

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Electrónico*

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO

**PROTOTIPO DE PLANTILLA INSTRUMENTADA PARA LA
ADQUISICIÓN DE PRESIÓN PLANTAR Y PARÁMETROS DE
MARCHA ORIENTADA A LA PREVENCIÓN DE ÚLCERAS EN
PIE DIABÉTICO**

AUTORES:

JUAN DIEGO ARÉVALO MÁRQUEZ

CHRISTIAN XAVIER SANGURIMA TENEPAGUAY

TUTORA:

ING. ANA CECILIA VILLA PARRA, MSC. PHD.

CUENCA – ECUADOR

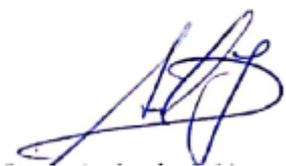
2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Juan Diego Arévalo Márquez con documento de identificación N° 010483464-3 y Christian Xavier Sangurima Tenepaguay con documento de identificación N° 010575302-4, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“PROTOTIPO DE PLANTILLA INSTRUMENTADA PARA LA ADQUISICIÓN DE PRESIÓN PLANTAR Y PARÁMETROS DE MARCHA ORIENTADA A LA PREVENCIÓN DE ÚLCERAS EN PIE DIABÉTICO”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Electrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

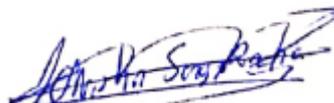
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero del 2020



Juan Diego Arévalo Márquez

C.I.: 010483464-3



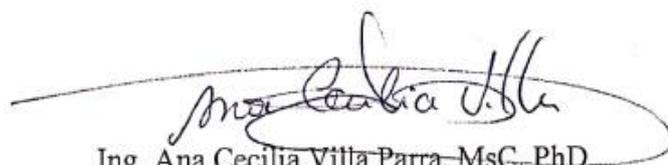
Christian Xavier Sangurima Tenepaguay

C.I.: 010575302-4

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación:
“PROTOTIPO DE PLANTILLA INSTRUMENTADA PARA LA ADQUISICIÓN DE PRESIÓN PLANTAR Y PARÁMETROS DE MARCHA ORIENTADA A LA PREVENCIÓN DE ÚLCERAS EN PIE DIABÉTICO”,
realizado por Juan Diego Arévalo Márquez y Christian Xavier Sangurima Tenepaguay, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero del 2020



Ing. Ana Cecilia Villa Parra. MsC. PhD

C.I.: 010387419-4

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

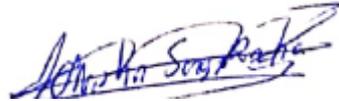
Nosotros, Juan Diego Arévalo Márquez con documento de identificación N° 010483464-3 y Christian Xavier Sangurima Tenepaguay con documento de identificación N° 010575302-4, autores del trabajo de titulación: **“PROTOTIPO DE PLANTILLA INSTRUMENTADA PARA LA ADQUISICIÓN DE PRESIÓN PLANTAR Y PARÁMETROS DE MARCHA ORIENTADA A LA PREVENCIÓN DE ÚLCERAS EN PIE DIABÉTICO”** certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, enero del 2020



Juan Diego Arévalo Márquez

C.I.: 010483464-3



Christian Xavier Sangurima Tenepaguay

C.I.: 010575302-4

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme cumplir este logro, a Don Bosco que siempre ha sido uno de mis pilares a lo largo de este camino de formación.

A nuestra tutora la Dra. Ana Cecilia Villa que nos ha tenido mucha paciencia al igual que nos ha brindado todo su apoyo y confianza.

Finalmente, no me podría olvidar de mis queridos familiares, profesores, amigos y amigas los cuales con la frase “ya acabas la tesis”, que se sentía como un halón de oreja, me daban ese empujón a concluir esta meta.

Juan Diego Arévalo Márquez

Quiero agradecer a Juan que ha sido mi compañero de tesis y excelente amigo, que ha sido el apoyo y soporte en la elaboración de este proyecto en conjunto. Además, quiero agradecer a mi tutora la Dr. Ana Cecilia Villa, que, ha sido clave en la elaboración de la tesis, la cual que nos ha dado recomendaciones y las guías necesarias para el desarrollo. Por último, agradezco a todas aquellas personas, amigos, familia y profesores que formaron parte de mi vida ya sea directa o indirectamente los mismo que de cierta manera contribuyeron a que este sueño se haga realidad.

Christian Xavier Sangurima Tenepaguay

DEDICATORIAS

Dedicó esta tesis a mis mamás Narcisa, Rosa, Carmen y mi mami Balbina, ellas me han sabido guiar, apoyar, cuidar y sobre todo quererme infinitamente, sin todo su esfuerzo, sus palabras fuertes y consejos no hubiese logrado cumplir este sueño y ser la persona que soy hoy en día.

Juan Diego Arévalo Márquez

Dedicó esta tesis a mis padres que han sido un pilar fundamental a lo largo de todo este proceso de estudio, que me han apoyado económica y moralmente siempre apoyándome en los momentos de mayor dificultad.

Christian Xavier Sangurima Tenepaguay

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIAS.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
RESUMEN.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XV
ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO.....	XVII
JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES).....	XVIII
OBJETIVOS.....	XX
1. OBJETIVOS.....	XX
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	XX
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XX
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA O ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1 Diabetes.....	1
1.1.1 diabetes de tipo 1.....	1
1.2.1 diabetes de tipo 2.....	1
1.3.1 La diabetes gestacional.....	2
1.4.1 Otros tipos de diabetes.....	2
1.2 Pie diabético.....	2
1.3 Biomecánica del pie.....	4
1.4 La marcha.....	6
1.1.4 Fase de apoyo.....	6
1.2.4 Fase de oscilación.....	7
1.3.4 Parámetros del ciclo de la marcha.....	7
1.4.4 Patrón de presión plantar.....	8
1.5 Plantillas instrumentadas para medir presión.....	9
1.1.5 Sensor flexiforce A401.....	10
1.2.5 Módulo HC05.....	11
1.3.5 Software arduino.....	12
1.4.5 Mpu6050.....	13
1.5.5 Software Labview.....	14
1.6.5 Software Autodesk Inventor.....	15
1.6 Equipos para analizar la marcha.....	15

1.1.6	Plataforma de presiones pedistar.....	16
1.2.6	Plataforma Dinascan	16
1.7	Plantillas instrumentadas disponibles en el mercado	17
1.7.1	Sistemas de sensores de fuerza novel	17
1.7.2	Plantillas electrónicas para ortopedia y rehabilitacion moticon.....	18
1.7.3	Biofoot	19
1.8	Pruebas PARA ANÁLISIS DE PRESIÓN PLANTAR	20
1.8.1	Test de apoyo estático	20
1.8.2	Test de velocidad de marcha	20
1.8.3	Escala de presiones	20
CAPÍTULO 2:	MARCO METODOLÓGICO	22
2.....		22
2.1	Construcción DEL prototipo de plantillas instrumentadas	24
2.1.1	Construcción y diseño deL prototipo	24
2.2.1	Diseño y programación de circuitos de adquisición en software Proteus y Arduino	25
2.3.1	Diseño y ruteo de placa de adquisición en software Altium Designer	27
2.4.1	Diseño y construcción de LA caja contenedora de circuiteria en software Inventor	28
2.5.1	Programación y tratamiento de datos en software labview.....	29
2.2	Comprobación de los parámetros de la marcha obtenidos con el sistema de plantillas	35
2.1.2	PRUEBAS PARA VERIFICAR LA PresiÓN ejercida COn prototipo de plantillas modo on-line.....	36
2.1.2	PRUEBAS PARA VERIFICAR EL Ángulo de apertura COn prototipo de plantillas modo on-line.....	37
2.2.2	Pruebas para verificar la Longitud de paso en el ciclo de marcha modo off-line.....	38
2.3.2	PRUEBA DE Velocidad durante el ciclo de marcha modo off-line.....	39
2.4.2	PRUEBA PARA VALIDAR LA Temperatura durante la marcha modo off-line.....	39
2.5.2	Prueba de la Cadencia o número de pasos durante la marcha modo off-line	40
2.3	PRUEBAS DEL SISTEMA CON SUJETOS NORMALES Y PACIENTES DIABÉTICOS	40
CAPÍTULO 3:	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ANÁLISIS ECONÓMICO.	41
3.....		41
3.1	Resultados de las pruebas técnicas.....	41
3.1.1	Resultados de las PRUEBAS PARA VERIFICAR LA PresiÓN ejercida COn prototipo de plantillas modo on-line.....	41
3.2.1	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA VERIFICAR EL Ángulo de apertura modo on-line	44

3.3.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA PARA VERIFICAR LA Longitud de paso modo off-line	47
3.4.1 Resultados de la prueba de Velocidad durante el ciclo de marcha modo off-line.....	48
3.5.1 Pruebas para verificar la Temperatura de funcionamiento durante la marcha modo off-line.....	49
3.6.1 Resultados de la prueba de Cadencia o número de pasos durante la marcha modo off-line.....	51
3.2 Análisis de datos en pacientes saludables	52
3.3 Análisis de datos en pacientes diabéticos.....	62
3.4 Análisis de costos del prototipo implementado	75
3.5 Características del prototipo y de dispositivos disponibles EN EL mercado... 81	
3.6 Análisis de los dispositivos	82
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXOS	89
ANEXO 1: PROGRAMACIÓN PARA CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS BLUETOOTH HC-05.	89
ANEXO 2: PROGRAMACIÓN PARA ADQUISICIÓN DE SEÑALES EN SENSORES FLEXI FORCE A401 Y MPU6050.....	91
ANEXO 3: PROGRAMACIÓN DE INTERFAZ GRÁFICA EN SOFTWARE LABVIEW	94
ANEXO 4: MANUAL DE USUARIO HARDWARE Y SOFTWARE.....	97
ANEXO 5: CARTA DE CONSENTIMIENTO.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Características obtenidas durante la marcha</i> [1].	XVIII
Figura 2. <i>Realidad de sobrepeso y obesidad en la población ecuatoriana</i> [3].	XVIII
Figura 3. <i>Número de fallecidos en 10 años</i> [3].	XVIII
Figura 4. <i>Úlcera en el pie diabético</i> [4].	3
Figura 5. <i>Exploración vascular de los reflejos (rotuliano y aquileo)</i> [5].	4
Figura 6. <i>Análisis del flujo sanguíneo con el instrumento Doppler</i> [5].	4
Figura 7. <i>Fases porcentuales en el ciclo de marcha</i> [8].	6
Figura 8. <i>Distribución de presiones durante las fases de la marcha</i> [8].	9
Figura 9. <i>Distribución de presión en la planta del pie</i> [11].	10
Figura 10. <i>Distribución de los sensores en la región de la planta del pie</i> [2].	10
Figura 11. <i>Sensor A401 y su curva de fuerza característica</i> [13].	11
Figura 12. <i>Módulo bluetooth HC-05</i> [14].	12
Figura 13. <i>Modelos de placas Arduino</i> [16].	12
Figura 14. <i>Arduino Nano</i> [18].	13
Figura 15. <i>Direcciones de los ejes en módulo MPU6050</i> [19].	13
Figura 16. <i>Ejemplo paneles de LabVIEW. (a) Panel Frontal, (b) Diagrama de bloques</i> [21].	15
Figura 17. <i>Diseño 3D en Autodesk Inventor</i> [22].	15
Figura 18. <i>Plataforma Pedistar, precio \$3757</i> [23].	16
Figura 19. <i>Plataforma dinamométrica Dinascan</i> [24].	17
Figura 20. <i>Plantilla de fuerza NOVEL</i> [26].	18
Figura 21. (a) <i>Plantillas electrónicas Moticon; (b) curva de fuerza obtenida por la plantilla electrónica Moticon</i> [27].	19
Figura 22. <i>Plantilla instrumentada Biofoot</i> [24].	19
Figura 23. <i>Software Biofoot</i> [24].	20
Figura 24. <i>Escala de colores con respecto a presiones plantares.</i> [29].	21
Figura 25. <i>Diagrama de bloques del sistema de plantillas instrumentadas para la adquisición de presión plantar propuesto en este proyecto. Fuente: Autor</i>	22
Figura 26. <i>Diagrama de procesos para construcción, pruebas y análisis de datos en plantillas instrumentadas. Fuente: Autor.</i>	23
Figura 27. <i>Diseño del cableado interno de las plantillas de pie derecho e izquierdo. Fuente: Autor</i>	24

Figura 28. Construcción de pistas dentro de la plantilla. Fuente: Autor	25
Figura 29. Simulación de circuito de adquisición de señales en Software Proteus 8.0. Fuente: Autor	26
Figura 30. Diseño esquemático de placa de adquisición y envío de datos en Altium Designer 18. Fuente: Autor.....	27
Figura 31. Diseño de PCB de placa de adquisición y envío de datos en Altium Designer 18. Fuente: Autor.....	28
Figura 32. Placa de adquisición y envío de datos. (a) vista posterior; (b) vista frontal. Fuente: Autor	28
Figura 33. Diseño de caja en software Inventor. (a) caja; (b) tapa. Fuente: Autor ..	29
Figura 34. Caja contenedora finalizada luego de impresión 3D. Fuente: Autor	29
Figura 35. Curva obtenida a partir de pruebas con pesos específicos. Fuente: Autor	30
Figura 36. Componente Visa Serial con parámetros de entrada. Fuente: Autor	31
Figura 37. Componente Visa Read con parámetros de entrada. Fuente: Autor.....	32
Figura 38. Componente Formula y su configuración. Fuente: Autor.....	32
Figura 39. Sumatoria de Señales para visualización de patrón de marcha. Fuente: Autor.....	33
Figura 40. Programación de la gama de colores según fuerza ejercida con parámetros para el cambio de color. (a) Interfaz gráfica; (b) programación en LabView. Fuente: Autor	33
Figura 41. Visualización de cambios de posición con medición en grados. (a) programación; (b) pantalla de visualización. Fuente: Autor	34
Figura 42. Bloques de contador de pasos, conteo de duración de las pruebas y operación matemática para obtención de la velocidad. Fuente: Autor.....	34
Figura 43. Bloques para etiquetado y almacenamiento de datos obtenidos. (a) Bloque "WriteToMeasurementFile"; (b) bloque "SetDynamicDataAttributes" Fuente: Autor	35
Figura 44. Bloques de obtención de datos almacenados para su visualización. Fuente: Autor	35
Figura 45. Sujeto y guía para la prueba de marcha. Fuente: Autor	36
Figura 46. Presiones ejercidas sobre los sensores en ambos pies en un instante de la marcha. Fuente: Autor	37

