batería, el PIC 18F45K22 y adicional cuenta con el módulo de tarjeta microSD, este módulo se encarga de guardar todos los datos almacenados en el PIC en la tarjeta SD para que luego esta se pueda retirar, ingresar en un ordenador y utilizar el programa diseñado para la lectura de los datos y su posterior interpretación.

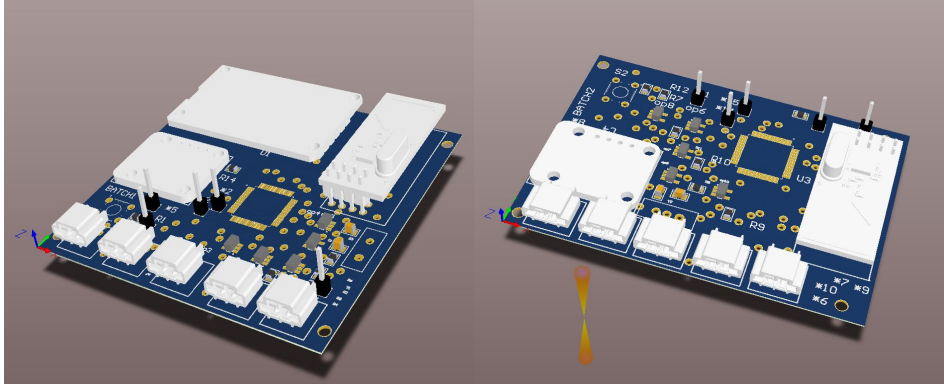


Figura 22: Izquierda:PCB placa maestra, derecha: PCB placa esclava

Para poder realizar el circuito necesario se leyeron todas las hojas de datos de los componentes para comprender las conexiones necesarias para su funcionamiento, ya teniendo conocimiento del modo de funcionamiento de todos los componentes se procedió a realizar una librería que contuviera todos los componentes en Altium tanto en 2D como en 3D para la fabricación del PCB. Se realizó un esquemático conectando todos los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del dispositivo. Los esquemáticos finales se puede observar en las figuras 93 y 94 realizados para los circuitos del prototipo.

Luego se procedió al diseño de las placas, para ello se decidió que fuera de dos capas debido a que la máquina fresadora que la universidad permite fabricar este tipo de placas. También se editaron las reglas en el diseño para que cumplieran con las normas de fabricación de la máquina. Al terminar el diseño de las placas y su revisión, se procedió a realizar cambios finales como la inclusión de headers en la placa para su programación debido a que no se cuenta con ningún elemento para programar microcontroladores de superficie. También se cambiaron las dimensiones finales de las placas priorizando una mayor altura y reduciendo el ancho de la placa para que ocupara el menor espacio posible. La placa maestra quedo con dimensiones de 56 mm x 79mm mientras que la placa esclava sus dimensiones fueron 56 mm x 62 mm.

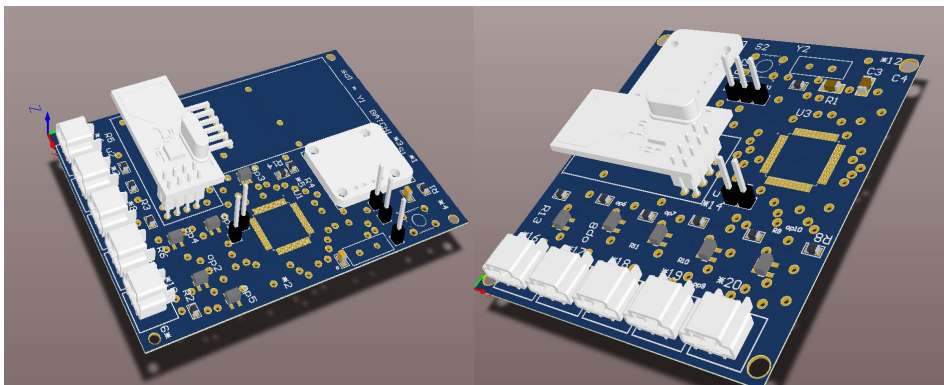
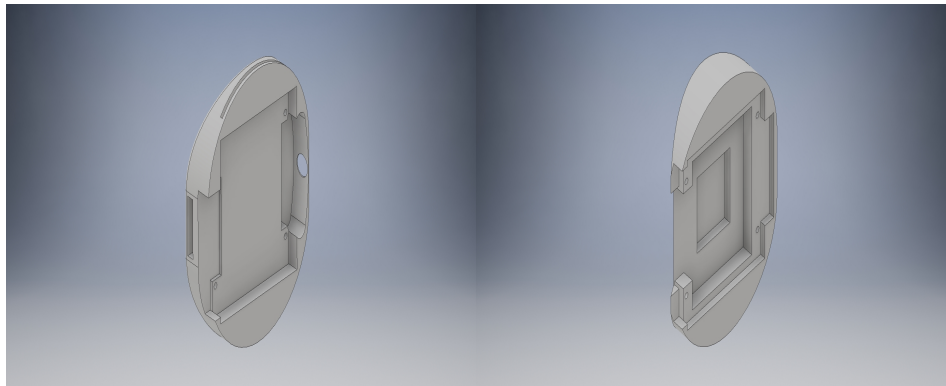
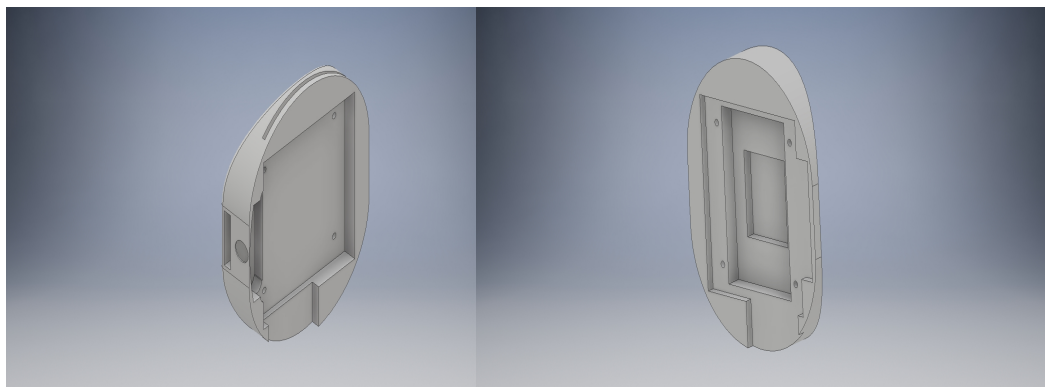


Figura 23: Izquierda: placa maestra final, derecha: PCB placa esclava final



(a) Parte inferior de funda módulo maestro (b) Parte superior de funda módulo maestro



(a) Parte inferior de funda módulo esclavo (b) Parte superior de funda módulo esclavo

7.9. Diseño de funda para placas

Para el diseño de las fundas de cada placa primero se tuvo que seleccionar el lugar indicado para que el atleta porte estas. Basado en dispositivos existentes como los rastreadores de arresto domiciliario y otros dispositivos hallado en los artículos mencionados en la sección de antecedentes como *Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review*. [3] se decidió que el usuario porte el dispositivo en el tobillo. Para el diseño se utilizó el software Autodesk Inventor 2017. Se planteó una funda conformada por una parte superior e inferior. Se tomó en consideración espacios para manipular la tarjeta SD, un espacio para la batería, un agujero para el interruptor, agujero para las salidas de los cables de sensores y agujeros para que tornillos sujeten tanto la placa como ambas partes, separadores entre las placas y las fundas, ranuras en la parte trasera para pasar una cinta de velcro que permita ajustar los dispositivos en los tobillos del usuario y un agujero para conectar el cable para cargar la batería. Se tomó en consideración procurar un ambiente lo mas cerrado posible para aislar el circuito del exterior.

En las figuras 26a, 26b , 27, 25b 25a, 24b, 24a se pueden observar los diseños realizados en Inventor para las placas del dispositivo.



(a) Parte superior de la funda

(b) Parte trasera de la funda

7.9.1. Selección de material para fabricación del dispositivo

Para la elaboración del prototipo se va utilizar el material PLA debido a que las impresoras 3D de la universidad utilizan este filamento. para la selección del material final del dispositivo se buscó un material que presentara el mayor número de características favorables a lo deseado. Entre las características buscadas se encuentra, ligero, resistente, bajo costo y aislante eléctrico.

Investigando materiales que cumplieran con estos parámetros se encontró uno en específico que cumplía que en este caso es el polipropileno o PP. El polipropileno es un termoplásticos que se obtiene de la polimerización del propileno que es un subproducto del petróleo. Este material puede ser modificado y adaptado para distintos usos. El polipropileno presenta las siguientes características: bajo costo, versatilidad con técnicas de procesamiento, buena procesabilidad, ligero, evita traspaso de humedad, alta resistencia disolventes, alta resistencia a flexión y fatiga y estabilidad térmica [47]. Debido a esto la decisión final para selección del material para una la fabricación a gran escala del producto final es polipropileno.

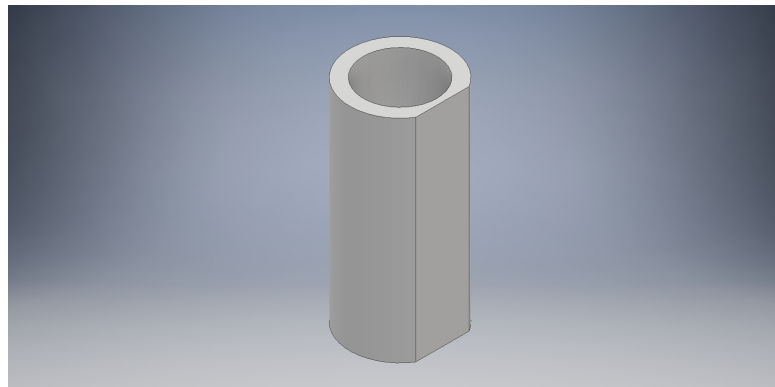


Figura 27: Separadores

7.10. Programación de microcontroladores

Para la programación de los microcontroladores se utilizó la herramienta de MPLAB con el compilador XC8 con el cual se programó todos los módulos necesarios del PIC18F45K22. Los módulos utilizados del microcontrolador fueron el ADC, módulo de protocolo de comunicación SPI1, SPI2 y Timer0. El módulo ADC fue utilizado para los cinco canales disponibles en el microcontrolador los cuales se utilizaron para captar la información de los sensores conectados al microcontrolador. El módulo SPI1 fue utilizado en uno de los circuitos para la escritura de datos del microcontrolador al módulo de tarjeta microSD. El módulo SPI2 fue utilizado para la comunicación entre el módulo maestro y esclavo con el componente NRF24L01. El motivo por el cual se utilizan los dos módulos SPI del microcontrolador es que se pretende mantener la comunicación entre el dispositivo maestro y esclavo de forma continua y no cambiar constantemente entre el módulo de comunicación y el de escritura en tarjeta SD. Además para el uso del módulo ADC y la lectura continua de los cinco canales se mantuvo un tiempo de 20 milisegundos para permitir la lectura correcta de cada uno de los canales. Por último, se utilizó el Timer0 del PIC para medir el tiempo entre cada ciclo de escritura y recolección de datos del módulo y poder observar y analizar la velocidad promedio de funcionamiento del circuito [35].

Como se puede observar en las figuras 28 y 29 se tienen los algoritmos del código principal del funcionamiento de ambas placas explicados de forma clara y breve.

7.11. Diseño interfaz gráfica

Para la Interfaz gráfica que se debía de diseñar para el análisis de los datos recopilados por el prototipo se decidió utilizar el lenguaje de programación Python. Esto se debe a la variada documentación existente para este lenguaje, las múltiples librerías existentes, el factor que es un software de libre acceso y compatibilidad en múltiples plataformas.

Basado en esto se procedió a investigar de distintas maneras de realizar una interfaz que mostrara el mapa de presiones de un pie de manera sencilla y fácil de interpretar por los usuarios. Para ello la primera versión del programa se llevó a cabo utilizando la librería Kivy que fue creada por el MIT. La versión diseñada con esta librería se puede observar en la figura 30 donde se encuentra el mapa del pie y los botones requeridos para desplegar los datos necesarios para el usuario. Al realizar pruebas con esta interfaz se encontró un problema en específico. Al momento de crear objetos en forma de cuadros para de resolución de la presión del pie, este tenía un máximo de 9600 objetos antes de cerrarse automáticamente el programa al llegar a su límite de objetos. Debido a este problema se descartó esta interfaz, ya que limita la resolución del mapa. Para ello se utilizó la librerías de Numpy, matplotlib, ColorMap y Pillow como principales fuentes. El procedimiento llevado a cabo es la lectura de datos de la tarjeta SD, el almacenamiento de estos limitaba el número de datos a desplegar y el tiempo de entrenamiento que se podía mostrar.

Debido a esta situación se procedió a buscar una nueva alternativa para mostrar los datos compilados por el dispositivo. Los datos en listas, los valores se leen y se mapean a un mapa de color. El resultado se puede observar en la Figura 31, dependiendo de las fuerzas obtenidas

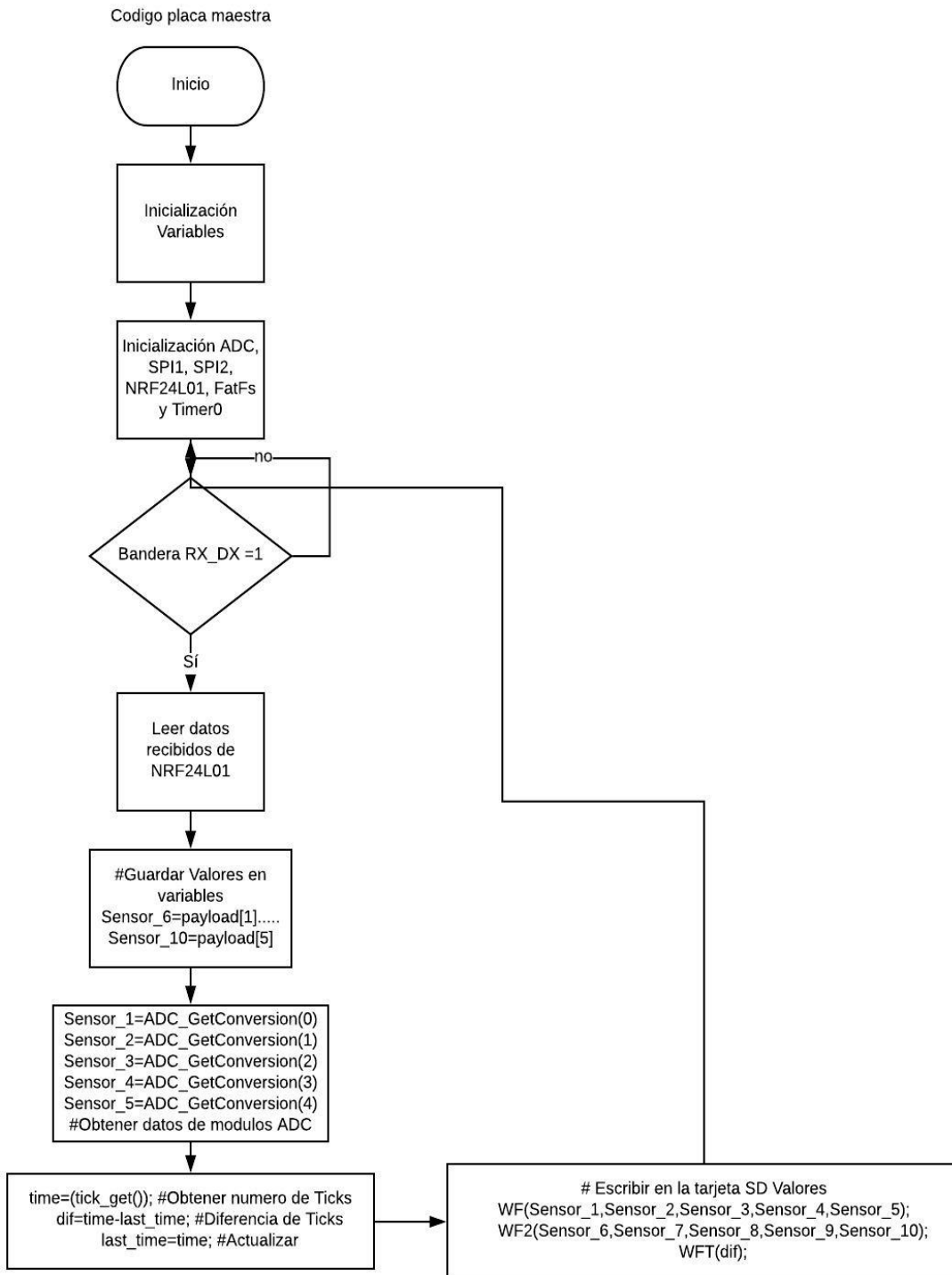


Figura 28: Algoritmo placa maestra

Codigo placa esclava

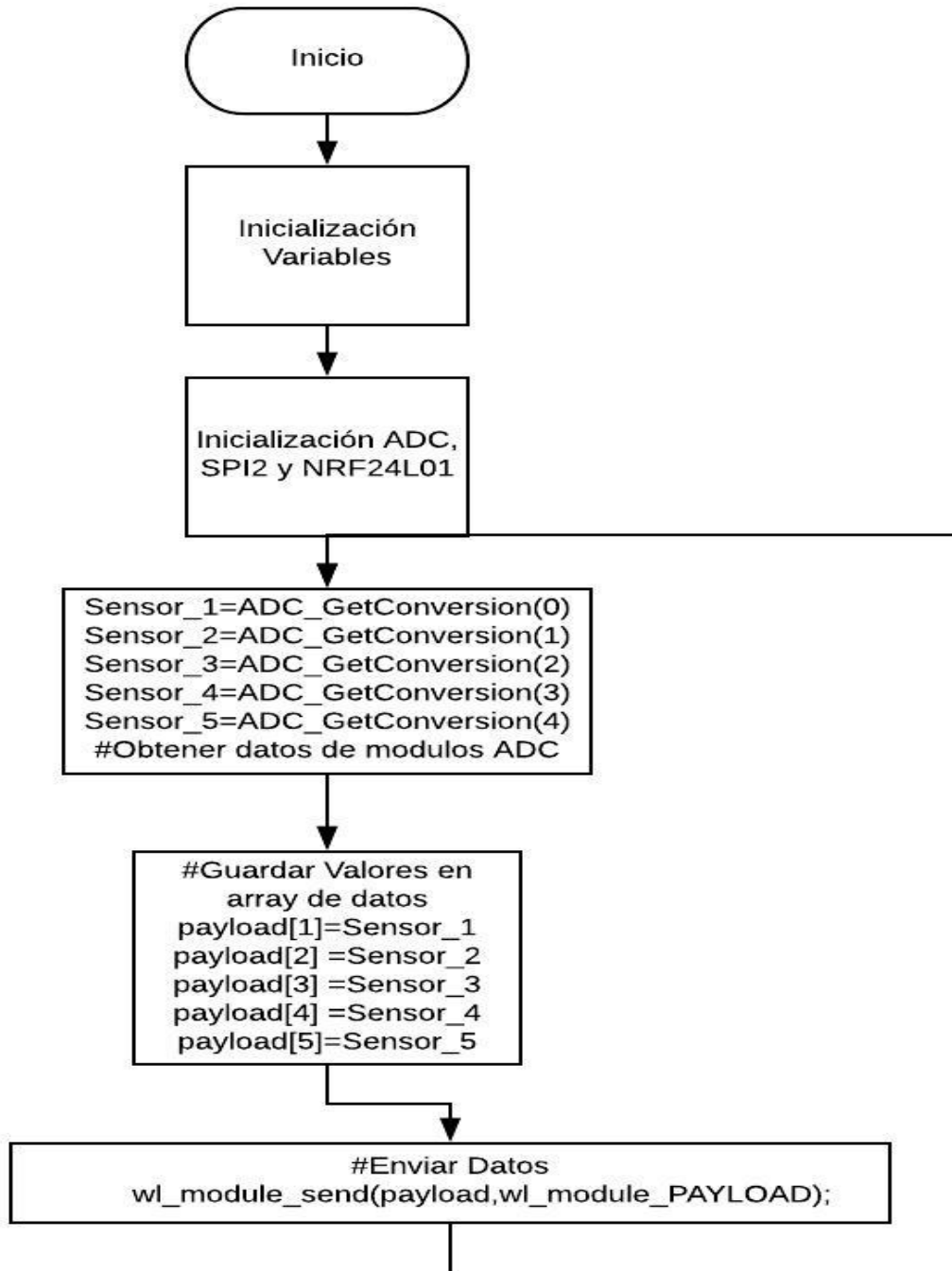


Figura 29: Algoritmo placa esclava



Figura 30: Versión 1 del programa creado

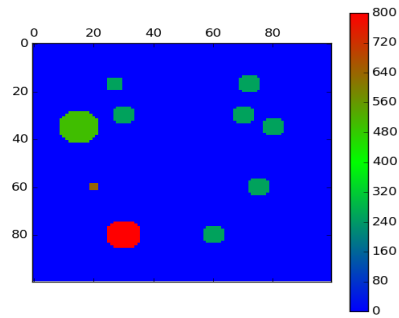


Figura 31: Mapa de color creado

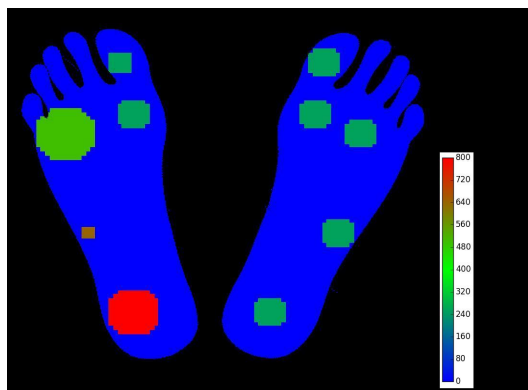


Figura 32: Mapa de presión diseñado

por el dispositivo el diámetro y color del círculo varían indicando la fuerza y la regularidad de los resultados. El resultado de la versión 2 del programa creado se puede observar en la Figura 32.

En la Figura 33 se puede observar un diagrama del algoritmo seguido para la implementación de la interfaz gráfica del programa que interpreta los resultados y los despliega al usuario.

Diagrama de flujo funcionamiento de GUI

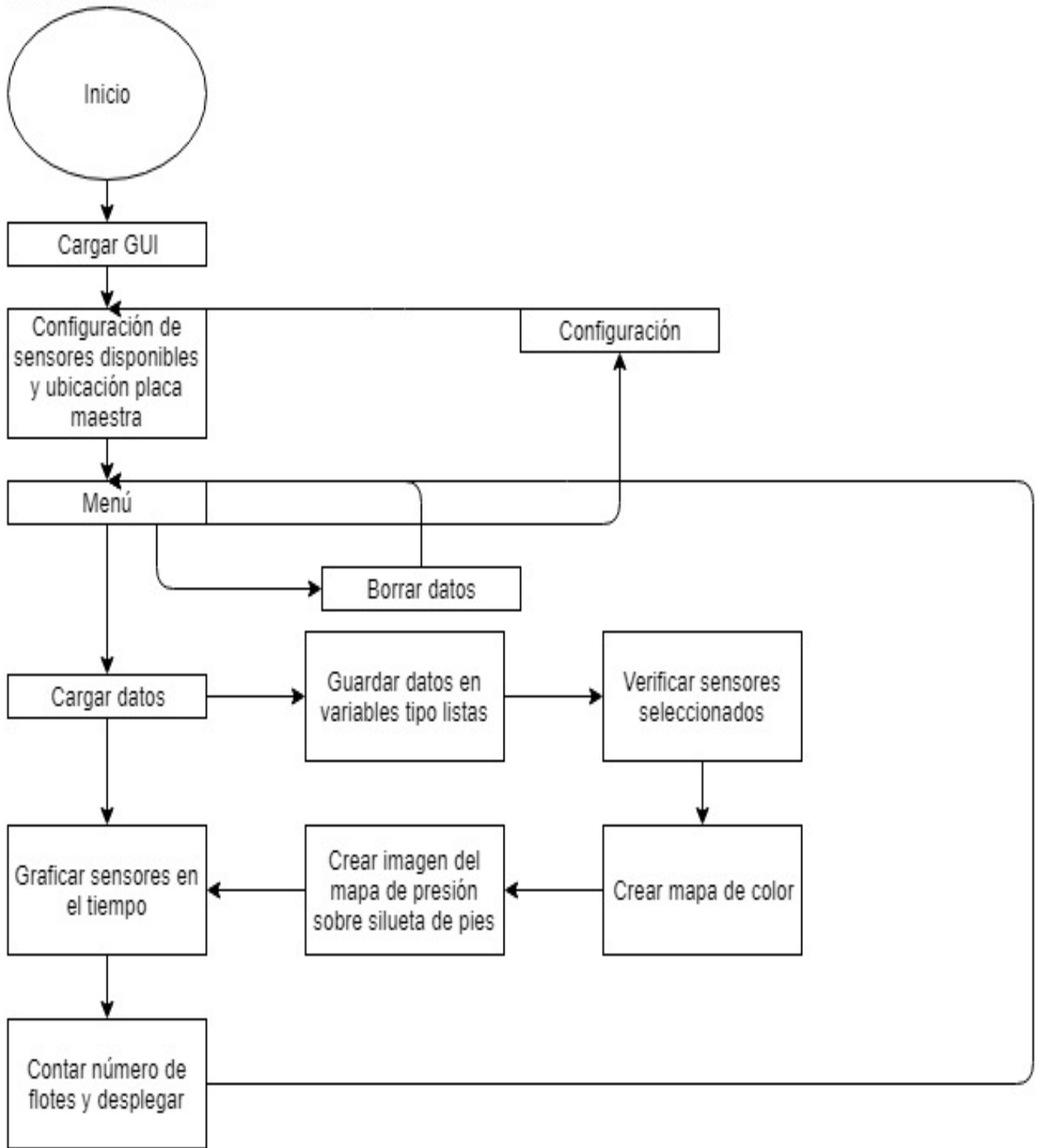


Figura 33: Algoritmo interfaz gráfica

8.1. Implementación de módulo tarjeta SD

Inicialmente se procedió a la lectura de cómo funciona una tarjeta SD y en que consiste su protocolo de lectura, se encontró que la comunicación se realiza regularmente por el protocolo serial de comunicación SPI para la comunicación con microcontroladores.

Basado en ello se procedió a investigar y buscar si se contaba con librerías Open Source o código abierto. Para ello se buscó en plataformas como Github, foros y páginas de internet. Después de esta investigación se encontró múltiples recursos existentes para distintos microcontroladores. El recurso con mayor documentación y uso para microcontroladores fue la librería FATFs. Esta librería está enfocada en la comunicación con tarjetas SD y SDH, estas últimas siendo tarjetas SD de alta capacidad.

Teniendo esta librería se procedió a leer toda la documentación existente y necesaria para su implementación. Teniendo la información se procedió a implementar la librería específicamente para el microcontrolador empleado que en este caso fue el PIC 18F45K22. Al momento de implementar la librería en el programa esta no funcionó como se requería.

Debido a estos problemas se procedió a llevar a cabo una etapa de revisión para determinar porque no funcionaba la librería en el proyecto. Entre las actividades que se realizaron fue probar con tarjetas SD de dos marcas distintas, cambiar el microcontrolador, el dispositivo compilador y el módulo de tarjeta SD sin obtener ningún resultado. Después de múltiples intentos se utilizó una tarjeta SD marca Sandisk de 8 Gb y se encontró que en la entrada de MISO y MOSI del módulo utilizado estaban invertidos.

Al solucionar todos los problemas inicialmente hallados se procedió a probar la librería una vez más y se logró su funcionamiento correcto. Primero se crea un archivo formato .txt

Valor Sensor 1	Valor Sensor 2	Valor Sensor 3	Valor Sensor 4	Valor Sensor 5	Valor Sensor 6	Valor Sensor 7	Valor Sensor 8	Valor Sensor 9	Valor Sensor 10	Ticks Durante Ciclo
0	25	40	250	40	80	0	20	120	70	7912

Cuadro 5: Datos guardados en archivo .txt en la tarjeta microSD

en la tarjeta SD y luego se abre el archivo creado en el cual se almacena la información recopilada por el microcontrolador con el formato que se observa en el Cuadro 5.

8.2. Implementación del módulo NRF24L01

Para la implementación del módulo de comunicación inalámbrica se utilizó el mismo procedimiento descrito previamente con el módulo de tarjetas SD, donde primero se investigó al respecto del módulo, sus características, su protocolo de comunicación y la documentación disponible para la implementación de este en microcontroladores.

Se determinó que la comunicación se realiza con este módulo por medio del protocolo SPI, las señales entre el microcontrolador y el NRF24L01 deben de ser de 3.3V debido a que es el voltaje máximo que permite este dispositivo.

Al concluir con la investigación y entendimiento del módulo se procedió a buscar librerías existentes disponibles. Se encontraron diferentes librerías implementadas para Arduino u otros microcontroladores. Se buscó la librería con mejor documentación y esta fue encontrada en la plataforma de Github, que es un repertorio de código open source, por el usuario G4lvaniX para el microcontrolador 18f452. Esta librería se editó para su uso con el microcontrolador 18F45K22 y se documentó los cambios realizados y las funciones utilizadas para su entendimiento y posterior referencia.

8.3. Lista de componentes a utilizar para la fabricación del dispositivo

Al armar el circuito en una placa de pruebas o protoboard e investigar los distintos módulos necesarios para la implementación del dispositivo se procedió a investigar los componentes necesarios, el precio y empaquetados disponibles para el diseño de la placa del circuito y lograr que este ocupe el menor espacio posible debido a que el usuario debe portar este durante el entrenamiento. Las páginas empleadas para la cotización e investigación de dispositivos fueron Mouser, Digikey y Amazon debido a que presentaban una manera sencilla de buscar todo lo requerido, el precio y la disponibilidad.

Al encontrar todos los componentes necesario se procedió hacer una lista de todos los componentes, la cantidad y el precio de cada uno de ellos. Esta tabla se puede ver en el Cuadro número 6. El precio total de la construcción de ambos módulos presenta un total de USD \$197.32.

Componente	Número de parte	Cantidad	Precio USD
Lipo Charger	1905	2	6.95
Resistencias	CMT-4023S-SMT-TR	10	0.126
OPAMP	LPV821DBVR	10	1.76
Capacitores	C0805C220F5GACTU	4	0.88
PIC18F45K22	PIC18F45K22-I/PT	2	3.120
Cristal oscilador 8MHz	XT9S20ANA8M	2	0.41
Resistencias	RS2012P-102-D-T5-3	2	0.660
Botón	1825910-6	2	0.1
Conector FFC	5-520314-2	10	0.5
Cable FFC	A9CAG-0208F	10	2.08
Módulo tarjeta SD	2126efef26m206	1	1.66
NRF24L01	BC22523	2	1.20
FSR	S-20-1000-FS5	10	99.50
MICRO SD		1	6.90
Batería	1578	2	7.95
Tornillos	3mm x 25 mm	8	0.3
TOTAL			\$197.32

Cuadro 6: BOM

8.4. Interfaz gráfica

La versión final de la interfaz gráfica se procedió a utilizar las herramientas de Pygubu y Tkinter con lo cual se realizó una interfaz gráfica mas sencilla y estructurada. La estructura de la interfaz gráfica es la siguiente. Se tiene una ventana de menú donde se puede cerrar el programa y otro de configuración donde se abre una ventana nueva donde el usuario puede indicar que sensores le interesa medir y en que pierna lleva el módulo de tarjeta microSD el usuario.

La relación de fuerza de presión con la resistencia de los FSR se hizo mediante una regresión lineal que va desde 0 a 1000 Newtons según el valor del ADC de 0 a 255. Esta relación se elaboró basado en la hoja de datos [39]. Por último en la ventana principal existe un botón para cargar los datos en la tarjeta microSD al programa y otro para borrar los datos. Al presionar el botón de cargar datos este muestra al usuario el mapa de color con la presión de los sensores seleccionados. Adicionalmente se cargan dos gráficas donde se muestran las presiones detectadas por los sensores en el tiempo del entrenamiento para ambos pies y también le indica cuantas veces el dispositivo detecto que ninguno de los sensores estaba bajo presión durante su uso para indicar cuantas veces hubo flote o ninguno de los dos pies estaba en contacto con el suelo en el entrenamiento. Para incorporar la detección debido a la limitante de sensores FSR disponibles se limitó a únicamente contar los sensores seleccionados en la configuración de la interfaz. Además, que al poseer canales ADC sin conectar estos detectan alta impedancia y valores aleatorios por momentos, motivo por el cual se deshabilitan al momento de desplegar estos resultados.

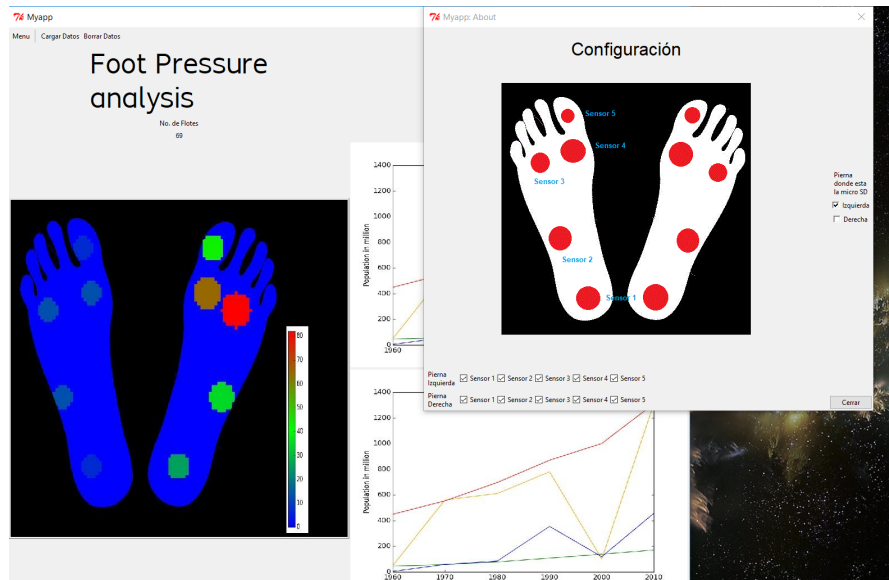


Figura 34: Interfaz final del programa

8.5. Diseño y fabricación de PCB

Al terminar el proceso de diseño se pasó a la fabricación de ambas placas en la fresadora de la universidad, la colocación de vías para juntar ambas capas del circuito y la soldadura de todos los componentes. Durante este proceso la placa esclava fue fabricada y soldada dos veces debido a que el módulo NRF24L01 que se soldó en la primera placa se encontraba defectuoso y le faltaban componentes que permitieran un funcionamiento correcto de la placa. En la Figura 35 se pueden observar ambas placas terminadas.

8.6. Fabricación de las fundas del dispositivo

Para la fabricación del prototipo de las fundas para el dispositivo se procedió a realizarlos con las impresoras 3D modelo Ultimaker 3 y el material utilizado para los prototipos fue PLA o poliácido láctico. Entre los ajustes principales se utilizó la resolución de 0.2 y un relleno del 0.1 con el fin de realizar prototipo ligero y reducir el tiempo de impresión de las fundas. En las figuras 36 y 37 se puede observar los prototipos finales donde el color verde y negro es la funda del circuito esclavo y el naranja con negro es el circuito maestro. Para evitar alguna incomodidad del atleta por parte de los tornillos se colocó en la parte trasera una cobertura de foamy.

8.7. Velocidad de funcionamiento del dispositivo

Al completar la implementación de todos los módulos requeridos para el funcionamiento del dispositivo se procedió a utilizar el Timer 0 del microcontrolador y con ayuda de la librería en Github "Tick" se modificó para poder medir en la interrupción del código la

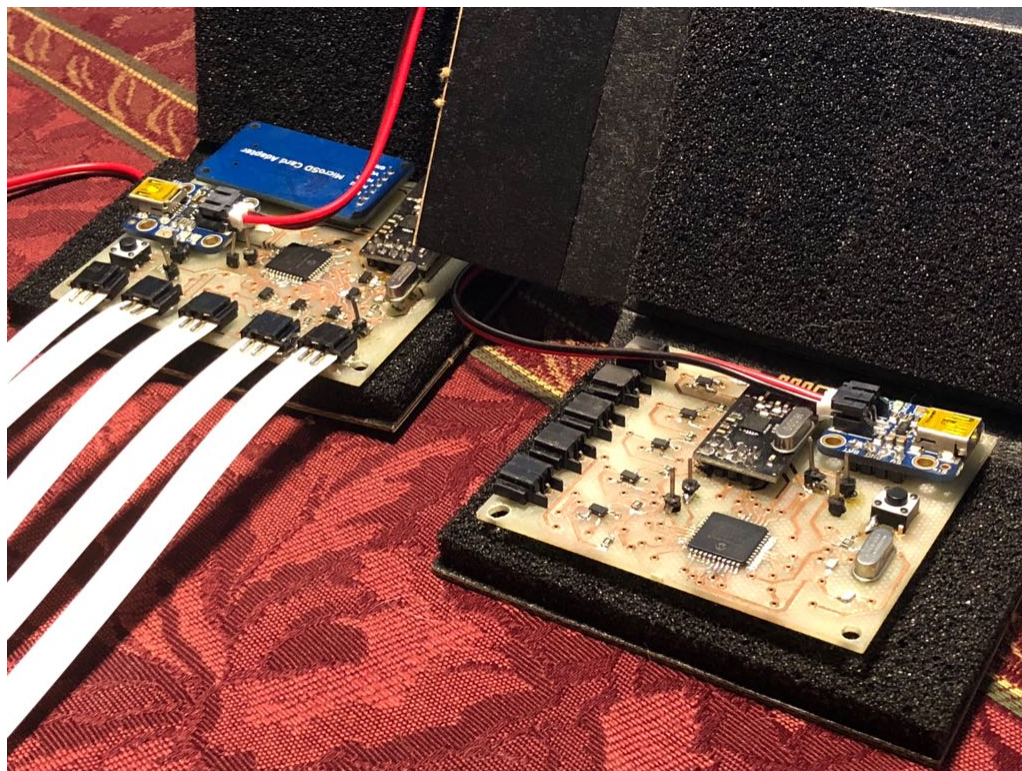


Figura 35: Placas finales



Figura 36: Prototipos finales



Figura 37: Prototipo final

velocidad media de cada ciclo para conocer la velocidad de toma de datos del dispositivo.

Para poder determinar el tiempo se requería definir la frecuencia de reloj utilizada que en este caso fue de 8 MHz. Con este dato se obtuvo que en cada ciclo se completaba en 1.02 segundos. De este tiempo el tiempo requerido para la obtención de los datos del módulo ADC fue de 120 milisegundos, comunicación entre microcontroladores de aproximadamente 400 milisegundos y cada ciclo de escritura de cinco datos en la tarjeta microSD fue de 300 milisegundos aproximadamente.

8.8. Pruebas de módulos

Al terminar la construcción y diseño del módulo se procedieron a las pruebas para verificar su correcto funcionamiento en distintas situaciones. Las situaciones que se decidieron evaluar fueron cuatro. La primera es con ambos pies apoyados en la parte del antepié, después con ambos pies apoyados por completo, ambos pies apoyados en el talón del pie o el retropié y, por último, una prueba en movimiento del usuario utilizando el dispositivo.

Antes de mostrar los resultados obtenidos cabe resaltar que para estas pruebas se utilizaron únicamente dos sensores en cada pie, uno en el antepié justo debajo del dedo Hallux o grueso y el otro en la parte trasera del pie o talón debido a la limitación de sensores y procurar de esta manera que el mapeo entre ambos pies fuera el mismo. Para la prueba del dispositivo los resultados desplegados se va mostrar una imagen de la posición empleada para la toma de mediciones en cada variante, las gráficas de presión-tiempo de cada sensor analizado y el mapeo de color de las presiones en los distintos puntos del pie seleccionados que en este caso son dos. Cabe resaltar que para el ajuste de los sensores en el pie del usuario se utilizó micropore y se colocaron como se puede observar en la Figura 42.