Figura 47. <i>Huellas dispuestas para la comprobación de la medición de ángulos.</i>	
Fuente: Autor.....	38
Figura 48. <i>Mediciones de longitud de paso sobre arena tanto al inicio como a final de la zancada.</i>	
Fuente: Autor	38
Figura 49. <i>Medios utilizados para comprobar datos de velocidad del sistema.</i>	
Fuente: Autor.....	39
Figura 50. <i>Señales de presión obtenidas del pie derecho en diferentes zonas plantares.</i>	
Fuente: Autor.	42
Figura 51. <i>Señales obtenidas del pie izquierdo en diferentes zonas plantares.</i>	
Fuente: Autor.....	42
Figura 52. <i>Ciclo de marcha y medición de ángulos a 0° pie izquierdo.</i>	
Fuente: Autor	44
Figura 53. <i>Ciclo de marcha y medición de ángulos a 0° pie derecho.</i>	
Fuente: Autor.....	45
Figura 54. <i>Ciclo de marcha y medición de ángulos a 30° pie izquierdo.</i>	
Fuente: Autor	45
Figura 55. <i>Ciclo de marcha y medición de ángulos a 30° en pie derecho.</i>	
Fuente: Autor.....	45
Figura 56. <i>Distancia de paso en pie izquierdo y pie derecho obtenido en pruebas.</i>	
Fuente: Autor.....	47
Figura 57. <i>Temperatura obtenida en pie izquierdo al inicio y al final de la prueba de marcha mediante sensor DS18B20.</i>	
Fuente: Autor	49
Figura 58. <i>Temperatura obtenida en pie derecho al inicio y al final de la prueba de marcha mediante sensor DS18B20.</i>	
Fuente: Autor	49
Figura 59. <i>Gráfica de cambio de temperatura durante marcha para el sujeto 1.</i>	
Fuente: Autor.....	50
Figura 60. <i>Número de pasos obtenidos mediante app podómetro.</i>	
Fuente: Autor.....	51
Figura 61. <i>Número de pasos visualizados en pie derecho e izquierdo.</i>	
Fuente: Autor	51
Figura 62. <i>Sujeto 1 saludable.</i>	
Fuente: Autor.....	52
Figura 63. <i>Patrones de presión del pie derecho sujeto 1 saludable.</i>	
Fuente: Autor ..	53
Figura 64. <i>Patrones de presión del pie derecho sujeto 1 saludable.</i>	
.....	53
Figura 65. <i>Sujeto 2 saludable.</i>	
Fuente: Autor.....	56
Figura 66. <i>Patrones de presión del pie derecho sujeto 2 saludable.</i>	
Fuente: Autor. .	56
Figura 67. <i>Patrones de presión del pie derecho sujeto 2 saludable.</i>	
Fuente: Autor. .	57
Figura 68. <i>Sujeto 3 saludable.</i>	
Fuente: Autor.....	59

Figura 69. <i>Patrones de presión del pie derecho sujeto 3 saludable.</i> Fuente: Autor ..	59
Figura 70. <i>Patrones de presión del pie izquierdo sujeto 3 saludable.</i> Fuente: Autor	60
Figura 71. <i>Paciente diabético 1</i>	62
Figura 72. <i>Patrones de presión del pie derecho paciente diabético 1.</i> Fuente: Autor	63
Figura 73. <i>Patrones de presión del pie izquierdo paciente diabético 1</i>	63
Figura 74. <i>Parámetros off-line del pie derecho paciente diabético 1.</i> Fuente: Autor.	64
Figura 75. <i>Parámetros off-line del pie izquierdo paciente diabético 1.</i> Fuente: Autor.	64
Figura 76. <i>Paciente diabético 2.</i> Fuente: Autor	66
Figura 77. <i>Patrones de presión del pie derecho paciente diabético 2.</i> Fuente: Autor	67
Figura 78. <i>Patrones de presión del pie izquierdo paciente diabético 2.</i> Fuente: Autor	67
Figura 79. <i>Parámetros off-line del pie derecho paciente diabético 2.</i> Fuente: Autor.	68
Figura 80. <i>Parámetros off-line del pie izquierdo paciente diabético 2.</i> Fuente: Autor.	68
Figura 81. <i>Paciente diabético 3.</i> Fuente: Autor	71
Figura 82. <i>Patrones de presión del pie derecho en paciente diabético 3.</i> Fuente: Autor.....	71
Figura 83. <i>Patrones de presión del pie izquierdo en paciente diabético 3.</i> Fuente: Autor.....	71
Figura 84. <i>Parámetros off-line del pie derecho paciente diabético 3.</i> Fuente: Autor	72
Figura 85. <i>Parámetros off-line del pie izquierdo paciente diabético 3.</i> Fuente: Autor	72
Figura 86. <i>Disposición de sensores dentro de plantilla instrumentada.</i> Fuente: Autor.	97
Figura 87. <i>Tela de protección colocada sobre sensores.</i> Fuente: Autor.	97
Figura 88. <i>Colocación de plantillas en pies de paciente.</i> Fuente: Autor	97
Figura 89. <i>Colocación de caja contenedora en tobillo y conexión entre dispositivos.</i> Fuente: Autor.....	98
Figura 90. <i>Paso 1 agregar dispositivos.</i> Fuente: Autor.	98
Figura 91. <i>Paso 1 agregar dispositivos bluetooth.</i> Fuente: Autor.	98
Figura 92. <i>Selección de dispositivo para emparejamiento.</i> Fuente: Autor.	98

Figura 93. <i>Paso 4 revisión de puertos COM. Fuente: Autor.</i>	99
Figura 94. <i>Reconocimiento de puertos COM para dispositivos transmisores. Fuente: Autor.</i>	99
Figura 95. <i>Visualización de icono de aplicación ejecutable del sistema. Fuente: Autor.</i>	99
Figura 96. <i>Interfaz gráfica del sistema abierta. Fuente: Autor.</i>	100
Figura 97. <i>Selección de puertos COM previamente revisados. Fuente: Autor.</i>	100
Figura 98. <i>Detener arranque por defecto del programa. Fuente: Autor.</i>	100
Figura 99. <i>Inicio o arranque del programa para recepción de datos. Fuente: Autor.</i>	101
Figura 100. <i>Revisión de recepción de datos en interfaz gráfica. Fuente: Autor.</i>	101
Figura 101. <i>Revisión de funcionamiento de gráficas y ciclos de marcha por recepción de datos. Fuente: Autor.</i>	101
Figura 102. <i>Configuración de valores en umbral y distancia de marcha. Fuente: Autor.</i>	102
Figura 103. <i>Selección de ubicación para guardado de datos de pacientes.</i>	102
Figura 104. <i>Botón para inicio de grabación de marcha de pacientes. Fuente: Autor.</i>	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estudios para determinar el grado de afección a la sensibilidad y flujo sanguíneo del pie diabético.	4
Tabla 2. <i>Presiones máximas (KPa) en zonas del pie a diferentes velocidades</i> [8].....	9
Tabla 3. <i>Características típicas de funcionamiento de sensor A401</i> [12].	11
Tabla 4. <i>Direcciones I2C para modulo MPU6050</i> [19].	13
Tabla 5. <i>Rango de lectura del MPU6050</i> [19].....	14
Tabla 6. <i>Características las plataformas Dinascan P600 y P800</i> [25].	17
Tabla 7. <i>Datos obtenidos con pruebas de pesos específicos en sensores FlexiForce A401</i>	30
Tabla 8. <i>Escala de valores obtenidos por ecuación en unidades de Kilo-pascales...</i>	31
Tabla 9. <i>Nivel de peso según IMC</i> [32].....	37
Tabla 10. <i>Datos de los participantes en las pruebas de marcha con el sistema de plantillas</i>	41
Tabla 11. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de sujeto 1. Fuente: Autor</i>	43
Tabla 12. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha de sujeto 1. Fuente: Autor</i>	43
Tabla 13. <i>Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor</i>	43
Tabla 14. <i>Comparación de IMC obtenido a partir de báscula y plantillas instrumentadas. Fuente: Autor</i>	43
Tabla 15. <i>Ángulos y errores en el pie izquierdo durante la prueba de 0°. Fuente: Autor</i>	46
Tabla 16. <i>Ángulos y errores en el pie derecho durante la prueba de 0°. Fuente: Autor</i>	46
Tabla 17. <i>Ángulos y errores en el pie izquierdo durante la prueba de 30°. Fuente: Autor</i>	47
Tabla 18. <i>Ángulos y errores en el pie derecho durante la prueba de 30°. Fuente: Autor</i>	47
Tabla 19. <i>Comprobación de error en longitud de paso del sistema con respecto a las huellas marcadas en la arena. Fuente: Autor.</i>	48

Tabla 20. <i>Comparaciones de datos de velocidad entre plantillas instrumentas y otros dispositivos de medición. Fuente: Autor.</i>	48
Tabla 21. <i>Comprobación de error en temperatura de plantilla instrumentada con respecto a sensor DS18B20. Fuente: Autor.</i>	50
Tabla 22. <i>Número de pasos en app e interfaz gráfica. Fuente: Autor.</i>	51
Tabla 23. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha del sujeto 1 saludable. Fuente: Autor.</i>	54
Tabla 24. <i>Parámetros offline pie derecho sujeto 1 saludable. Fuente: Autor.</i>	54
Tabla 25. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha del sujeto 1 saludable. Fuente: Autor.</i>	54
Tabla 26. <i>Parámetros offline pie izquierdo sujeto 1 saludable. Fuente: Autor</i>	54
Tabla 27. <i>Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor.</i>	55
Tabla 28. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de sujeto 2 saludable. Fuente: Autor</i>	57
Tabla 29. <i>Parámetros offline pie derecho sujeto 2 saludable. Fuente: Autor.</i>	58
Tabla 30. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha del sujeto 2. Fuente: Autor.</i>	58
Tabla 31. <i>Parámetros offline pie izquierdo sujeto 2 saludable. Fuente: Autor</i>	58
Tabla 32. <i>Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor.</i>	58
Tabla 33. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de sujeto 3 saludable. Fuente: Autor</i>	60
Tabla 34. <i>Parámetros offline pie derecho sujeto 3 saludable. Fuente: Autor.</i>	61
Tabla 35. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha del sujeto 3. Fuente: Autor.</i>	61
Tabla 36. <i>Parámetros off-line pie izquierdo sujeto 3 saludable. Fuente: Autor.</i>	61
Tabla 37. <i>Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor.</i>	61
Tabla 38. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de sujeto 1 diabético. Fuente: Autor.</i>	65
Tabla 39. <i>Parámetros offline pie derecho sujeto 1 diabético. Fuente: Autor</i>	65
Tabla 40. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha de sujeto 1. Fuente: Autor.</i>	65

Tabla 41. <i>Parámetros offline pie izquierdo sujeto 1 diabético. Fuente: Autor</i>	65
Tabla 42. <i>Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor</i>	66
Tabla 43. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de paciente diabético 2. Fuente: Autor</i>	69
Tabla 44. <i>Parámetros offline pie derecho paciente diabético 2. Fuente: Autor</i>	69
Tabla 45. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha de paciente diabético 2. Fuente: Autor</i>	69
Tabla 46. <i>Parámetros offline pie izquierdo paciente diabético 2. Fuente: Autor</i>	70
Tabla 47. <i>Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor</i>	70
Tabla 48. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de paciente diabético 3. Fuente: Autor</i>	73
Tabla 49. <i>Parámetros offline pie derecho paciente diabético 3. Fuente: Autor</i>	73
Tabla 50. <i>Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha de paciente diabético 3. Fuente: Autor</i>	73
Tabla 51. <i>Parámetros offline pie izquierdo sujeto 3 diabético. Fuente: Autor</i>	74
Tabla 52. <i>Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor</i>	74
Tabla 53. <i>Materia prima directa. Fuente: Autor</i>	76
Tabla 54. <i>Materia prima indirecta. Fuente: Autor</i>	76
Tabla 55. <i>Costos fijos y variables. Fuente: Autor</i>	77
Tabla 56. <i>Flujo de caja con proyección anual. Fuente: Autor</i>	79
Tabla 57. <i>Inversión para el prototipo. Fuente: Autor</i>	80

RESUMEN

En el siguiente documento se describe el procedimiento de diseño y elaboración de un prototipo de plantillas instrumentadas inalámbricas para adquirir datos de la presión plantar y parámetros para análisis de la marcha, como el ángulo de pisada, la distancia de paso, la velocidad y la temperatura. La plantilla está diseñada para ser ajustada a dos tallas y consta de seis sensores de presión y un acelerómetro en cada pie. El sistema posee comunicación inalámbrica vía Bluetooth para el envío de datos a un dispositivo receptor que cuenta con un software en LabVIEW para la obtención de una base de datos y visualización de la información, como los puntos de mayor presión plantar y el modelo de marcha. Se realizaron pruebas técnicas para la verificación de los datos brindados por el sistema y se obtuvieron porcentajes de error inferiores al 5%. Finalmente se realizó la adquisición y análisis de los parámetros de presión y marcha de sujetos saludables y personas con diabetes con el fin de evaluar las condiciones de marcha en los dos casos. Se pudo concluir que el sistema desarrollado puede ser empleado como herramienta de apoyo para el diagnóstico y seguimiento del pie diabético siendo un aporte tecnológico al área de la instrumentación médica para la prevención de úlceras.

INTRODUCCIÓN

Según datos oficiales publicados por la INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) de Ecuador indican que una de las enfermedades de más alto impacto social y la segunda causa de muerte en nuestro país es la enfermedad crónica llamada diabetes. Esta enfermedad se presenta debido a que el páncreas se deteriora disminuyendo la producción de insulina produciendo hiperglucemia que es cuando hay niveles altos de glucosa en la sangre. Esta condición genera problemas en diversas partes del cuerpo debido a que las personas afectadas comienzan a tener daños en los nervios y vasos sanguíneos, lo que con llevan a la pérdida de la sensibilidad y al aumento de temperatura en sus pies. Esto puede ocasionar la aparición de llagas, infecciones o úlceras que son de difícil tratamiento debido a la falta de circulación y oxigenación, provocando en casos críticos la amputación del miembro en cuestión.

Las medidas de prevención son de gran importancia para combatir esta enfermedad. Estas incluyen el cuidado de los pies, el análisis de malas posturas, realizar evaluaciones del ciclo de marcha anómalo con sobrepresiones y el seguimiento a los pacientes para determinar la pérdida de sensibilidad en zonas del pie. Estas actividades pueden ser ejecutadas empleando tecnología como herramienta de aporte al diagnóstico médico para la prevención de úlceras en el pie diabético y de amputaciones.

Con este antecedente, el enfoque de nuestro proyecto es el aportar al área de la instrumentación biomédica, planteando el diseño, construcción y validación de un prototipo de plantilla instrumentada para la adquisición de presión plantar y parámetros de la marcha orientada a la prevención de úlceras en pie diabético. Estas plantillas cuentan con sensores de fuerza resistivos de alta precisión y una interfaz para el envío de la información de manera inalámbrica vía Bluetooth hacia un ordenador con un software de procesamiento y una interfaz para la visualización de los datos. En el ordenador se mostrarán y almacenarán los parámetros del ciclo de marcha, como curvas generadas, valores de presión, distancias, velocidades, ángulos de apertura, número de pasos y temperatura.

La información obtenida por el dispositivo fue validada mediante diversas pruebas piloto con individuos que no padecen ninguna enfermedad y en pacientes que han sido diagnosticados con diabetes, las cuales indican un error menor al 5% en todos los parámetros medidos por la plantilla. Los datos de presión obtenidos fueron contrastados con lo publicado en la literatura de estudios de presiones ejercidas en individuos. El sistema realizado genera gráficas y tablas de resultados para analizar variaciones o anomalías obtenidas durante la marcha que permitirá al personal médico tomar conclusiones importantes para la prevención de úlceras en el pie diabético.

Estas plantillas instrumentadas constarán con sensores de fuerza resistivos de alta precisión acordes para el estudio a realizar, los datos de los pacientes serán adquiridos, procesados y enviados de manera inalámbrica vía Bluetooth hacia un ordenador o PC el cual tendrá un software de procesamiento y una interfaz gráfica amigable para cualquier individuo que ocupe nuestro dispositivo.

En el ordenador se podrá visualizar diversos parámetros del ciclo de marcha, como curvas generadas, valores de presión, distancias, velocidades, ángulos de apertura, número de pasos y temperatura, cabe señalar que estos serán guardados en la PC para un posterior análisis.

La información obtenida por el dispositivo tendrá que ser validada mediante diversas pruebas piloto, las cuales comprobarán un error menor al 5% en todos los parámetros, de la misma forma los datos de presión deberán ser muy cercanos a los obtenidos sobre el estado del arte acerca de presiones ejercidas en individuos, de ahí que se realizarán pruebas en individuos que no padecen ninguna enfermedad y en pacientes que han sido diagnosticados con diabetes.

Finalmente, con las pruebas realizadas se generarán gráficas y tablas de resultados tanto de individuos como de pacientes, en donde se podrá analizar variaciones o anomalías obtenidas, llegando a conclusiones importantes para la prevención de úlceras en el pie diabético.