Figura 38: Usuario apoyado en antepié



Figura 39: Usuario apoyado en retropié



Figura 40: Usuario parado



Figura 41: Usuario en movimiento



Figura 42: Posición de sensores en pié de usuario

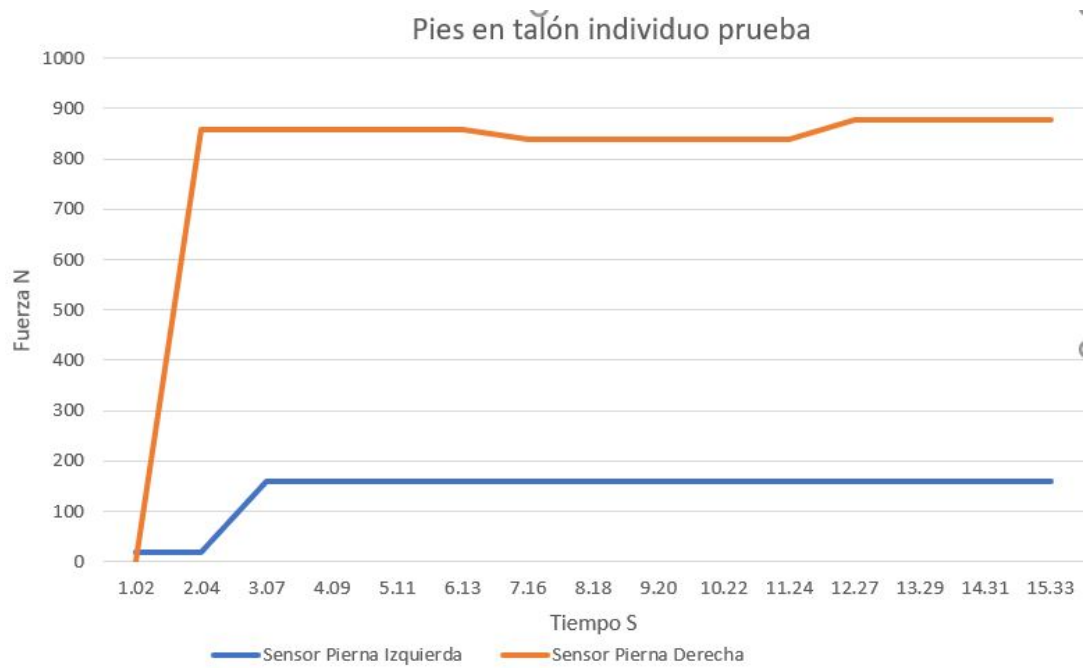


Figura 43: Gráfico de resultados de pie apoyado en talón

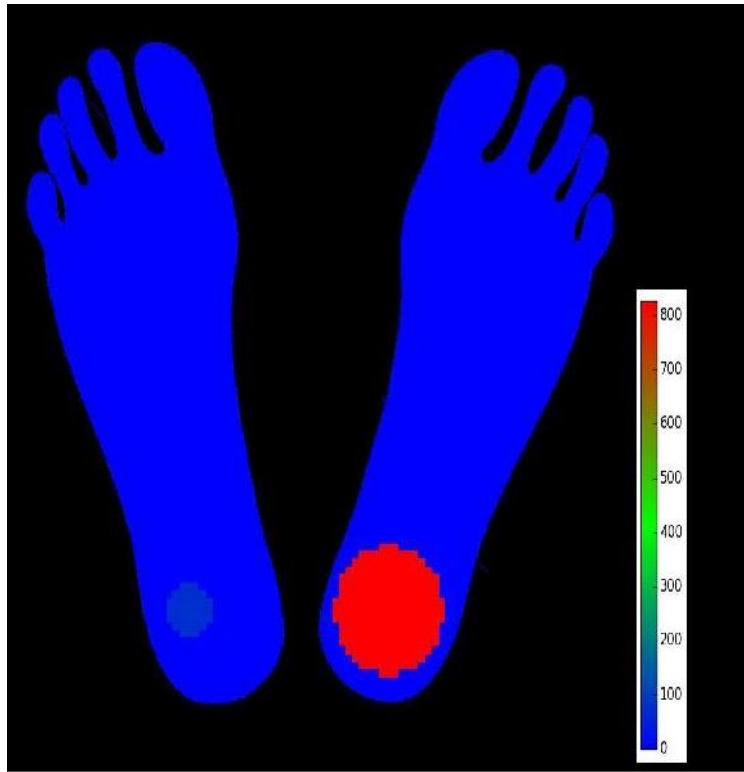


Figura 44: Mapa de color de resultados de pie apoyado en talón

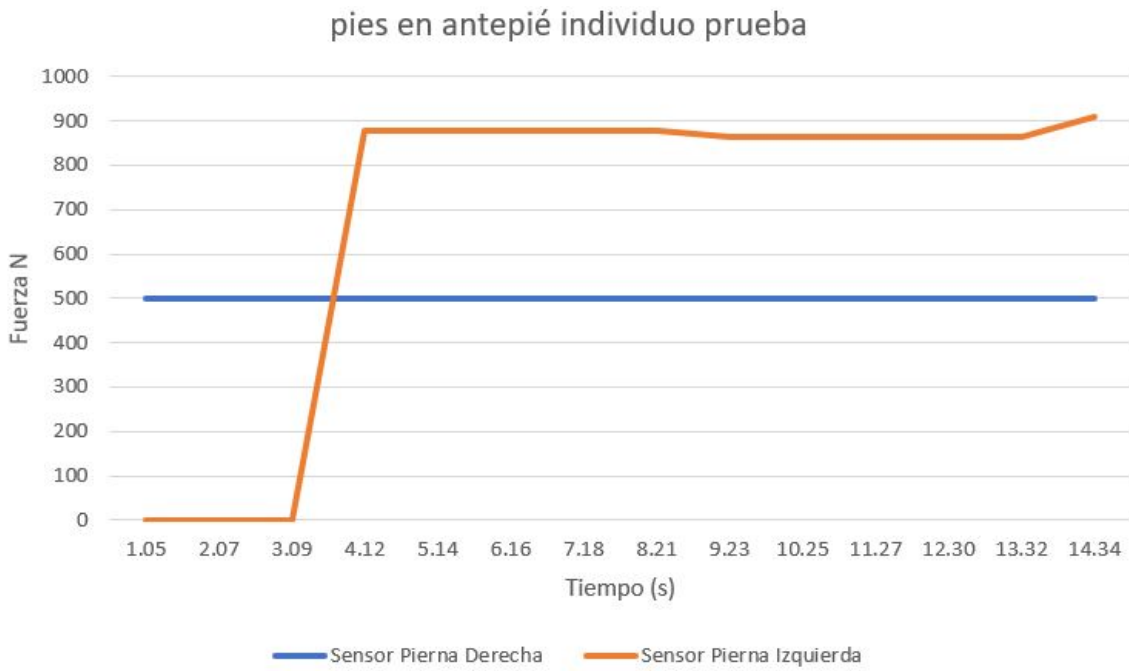


Figura 45: Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié

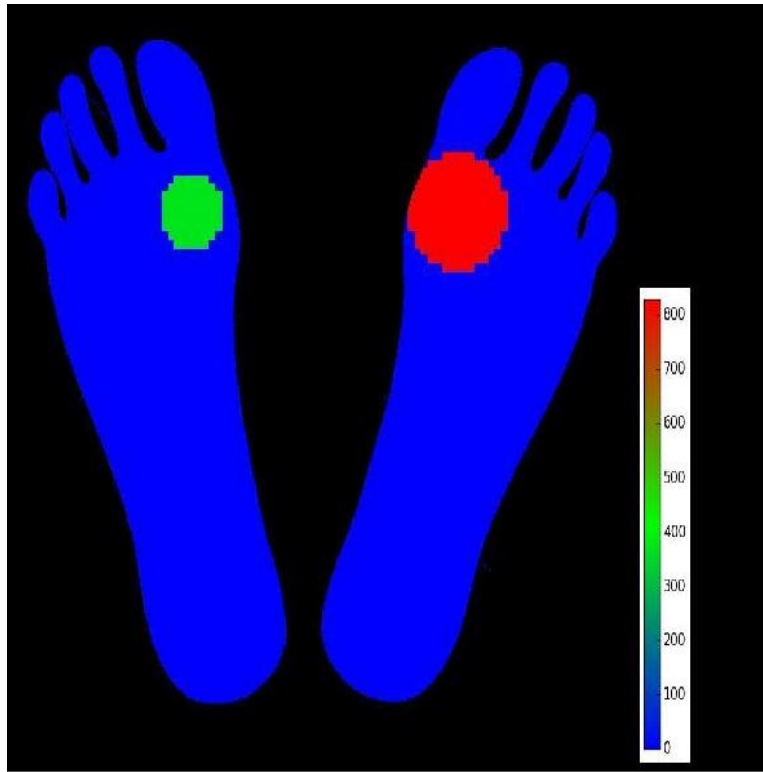


Figura 46: Mapa de color de resultados de pie apoyado en antepié

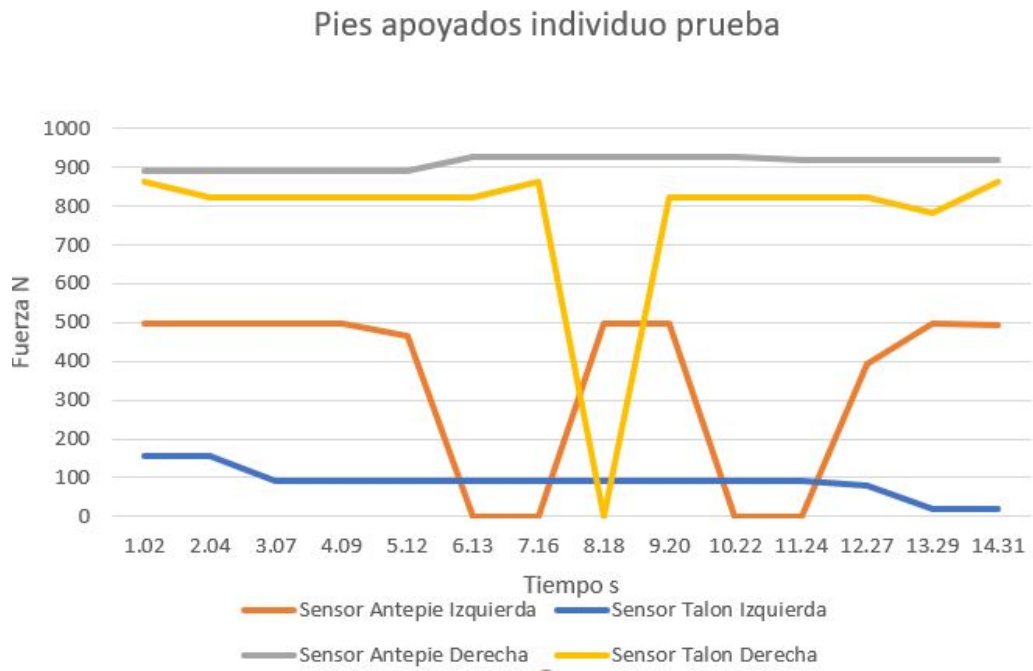


Figura 47: Gráfico de resultados de pie apoyado en forma uniforme

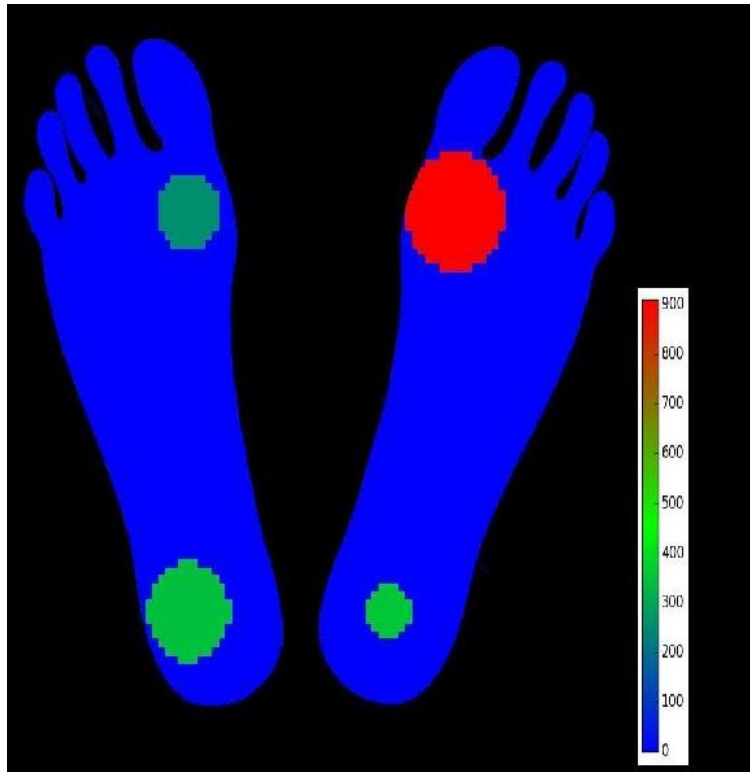


Figura 48: Mapa de color de resultados de pie apoyado en forma uniforme

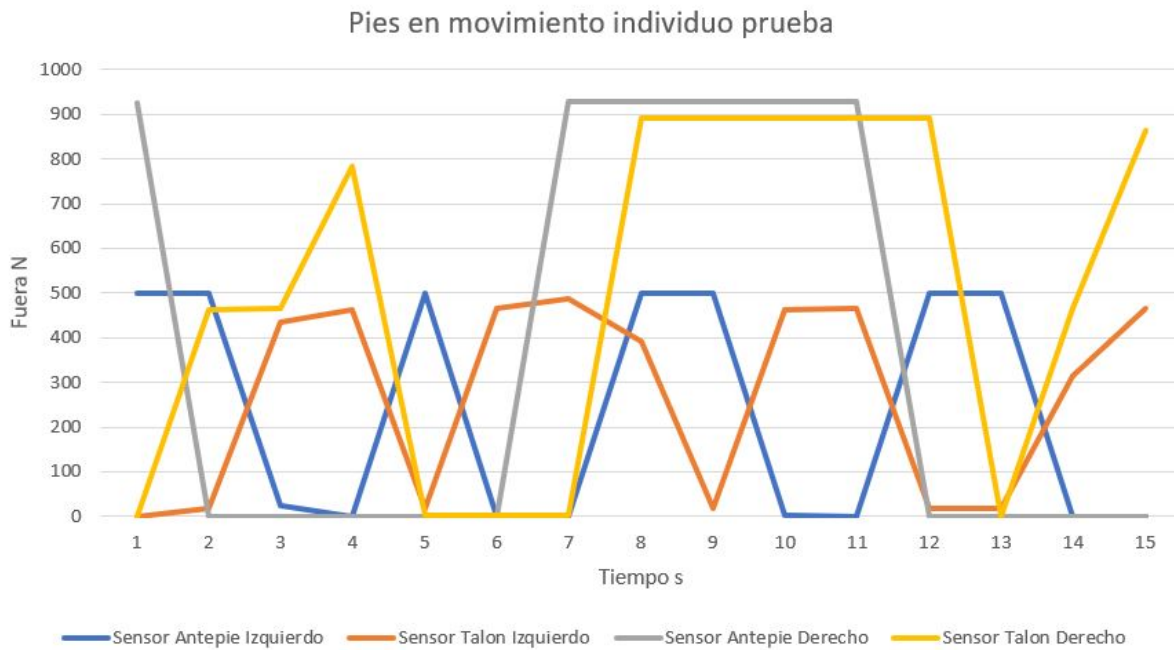


Figura 49: Gráfico de resultados de pie en movimiento

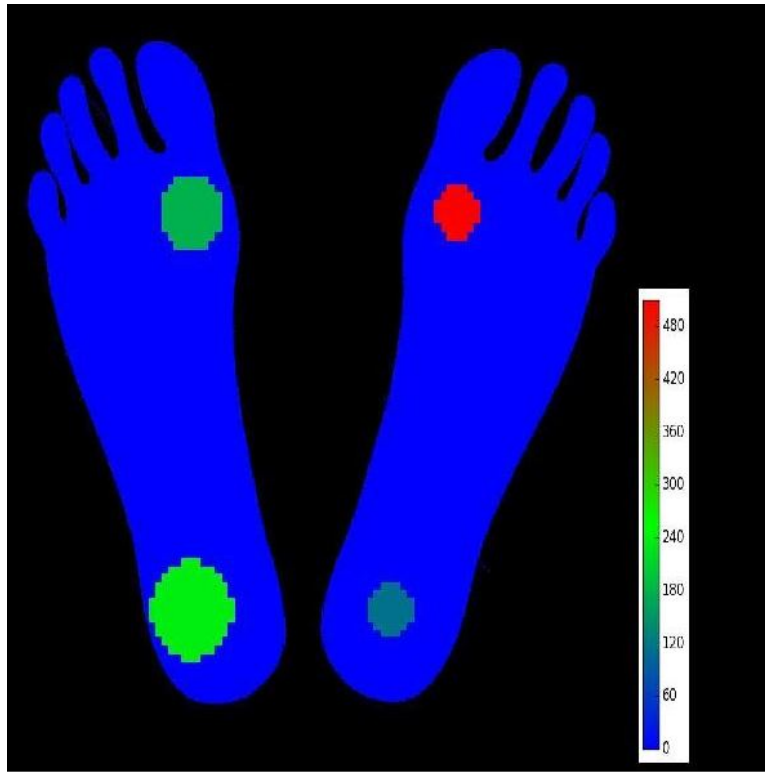


Figura 50: Mapa de color de resultados de pie en movimiento



Figura 51: Figura de individuo 1 Apoyo

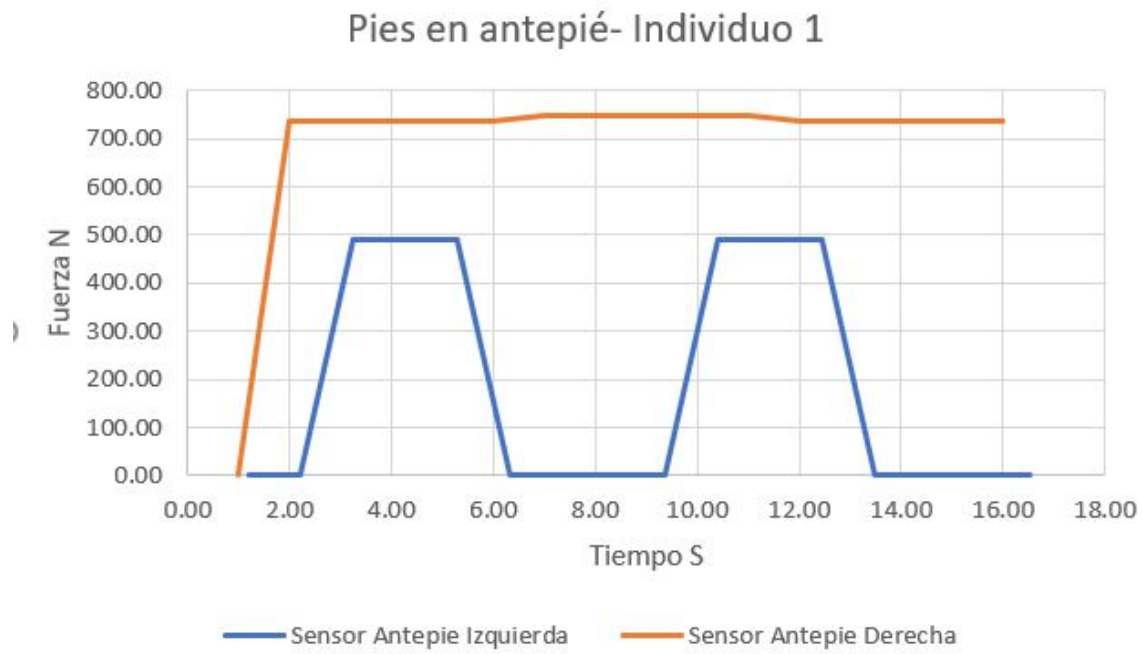


Figura 52: Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 1



Figura 53: Figura de individuo 1 Talón

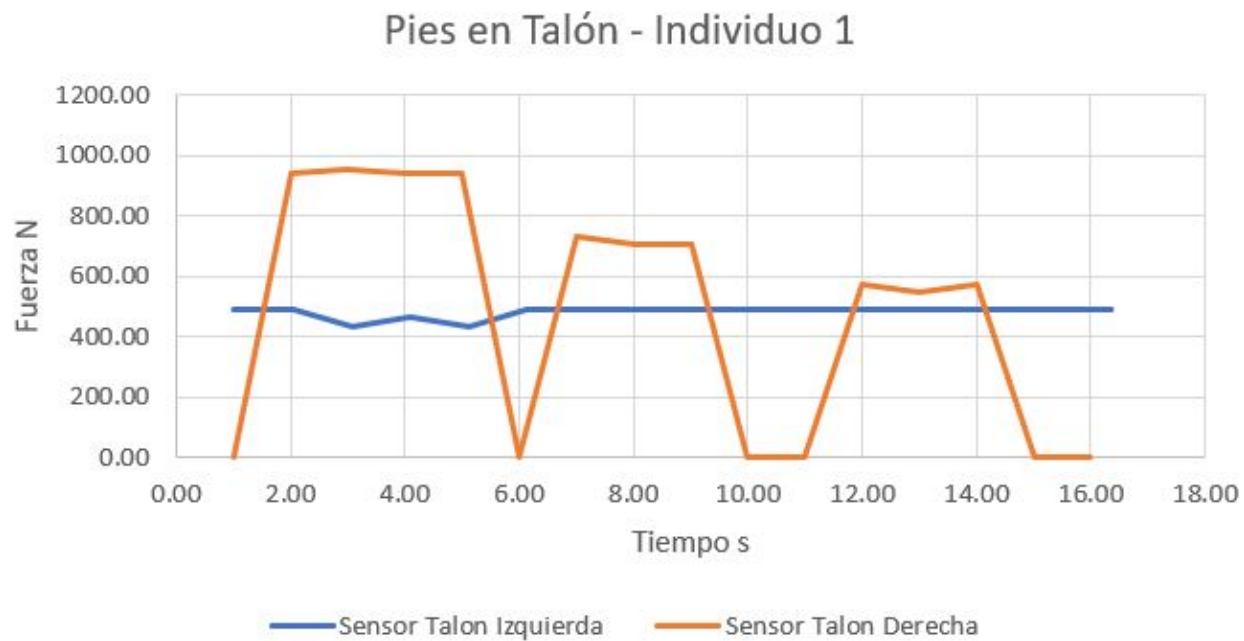


Figura 54: Gráfico de resultados de pie apoyado en talón individuo 1



Figura 55: Figura de individuo 1 Antepié

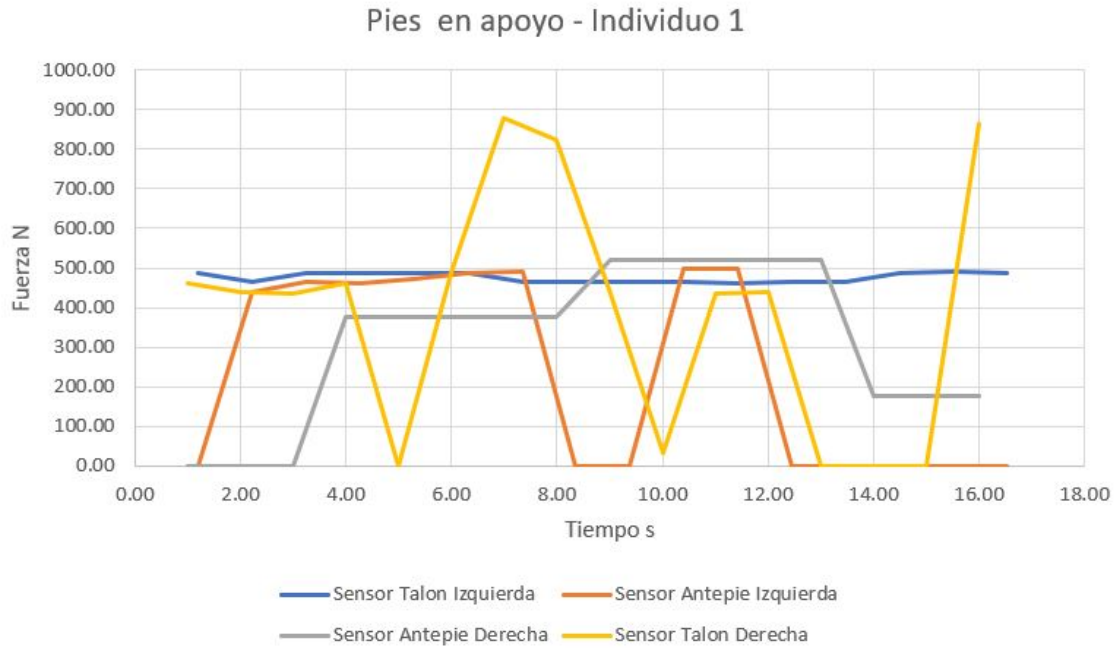


Figura 56: Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 1



Figura 57: Figura de individuo 1 Movimiento

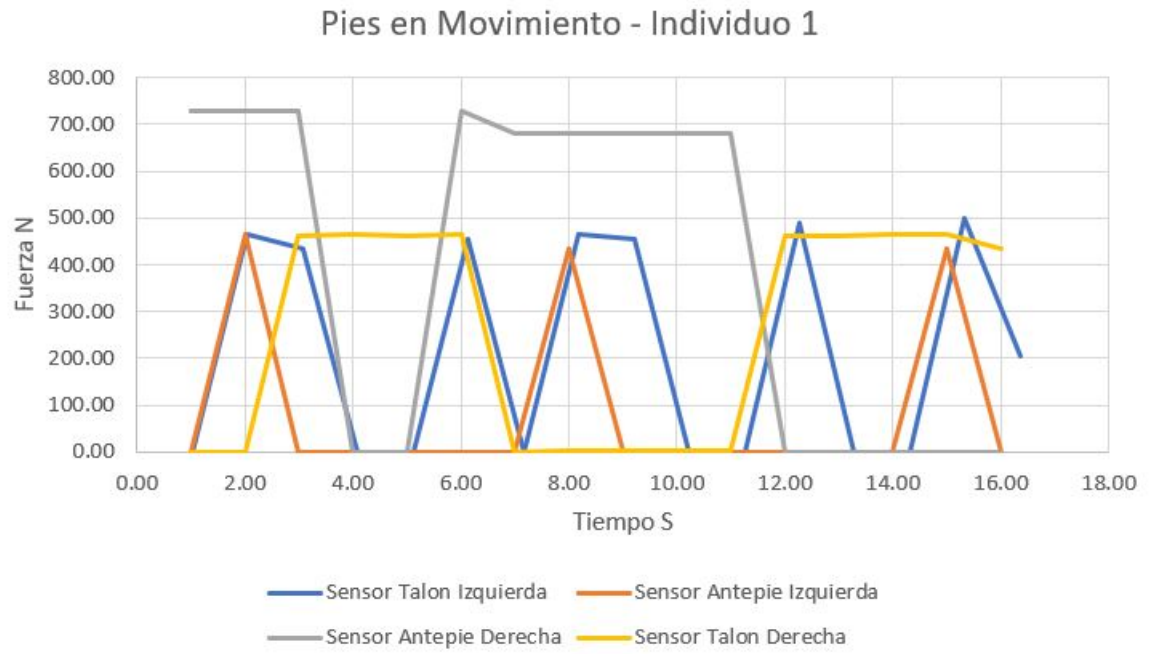


Figura 58: Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 1



Figura 59: Figura de individuo 2 Apoyo

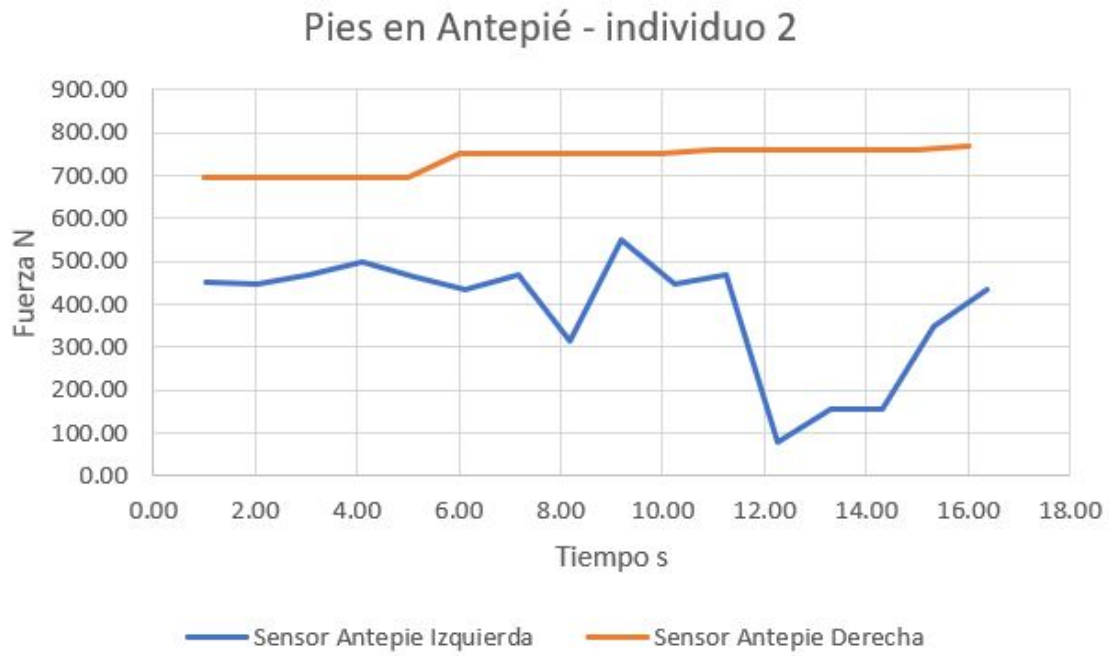


Figura 60: Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 2



Figura 61: Figura de individuo 2 Talón



Figura 62: Gráfico de resultados de pie apoyado en talón individuo 2



Figura 63: Figura de individuo 2 Antepié

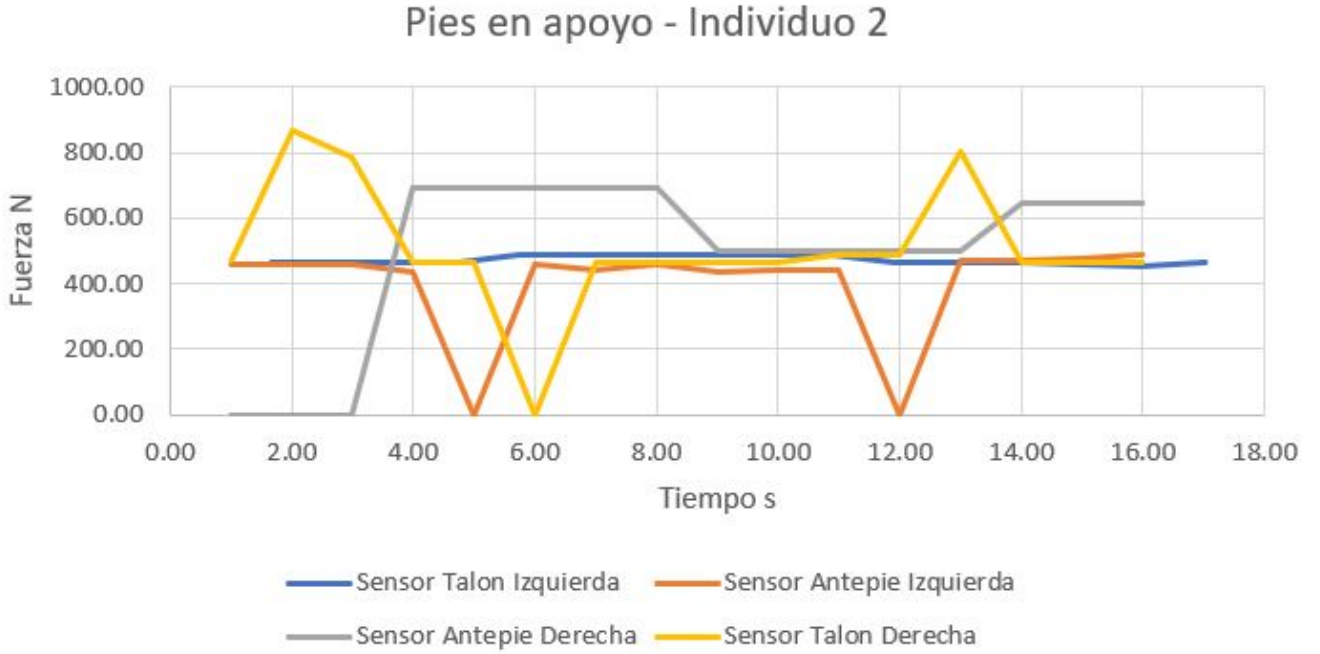


Figura 64: Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 2



Figura 65: Figura de individuo 2 Movimiento

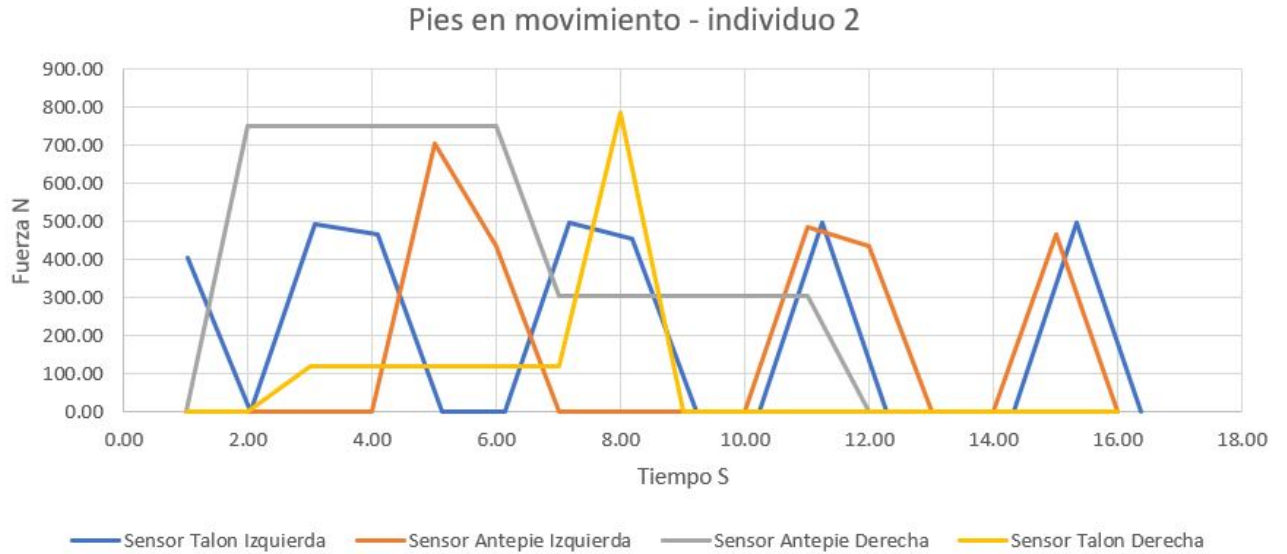


Figura 66: Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 2

Para estandarizar los resultados de las pruebas se realizaron sobre una superficie plana de concreto. Para la toma de resultados se les solicito caminar durante 30 segundos con el dispositivo para permitir al cuerpo del usuario adaptarse al dispositivo en el tobillo y los sensores en la planta del pie basado en las recomendaciones del trabajo [1]. Todas las pruebas fueron ejecutadas en el mismo espacio y con una duración de 15 segundos para cada ejercicio. Las pruebas fueron realizadas en seis usuarios distintos.