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

Aquí en el país, según datos oficiales de la INEC la población comprendida entre los 10 a los 59 años de edad el 1.7% tiene diabetes, pero los datos resultan más alarmantes si consideramos el rango de 30 a 50 años en donde una persona de cada diez sufre o han sido diagnosticadas de diabetes. Esta enfermedad a lo largo del tiempo genera complicaciones a la salud de la persona, una de ellas es el pie diabético que es la aparición de una úlcera llaga en el pie, una condición producida por la neuropatía y la vasculopatía (daños a los nervios y a los vasos sanguíneos), haciendo que en casos de infecciones o lesiones sus curaciones sean muchos más difíciles derivando en ocasiones en gangrenas que son tratadas únicamente mediante amputación de la extremidad afectada. Una persona con diabetes tiene alto riesgo de presentar una úlcera siéndoles factores de riesgo una sobrecarga anómala en el pie, o simplemente el uso inadecuado de algún tipo de zapato [1].

Aunque existen varios tratamientos para el pie diabético, entre ellos la disminución de carga en la zona afectada y el uso de antibióticos, la detención temprana de esta patología es sumamente importante ya que disminuye el riesgo de amputación de la extremidad [1]. Para la prevención existen diversos estudios, pruebas y análisis que incluyen el uso de plantillas instrumentadas de alta precisión o de plataformas con sensores. El objetivo es tomar datos de presión plantar de manera estática y dinámica para el análisis en diversas zonas del pie de tal manera que se pueda reconocer el patrón de presión y determinar las patologías que pudieran presentarse [2]. Con plantillas instrumentadas es posible adquirir y evaluar parámetros que son importantes para analizar la marcha y relacionar esta información con la aparición de úlceras plantares. Entre estos parámetros están: el patrón de presión, la longitud de paso, la velocidad del individuo y el ángulo de inclinación del pie durante la ejecución de pasos. Esta información permite generar herramientas para asistir diagnósticos y definir tratamientos o compensaciones de presión plantar según sea el caso [2]. Por esta razón, el análisis de presión debería ser realizado de manera frecuente para contar con la información que permita evaluar el estado del pie diabético, sin embargo, el acceso a este tipo de instrumentación en Ecuador es limitado. En general, a pesar de la importancia de la información de presión plantar en los pacientes diabéticos, un pequeño porcentaje de la población tiene acceso a estudios de presión plantar con plataformas de presión o plantillas instrumentadas. En este contexto, la construcción de plantillas instrumentadas permitiría crear una herramienta portátil para hacer un seguimiento de casos de pie diabético, en términos de adquisición y análisis de presión plantar para la prevención de úlceras.

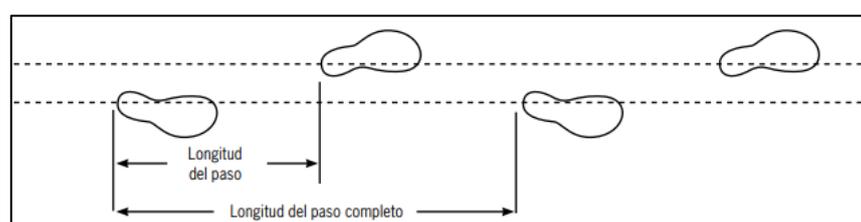


Figura 1. Características obtenidas durante la marcha [1].

JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)

La mala alimentación, la poca actividad física, el consumo tanto de cigarrillos como de alcohol son factores que incrementan la posibilidad de parecer diabetes. En la Figura 2 se encuentran cifras de la realidad de sobrepeso en la población de Ecuador [3].



Figura 2. Realidad de sobrepeso y obesidad en la población ecuatoriana [3]

Según el INEC la enfermedad de la diabetes es la segunda causa de muerte en el Ecuador después de las enfermedades cardíacas. En el año 2007 se reportaron 3.292 fallecidos a causa de la diabetes, ya en el año 2016 esta cifra aumento a 4.906 fallecidos a causa de la diabetes , es decir un aumento del 51% en 10 años , ver figura 3.



Figura 3. Número de fallecidos en 10 años [3]

En nuestro país, las mujeres han perdido más la vida que los hombres por la diabetes en el año 2016 la cifra fue de 2.628 mujeres frente a 2.278 hombres [3].

Estas cifras indican que es necesaria la implementación de programas de prevención y educación, como parte de las medidas de prevención del pie diabético. Como parte de estas medidas está la evaluación de la presión plantar con plantillas para la prevención de úlceras diabéticas, para evitar picos de presión en zonas vulnerables del pie, e inclusive para evitar una mala postura al momento de caminar. En este contexto, la construcción de una plantilla podría ser instrumento que permita a los especialistas y pacientes monitorear la presión plantar y parámetros de marcha como ángulos de inclinación, longitud de paso y separación de los pies entre otros ofrecerían una amplia gama de información para los especialistas. De esta forma se aportaría con una herramienta para la prevención de úlceras en casos de pie diabético.

OBJETIVOS

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de plantilla instrumentada para la adquisición y análisis de presión plantar y parámetros de la marcha orientado a la prevención de úlceras en pie diabético.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir dos plantillas electrónicas inalámbricas para la adquisición y envío de datos con una disposición de seis sensores en las principales zonas de presión plantar.
- Desarrollar una interfaz gráfica amigable que permita la visualización de los parámetros obtenidos de presión, velocidad, ángulo de pisada, longitud de paso y el ciclo de marcha.
- Comprobar el correcto funcionamiento de las plantillas con pruebas que demuestren la precisión y exactitud de las mismas.
- Realizar pruebas del prototipo con un grupo de personas saludables y personas con pie diabético del centro “La Casa de la Diabetes” para comparar los patrones de presión plantar y parámetros de marcha.
- Crear una base de datos para realizar un análisis de la información adquirida para proponer nuevos tipos de metodologías para el seguimiento y prevención de pie diabético.

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA O ESTADO DEL ARTE

1.1 DIABETES

La diabetes es la enfermedad que aparece debido a que el páncreas, órgano encargado en regular el azúcar de la sangre no produce insulina suficiente. El efecto de la diabetes hace que el nivel de glucosa en la sangre sea demasiado alto, dicha glucosa proviene principalmente de los alimentos que consumimos. La diabetes no tiene cura, sin embargo, las personas que parecen de esta enfermedad pueden controlar los niveles de glucosa en la sangre con un tratamiento permitiendo que estas personas lleven una vida con normalidad que les permita mantener la glucosa en la sangre en niveles normales para llevar su vida con normalidad. Hay diferentes tipos de diabetes, las cuales se detallan a continuación [4].

1.1.1 DIABETES DE TIPO 1

La diabetes tipo 1 se caracteriza por el sistema inmunitario destruir las células que el páncreas produce haciendo que los niveles de insulina en el cuerpo humano sean insuficientes. El tratamiento para estas personas consiste en suministrarle insulina todos los días [4]. Este tipo de diabetes principalmente se da en niños y jóvenes.

1.2.1 DIABETES DE TIPO 2

La mala alimentación y la inactividad física son las causantes de este tipo de diabetes. El organismo ya no utiliza eficazmente la insulina que produce, como consecuencia

de esta anomalía en el cuerpo humano comienzo a acumular exceso de glucosa en la sangre que a pasar de los años pueden provocar enfermedades del corazón, a los ojos y dentales, daños a los nervios. Los daños a los nervios suelen producirse principalmente en la zona de los pies, esto es debido a que los pies es el órgano mas lejano con respecto al corazón por lo que a la sangre le cuesta más trabajo llegar por ende los pies están más propensos a desarrollar úlceras que sin un diagnóstico temprano y un tratamiento oportuno puede generar en la amputación [4].

1.3.1 LA DIABETES GESTACIONAL

Principalmente es diabetes tipo 2 que afecta a las mujeres en estado de gestación y desaparece luego de dar la luz. Pero el haber parecido este tipo de diabetes incrementa la posibilidad de parecer diabetes tipo 2 en el futuro [4].

1.4.1 OTROS TIPOS DE DIABETES

Hay otros tipos diabetes como monogénica y la diabetes relacionada con la fibrosis quística, estos dos tipos de diabetes no son tan comunes.

1.2 PIE DIABÉTICO

Entre las consecuencias de los altos niveles de glucosa en la sangre es el daño a los nervios (Neuropatía Diabética) y a los vasos sanguíneos debido a una mala circulación. Esto afecta principalmente a los pies, ocasionando disminución de la sensibilidad, aumento de la temperatura y tendencia a la aparición de llagas, infecciones o úlceras (Figura 4), que son de difícil curación. Estas lesiones sin un tratamiento pueden generar una infección mayor y llegar incluso a la amputación del pie [4].



Figura 4. Úlcera en el pie diabético [4]

Actualmente esta problemática es tratada por especialistas como el podólogo que se encarga de revisar los pies en busca de alguna infección que diagnosticada a tiempo se puede tratar. Las recomendaciones para los pacientes con diabetes son las siguientes [4]:

1. Revise sus pies todos los días y ante cualquier anomalía no dude en contactar con el especialista.
2. Lave sus pies todos los días porque la higiene es importante para evitar hongos o bacterias.
3. Mantenga su piel humectada y suave porque la resequeidad puede causar resquebrajamiento en la piel provocando una llaga.
4. Lime las callosidades suavemente debido a que cualquier corte en la piel puede derivar en una llaga.
5. Si es posible, mire y sienta sus pies con sus manos y si no puede hacerlo, pídale a su especialista en pies que lo haga por usted.
6. Use medias y zapatos en todo momento, los mismos ayudan a mantener la temperatura de los pies y los protege del frío y del calor.
7. Mantenga la circulación sanguínea en sus pies mediante masajes y ejercicios.

El objetivo principal del especialista es buscar el cierre completo de la llaga buscando la desaparición de la úlcera y con eso la disminución del riesgo de amputación de la extremidad. Cualquier herida en el pie puede ser la entrada de bacterias que pueden causar una infección. Además de lo indicado, el especialista realiza un estudio neuropático y vascular para determinar el grado de afección a la sensibilidad y flujo sanguíneo del pie con las pruebas indicadas en la Tabla 1.

Estudio	Descripción	Figura
Exploración de la sensibilidad o neuropatía diabética	<p>Evalúa la sensibilidad del pie tanto superficial como profunda</p> <p>Evalúa los reflejos del paciente</p>	 <p>Figura 5. Exploración vascular de los reflejos (rotuliano y aquileo) [5].</p>
Exploración vascular o vasculopatía diabética	<p>Permite apreciar el estado del flujo sanguíneo</p> <p>Emplea un instrumento llamado Doppler</p>	 <p>Figura 6. Análisis del flujo sanguíneo con el instrumento Doppler [5].</p>
Estudio barapodométrico	<p>Permite predecir la aparición de la lesión</p> <p>Detecta zonas específicas de la planta del pie que están expuestas a exceso de presión [5] Emplea plataformas de marcha o plantillas.</p>	 <p>Figura7. Plataforma Marcha [5].</p>

Tabla 1 Estudios para determinar el grado de afección a la sensibilidad y flujo sanguíneo del pie diabético.

1.3 BIOMECÁNICA DEL PIE

La biomecánica permite realizar un análisis completo del pie y ocupa métodos de física e ingeniería mecánica [6]. Los conceptos importantes son el de la masa (m), la cual consiste en la propiedad que posee un objeto para oponer resistencia al cambio de velocidad y no depende de la gravedad. Otro concepto a utilizar es la fuerza (F) que utiliza la gravedad sobre un objeto y varía su posición [6].

Para poder relacionar estos conceptos se utiliza la segunda ley de Newton, que manifiesta que “la aceleración (a) de un objeto es directamente proporcional a la fuerza que actúa sobre él y es inversamente proporcional a la masa” [6] como se indica en la siguiente ecuación:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

a partir de la cual se determina que la aceleración es la variación de velocidad por unidad de tiempo y su unidad es metros sobre segundo al cuadrado [6].

$$N = \frac{kg\ m}{s^2}$$

También se puede generar una fuerza (F) cuando existe conexión entre dos o más segmentos, como es el caso del tobillo y el pie de un individuo. La fuerza podrá mover un segmento rotándolo por el otro, fuerza también llamada momento y cuya unidad es el Nm [6], como se expresa en la siguiente ecuación:

$$M = Fx\ l$$

En donde: “l” es la distancia que se mide entre la fuerza Fx y el punto de rotación perpendicular a la línea de la fuerza. Los momentos y fuerzas aplicadas permiten conocer los comportamientos de las articulaciones en situaciones dinámicas. Para poder ejemplificar se tiene a una persona quien está parada sobre las puntas de sus pies actuando su peso sobre él, para mantener el equilibrio el momento en el tobillo deberá ser cero y al mismo tiempo actuando la fuerza muscular que produce una fuerza opuesta a la del peso [6].

Para nuestro estudio en personas con diabetes, la distribución de fuerzas es muy importante, debido a que la presión es la magnitud que se encarga de dividir esta distribución. Conociendo que la presión es la fuerza que se aplica sobre una superficie de contacto y se mide en pascales (Pa) [6], cumpliéndose la siguiente relación:

$$1Pa = 1,020 \cdot 10^{-5} kg/cm^2$$

1.4 LA MARCHA

La marcha es “un proceso de locomoción en el cual el cuerpo humano, en posición erguida, se mueve hacia adelante, siendo su peso soportado, alternativamente, por ambas piernas” [7]. Para su estudio la unidad fundamental es el ciclo de marcha que está consta de la *Fase de Apoyo* que es cuando el pie está en contacto con el piso y la *Fase de Oscilación* que es cuando el pie se no está en contacto es decir esta suspendido en el aire [7] tal como se indica en la Figura 8.

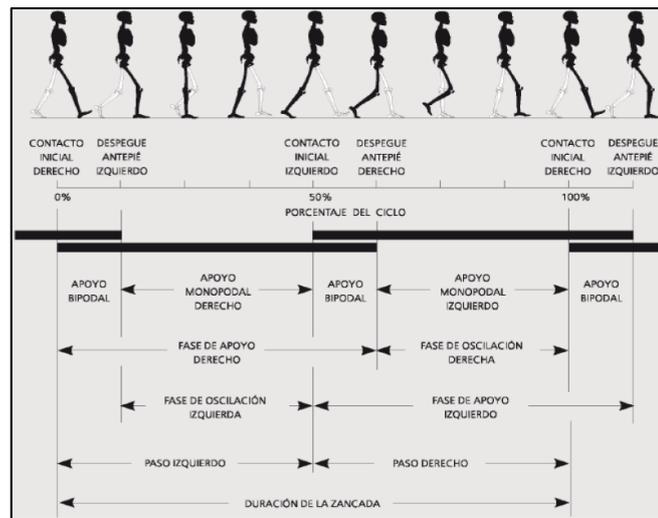


Figura 7. Fases porcentuales en el ciclo de marcha [8].

1.1.4 FASE DE APOYO

La fase de apoyo esta constituido aproximadamente por el 60 % del ciclo de marcha y puede dividirse en las siguientes sub-fases [7]:

- Primer periodo de doble apoyo:** Este período implica que en gran cantidad el peso del cuerpo recae sobre un pie, mientras el pie contralateral se encuentra oscilante. Como se observa en la Figura 7.
- Primer apoyo unipodal o periodo portante:** El miembro de referencia empieza a elevarse e inicia la fase oscilante.
- Segundo doble apoyo:** El miembro tomado como referencia se encuentra apoyado solo por el antepié en el suelo y está en ubicado posteriormente con respecto al miembro opuesto y acelerando el cuerpo hacia adelante, se convierte en el miembro propulsor o dinámico.
- Segundo apoyo unipodal o periodo oscilante:** El miembro de referencia empieza a elevarse e inicia la fase oscilante.