Figura 67: Figura de individuo 3 Apoyo

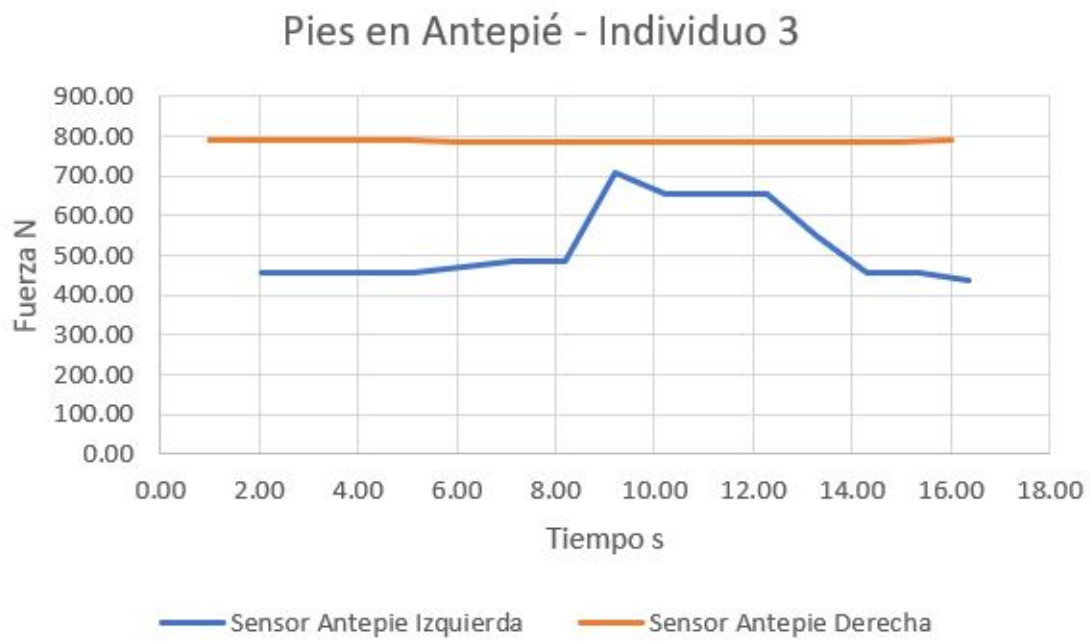


Figura 68: Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 3



Figura 69: Figura de individuo 3 Movimiento



Figura 70: Figura de individuo 3 Movimiento



Figura 71: Figura de individuo 3 Antepié

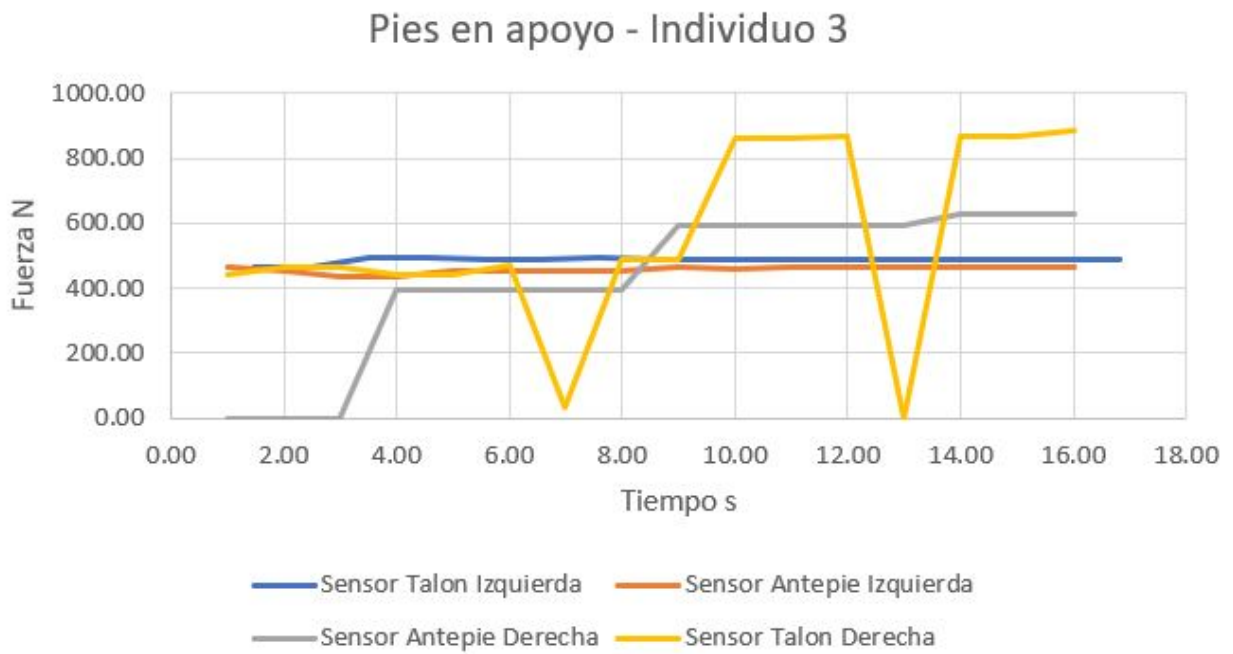


Figura 72: Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 3



Figura 73: Figura de individuo 3 Talón

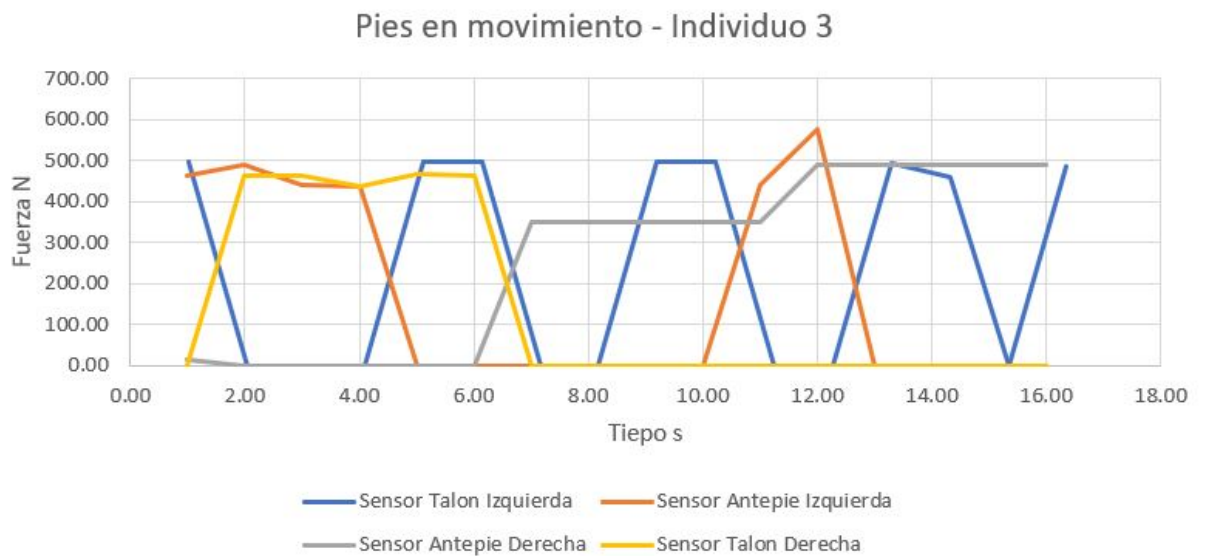


Figura 74: Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 3



Figura 75: Figura de individuo 4 Apoyo

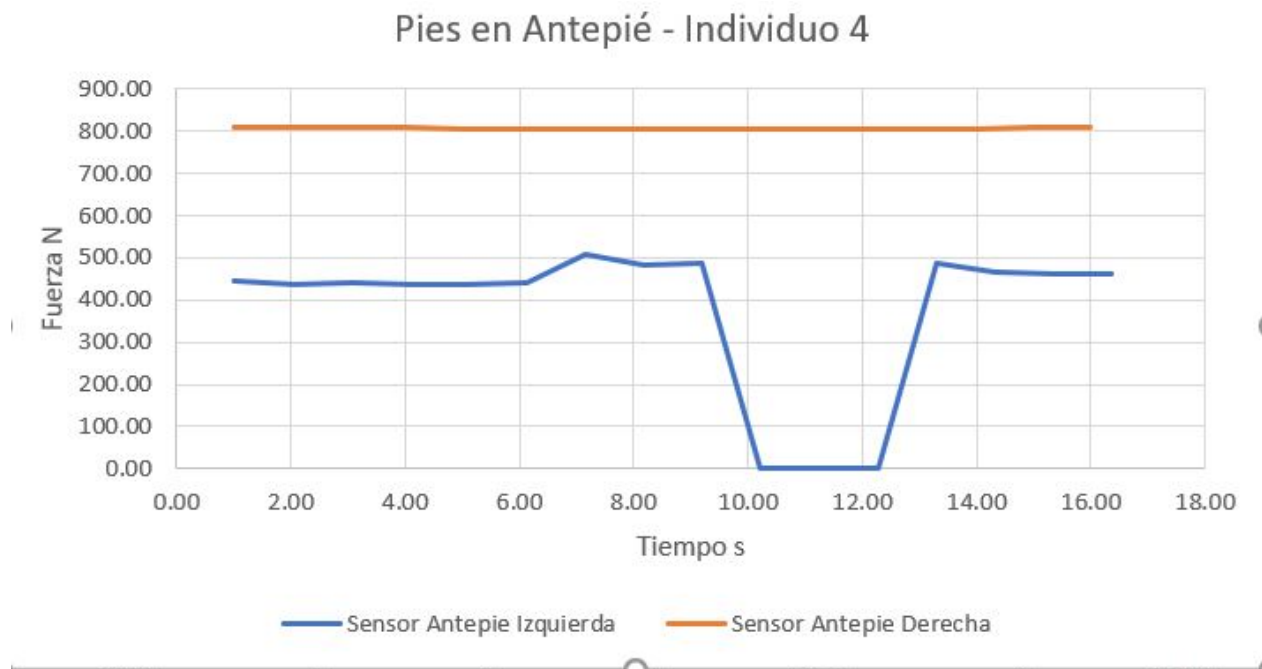


Figura 76: Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 4



Figura 77: Figura de individuo 4 Talón



Figura 78: Gráfico de resultados de pie apoyado en talón individuo 4



Figura 79: Figura de individuo 4 Antepié

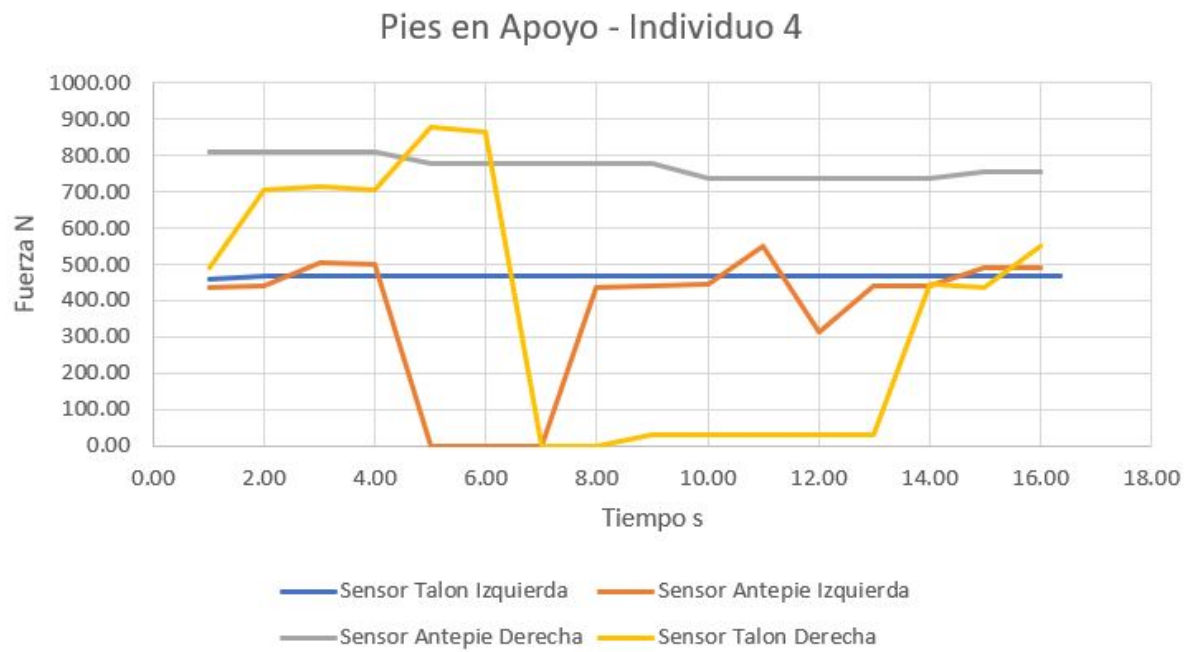


Figura 80: Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 4



Figura 81: Figura de individuo 4 Movimiento

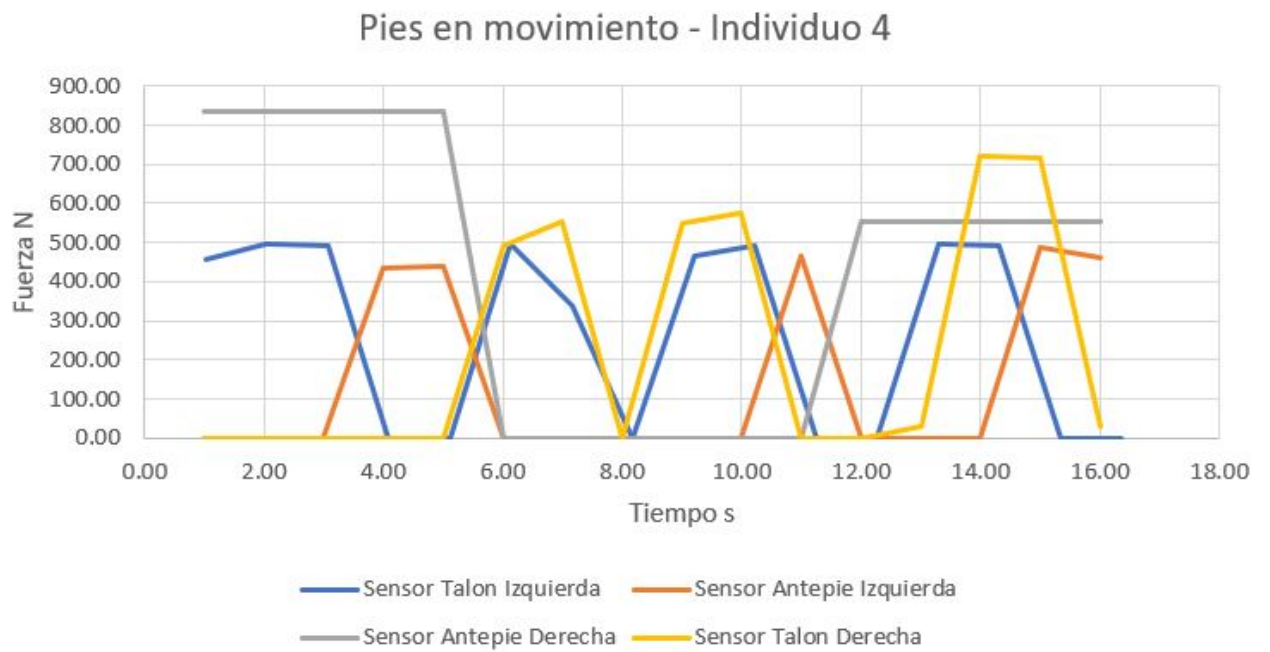


Figura 82: Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 4

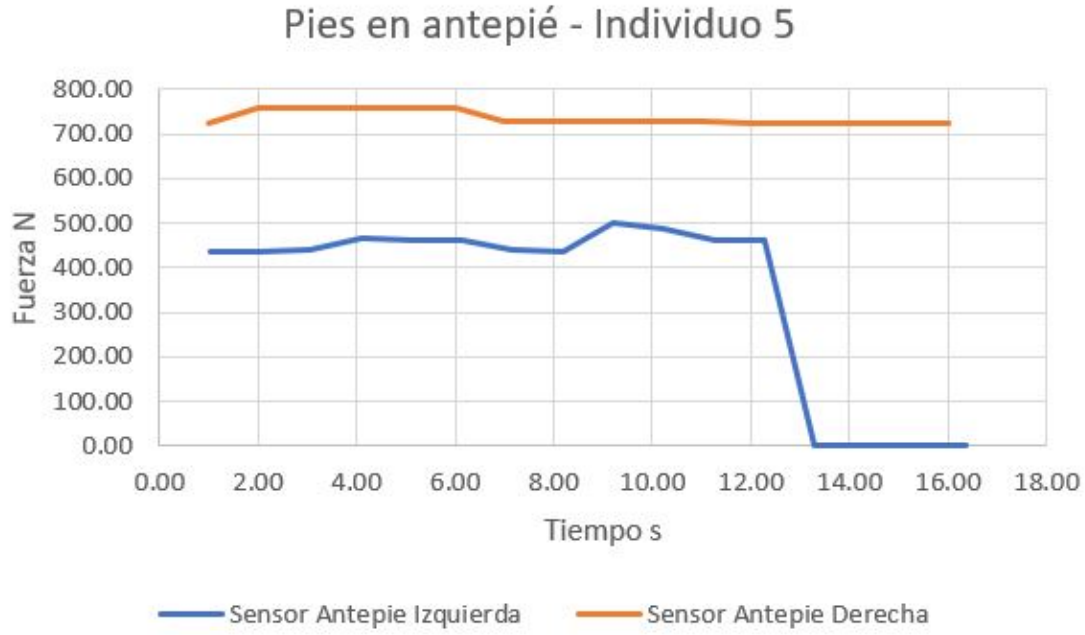


Figura 83: Gráfico de resultados de pie apoyado en antepié individuo 5

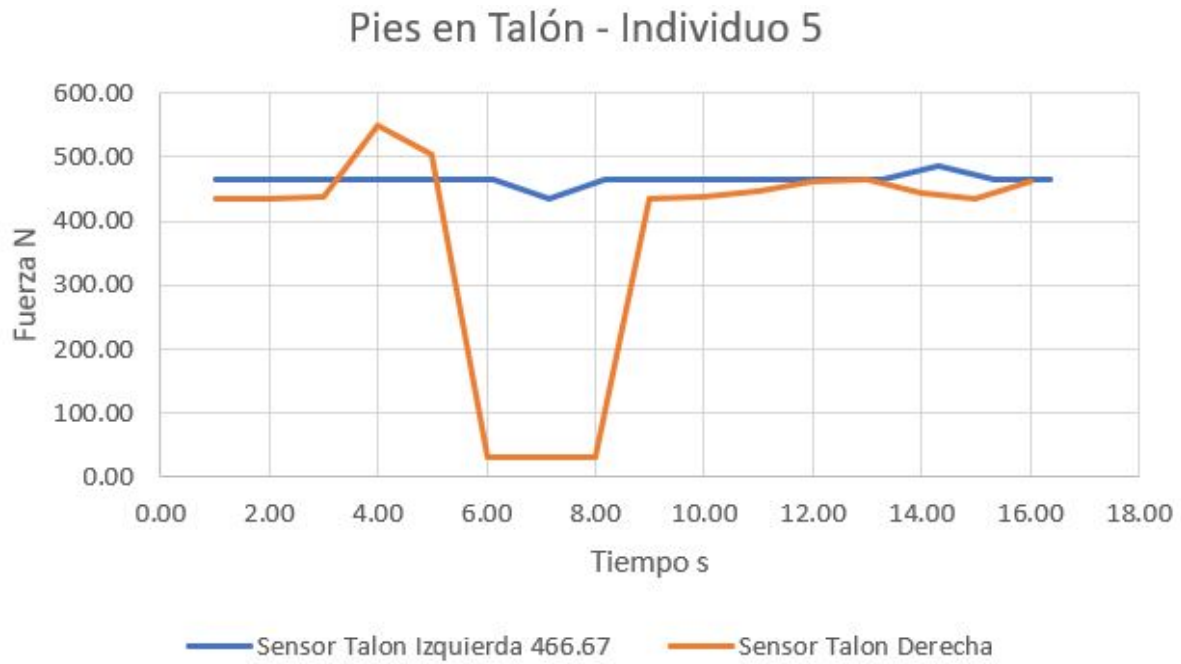


Figura 84: Gráfico de resultados de pie apoyado en talón individuo 5

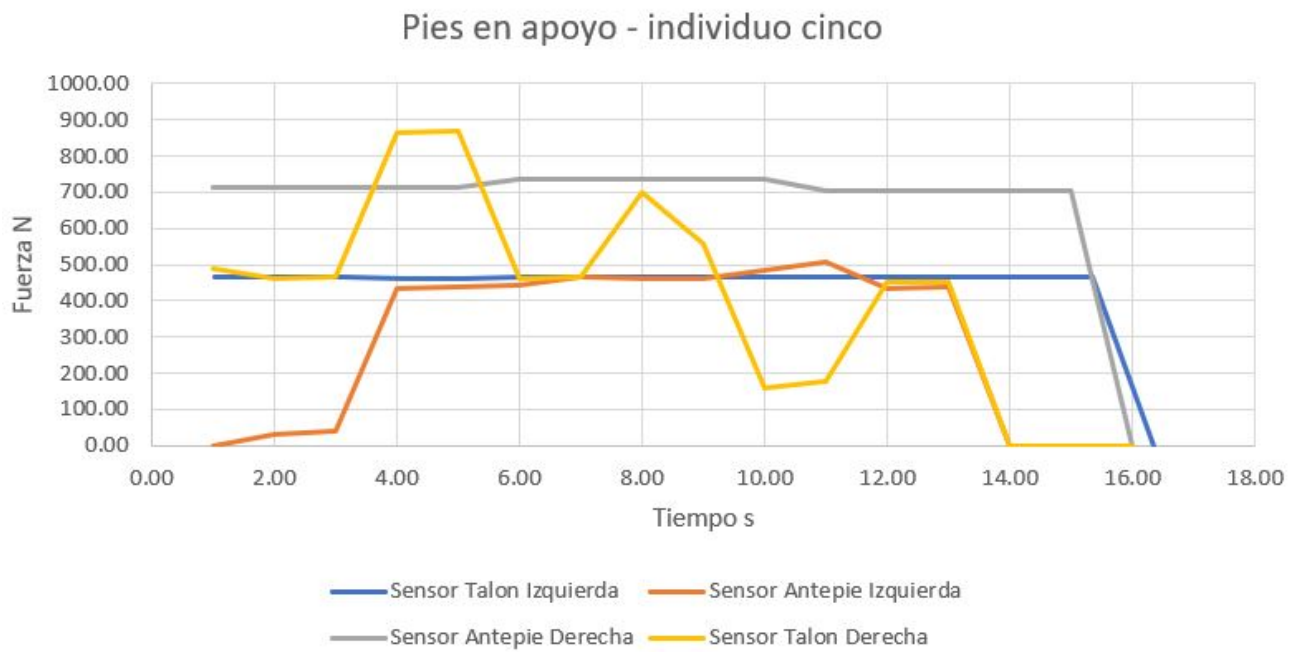


Figura 85: Gráfico de resultados de pie apoyado en apoyo individuo 5

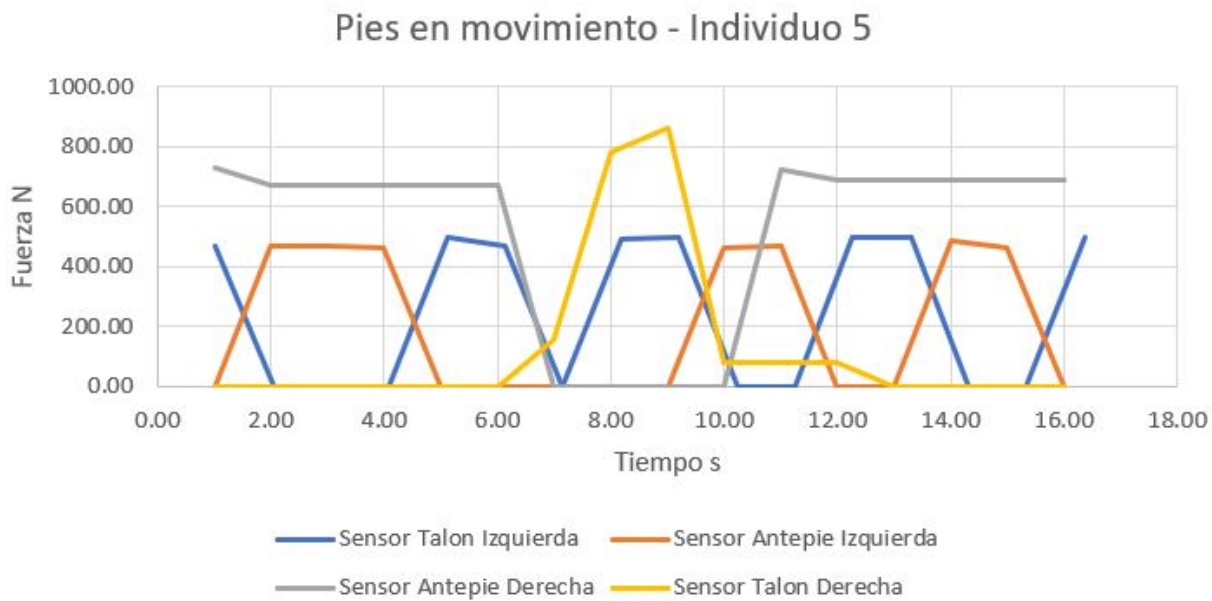


Figura 86: Gráfico de resultados de pie apoyado en movimiento individuo 5

9.1. Sensores FSR

Para la selección de los sensores FSR se utilizó como opción principal los sensores que la universidad había adquirido FSR 402. Basado en la hoja de datos y las características se determinó que cumplía con las suficientes especificaciones como para ser utilizado en el dispositivo al tener un rango de detección de fuerzas de 0 a 1000 Newtons. Luego de esto se determinó que la cantidad de cinco sensores FSR basado en en el diámetro de media pulgada de estos y los trabajos analizados como *Análisis biomecánico del apoyo plantar en la marcha atlética. Relación entre la huella plantar, ángulos de la articulación subastragalina y presiones plantares* [1] sobre la presión en los pies de las personas. Estos colocados de forma que uno quede en el retropié, dos en el antepié otro en el mediopie y por último uno en el dedo Hallux. Analizando las presiones en cada punto del pie con las que basado en el trabajo *Biomechanics of Running and Walking* [38] se manejan en las distintas actividades se consideró adecuado su uso para una buena aproximación de las presiones en los pies de lo usuarios.

9.2. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica diseñada pasó por múltiples versiones. La primera versión fue en kivy lugar donde el límite de objetos creados afectaba el funcionamiento y cerraba el programa automáticamente al no poder pasar de 9600 elementos. Luego se pasó a Tkinter con las librerías Numpy, matplotlib, colormap y Pygubu con las cuales se logró la interfaz que se puede observar en las figuras 87 y 88 la cual se buscó que fuera lo más simple posible con una ventana para la configuración del dispositivo de que sensores se quieren leer y en que pierna

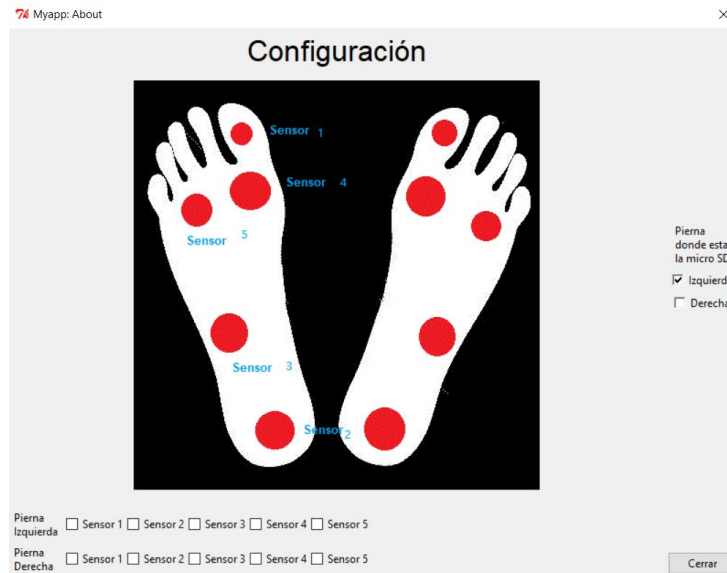


Figura 87: Configuración de sensores en interfaz gráfica

esta el dispositivo con la tarjeta microSD. La ventana principal muestra el mapa de color de la presión en los pies del atleta durante todo el entrenamiento, las gráficas de presión en el tiempo de cada uno de los sensores y también indica si el dispositivo detecta en algún momento que todos los sensores analizados no sienten presión para indicar las veces que el atleta cae en la infracción de flote.

9.3. Comunicación inalámbrica

La comunicación inalámbrica entre módulos fue implementada con el componente NRF24L01. Este módulo tiene un alcance en condiciones cerradas de aproximadamente 3 metros lo cual es un rango suficiente debido a que la comunicación se realiza entre ambos tobillos del atleta que es una distancia que no excede de un metro durante la practica de la marcha atlética debido a la secuencia de pasos y técnica empleada. Esta comunicación fue implementada con interrupciones para garantizar su funcionamiento y envió correcto de datos y una velocidad constante la cual es de aproximadamente 400 milisegundos y fue implementada de modo que si esta comunicación se interrumpe los módulos se detienen hasta que sea restablecida la comunicación.

9.4. Almacenamiento de datos

El almacenamiento de datos se tomó la decisión de realizarlo mediante la escritura de datos en una tarjeta microSD. Esta decisión fue debido a la variación en los entrenamientos de los atletas de marcha atlética. Muchos de estos dependen del entrenador además que las distancias en los entrenamientos pueden ser muy largas y crear un dispositivo que dependa de una distancia límite en un deporte que recorren distancias de 25-50 kilómetros resulta poco

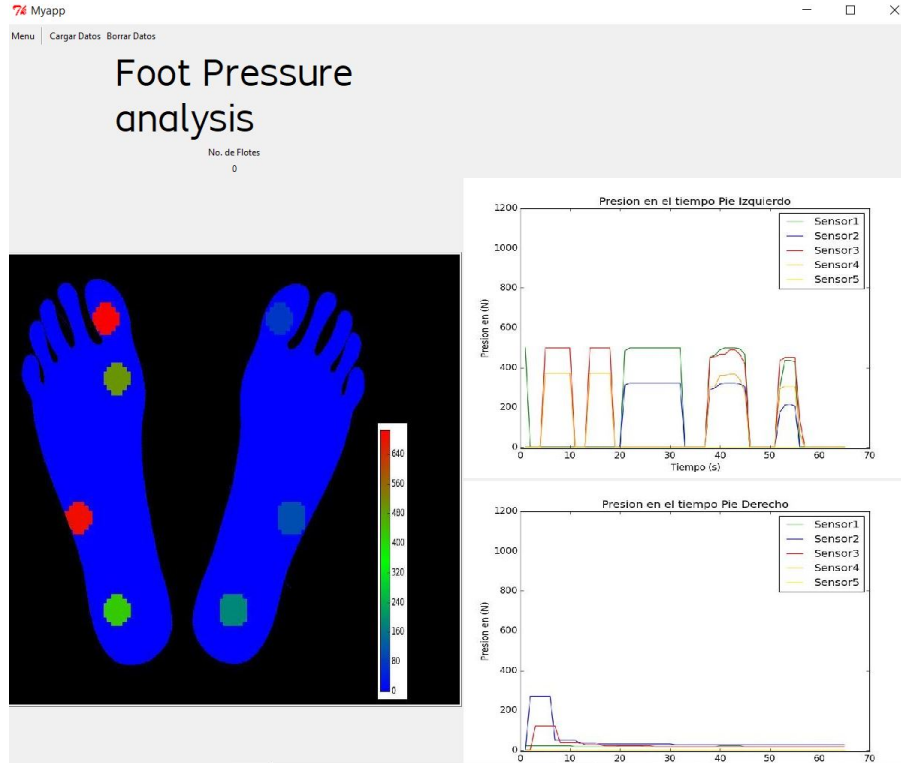


Figura 88: Resultados desplegados por interfaz gráfica

conveniente por lo que se dejó la libertad de llevar a cabo cualquier tipo de entrenamiento sin importar las distancias. La implementación de la siguiente manera: primero se recolectan los datos de ambos módulos ADC, se almacenan en variables para luego escribir todos los datos recolectados. Las limitantes de este módulo es que no permite la escritura de variables tipo doble o flotante únicamente enteros. El ciclo de escritura de datos depende de la cantidad de datos que se desea escribir en este caso, once datos toma un tiempo de 600 milisegundos. Los datos obtenidos se escriben en un archivo tipo texto en el cual por columnas se van ordenando cada ciclo de recolección y captura de datos de ambos pies. El inconveniente más grande del módulo es que no funciona con todas las marcas de tarjeta SD o de capacidad. Las memorias mayores de 2 GB tipo SDHC únicamente se logro utilizar la marca Sandisk con capacidad de 8GB que es una capacidad que permite la recolección de datos en un archivo texto que excede el tiempo de entrenamiento continuo regular de un atleta de aproximadamente cuatro a cinco horas.

9.5. Diseño y fabricación del dispositivo

El diseño del dispositivo resultó de un tamaño adecuado para proteger la placa del exterior lo más posible. El prototipo fue fabricado utilizando PLA en una impresora 3D con una resolución de 0.2 y un relleno de 0.1. Esta estructura resultó resistente sin resultar muy pesada. El diseño procuro ser lo más cerrado posible para aislar del exterior el circuito pero aún permitir la conexión de un cable micro USB para el proceso de carga de la batería, la salida de los sensores de presión y la extracción de la tarjeta micro SD. Para el caso de

un dispositivo funcional en su totalidad el polímero con mayor número de características favorables es el polipropileno.

Las principales complicaciones del diseño presentado es la extracción y la manipulación de la tarjeta micro SD. Eso se debe a que no se consideró la distancia del exterior al punto de soldadura de la placa. Otro inconveniente son las fuerzas externas al conectar el cable o la memoria micro SD de la placa esto puede ocasionar problemas de continuidad en la placa si se dependen estos componentes por lo que en este caso se debería de haber hecho placas separadas de la principal para los componentes y así evitar fuerzas directas sobre las placas además de poder colocarlo en lugares más accesibles para su conexión o extracción.

En el caso de las placas de cobre fabricadas, estas funcionan correctamente y se ajustan de manera firme a las fundas que protegen a estas del exterior aunque en sectores de las placas queda muy cerca a otros componentes dejando la posibilidad a que en su mal manejo durante el ensamble pueda afectar el circuito. Los separadores entre la placa y las fundas permite aislar el circuito y que sus elementos no estén en contacto con algún otro elemento que afecte su funcionamiento.

9.6. Costo del prototipo

El costo de la fabricación de las placas para el dispositivo detector de presiones es de aproximadamente USD \$197.32. Este precio es menor al de los dispositivos similares analizados. Cabe mencionar que Tekscan es un dispositivo para aplicaciones médicas que incluye tanto el dispositivo como el software para su uso y no se encontró el precio de dispositivos de aplicación deportiva debido al proceso de empresas para determinar si el cliente está en verdad interesado o no en el producto. En este caso el precio indicado no cuenta con el precio de manufactura de las fundas en polipropileno aunque entre las características encontradas es de los polímeros menos costosos para su fabricación y moldeo.

9.7. Resultados del funcionamiento del dispositivo

Basado en los resultados obtenidos al momento de probar el dispositivo en individuos en las figuras 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50 y 49 se puede analizar con un individuo de prueba el funcionamiento de la interfaz gráfica con los resultados capturados por el dispositivo. La primera prueba fue apoyados ambos pies en el talón como se puede observar en la Figura 43 en donde se observan las fuerzas experimentadas en ambos los sensores de cada pié aunque las magnitudes varían de manera notable. En la Figura 45 se pueden ver las presiones en los sensores del antepié que repiten la diferencia en magnitudes entre ambos sensores. Por último se hicieron pruebas de los pies apoyados sin movimiento y luego con un movimiento simulado de marcha que se pueden observar en las figuras 47 y 49.

Luego se realizaron pruebas con cinco individuos de prueba los cuales realizaron las mismas cuatro variaciones descritas con anterioridad. Los resultados de estas pruebas se pueden ver en las siguientes figuras en conjunto con imágenes de los individuos en la toma de datos 52, 54, 56, 58, 60, 62, 64, 66, 68, 70, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 83, 84, 85 y 86. Al



Figura 89: Figura de individuo 5 Apoyo

estar el pie apoyado se puede ver como mantiene la magnitud a pesar de ciertos valores atípicos que se puede atribuir a una mala medición o un movimiento realizado por el usuario durante la toma de mediciones. En el caso de ambos pies en movimiento se puede observar que las mediciones varían de una manera intercalada aproximadamente indicando el cambio de presión en cada sensor conforme el usuario se desplaza. Al igual que en las mediciones pasadas la magnitud entre sensores es notable donde unos llegan a un valor mayor que el resto. En este caso el problema de mayor importancia es el tiempo de recolección de datos debido a que la rapidéz en tomar los datos es de un segundo y en el caso de un usuario en movimiento puede que no capture todos los momentos exactos del proceso de desplazamiento de forma continua. Por último, cabe resaltar que los cambios en magnitud no graduales pueden verse influidos tanto por el tiempo de toma de datos y que el rango de fuerzas que en este caso detectan los sensores FSR no sea exactamente el indicado en sus hojas de datos.

Entre las principales observaciones de los resultados se encuentra que en efecto los sensores logran captar las presiones de los puntos del pie al estar en contacto con el suelo. Cabe mencionar que los valores en magnitud de las presiones en cada sensor varía de una manera notable. Esto se debe a que al obtener estos resultados se analizó la impedancia de los sensores FSR y a pesar de que la hoja de datos indica que esta en el rango de 10 a 1M ohm se midieron las impedancias de cada uno de los FSR y estas variaban de su impedancia máxima en el rango de 200 a 900 k Ohms . Otro motivo por el cual se debe esta diferencia en rangos de presiones es que al momento de evaluar se les solicitó a los sujetos de prueba pararse de manera uniforme pero existió siempre la posibilidad de que se apoyaran más en un pie que en el otro durante la toma de mediciones.

Para el caso de la detección de flotes se tuvo que realizar múltiples pruebas debido a que



Figura 90: Figura de individuo 5 Talón

cada canal ADC trabaja de forma independiente y no todos trabajan en los mismos rangos. Los valores en cada canal analógico de los sensores no llegan a un mismo valor mínimo y máximo. Algunos llegan a cero mientras que otros su mínimo es 10 o 40 y algunos llegan al máximo de 255 mientras que otros llegan a 140 o 180.

Basado en los valores que los canales analógicos capturan al estar presionados y no presionados se tuvo que colocar rangos límites. De esta manera al no llegar a cierto valor la suma de los datos capturados de los sensores seleccionados en la interfaz gráfica este lo considera como flote. El valor se colocó como límite de esto fue 40, por lo cual si la sumatoria de las señales de los canales ADC no superan un valor de 40 se considera flote. Este valor fue comprobado con los cuatro sensores disponibles por lo que al tener diez sensores conectados puede que este limite varíe y se deba de ajustar al estado de los sensores y los canales ADC.

Las principales complicaciones durante la toma de resultados y pruebas del prototipo se encuentra en el acople entre los sensores FSR y el cable FFC debido a que a pesar de que son de las dimensiones correctas para el acople el largo de las entradas del sensor FSR es muy corto para el espacio de los cables FFC. Para procurar que este no fuera un inconveniente se recurrió a utilizar silicón para fijar estos a los cables FFC.



Figura 91: Figura de individuo 5 Antepié



Figura 92: Figura de individuo 5 Movimiento

- Utilizar cinco sensores FSR 402 de media pulgada de diámetro permiten una detección con buena aproximación de las presiones en el pie al tener un rango de hasta 1000 Newtons que está cercano a los 1200 Newtons en marcha.
- La interfaz gráfica permite seleccionar que sensores se desea medir durante el entrenamiento, la pierna con el dispositivo maestro y los resultados relevantes de valores de cada uno de estos durante el tiempo y las magnitudes promedio de cada uno en forma de mapa de presiones.
- Se seleccionó el almacenamiento de datos mediante un módulo de escritura SD debido a las distancias variantes en los entrenamientos de marcha atlética.
- Se diseñó una estructura que se copla al tobillo de cualquier usuario con un tamaño reducido y ligero capaz de adaptarse a distintos tamaños y formas de pies.
- Se construyó el sistema a un precio menor a los USD \$200.
- La recolección de datos se da en un tiempo de un 1.02 segundos por cada ciclo.
- La velocidad de recolección no permite una toma de datos continua de todo el proceso de desplazamiento.
- Se logró el diseño e implementación de un dispositivo que detecta la presión en los puntos de apoyo de los pies.

Entre las principales recomendaciones del trabajo realizado se tiene la siguientes propuestas:

- Investigar y optimizar el tiempo de recolección y escritura de datos para permitir una lectura de los sensores que permita analizar el estado de cada uno de estos en todo el desplazamiento y no solo en períodos discretos.
- Buscar la manera de implementar en el dispositivo el uso de un sensor de flexión para incorporarlo en la rodilla del atleta y de esta manera lograr analizar la flexión en las rodillas del usuario para permitirle mejorar el movimiento en las articulaciones inferiores del atleta.
- Investigar y lograr el funcionamiento del dispositivo con otros modelos de tarjetas SD.
- Integrar un acelerómetro al dispositivo con el fin de aumentar su funcionalidad para otras disciplinas y poder capturar una mayor cantidad de datos que pueden a llegar a ser de utilidad para los usuarios.
- Considerar la integración de una bocina en la placa que permita al atleta saber en tiempo real cuando comete una falta.

- Utilizar un módulo de escritura en tarjetas SD o MicroSD con mayor confiabilidad al empleado en este dispositivo.
- Modificar el acople entre el cable FFC y los sensores FSR para que este resulte fijo y no exista posibilidad de un desacople durante la colocación de los sensores FSR en el pie del usuario o el entrenamiento.
- Considerar la fabricación de placas flexibles que disminuyan el peso del dispositivo.

- [1] J. A. García, M. Meana, F. J. Vera-García y J. L. L. Elvira, “Análisis biomecánico del apoyo plantar en la marcha atlética. Relación entre la huella plantar, ángulos de la articulación subastragalina y presiones plantares”, es-ES, *European Journal of Human Movement*, vol. 20, n.º 0, págs. 37-55, sep. de 2010, ISSN: 2386-4095. dirección: <https://recyt.fecyt.es/index.php/ejhm/article/view/56269>.
- [2] R.-E. Irimia y M. Gottschling, “Foot Modeling and Smart Plantar Pressure Reconstruction from Three Sensors.”, *Biodiversity Data Journal*, vol. 4, e7720, jun. de 2016, ISSN: 1314-2828, 1314-2836. DOI: 10.3897/BDJ.4.e7720. dirección: <http://bdj.pensoft.net/articles.php?id=7720>.
- [3] A. H. Abdul Razak, A. Zayegh, R. K. Begg e Y. Wahab, “Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review”, en, *Sensors*, vol. 12, n.º 7, págs. 9884-9912, jul. de 2012, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s120709884. dirección: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/7/9884>.
- [4] “<http://ljournal.ru/wp-content/uploads/2017/03/a-2017-023.pdf>”, LJournal, inf. téc., 2017. DOI: 10.18411/a-2017-023. dirección: <http://ljournal.ru/wp-content/uploads/2017/03/a-2017-023.pdf>.
- [5] “Request for Proposals Archives-PMR Supplements”, en, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 93, n.º 4, pág. 732, abr. de 2012, ISSN: 00039993. DOI: 10.1016/j.apmr.2012.03.001. dirección: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003999312001487>.
- [6] *Marcha Atlética*, es, nov. de 2015. dirección: <https://conceptodefinicion.de/marcha-atletica/>.
- [7] RFEA, *Marcha*, ES, publisher: RFEA, 2008. dirección: http://www.rfea.es/jueces/ExamenJA_%20JN/Marcha.pdf.
- [8] *Pressure Mapping Technology*, en, nov. de 2018. dirección: <https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-technology>.
- [9] Iniciasport, *ATLETISMO 7 | Técnica para marcha atlética*, dic. de 2015. dirección: <https://www.youtube.com/watch?v=xp-w0ISWmec>.