La fase de apoyo de manera general comienza con contacto del talón en el suelo. Al 15 % del ciclo de marcha, el antepié realiza contacto con el suelo generando la subfase llamada pie plano. Al 40 % del ciclo de marcha, el talón empieza a elevarse del suelo en la subfase de despegue. Al 50 % se despegan el antepié y al 60% del ciclo de marcha se finaliza la etapa de apoyo con la elevación de los dedos dando paso a la fase de oscilación [7].

1.2.4 FASE DE OSCILACIÓN

La fase de oscilación esta constituida aproximadamente por el 40% del ciclo de marcha y puede ser dividida en tres subfases [9]: inicial o aceleración, media o balance medio y final o desaceleración.

- a) ***Aceleración:*** Se caracteriza por un cambio rápido de aceleración de la pierna en análisis cuando los dedos despegan del suelo.
- b) ***Balance Medio:*** En esta sub-fase la pierna balanceada sobrepasa a la pierna opuesta con un movimiento hacia delante, debido a que esta se encuentra en la fase de apoyo.
- c) ***Desaceleración:*** Esta etapa es característica por la desaceleración de la pierna que en sub-fases anteriores se movía rápidamente debido a que se acerca el final de la fase de oscilación.

1.3.4 PARÁMETROS DEL CICLO DE LA MARCHA

Para el análisis de la marcha se emplean medidas de parámetros como la longitud, ancho de paso, ángulo de paso, velocidad de marcha y la cadencia [7].

- a. ***Longitud de paso completo:*** es la distancia total medida de talón a talón en el siguiente paso del mismo pie. Su media aproximada es 156cm por paso completo.
- b. ***Longitud de paso:*** Distancia entre el apoyo inicial de un pie y el apoyo inicial del pie opuesto, la media es 75cm.
- c. ***Ancho de paso:*** Es la separación total hay que entre ambos pies, se mide entre los puntos medios de ambos talones y su media es de 10cm.
- d. ***Ángulo del paso:*** Es la abertura total del pie con respecto al talón y mide generalmente 15°.

- e. **Cadencia:** el numero de pasos que una persona da por un tiempo determinado, en adultos oscila entre los 100 y los 120 pasos por minuto(ppm)
- f. **Velocidad de marcha:** Es la distancia recorrida expresada en unidad de tiempo y también puede ser calculado multiplicando la longitud de paso y la cadencia. La velocidad media en adultos es de 75 a 80 m/min.

1.4.4 PATRÓN DE PRESIÓN PLANTAR

El análisis de la presión plantar es empleado en el estudio de la marcha debido a que permite conocer la interacción del pie-suelo o pie-calzado. Sus aplicaciones van desde el estudio de los parámetros de la marcha, diagnóstico de patologías y diseño de calzado deportivo, plantillas, etc [8].

El análisis de la marcha puede ser estático y dinámico. En el análisis estático la proporción de carga soportada en las distintas zonas del pie para conocer las zonas que soportan mayor presión durante el apoyo bipodal, es la zona del talón y la zona de la cabeza de los metatarsianos [10]. Durante el apoyo estático la mayor presión se ubica en la cabeza de los metatarsianos, siendo la presión uniforme en todos, menos en el primero que soporta el doble de presión con respecto a los demás [8]. Se sabe también que la zona del pie que percibe mayor presión es el tercer metatarsiano cuando el pie tiende a ser convexo en dicha zona [8].

Los estudios realizados para el registro dinámico en pies sanos y descalzos durante la marcha dan a conocer que el talón entra en contacto primero en la fase de apoyo por su zona lateral y en esta misma fase el máximo pico de presión que es cercano al 25% se da cuando la parte del medio pie y talón se apoyan al mismo tiempo las cabezas de los metatarsianos realizan contacto con el suelo, en este instante coincide la fase de recepción de la carga del pie [10].

La literatura indica que la velocidad del centro de presión durante el apoyo inicial que realiza el talón es muy alta, dando a conocer la transferencia de carga y disminución posterior de aceleración pasando la zona del medio pie [10]. En esta zona la presión es muy baja por lo que la fuerza ejercida debido al peso corporal se transmite desde la zona del talón hacia adelante, el tiempo aproximado entre el apoyo del talón y el medio pie llegaría al 50% de la fase de apoyo [10].

La zona delantera del pie está expuesta a cambios y variaciones debido a que el 40% del pico de presión en la fase de apoyo se da en la zona delantera, en donde existe una disminución de velocidad significativa [10]. Esta disminución se debe al soporte de carga realizado por los metatarsianos pudiendo llegar a la máxima presión del antepié es decir el 80% de la fase total de apoyo [10]. En la Tabla 2 se muestran los datos de presión plantar durante tres condiciones de marcha obtenidos en un estudio con sujetos saludables [10].

PRESIONES MÁXIMAS DURANTE LA MARCHA (KPa)			
Área del pie	Marcha lenta	Marcha Normal	Marcha Rápida
Talón	293±79	358±87	493±128
Medio pie	66±52	57±44	44±41
Cabeza 1° metatarsiano	265±138	299±137	362±165
Cabezas 2° y 3° metatarsiano	316±96	343±133	355±152
Dedo grueso	280±110	317±116	431±162

Tabla 2. Presiones máximas (KPa) en zonas del pie a diferentes velocidades [8]

Antes del 20% de la fase de apoyo el talón presenta el máximo pico; luego el antepié inicia la contribución al soporte de carga en el otro 25% de la fase de apoyo [9]. Cuando se acerca al 50% de la fase de apoyo el mayor pico de carga se encuentra en la cabeza de los metatarsianos y una pequeña parte en los dedos [9]. Luego al llegar al 80% de la fase alcanzado la presión máxima en las cabezas de los metatarsianos y en el 85% de la fase los dedos pulgar e índice alcanzan el pico de presión máxima [9]. En la Figura 9 se muestra la distribución de presiones plantares durante las fases de la marcha captadas por una plataforma de presión [8].

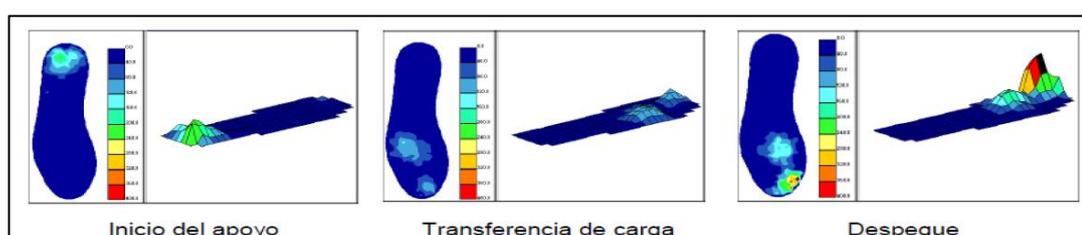


Figura 8. Distribución de presiones durante las fases de la marcha [8].

1.5 PLANTILLAS INSTRUMENTADAS PARA MEDIR PRESIÓN

Las plantillas instrumentadas permiten adquirir información de la presión ejercida que puede ser transmitida y procesada para identificar las zonas con mayor presión y realizar gráficas del modelo de marcha. Éstas usan un conjunto de sensores

de presión (capacitivos si deseas obtener medidas de alta precisión) para obtener la medida de la distribución de presiones ejercidas durante la pisada de forma continua y en cualquier entorno y terreno como se indica en la Figura 10 [11].

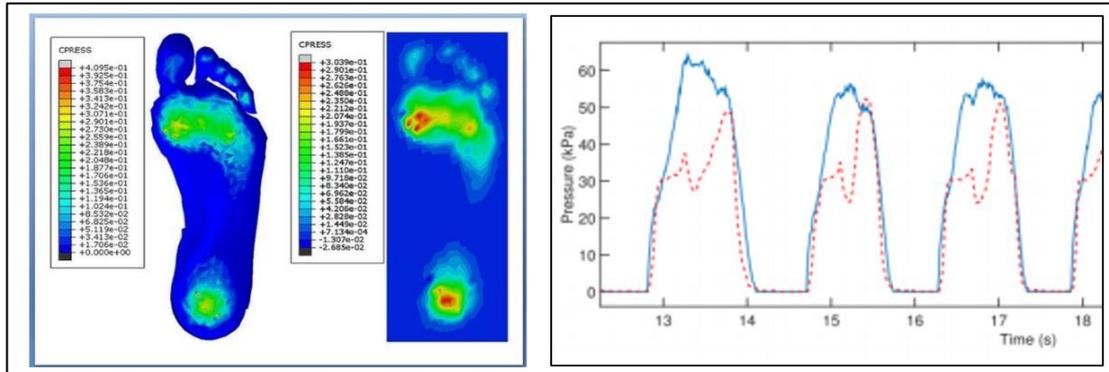


Figura 9. Distribución de presión en la planta del pie [11].

También se emplean dispositivos FSR (Resistencia Sensible a la Fuerza) que son resistencias de medición que deben emplearse en una configuración de divisor de voltaje [12] y distribuirse de tal manera que permitan obtener la presión en la planta del pie como se muestra en la Figura 11 las zonas anatómicas del pie para disposición de los sensores [2]. Existen tamaños personalizados que van desde 5 mm hasta 600 mm.

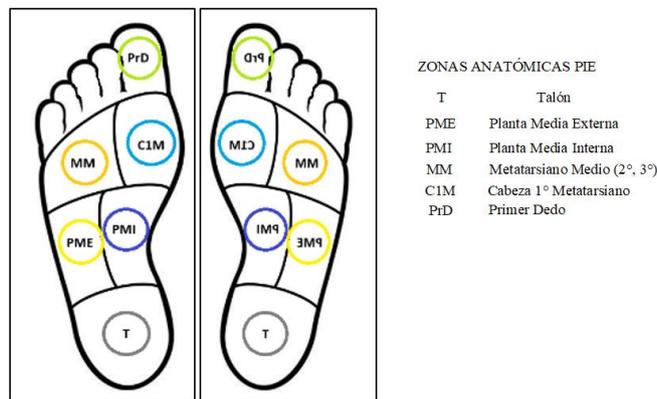


Figura 10. Distribución de los sensores en la región de la planta del pie [2].

1.1.5 SENSOR FLEXIFORCE A401

Uno de los sensores de presión más empleados y que fueron empleados en este proyecto es el sensor FlexiForce A401. Este es un sensor de fuerza piezorresistivo estándar con un factor de repetibilidad de 2,5% al 80% de fuerza aplicada en el sensor. Se puede usar para medición y creación de prototipos basados

en mediciones de presión. Estos sensores tienen una capacidad de detección hasta 111 N o de 0 a 25 lb con un área de presión 25,4 mm [13]. En la Figura 12 se muestra la apariencia del sensor y su curva característica. La resistencia típica de este sensor sin carga es $> 1M\Omega$ y su máxima corriente recomendada es de 2,5mA [13].

Para garantizar el rango en escala de voltaje es importante contar con una resistencia de retroalimentación que permite medir fuerzas pequeñas y mejorar la sensibilidad del sensor.

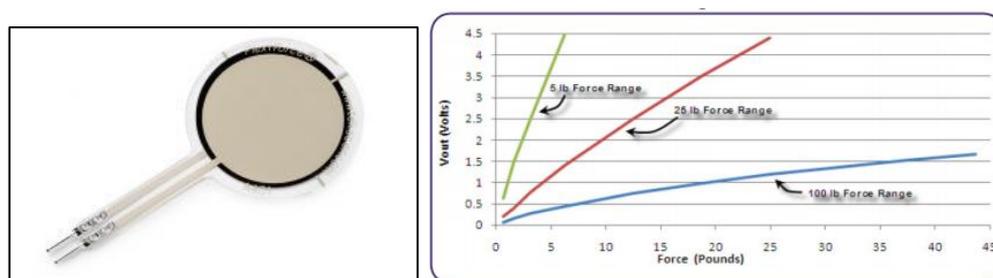


Figura 11. Sensor A401 y su curva de fuerza característica [13].

En la Tabla 3 se indican las características típicas de funcionamiento de este sensor comúnmente empleado para aplicaciones biomédicas.

	Actuación Típicas	Condiciones de Evaluación
Linealidad (Error)	$< \pm 3\%$ de toda su escala	Línea obtenida desde el 0 al 50% de carga
Repetibilidad	$< \pm 2.5\%$	80% de toda la fuerza aplicada
Histéresis	$< 4.5\%$ de toda su escala	80% de toda la fuerza aplicada
Derivada	5% por la escala logarítmica de tiempo	Constante de carga de 111N(25lb)
Tiempo de respuesta	$-5\mu sec$	Fuerza de impacto, salida grabada en osciloscopio
Temperatura de operación	$-40^{\circ}C$ a $60^{\circ}C$	Fuentes de calor por convección y conducción
Criterio de aceptación	$\pm 40\%$ de variación entre sensor y sensor	Salidas considerando una prueba de presión
Durabilidad	≥ 3 millones de interacciones	Carga perpendicular, temperatura ambiente, 22N (5lb)
Sensibilidad de temperatura	$0.36\% / ^{\circ}C$	Calentamiento conductivo

Tabla 3. Características típicas de funcionamiento de sensor A401 [12].

1.2.5 MÓDULO HC05

El Bluetooth es una estándar para entablar una comunicación inalámbrica personal, ideal para transmisión de voz o de datos en una banda de radio frecuencia libre ISM y opera en los 2.4 GHz. Unos de los dispositivos que emplean este tipo de comunicación es el modulo HC-05 (ver Figura 12) [14].

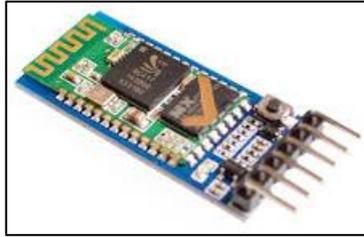


Figura 12. Módulo bluetooth HC-05 [14]

1.3.5 SOFTWARE ARDUINO

Es un dispositivo con una plataforma de hardware libre, diseñado para una fácil implementación en proyectos de electrónica multidisciplinarios [15]. Arduino es una placa donde podemos conectar diversos periféricos a las entradas como en las salidas puede ser programado dentro de varias plataformas como Windows, macOS y GNU/Linux. Existen varios modelos de placas Arduino (ver Figura 14) la mayoría de ellos comparten características comunes tanto en librerías como en software [16].



Figura 13. Modelos de placas Arduino [16]

El microcontrolador incorporado en estas placas es el ATmega328P de la marca Atmel, que cuenta con tecnología que permite bajo consumo energético. El Arduino Nano que se muestra en la Figura 15 posee este microcontrolador y dispone de un chip CH340G como convertor serial a USB, un voltaje de operación de 5V, una alimentación de 7 a 12 V, 14 I/O Digitales (6 son PWM), Memoria Flash de 32 KB, EPROM de 1KB y una frecuencia de trabajo de 16MHz [17], [18].

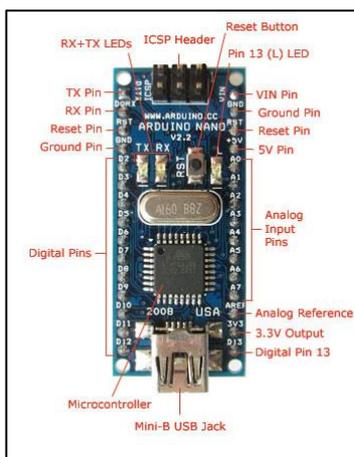


Figura 14. Arduino Nano [18].

1.4.5 MPU6050

El MPU6050 es un módulo como se indica en la Figura 15, es un dispositivo de medición inercial de 6 grados de libertad que combina tanto un giroscopio como un acelerómetro de 3 ejes cada uno, por lo que es posible medir velocidad angular y aceleración en los 3 ejes [19].

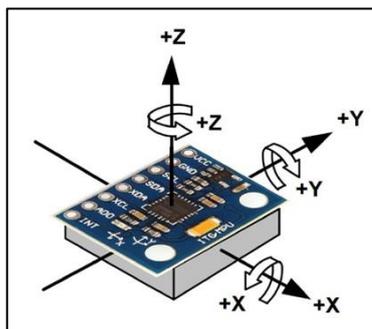


Figura 15. Direcciones de los ejes en módulo MPU6050 [19].

La comunicación del módulo con los microcontroladores es por I2C, los pines SCL y SDA. [19].

Se puede trabajar en dos direcciones I2C como se indica en la Tabla 4.

Pin AD0	Dirección I2C
AD0 = HIGH (5V)	0X69
AD0 = LOW (GND O NC)	0X68

Tabla 4. Direcciones I2C para modulo MPU6050 [19].

El pin AD0 internamente cuenta con una resistencia puesta a GND, por lo que si no se conecta este pin la dirección por defecto será de 0x68.

El MPU6050 cuenta también con rangos de lecturas los cuales estarán configurados por defecto y son los indicados en la Tabla 5.

Variable	Valor mínimo	Valor central	Valor máximo
Lectura MPU6050	-32768	0	-32767
Aceleración	-2g	0g	+2g
Velocidad Angular	-250°/s	0°/s	+250°/s

Tabla 5. Rango de lectura del MPU6050 [19]

Para poder escalar estos valores a datos en unidades del sistema internacional solo se tendrá que ocupar ecuaciones sencillas que dependerán de la gravedad para obtener valores de aceleración o velocidad angular [19].

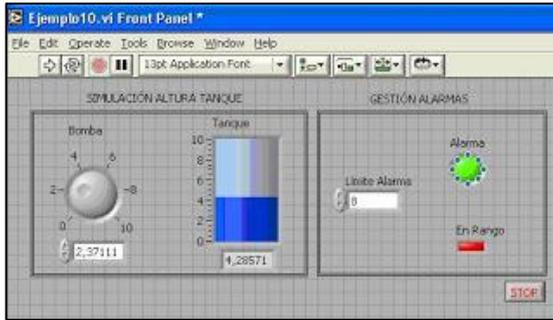
1.5.5 SOFTWARE LABVIEW

Este es un software con el cual se puede realizar pruebas, medidas y controles con acceso rápido a hardware y datos. Este será el empleado en este trabajo debido a que permite realizar el procesamiento de datos y la visualización de estos, debido a las características que posee [20].

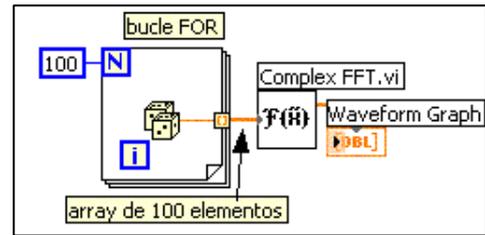
Este software ofrece un tipo de programación gráfico que permite visualizar cada sección de la aplicación diseñada, incluyendo configuraciones de hardware y datos [20].

El uso de este software incluye dos partes, la una llamada “Panel Frontal” y el “Diagrama de Bloques”.

El panel frontal, se utiliza para interactuar cuando se ejecuta el programa. En este panel se determinan los controles de entrada como botones y los indicadores de salidas como gráficas, como se indica en la Figura 17 (a) [21]. El diagrama de bloques contiene el programa en donde se define como funcionara el proyecto a realizar. Aquí se ubican iconos que cumplen una función determinada y se interconectan como se muestra en la Figura 17 (b) [21].



(a)



(b)

Figura 16. Ejemplo paneles de LabVIEW. (a) Panel Frontal, (b) Diagrama de bloques [21].

1.6.5 SOFTWARE AUTODESK INVENTOR

Es un software de CAD 3D (ver Figura 18) con el cual se pueden realizar diseños profesionales en ingeniería de productos. Este software trabaja mediante una combinación de capacidades de diseño paramétrico, directo, de formas libres y basado en reglas [22].



Figura 17. Diseño 3D en Autodesk Inventor [22]

Este software en el presente proyecto se emplea para diseñar el contenedor de circuitos de adquisición y transmisión.

1.6 EQUIPOS PARA ANALIZAR LA MARCHA

Existen varios equipos que se utilizan para realizar análisis de marcha pudiendo destacar las plataformas de presión y plantillas instrumentadas.

1.1.6 PLATAFORMA DE PRESIONES PEDISTAR



Figura 18. *Plataforma Pedistar*, precio \$3757 [23]

Es una plataforma de presiones para el análisis biomecánico de la marcha en 3D (ver Figura 19) de 45 cm de ancho, 57,5 cm de alto, 4 cm de profundidad y un peso de 2Kg. Este tipo de plataforma permite realizar estudios estáticos, posturológicos y dinámicos.

En el análisis estático se evalúan la posición del punto de gravedad, la presión máxima y media en zonas como el antepié y el retropié. A partir de la visualización en 3D es posible realizar estudios estabilométricos.

1.2.6 PLATAFORMA DINASCAN

Esta plataforma puede realizar el estudio dinamométrico durante la marcha de un individuo como se indica en la Figura 20 [24]. Los usos más frecuentes de esta plataforma son el análisis funcional de la marcha normal y patológica, la valoración de discapacidad y su evolución. Sirve como herramienta para la adecuación de ayudas técnicas, órtesis y exoprótesis, la valoración de equilibrio, del daño corporal e incapacidad laboral. Es posible realizar también el análisis de movimientos deportivos y prevenir de lesiones mejorando el rendimiento. Aporta al diseño y calificación de calzado deportivo como de calle [25].



Figura 19. Plataforma dinamométrica Dinascan [24].

Las especificaciones técnicas de dos tipos de plataforma Dinascan se muestran en la Tabla 6.

Parámetros	Dinascan P600	Dinascan P800
Área activa	600 mm x 370 mm	800 mm x 800 mm
Altura	100 mm	100 mm
Peso	25 Kg	65 Kg
Rango de medida en Fuerzas verticales	4500 N	15000 N
Rango de medida en Fuerzas horizontales	±750 N	±2000 N
Rango de calibración en Fuerzas verticales	2000 N	2000 N
Rango de calibración en Fuerzas horizontales	±400 N	±400 N
Incertidumbre en Fuerzas verticales	±10 N	±10 N
Incertidumbre en Fuerzas horizontales	±25 N	±25 N
Exactitud y repetibilidad en el cálculo del centro de presiones. Rango 0 – 40 mm: ±1mm.	--	--
Exactitud y repetibilidad en el cálculo del centro de presiones. Rango 40 – 200 mm: ±2mm.	--	--

Tabla 6. Características las plataformas Dinascan P600 y P800 [25].

1.7 PLANTILLAS INSTRUMENTADAS DISPONIBLES EN EL MERCADO

1.7.1 SISTEMAS DE SENSORES DE FUERZA NOVEL

Este tipo de plantilla (ver la Figura 21) emplea sensores de presión capacitivos de alta precisión que permiten obtener la distribución de presión en el pie de manera estática o dinámicas. Los datos pueden observarse en tiempo real mediante fibra óptica o bluetooth y pueden ser almacenados en una memoria SD. Esta plantilla incluye un software para el análisis en 2D, 3D e isobárico. Permite ver los datos numéricos de cada sensor, la línea de desplazamiento del centro de presiones, la superficie y el tiempo de contacto [26].



Figura 20. Plantilla de fuerza NOVEL [26].

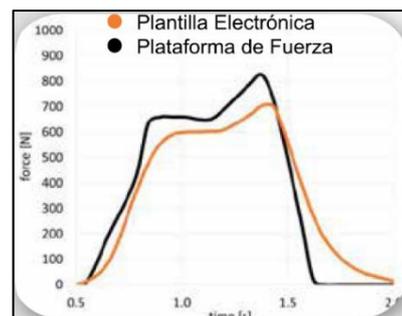
1.7.2 PLANTILLAS ELECTRÓNICAS PARA ORTOPEDIA Y REHABILITACION MOTICON

Este es un sistema de plantillas que mide la distribución de presiones en las zonas plantares, aceleración del pie y trayectoria de centro de gravedad de forma simultánea. Estas plantillas tienen sincronización con video, son livianas, con sistemas inalámbrico, delgadas y robustas [27]. Entre los datos que ofrece la plantilla Moticon están: la distribución de la presión del pie representada en una escala termográfica, el centro de presión representa la trayectoria la cual tendrá durante el apoyo del pie, la fuerza de reacción del pie durante el apoyo y la aceleración que permite ver un vector de aceleración de cada pie durante el movimiento [27]. Las especificaciones para su funcionalidad inalámbrica son una frecuencia de muestreo de los sensores de 5, 10, 25 ,50 Hz, la latencia ANT:0.18s y un rango de 2m a 5m.

En la Figura 22 (a) se muestra la apariencia de estas plantillas y en la Figura 22 (b) se presenta el gráfico de curva de fuerzas comparando la plantilla electrónica con los datos de una plataforma de fuerza [27].



(a)



(b)

Figura 21. (a) *Plantillas electrónicas Moticon; (b) curva de fuerza obtenida por la plantilla electrónica Moticon [27].*

1.7.3 BIOFOOT

Este sistema cuenta con cinco plantillas instrumentadas como se muestra en la Figura 23, de diversas tallas. Posee un módulo transmisor, una tarjeta de recepción y el software específico del dispositivo [24].



Figura 22. *Plantilla instrumentada Biofoot [24].*

Cada plantilla cuenta con 64 sensores distribuidos de tal forma que la mayor cantidad de sensores se encuentre en zonas de mayor presión. Esta permite su uso en ambos pies y su vida útil es de aproximadamente 3000 pasos, pudiendo ser utilizadas a pesar del daño de algún sensor. El rango de medición de estas plantillas es hasta 1200 kPa con una resolución de 0,1 kPa y cada sistema cuenta con un fichero de calibración para poder ser utilizado en cada plantilla nueva.

El software del sistema permite obtener un mapa numérico de presiones y presiones máximas, un mapa tridimensional con escala de grises, mapa de isobaras y una tabla de parámetros calculados por zonas [24]. Se puede obtener también la posición y trayectoria del baricentro y es posible visualizar el mapa de presiones en tiempo real. En la Figura 24 se muestra la gráfica de la presión plantar durante la marcha que se visualiza en el software Biofoot.

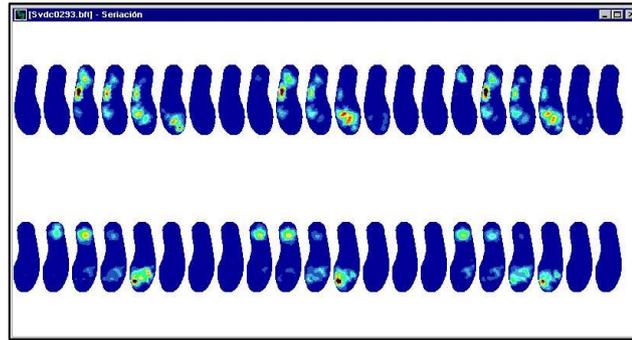


Figura 23. *Software Biofoot* [24].

1.8 PRUEBAS PARA ANÁLISIS DE PRESIÓN PLANTAR

1.8.1 TEST DE APOYO ESTÁTICO

Este test consiste permite visualizar y comprobar si las presiones ejercidas por un sujeto de pie son correctas o tienden a ser anómalas o con daños en su patrón de presión. Consiste en adquirir la información de presión cuando el sujeto se encuentra estático por un lapso de 30 segundos [11].

1.8.2 TEST DE VELOCIDAD DE MARCHA

Con este test es posible obtener parámetros de marcha como longitud de paso, ángulo de inclinación de pisada, velocidad de paso, patrón de presión y patrón de marcha. Un individuo tiene que realizar una marcha, empezando de manera estática en un punto fijo y luego caminar a velocidad normal por una distancia de 10 metros.

En este test se registra el tiempo que se demora un paciente en recorrer 10 metros en línea recta, si los resultados son menores a 1m/s son predictores de problemas en personas de la tercera edad [28].

1.8.3 ESCALA DE PRESIONES

Para poder comprender las imágenes de presión obtenidas con las diversas pruebas se emplea una escala de colores y valores con respecto a la fuerza aplicada en cada uno de los sensores de las plantillas. En la Figura 25 se muestra un ejemplo de este tipo de escalas que permite visualizar las presiones en unidades de medida en kPa (Kilo Pascales) [29].



Figura 24. *Escala de colores con respecto a presiones plantares.* [29]

Se puede apreciar que en la escala existen diversos colores, siendo rojo el que indica una sobrepresión, el color azul zonas donde no hay presión y el verde una presión aceptable para el paciente [29].

CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO

El sistema de plantillas instrumentadas para la adquisición de presión plantar y parámetros de marcha orientada a la prevención de úlceras en pie diabético planteado en este proyecto se encuentra descrito en el diagrama de bloques de la Figura 26.

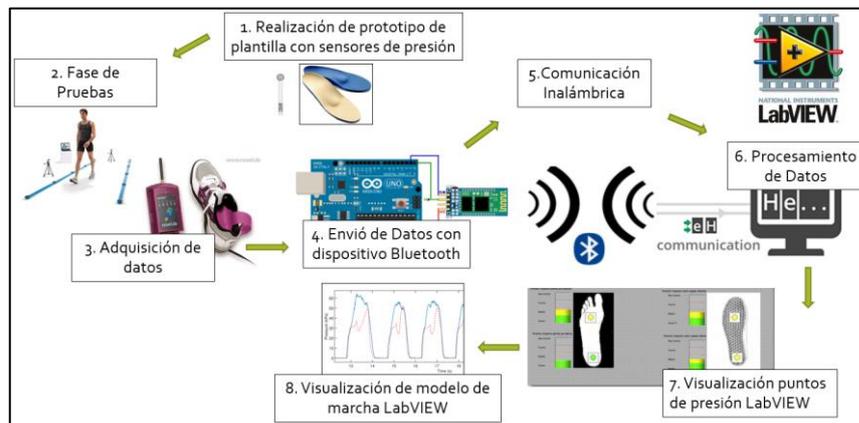


Figura 25. Diagrama de bloques del sistema de plantillas instrumentadas para la adquisición de presión plantar propuesto en este proyecto. Fuente: Autor

Para la realización del prototipo de plantilla instrumentada se ejecutaron varias etapas, como el diseño de la plantilla y su construcción física. Posteriormente el diseño de los circuitos electrónicos para adquisición y envío de datos hacia una PC para la visualización y procesamiento. Finalmente se realizaron pruebas técnicas y con sujetos para validar la plantilla. En la Figura 27 se muestra un diagrama con el detalle de los procesos para construcción, pruebas y análisis de datos de las plantillas instrumentadas.