- [10] P. p. C. Sierra, *MARCHA ATLETICA*, es. dirección: <http://marchaenatletismo.blogspot.com/> (visitado 26-05-2018).
- [11] C. Física, *EDUCACIÓN FÍSICA: LA MARCHA*, mayo de 2014. dirección: <http://manuelespinozaloja.blogspot.com/2014/05/la-marcha.html>.
- [12] *Biofeedback. Qué es y qué beneficios tiene*, es-ES. dirección: <http://guiapsicologia.com/biofeedback/>.
- [13] P. M. Gacto, *Biofeedback: qué es y cómo funciona*, es-ES, ago. de 2018. dirección: <https://www.nascia.com/que-es-el-biofeedback/>.
- [14] *Definición de psicología del deporte — Definicion.de*, es-ES. dirección: <https://definicion.de/psicologia-del-deporte/>.
- [15] *Website - EZEN — Salud y Rendimiento*. dirección: <https://ezensr.com/index.php>.
- [16] *Biomecánica - Mibienestar*. dirección: <http://www.mibienestar.es/salud/2-general/2-biomecanica.html>.
- [17] *PIE (ESTRUCTURA Y FUNCIÓN)*, es-ES, nov. de 2015. dirección: <http://balancesportclinic.com/pie-estructura-y-funcion/>.
- [18] Sofia Vergara, *Puntos de apoyo en la marcha humana*, Educación, sep. de 2014. dirección: <https://es.slideshare.net/sofiadv1/puntos-de-apoyo-en-la-marcha-humana> (visitado 06-05-2018).
- [19] *Anatomía del Pie | Conforpié*. dirección: <http://www.conforpie.com/el-pie/anatomia-del-pie/> (visitado 02-06-2018).
- [20] M. CITLALLI, *Sensores FSR de fuerza o Galgas*. ES. dirección: <http://learn.teslabem.com/sensor-fsr/> (visitado 03-03-2018).
- [21] *nRF24 Series*, en. dirección: <https://www.nordicsemi.com/en/Products/Low%20power%20short-range%20wireless/nRF24%20series>.
- [22] F. E. Valdés Pérez y R. Pallás Areny, *Microcontroladores: fundamentos y aplicaciones con PIC*, Spanish. Barcelona; México D.F.: Marcombo ; Alfaomega, 2007, OCLC: 803712417, ISBN: 9788426714145 9789701511497.
- [23] *Microcontrolador - qué es y para que sirve*, es-ES, nov. de 2017. dirección: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/microcontrolador/>.
- [24] K. Navarro, *¿Cómo funciona el protocolo SPI?*, es-ES, oct. de 2014. dirección: <http://panamahitek.com/como-funciona-el-protocolo-spi/>.
- [25] *Tarjeta SD - Toda la información sobre tarjetas SD y micro SD*, es-ES. dirección: <http://tarjetasd.com/> (visitado 14-05-2018).
- [26] *Secure Digital*, en, Page Version ID: 880945849, ene. de 2019. dirección: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Secure_Digital&oldid=880945849.
- [27] *Conversor analógico-digital*, 2013. dirección: <http://www.etsist.upm.es/estaticos/ingeniatic/index.php/tecnologias/item/425-conversor-anal%C3%B3gico-digital.html> (visitado 16-05-2018).
- [28] *Know all about Analog to Digital ADC Converters*, en-US, oct. de 2014. dirección: <https://www.elprocus.com/analog-to-digital-adc-converters/> (visitado 23-06-2018).

- [29] *3.7.2 Documentation*. dirección: <https://docs.python.org/3/index.html> (visitado 26-02-2018).
- [30] *TkInter - Python Wiki*. dirección: <https://wiki.python.org/moin/TkInter> (visitado 23-08-2018).
- [31] *Matplotlib: Python plotting — Matplotlib 3.0.2 documentation*. dirección: <https://matplotlib.org/>.
- [32] A. Autalán, *A simple GUI designer for the python tkinter module: alejandroautalan/pygubu*, original-date: 2013-02-13, ene. de 2013. dirección: <https://github.com/alejandroautalan/pygubu>.
- [33] *PCB Basics - learn.sparkfun.com*. dirección: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/pcb-basics>.
- [34] *The Ultimate PCB Design Software Comparison | SFCircuits*. dirección: <https://www.sfcircuits.com/pcb-school/pcb-design-software-comparison-guide>.
- [35] *MPLAB- X IDE | Microchip Technology*. dirección: <https://www.microchip.com/mplab/mplab-x-ide> (visitado 14-09-2018).
- [36] *MPLAB- XC Compilers | Microchip Technology*. dirección: <https://www.microchip.com/mplab/compilers> (visitado 27-05-2018).
- [37] J. I. García, *Fundamentos del diseño mecánico*, es. Universidad del Valle, 2004, Google-Books-ID: 2RqUgt9YISEC, ISBN: 9789586703352.
- [38] A. Tongen, “Biomechanics of Running and Walking”, 2017. DOI: 10.18411/a-2017-023. dirección: <http://www.mathaware.org/mam/2010/essays/TongenWunderlichRunWalk.pdf>.
- [39] *FSR, Robot Force Sensors, Robot Pressure Sensor, Robot Touch Sensor, Force sensing Resistor*. dirección: <https://www.trossenrobotics.com/store/p/6445-5-Inch-Force-Sensing-Resistor-FSR.aspx> (visitado 20-08-2018).
- [40] Fundacion Gacelas, *ENTRENAMIENTO DE MARCHA ATLETICA*, dic. de 2016. dirección: https://www.youtube.com/watch?v=_YkNGR63D1A (visitado 24-04-2018).
- [41] Fútbol Extra Retalhuleu, *ERICK BARRONDO EN RETALHULEU ENTRENANDO*, nov. de 2014. dirección: <https://www.youtube.com/watch?v=p9JlNw71w0M> (visitado 27-06-2018).
- [42] La Pizarra De Doc, *La marcha atlética*, nov. de 2017. dirección: <https://www.youtube.com/watch?v=yuyr0uFv9AU>.
- [43] Soy502, *Erick Barrondo*, ago. de 2016. dirección: <https://www.youtube.com/watch?v=K88c0fA2SSc> (visitado 22-09-2018).
- [44] B. Bindu, *How to use SD Card With PIC Microcontroller using XC8 and FatFs*, en-ZA, mar. de 2015. dirección: <https://www.studentcompanion.co.za/interfacing-sd-card-with-pic-microcontroller-xc8/>.
- [45] *Interfacing Microcontrollers with SD Card*, en-US, dic. de 2016. dirección: <https://openlabpro.com/guide/interfacing-microcontrollers-with-sd-card/> (visitado 05-2018).
- [46] *diyembedded.com: nRF24L01 tutorials 1-3 for the PIC completed*, en. dirección: <http://blog.diyembedded.com/2007/06/tutorials-1-3-for-pic-completed.html>.

[47] *Polipropileno usos y características*. dirección: <http://canalconstruccion.com/polipropileno-usos-y-caracteristicas.html> (visitado 16-05-2018).