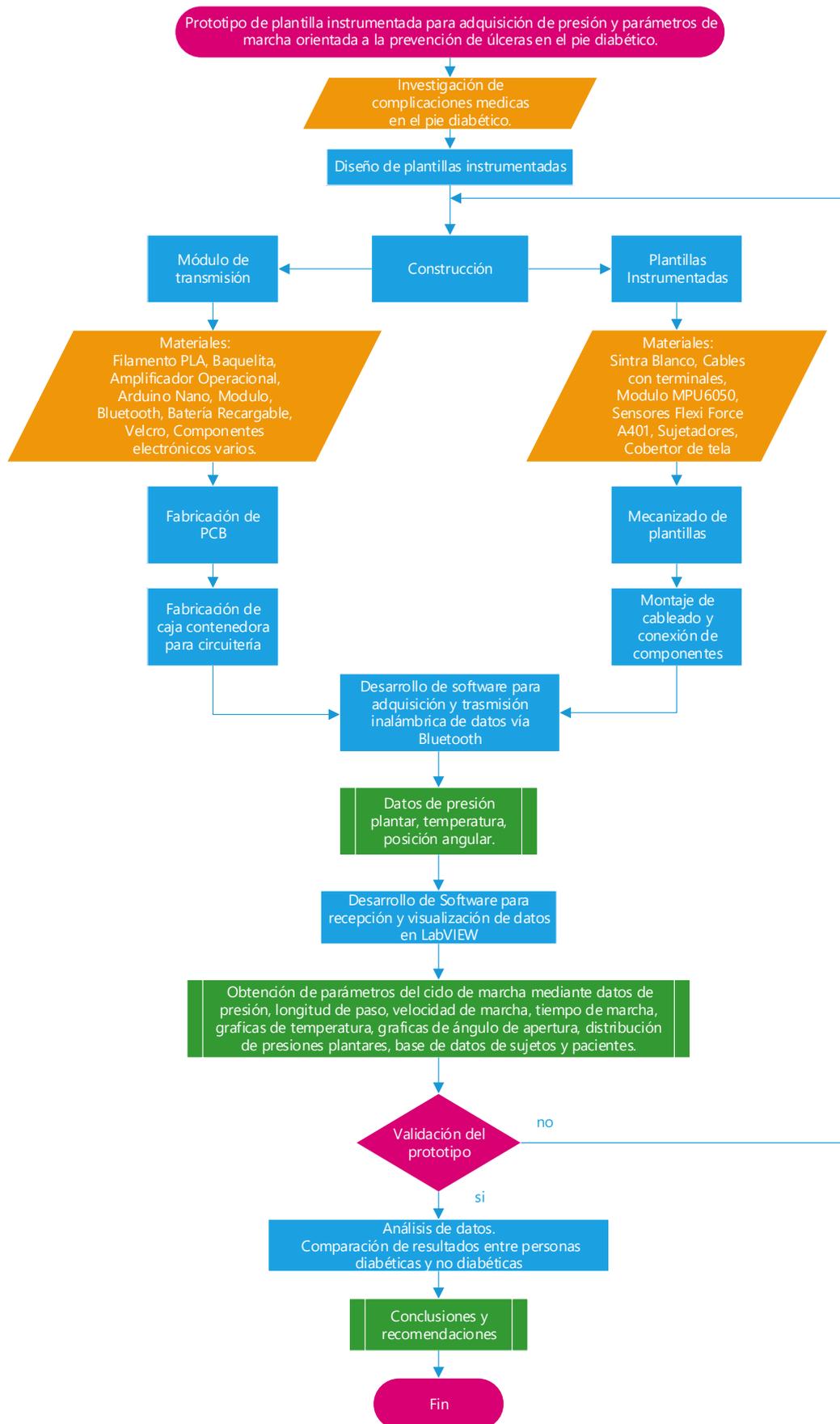


Figura 26. Diagrama de procesos para construcción, pruebas y análisis de datos en plantillas instrumentadas. Fuente: Autor.

2.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE PLANTILLAS INSTRUMENTADAS

2.1.1 CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DEL PROTOTIPO

Para el diseño de las plantillas instrumentadas se consideraron dos medidas estándar: las tallas 37 y 40 para calzado en Latinoamérica. Posteriormente se diseñó el cableado interno de las plantillas en el software AutoCAD tomando en cuenta que la superficie de la plantilla tendrá un arreglo de 6 sensores de fuerza como se muestra en la Figura 28 y un módulo MPU6050.

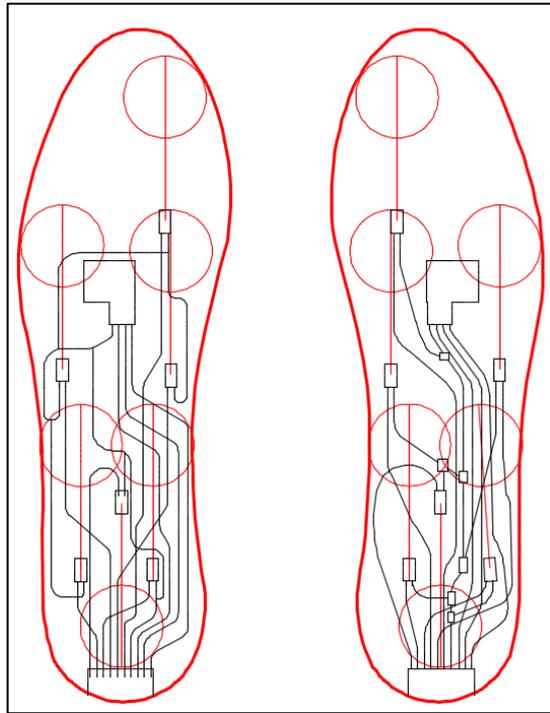


Figura 27. *Diseño del cableado interno de las plantillas de pie derecho e izquierdo. Fuente: Autor*

Posterior al diseño se realizó la construcción de las pistas dentro de las plantillas (como se indica en la Figura 29) con un taladro de alta velocidad y una máquina CNC (Control Numérico Computarizado) en el material Sintra, el cual posee características apropiadas como resistencia a la humedad, bajo peso y alta durabilidad.

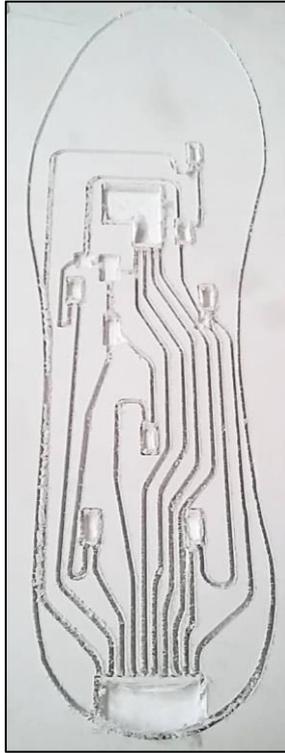


Figura 28. *Construcción de pistas dentro de la plantilla. Fuente: Autor*

2.2.1 DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE CIRCUITOS DE ADQUISICIÓN EN SOFTWARE PROTEUS Y ARDUINO

Los prototipos construidos para su comunicación cuentan con una placa electrónica la cual realiza la adquisición mediante amplificadores operacionales y se conectan a un módulo Arduino Nano para su conversión de datos analógicos a digitales. Posteriormente estos son enviados vía bluetooth a un PC para su visualización en la interfaz gráfica en el software LabVIEW.

Para que no existan confusiones al momento de realizar la conexión entre los dos módulos bluetooth con la PC (plantilla derecha e izquierda) se realizó la configuración del nombre y velocidad de transmisión de cada módulo mediante comandos AT y la interfaz Arduino. De esta manera fueron asignados los nombres “PIE_DERECHO” y “PIE_IZQUIERDO” para cada módulo con una velocidad de transmisión de 9600 baudios. En el ANEXO 1 se encuentra detalle del programa de esta etapa.

Se empleó el dispositivo Arduino Nano porque cuenta con 8 puertos analógicos que son ocupados para la adquisición de los datos de los sensores de presión y del MPU6050.

En la programación se realizó la adquisición de las 6 señales analógicas correspondientes a las señales de los sensores Flexi Force A401, mediante un amplificador operacional LM324N y LM358N. Para obtener los parámetros del MPU6050 se utilizaron 2 entradas analógicas del Arduino Nano, obteniendo tanto el ángulo de apertura dentro de la plantilla y el dato de la temperatura. La programación de esta etapa se encuentra en el ANEXO 2, en donde se indican cuáles fueron las variables utilizadas, librerías y código de programación para la obtención de los datos y posterior concatenación para envío por puerto serial utilizando un módulo bluetooth HC-05.

El circuito de adquisición y transmisión de datos fue simulado en el software Proteus 8.0 como se muestra en la Figura 30 antes de ser armado en la placa.

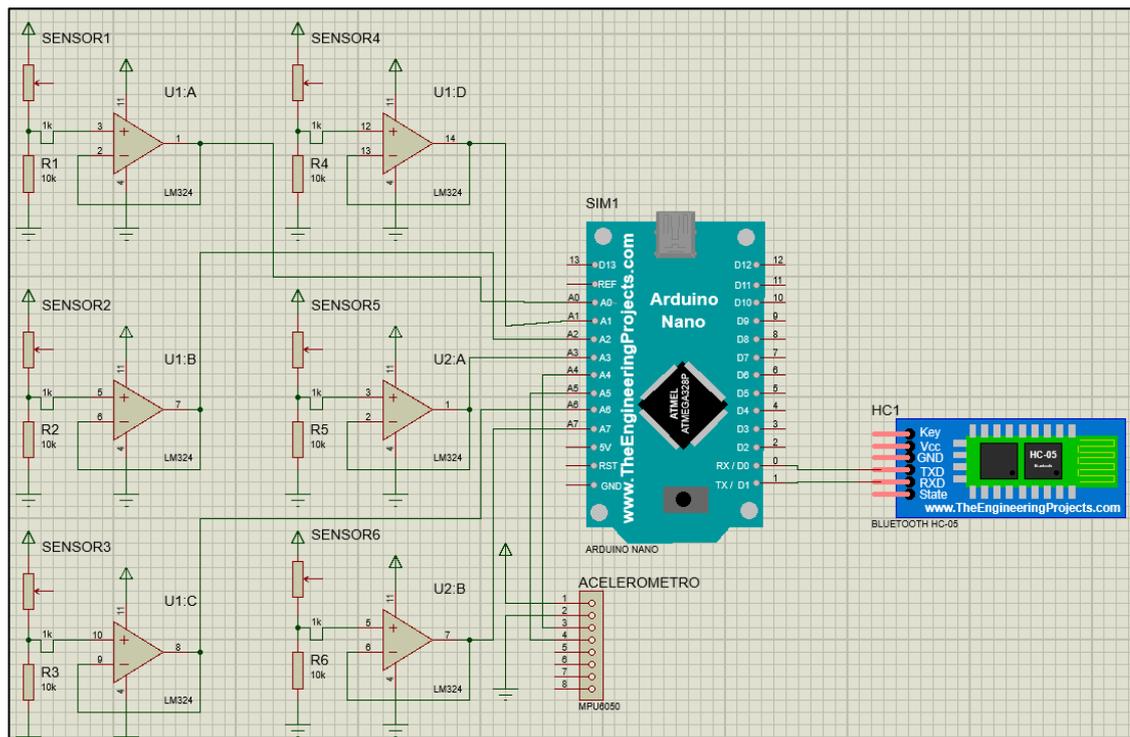


Figura 29. Simulación de circuito de adquisición de señales en Software Proteus 8.0. Fuente: Autor

2.3.1 DISEÑO Y RUTEO DE PLACA DE ADQUISICIÓN EN SOFTWARE ALTIUM DESIGNER

El diseño de las placas de adquisición y envío se realizó en el software Altium Designer. En la Figura 31 se muestra el esquemático de la placa de adquisición y de envío de datos desarrollada y en la Figura 34 el PCB de la misma. Se construyeron librerías para los componentes como el Arduino Nano, los amplificadores operacionales LM324, LM358, el socket para Bluetooth y el socket para bus de datos.

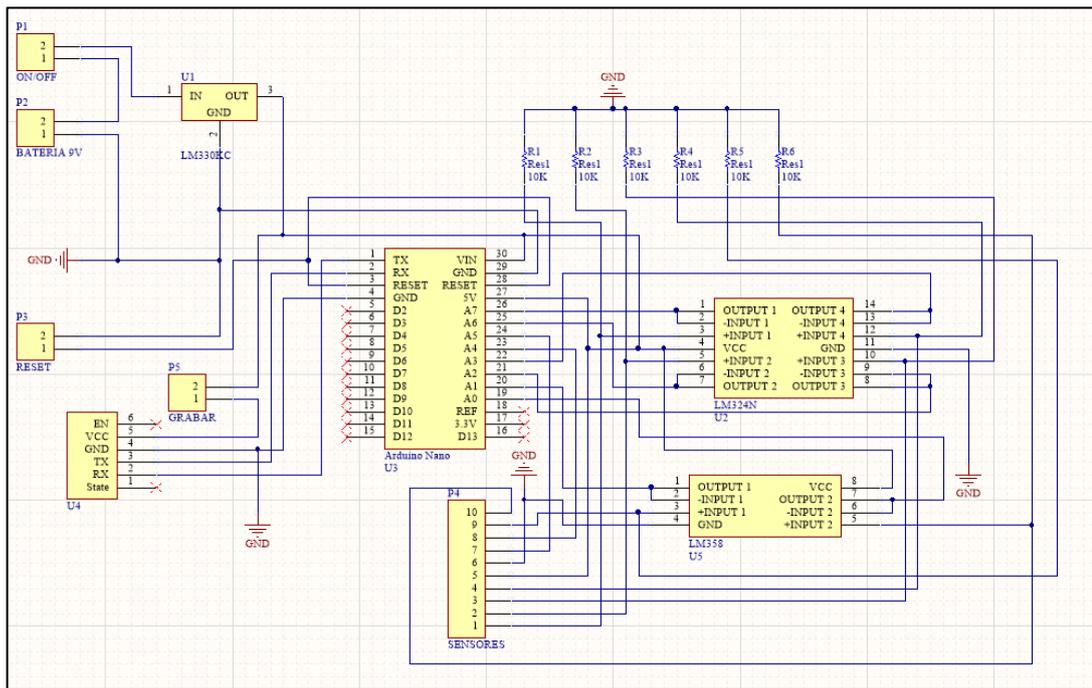


Figura 30. Diseño esquemático de placa de adquisición y envío de datos en Altium Designer 18.
Fuente: Autor

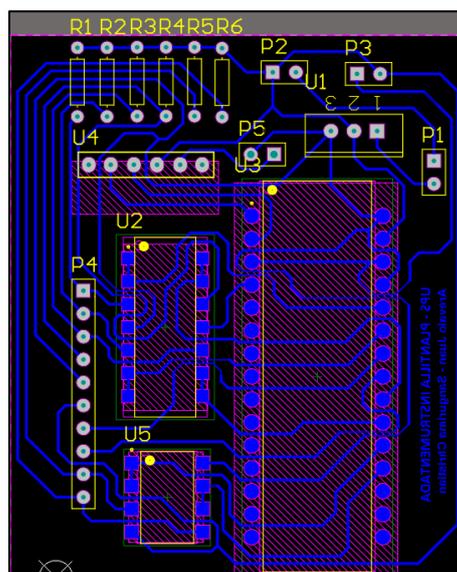


Figura 31. Diseño de PCB de placa de adquisición y envío de datos en Altium Designer 18. Fuente: Autor

La fabricación de las placas con la impresión, transferencia, perforado y soldado de componentes fue de manera manual. En la Figura 33 (a) se muestra la parte posterior de placa obtenida y en la Figura 33 (b) la vista frontal de la placa finalizada.

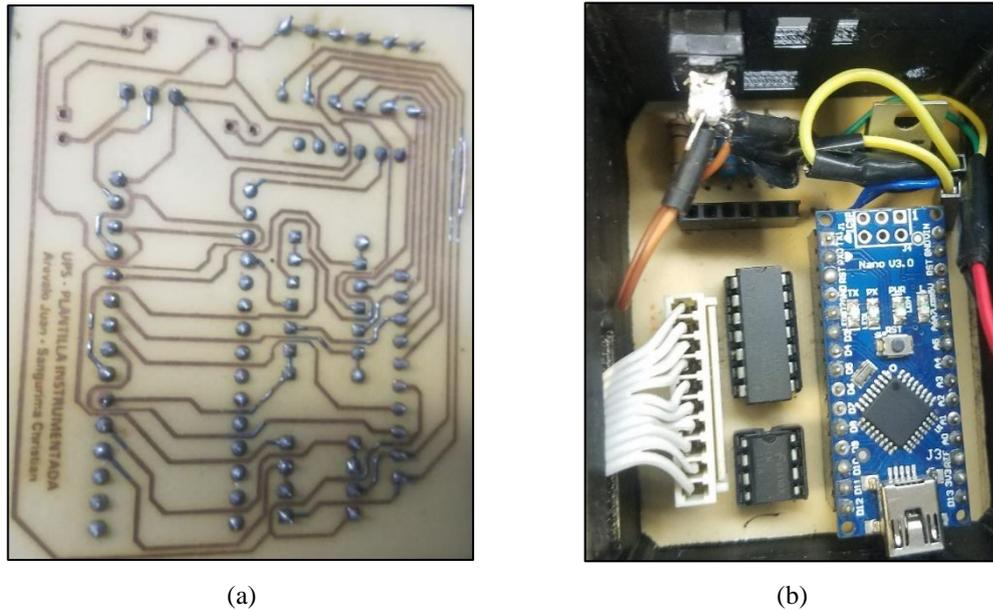


Figura 32. Placa de adquisición y envío de datos. (a) vista posterior; (b) vista frontal. Fuente: Autor

2.4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CAJA CONTENEDORA DE CIRCUITERIA EN SOFTWARE INVENTOR

Para el diseño de la caja de protección de los circuitos se consideraron el diámetro de los orificios para switches, bus de datos, indicadores y espacio para la batería. Además para determinar la forma y tamaño de la caja se analizó que es necesario una curvatura que permita que ésta se adapte a la pantorrilla y que sea de un tamaño pequeño que no incomode al usuario. Para la sujeción de la caja se consideró el uso de cintas de velcros ajustadas a la caja. Este diseño se realizó en el software inventor con una extensión “.ipt” para el ensamble de los componentes en un formato “.iam”. En la Figuras 34 (a) y (b) se encuentra el diseño final de la caja y de la tapa. La dimensión de la caja es de 72mm x 58mm x 48mm.

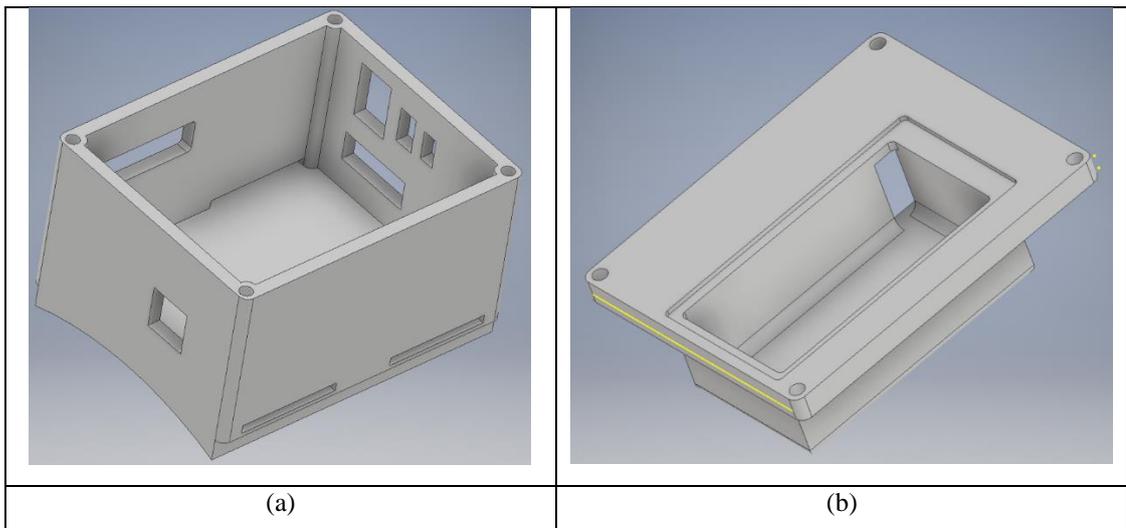


Figura 33. *Diseño de caja en software Inventor. (a) caja; (b) tapa. Fuente: Autor*

La caja se construyó con una impresora 3D utilizando filamento de ácido poliláctico (PLA) por su facilidad de impresión y excelente adherencia entre capas. Este también no genera olor y tiene un bajo índice en deformación de piezas [31]. La caja finalizada se muestra en la Figura 35.

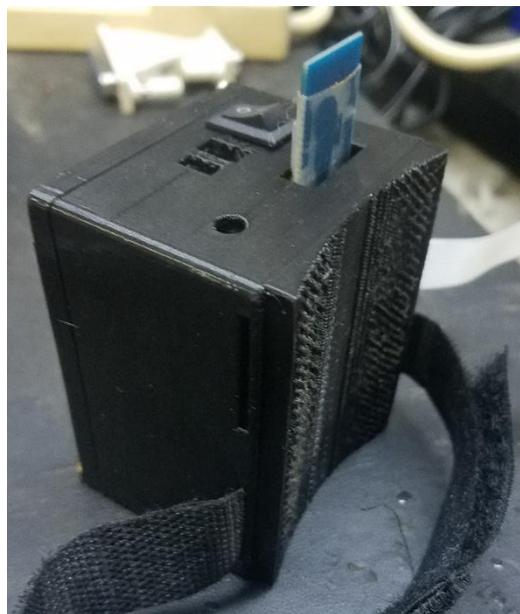


Figura 34. *Caja contenedora finalizada luego de impresión 3D. Fuente: Autor*

2.5.1 PROGRAMACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS EN SOFTWARE LABVIEW

En el software LabVIEW se obtienen los valores de presión adquiridos con los sensores. Estos valores en bits de 0 a 1024 deben ser transformados a unidades de

presión como el kilo pascal (kPa). Se obtuvo una ecuación característica de los sensores Flexi Force A401 mediante pruebas con pesos específicos aplicados a los sensores en un rango de 1kg a 10kg. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 9.

Peso (Kgf)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bits	0	186	336	420	490	540	600	630	680	707	785
Newtons	0	9,79	19,57	29,36	39,14	48,93	58,72	68,50	78,29	88,07	97,86

Tabla 7. Datos obtenidos con pruebas de pesos específicos en sensores FlexiForce A401

Estas pruebas tuvieron que ser realizadas debido a que se emplearon los amplificadores operacionales LM324 y LM358, y no el amplificador de instrumentación especificado por el fabricante. Con la tabla de datos obtenida se obtuvo en Excell una ecuación de 4to orden para representar la curva de los sensores que se muestra en la Figura 40. La ecuación obtenida de los sensores es la siguiente:

$$y = 0,0000000002x^4 - 0,000006x^3 + 0,00006x^2 + 0,041x + 0,0243$$

Esta ecuación permite obtener los datos en unidades de fuerza como el newton (N), finalmente se realiza la transformación a Kilo-Pascales para visualizar esta información en la interfaz gráfica en LabVIEW.

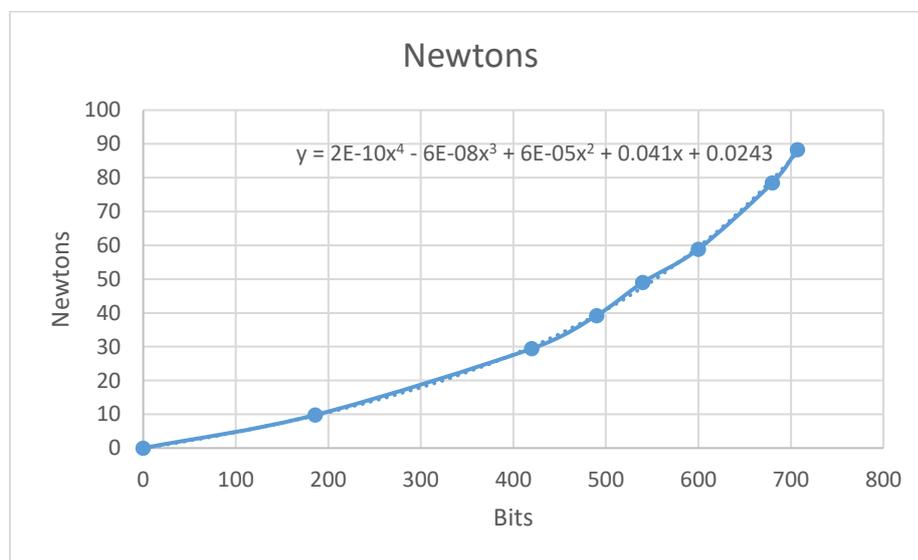


Figura 35. Curva obtenida a partir de pruebas con pesos específicos. Fuente: Autor

Los datos de la superficie de acción de Sensores Flexi Force A401 se calcula con la siguiente ecuación del área de sensado:

$$\text{Área de sensado} = r^2\pi$$

Si el diámetro del sensor es de 2,54 cm se obtiene que:

$$\text{Area de sensado} = 1,27^2\pi$$

$$\text{Área de sensado} = 5,067 \text{ cm}^2$$

Donde:

$$1 \text{ Newton/cm}^2 = 10 \text{ Kilo Pascales}$$

Con las ecuaciones obtenidas se realiza la transformación de los datos en bits a valores en kilo-pascales.

Newtons	0	9,79	19,57	29,36	39,14	48,93	58,72	68,50	78,29	88,07	97,86
Kilo pascales	0	19,3	38,62	58,02	77,35	96,69	116,04	135,37	154,72	174	193,3

Tabla 8. Escala de valores obtenidos por ecuación en unidades de Kilo-pascales

El envío y recepción de datos realizó vía bluetooth, la interfaz gráfica realizada permite obtener la información de dos puertos de comunicación creados al momento del emparejamiento entre los módulos bluetooth del prototipo y el de la PC.

Para la lectura de datos enviados vía bluetooth se ocupó el bloque Visa Serial mostrada en la Figura 37, el cual permite leer los diversos puertos COM o puerto serial.

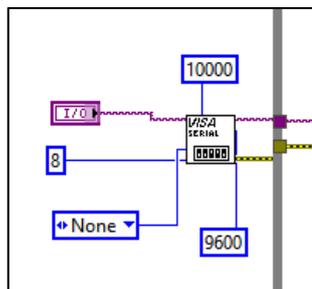


Figura 36. Componente Visa Serial con parámetros de entrada. Fuente: Autor

Los datos son recibidos a través del puerto serial y por su estructura de envío deben ser separados y procesados en las siguientes etapas. Para esto se empleó el bloque “Visa Read” asignándole un tamaño de lectura de 72 bits debido a que son 9 datos enviados sin contar con caracteres de separación que en este caso son comas.

De esta manera se logra que en la comunicación no existan lapsos en los cuales se pierden datos o que puedan llegar datos nulos.

En la siguiente fase de lectura se ocupó el bloque de “Patrón de Coincidencia” en el que se asigna cual es el carácter de separación, y se conecta en cascada varios bloques para los 9 datos que deben ser recibidos como se indica en la Figura 38.

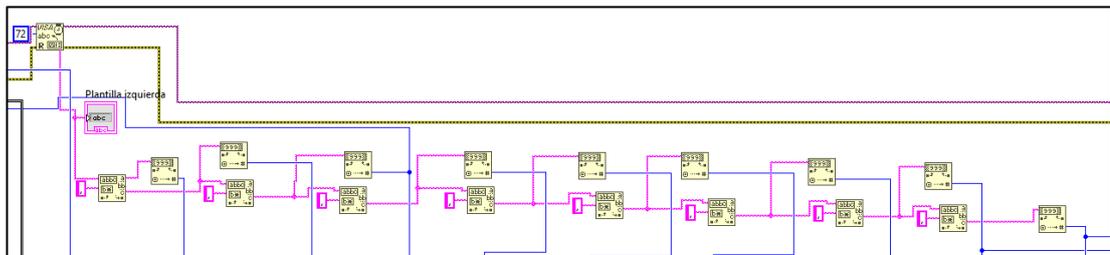


Figura 37. Componente Visa Read con parámetros de entrada. Fuente: Autor

Para la obtención de los datos de señales analógicas en unidades como el Kilopondio o Kilogramo Fuerza (KgF) se necesitó la transformación de señales, para lo cual se utilizó el bloque “Fórmula” como se muestra en la Figura 39 y se ingresó las ecuaciones de los sensores obtenidas previamente.

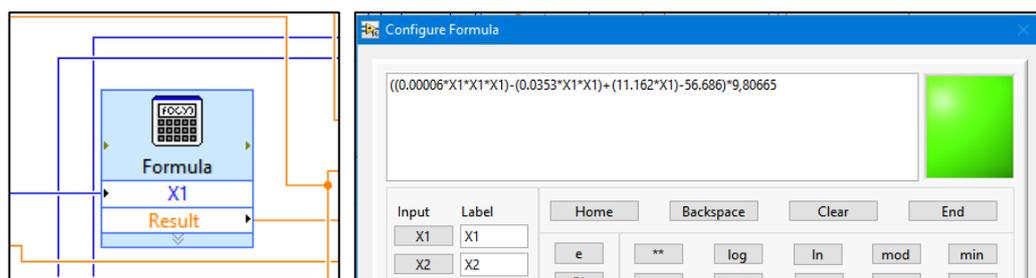


Figura 38. Componente Formula y su configuración. Fuente: Autor

Para obtener el dato del ciclo de marcha en la interfaz gráfica, se realizó una sumatoria de los datos adquiridos por los sensores de fuerza comenzando desde el sensor del talón hasta el sensor colocado en el dedo pulgar como se indica en la Figura 40. Para la visualización de la presión en cada sensor se envía las señales por canales separados para que puedan ser visualizados independientemente.

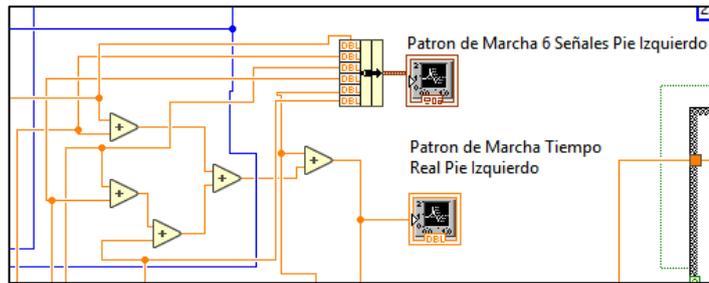


Figura 39. Sumatoria de Señales para visualización de patrón de marcha. Fuente: Autor

En la interfaz gráfica se programó una escala de colores, la cual indica en kPa el nivel de presión con el que puede estar soportando cada sensor en un momento determinado como se muestra en la Figura 41 (a). En la programación se utilizó el bloque “RGB to Color” (Figura 41 (b)) el cual mediante algunas operaciones matemáticas y comparaciones permite obtener un color específico en la gama de colores y crea que efecto de que el color asignado al indicador pueda desvanecerse mientras se comienza a visualizar un nuevo color por el cambio de presiones en la plantilla.

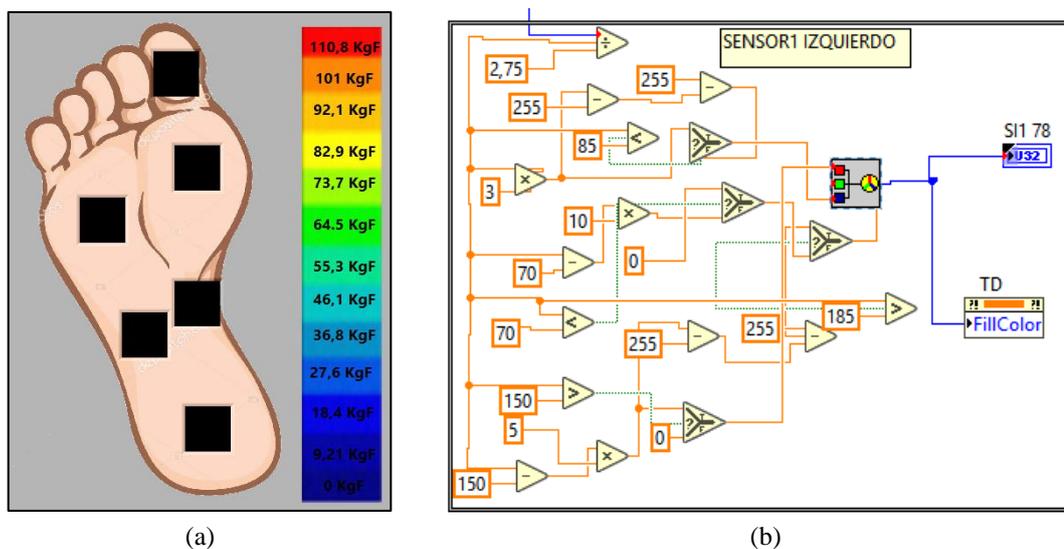


Figura 40. Programación de la gama de colores según fuerza ejercida con parámetros para el cambio de color. (a) Interfaz gráfica; (b) programación en LabView. Fuente: Autor

Entre los parámetros de la marcha obtenidos con la plantilla, se incluye el ángulo de apertura de cada una de las plantillas y el ángulo máximo en toda la marcha. Para esta etapa se utilizaron los bloques de comparación y de máximos y mínimos como se indica en la Figura 42 (a). Estos datos son almacenados en una variable local de LabVIEW para su posterior visualización en un diagrama chart Figura 42 (b).