13.1. Esquemáticos de placas fabricadas

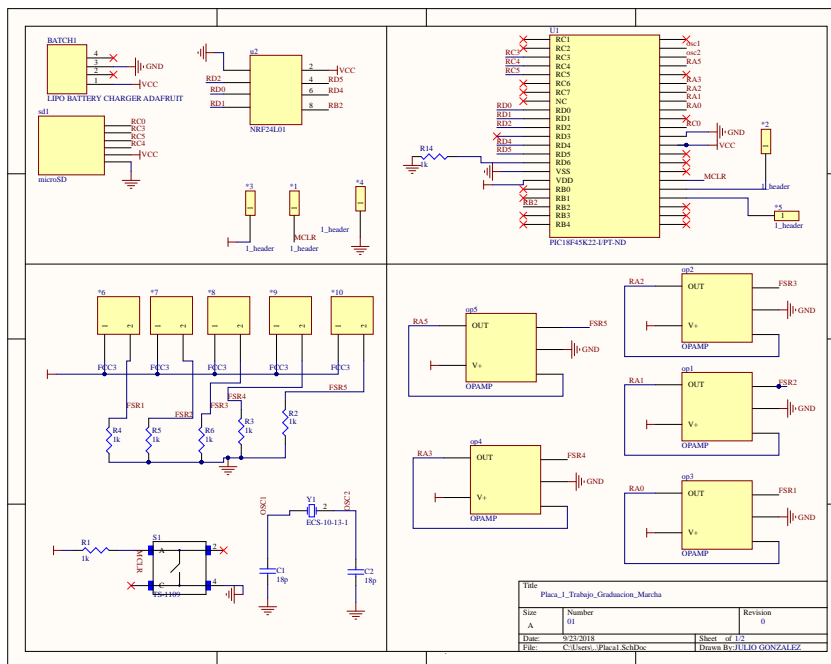


Figura 93: Placa maestra

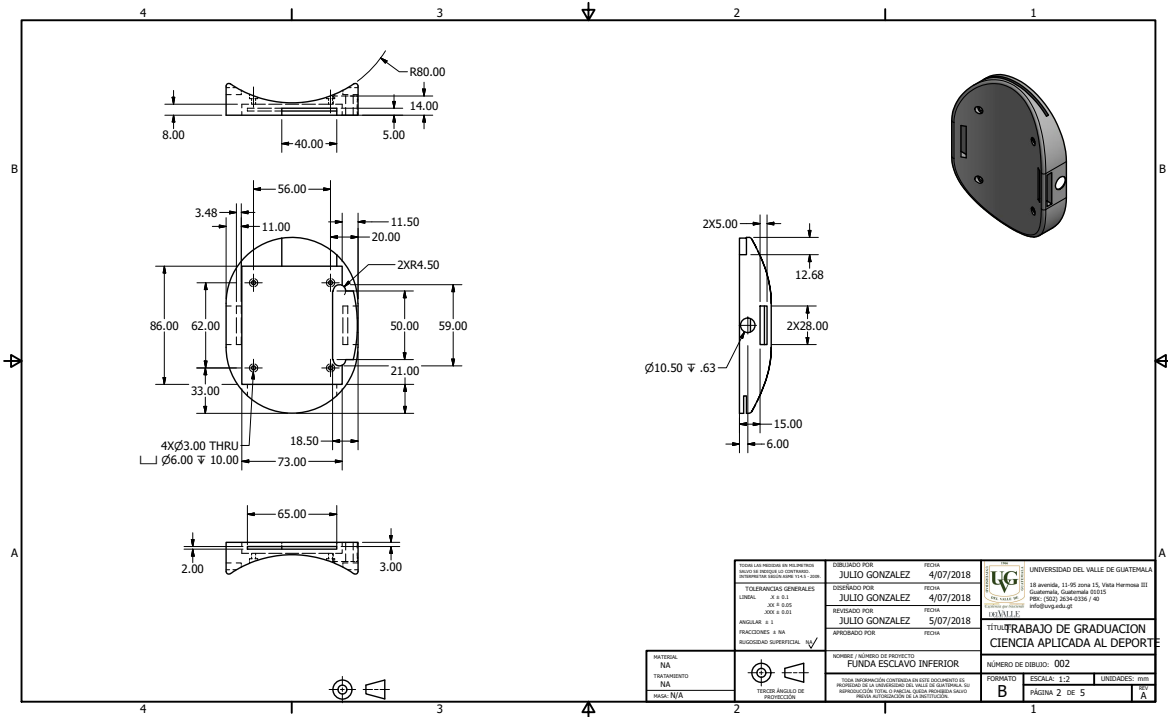


Figura 96: Planos funda inferior placa esclava

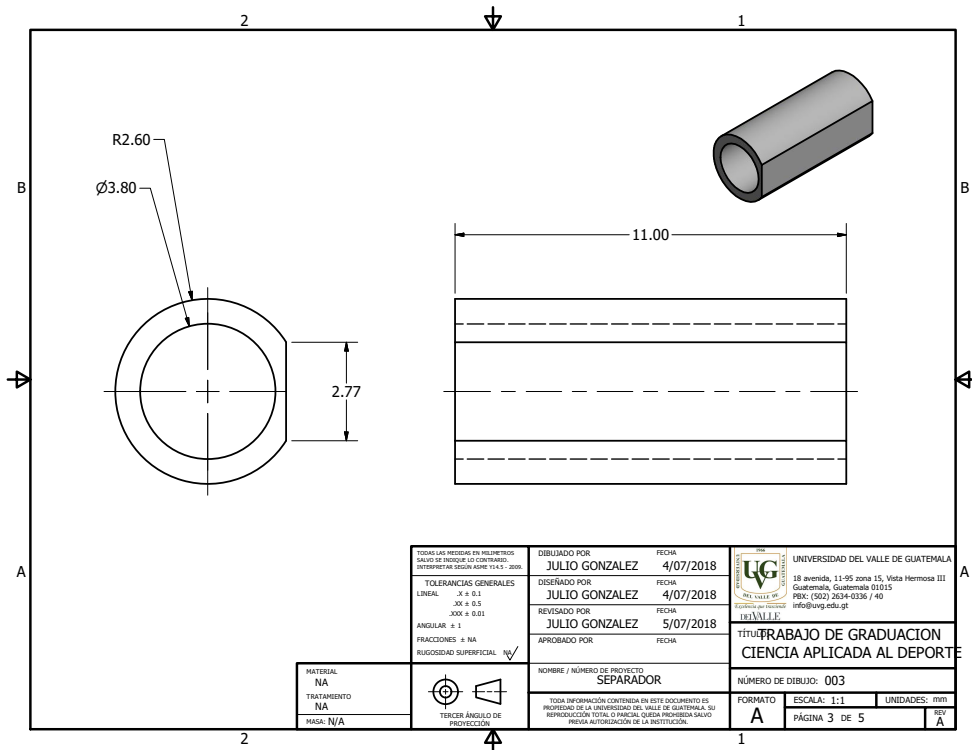


Figura 97: Planos cilindros de retención

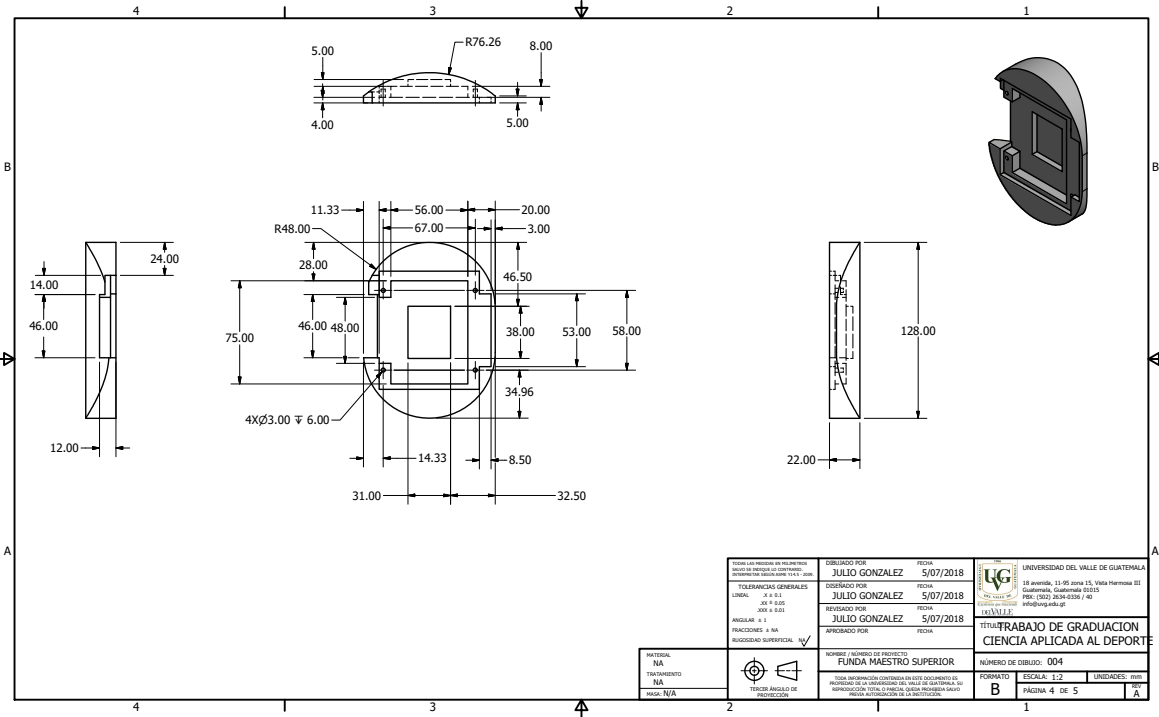


Figura 98: Planos funda superior placa maestra

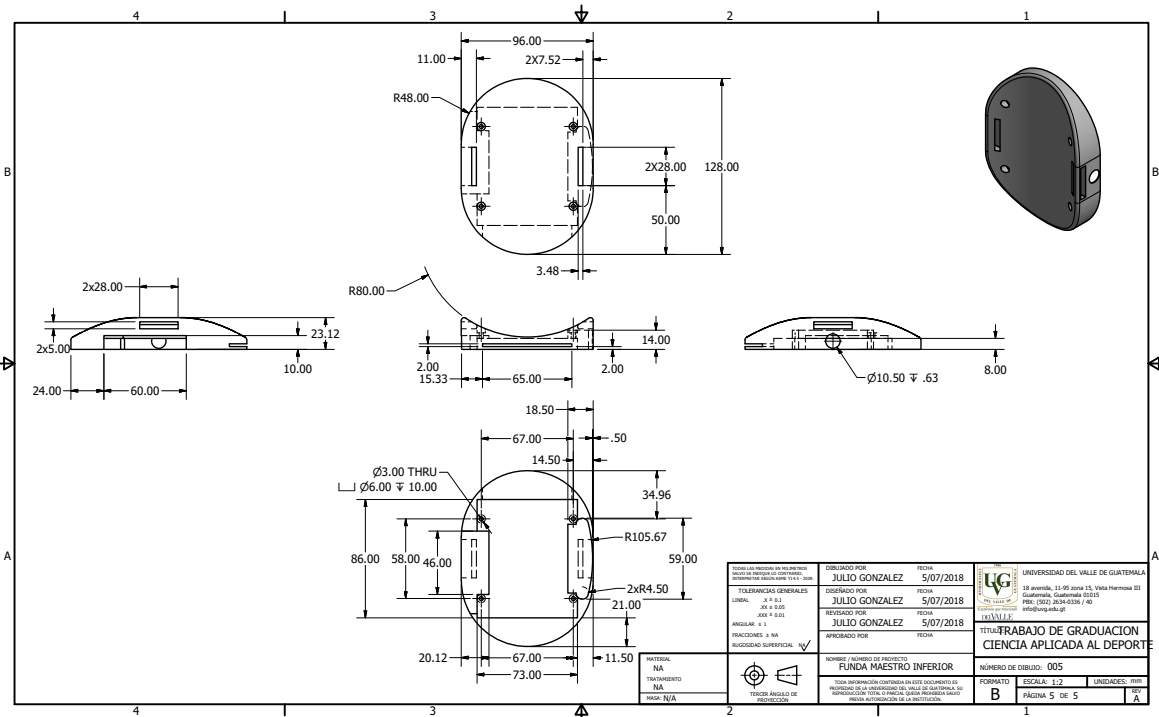


Figura 99: Planos funda inferior placa maestra

13.3. Imágenes del prototipo

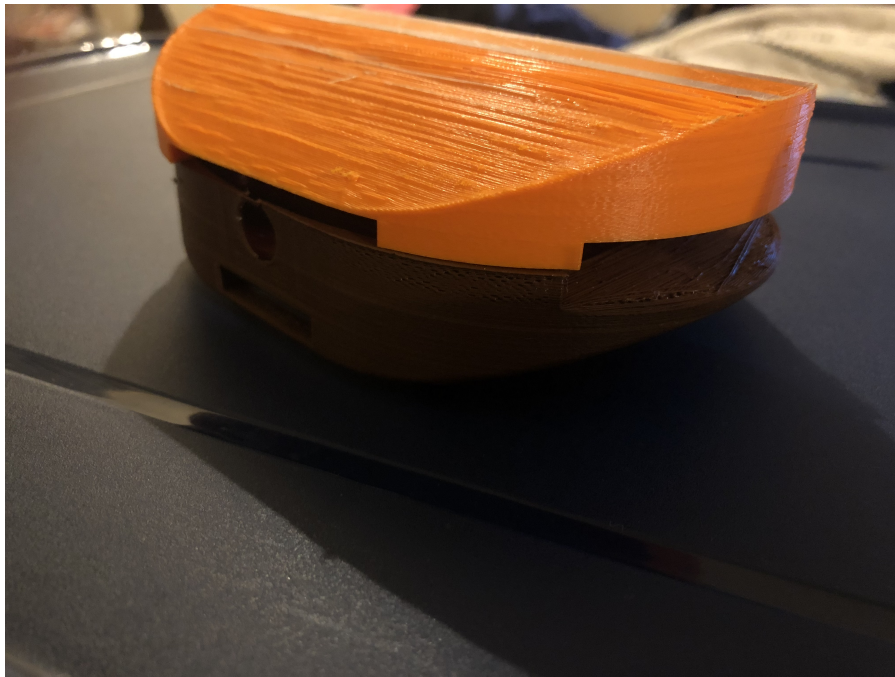


Figura 100: Prototipo versión 1

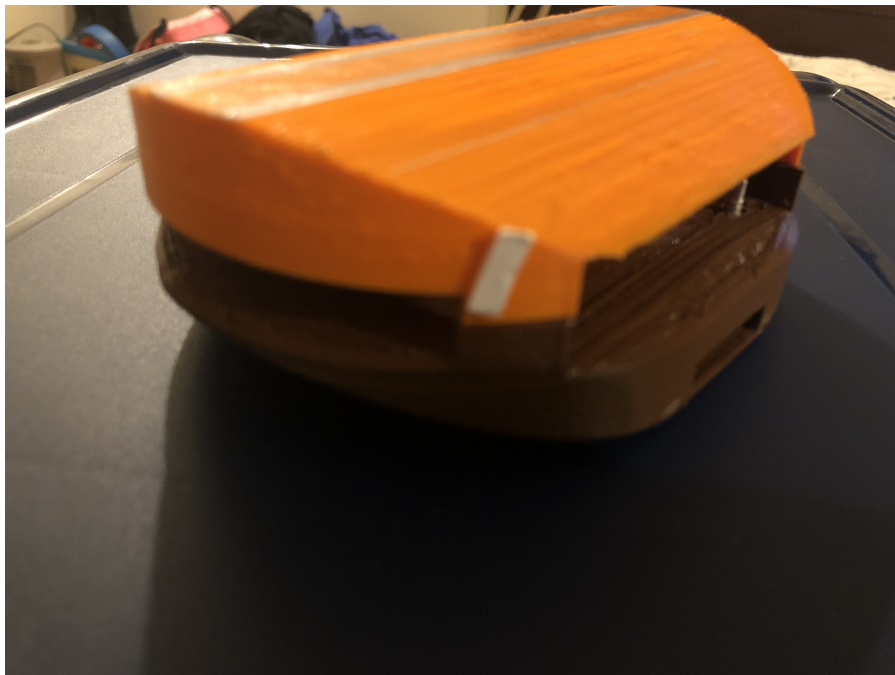


Figura 101: Prototipo versión 1 vista 2

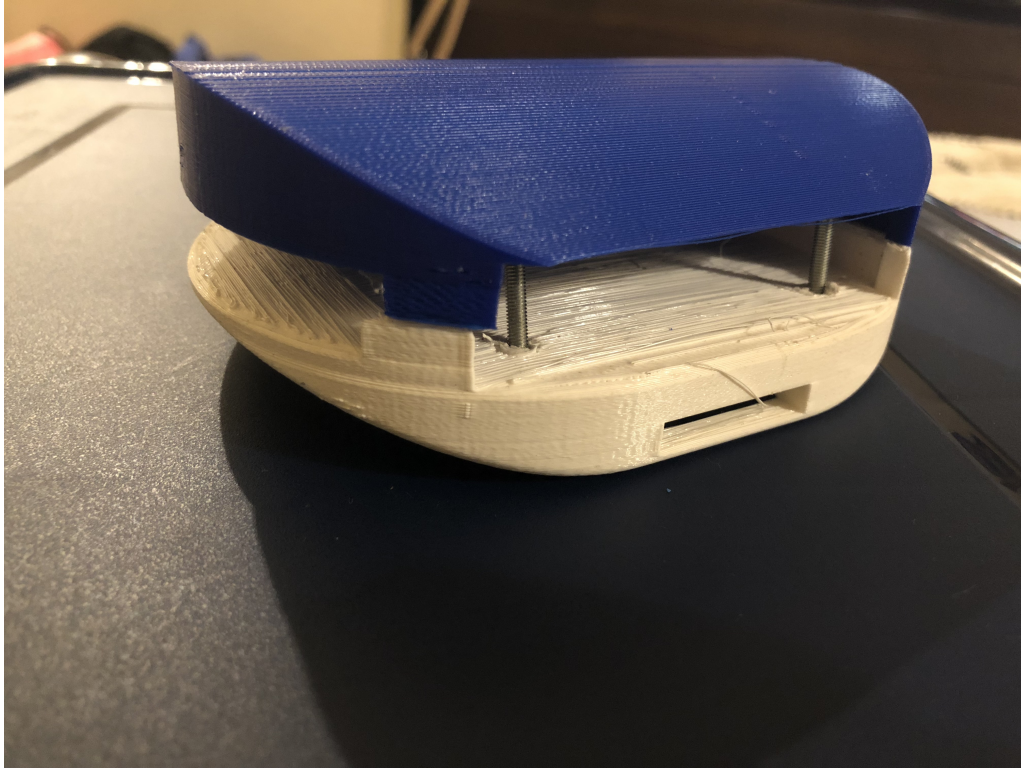


Figura 102: Prototipo versión 2

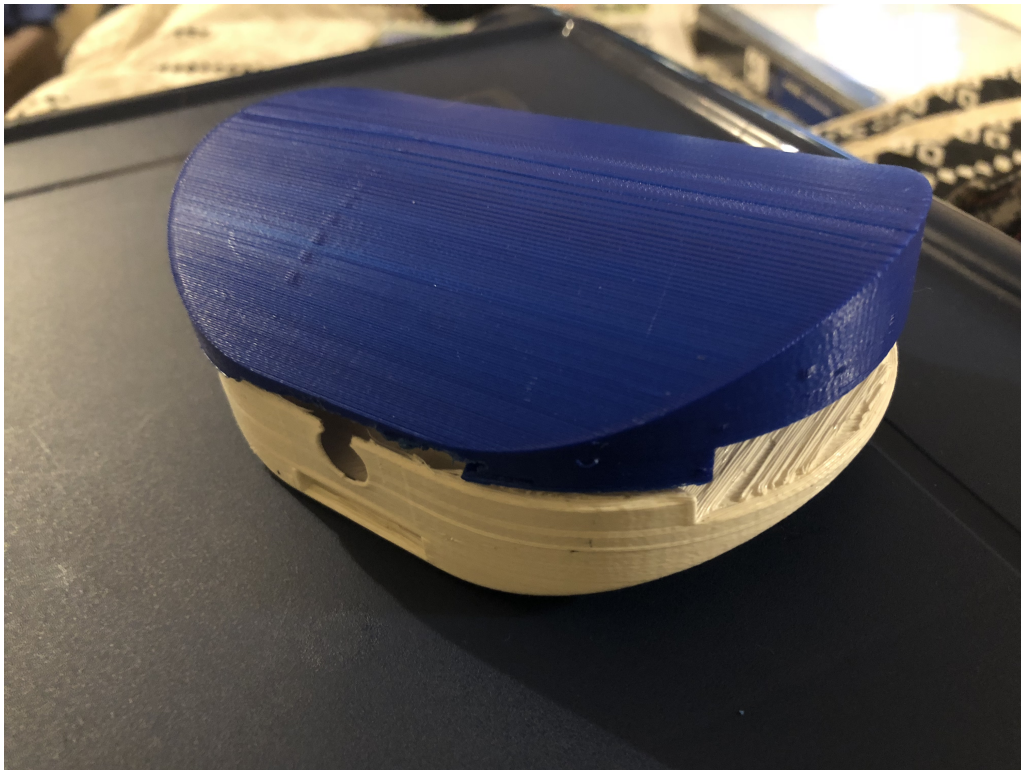


Figura 103: Prototipo versión 2 vista 2

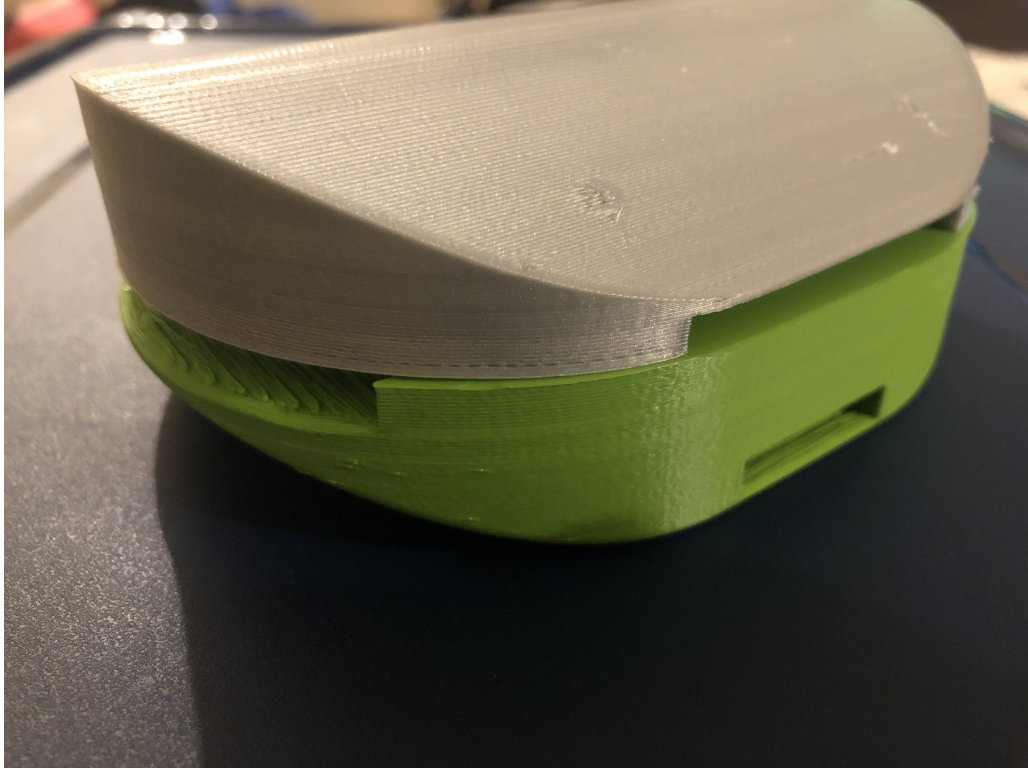


Figura 104: Prototipo versión 3

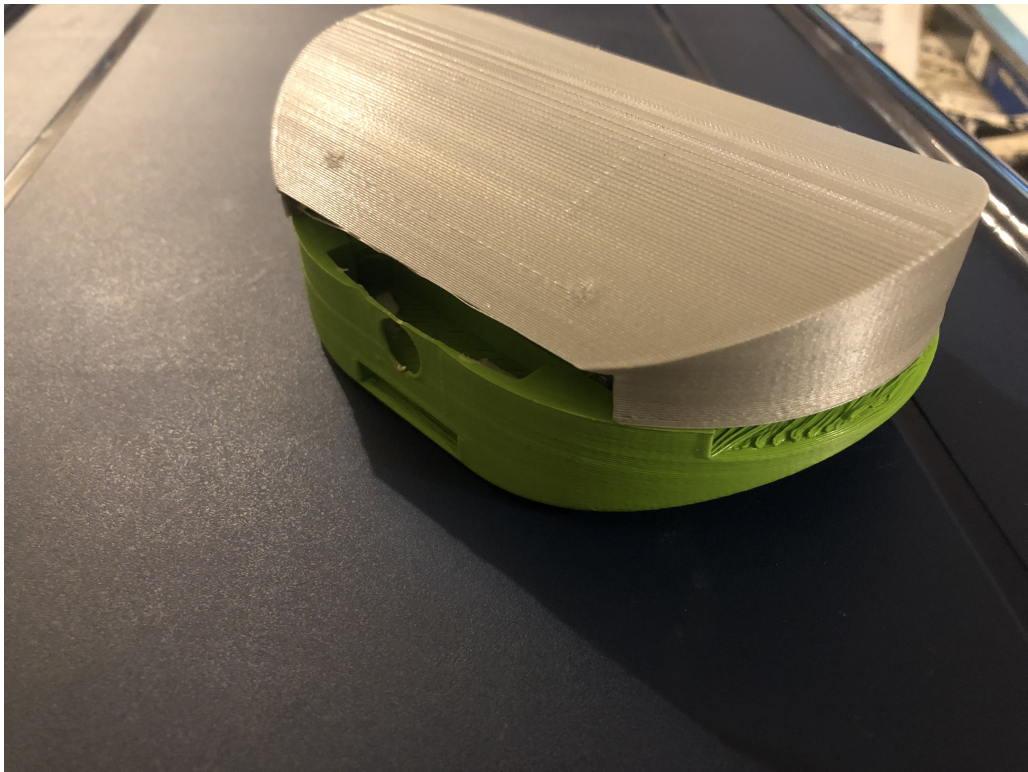


Figura 105: Prototipo versión 3 vista 2



Figura 106: Prototipo versión final dispositivo esclavo vista lateral 1



Figura 107: Prototipo versión final dispositivo esclavo vista lateral 2



Figura 108: Prototipo versión final dispositivo esclavo vista lateral 3



Figura 109: Prototipo versión final dispositivo esclavo vista superior



Figura 110: Prototipo versión final dispositivo maestro vista lateral 1



Figura 111: Prototipo versión final dispositivo maestro vista superior

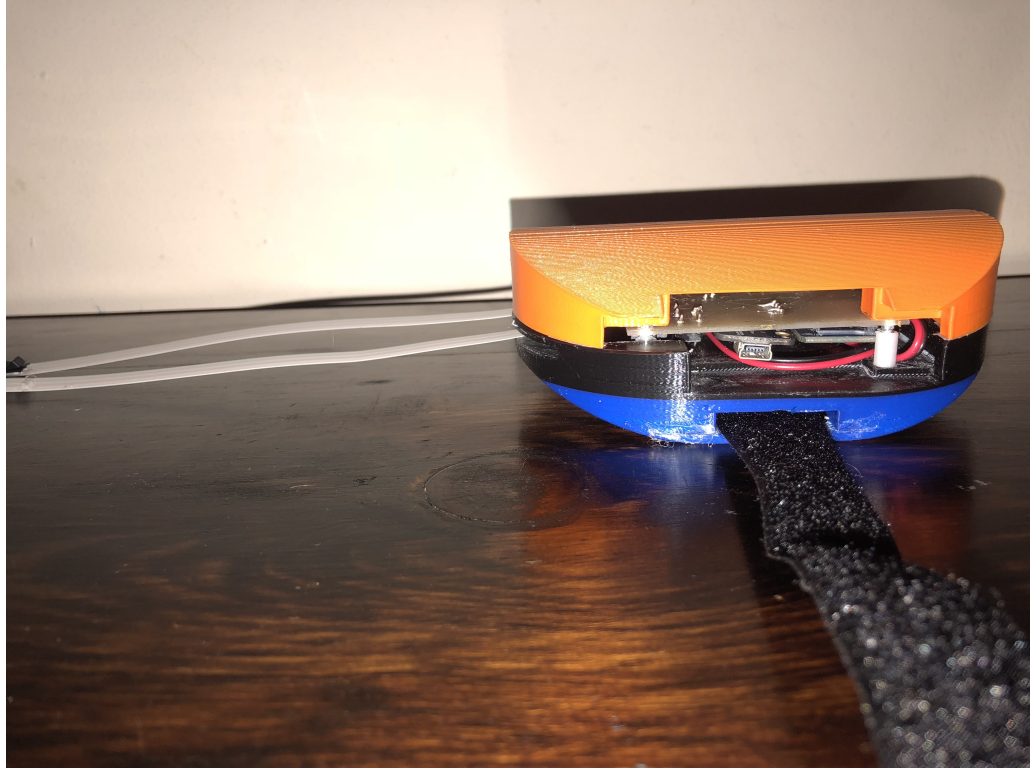


Figura 112: Prototipo versión final dispositivo maestro vista lateral 2

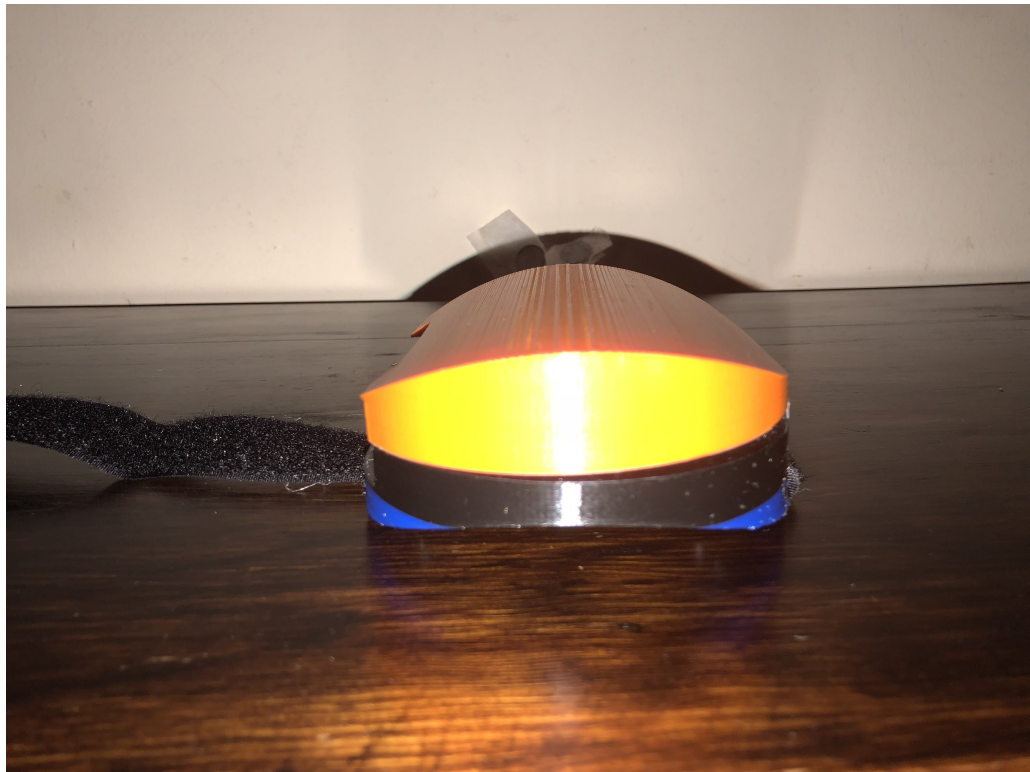


Figura 113: Prototipo versión final dispositivo maestro vista lateral 3



Figura 114: Prototipo versión final dispositivo maestro vista inferior



Figura 115: Prototipo versión final dispositivo esclavo vista inferior

ADC Es un componente electrónico que convierte señales analógicas a digitales. 22

Interfaz Se denomina como interfaz o GUI, "Graphical User Inteface" a la conexión entre dos máquinas o entre máquina y ser humano. Esta permite brindar un soporte para la comunicación entre ellos. 37

Microcontroladores Son circuitos integrados digitales que pueden ser usados para diversas aplicaciones debido a su características de poder ser programables según sea su función final. Estos componentes estan compuestos por una unidad central de proceso o CPU, memoria (ROM y RAM) y entradas y salidas. 19

Open Source Consiste en un modelo de desarrollo de software que se basa en la colaboración abierta por parte de una comunidad manteniendo el software gratis y el código disponible para la mejora constante. 43

PCB PCB o "Printed Circuit Board" es un circuito impreso, este consiste en una superficie que está compuesta por material conductor en forma de caminos y bases para soldar elementos con el fin de conectar eléctricamente sus elementos. Generalmente las placas están recubiertas de cobre mientras que la base es de fibra de vidrio. 23

Piezo-resistivo Esta es una propiedad que presentan ciertos materiales conductores y semi-conductores en el cual la resistencia de este cambia cuando se le somete es un esfuerzo mecánico. 18

PLA Es un tipo de filamento utilizado en las impresoras 3D que esta fabricado a base del maíz. Su nombre completa es poliácido láctico. 46

Receptor Dispositivo electrónico que permite la recuperación de las señales transmitidas por un transmisor. 19

Sensor Un sensor se define como todo dispositivo que tiene la capacidad de variar cierta característica o propiedad ante magnitudes químicas o física. 18

Tarjeta SD Las tarjetas SD o “Secure Digital” son dispositivos de almacenamiento portátiles en forma de una tarjeta de memoria. Son muy utilizados para teléfonos móviles, computadoras y videoconsolas. 20

Transmisor Es un instrumento que capta las variables de proceso y la transmite a cierta distancia a un instrumento indicador o controlador. 19