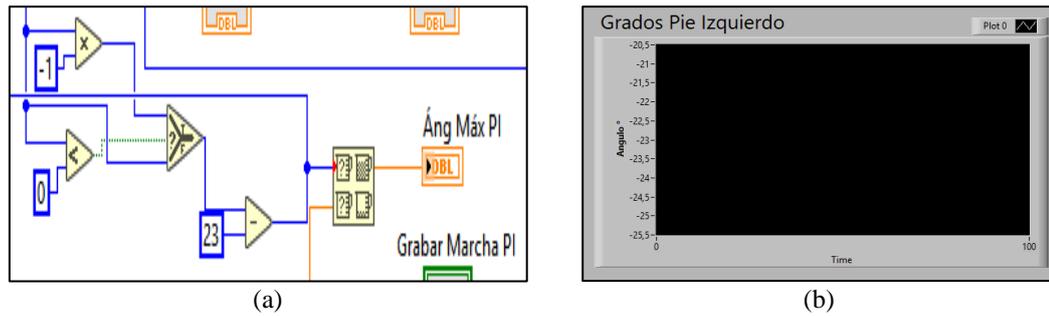


Figura 41. Visualización de cambios de posición con medición en grados. (a) programación; (b) pantalla de viasualización. Fuente: Autor

Para obtener el dato de la velocidad de la marcha se diseñó un contador de pasos para detectar los picos de la señal generada durante los ciclos de marcha que se muestra en la Figura 43. Para esto se configuró la amplitud y un umbral mediante pruebas experimentales realizadas con las plantillas instrumentadas. Estas pruebas se realizaron durante una marcha de 10 metros, se obtuvo el tiempo de duración promedio del ciclo de marcha y la velocidad.

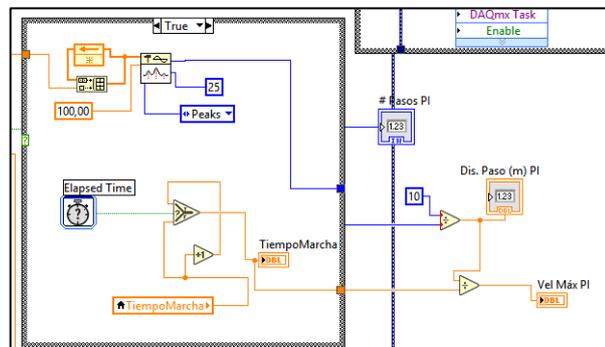


Figura 42. Bloques de contador de pasos, conteo de duración de las pruebas y operación matemática para obtención de la velocidad. Fuente: Autor

Todos los datos obtenidos durante las pruebas con las plantillas pueden ser exportados a una base de datos y almacenados con extensión TDMS (Test & Data Management Software). Esto permite que la información pueda ser procesada y visualizada en programas como Excel, Matlab o LabVIEW. Para esto se utilizó el bloque “WriteToMeasurementFile” como se indica en la Figura 44 (a), el cual permite obtener varias señales y guardarlas en el mismo archivo TDMS. A cada dato se les asignó una cabecera con el nombre del área en la que se encuentra el sensor o el parámetro obtenido. Con el bloque “SetDynamicDataAttributes” se configuró el

nombre y tipo de dato para su posterior almacenamiento en el archivo creado como se muestra en la Figura 44 (b).

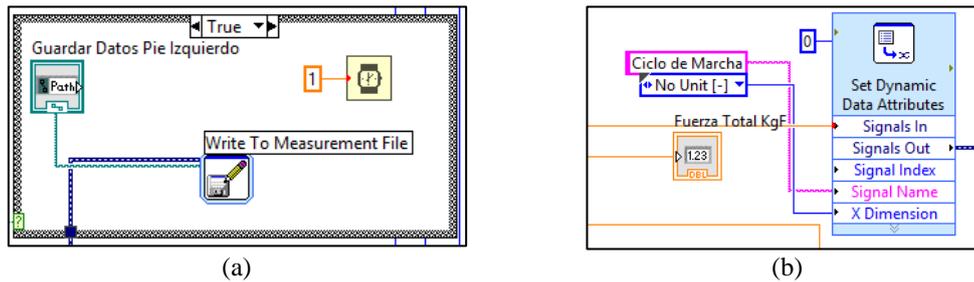


Figura 43. Bloques para etiquetado y almacenamiento de datos obtenidos. (a) Bloque *WriteToMeasurementFile*; (b) bloque *SetDynamicDataAttributes* Fuente: Autor

La interfaz gráfica cuenta con una pestaña que permita visualizar todo el ciclo de marcha durante las pruebas. Para este fin se empleó el bloque “Read From Measurement File” indicado en la Figura 45, que permite extraer los datos TMDS grabados en tiempo real y graficarlos en un “Waveform Chart” al finalizar la prueba de marcha.

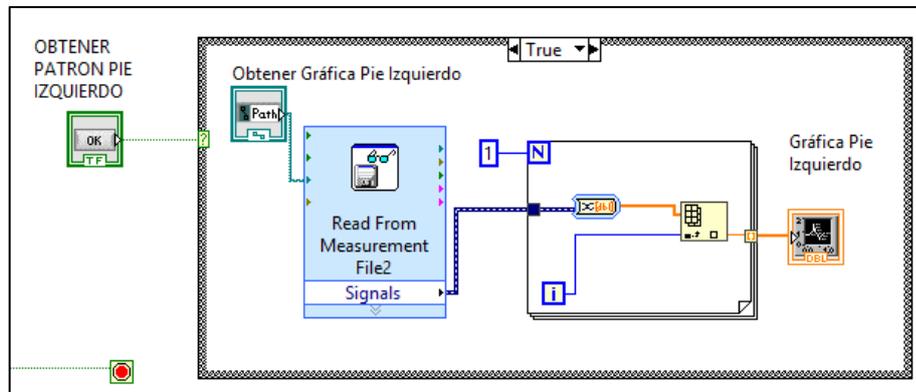


Figura 44. Bloques de obtención de datos almacenados para su visualización. Fuente: Autor

2.2 COMPROBACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA MARCHA OBTENIDOS CON EL SISTEMA DE PLANTILLAS

Para la obtención de las curvas en las diferentes fases de la marcha se realizó el análisis de los sensores por secciones del pie. En un primer momento, en el contacto inicial, solamente se analiza el sensor del talón. En una segunda etapa se analizan cuatro sensores, dos en la región del medio pie externo e interno y dos sensores de la región del 1er, 2do y 3er metatarsiano. La posición final de la marcha se analizó con el último sensor del primer dedo o dedo grueso. Todos estos datos

fueron almacenados en el mismo archivo .TDMS de cada paciente junto con otros datos como temperatura y grados de apertura del pie.

Para poder corroborar el correcto funcionamiento de las plantillas instrumentadas se tuvo que realizar diversas pruebas con respecto a cada parámetro: patrón de marcha, ángulo de apertura, longitud de paso, velocidad de marcha, temperatura, cadencia y presiones durante el ciclo de marcha.

2.1.2 PRUEBAS PARA VERIFICAR LA PRESIÓN EJERCIDA CON PROTOTIPO DE PLANTILLAS MODO ON-LINE

Los datos obtenidos mediante las pruebas de marcha con las plantillas instrumentadas fueron contrastados con tablas de datos obtenidos en la literatura, las cuales presentan valores máximos en diversas zonas del pie a diferentes velocidades. Para realizar estas pruebas, las plantillas deben estar correctamente colocadas y el sujeto recorrerá una distancia de 10 metros en línea recta como se indica en la Figura 46. Se realizarán cinco repeticiones a velocidad normal.



Figura 45. Sujeto y guía para la prueba de marcha. Fuente: Autor

Las presiones obtenidas por los sensores se deben visualizar en la interfaz creada en LabVIEW con la gama de colores para identificación de nivel de presión ejercida a cada sensor como se indica en la Figura 47. Con los datos guardados se obtienen las gráficas del ciclo de marcha con los picos máximos y mínimos de presiones ejercidas que serán comparados con los datos de la Tabla 2.

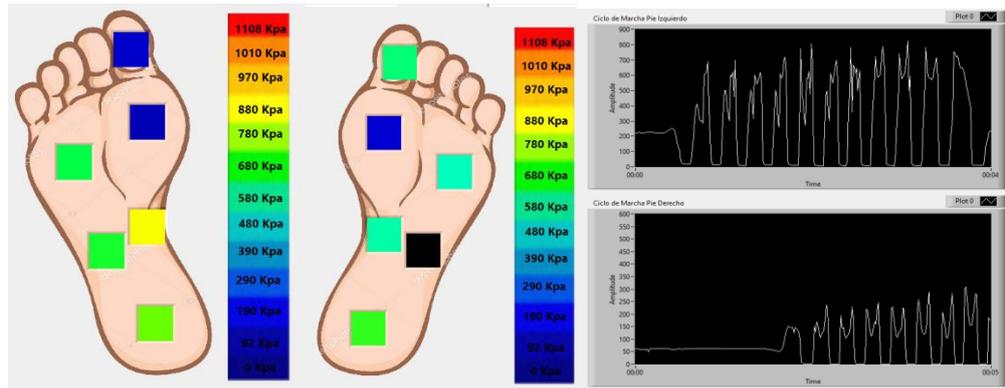


Figura 46. Presiones ejercidas sobre los sensores en ambos pies en un instante de la marcha.
Fuente: Autor.

Otra forma de corroborar la plantilla instrumentada es obtener el índice de masa corporal o IMC, el cual se puede obtener mediante la altura y el peso específico de los pacientes, lo cual podemos comparar que exista una similitud en los datos obtenidos de la plantilla, pero no exacto debido a que no es un instrumento especializado en esta área y existen otras plataformas de mayor precisión.

IMC	Nivel de peso
Menor a 18,5	Bajo peso
18,5-24,9	Normal
25-29,9	Sobrepeso
30 0 mas	Obeso

Tabla 9. Nivel de peso según IMC [32].

2.1.2 PRUEBAS PARA VERIFICAR EL ÁNGULO DE APERTURA CON PROTOTIPO DE PLANTILLAS MODO ON-LINE

Para verificar los datos del ángulo de apertura durante el ciclo de marcha obtenidos por el sistema se realizarán pruebas contrastando esta información con los datos medidos en huellas dispuestas como guía, a diversos ángulos como se indica en la Figura 48. Durante la prueba el sujeto debe caminar sobre estas huellas. En este experimento se realizan 5 repeticiones tanto para 0° como para 30°, obteniendo el ciclo de marcha y el ángulo de apertura como dato del sistema.

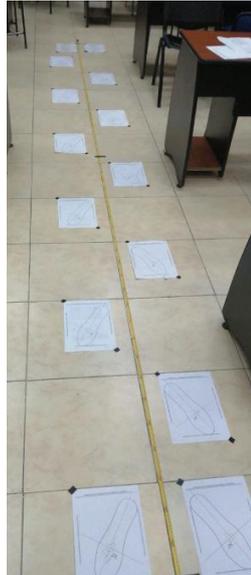


Figura 47. *Huellas dispuestas para la comprobación de la medición de ángulos.* Fuente: Autor

2.2.2 PRUEBAS PARA VERIFICAR LA LONGITUD DE PASO EN EL CICLO DE MARCHA MODO OFF-LINE

En esta prueba se obtendrá la distancia en metros de la longitud de paso del sujeto de prueba tomando en cuenta que la distancia comienza desde la posición del talón al inicio de la zancada y culmina con el asentamiento del mismo al finalizar la zancada. Se utiliza la impregnación de huellas en una superficie para realizar la comprobación de distancias y errores en cada prueba como se indica en la Figura 49.



Figura 48. *Mediciones de longitud de paso sobre arena tanto al inicio como a final de la zancada.* Fuente: Autor

Para verificar las medidas de longitud de paso visualizadas en la interfaz gráfica se necesita obtener este dato con base a la distancia recorrida por el individuo y el número de pasos que el individuo realizó durante la misma. La distancia para ambos pies se obtiene con la siguiente ecuación:

$$dpaso = \frac{distancia}{\#pasos}$$

2.3.2 PRUEBA DE VELOCIDAD DURANTE EL CICLO DE MARCHA MODO OFF-LINE

Para el cálculo de velocidad durante las diversas pruebas de marcha se debe emplear la distancia de la marcha y el tiempo en segundos que le toma al individuo recorrer esta distancia. Los datos se obtienen con un cronómetro y con datos obtenidos de la aplicación radar de velocidad como se indica en la Figura 50. Estos serán luego comparados con los obtenidos por el sistema.



Figura 49. Medios utilizados para comprobar datos de velocidad del sistema. Fuente: Autor.

2.4.2 PRUEBA PARA VALIDAR LA TEMPERATURA DURANTE LA MARCHA MODO OFF-LINE

Para validar los datos obtenidos de temperatura se realizará una comparación de datos entre los obtenidos por el MPU6050 y los datos de un sensor de temperatura DS18B20 en unidades de grados centígrados (°C).

Los datos de temperatura de la plantilla instrumentada serán guardados durante todo el ciclo de marcha para poder obtener una curva en la que se visualice los cambios con respecto al tiempo.

2.5.2 PRUEBA DE LA CADENCIA O NÚMERO DE PASOS DURANTE LA MARCHA MODO OFF-LINE

Para lograr comprobar el número de pasos obtenidos por el sistema, se realizan dos pruebas en las cuales se comparará los datos obtenidos mediante la interfaz gráfica de las plantillas instrumentadas frente a los datos obtenidos con la aplicación llamada “podómetro” la cual realiza el conteo de pasos en una distancia determinada que en este caso es de 10 metros. Para realizar una segunda comparación de los datos obtenidos se realizará el conteo de pasos de manera visual en cada prueba realizada.

2.3 PRUEBAS DEL SISTEMA CON SUJETOS NORMALES Y PACIENTES DIABÉTICOS

Posterior a esta validación técnica se realizarán pruebas con sujetos normales y con pacientes diabéticos para evaluar el desempeño del sistema y comentarios de los usuarios.

Se solicitó a los sujetos realizar una caminata con marcha normal por una distancia de 10 metros. Cada sujeto realiza 5 repeticiones, periodo durante el cual el sistema adquiere y almacenan los datos de presión.

Los datos de los sujetos que participaron en las pruebas se encuentran a continuación en la Tabla 12:

	Sujetos					
	S1	S2	S3	D1	D2	D3
Peso (lb)	114,6	161,9	146,9	155,5	125,6	137,5
Edad (años)	25	25	26	37	59	46
Estatura (m)	1,51	1,75	1,64	1,55	1,49	1,53
Género	F	M	M	M	F	F
Enfermedad	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Diabetes tipo 2	Diabetes tipo 2	Diabetes tipo 2
Tiempo de padecimiento (años)				1	19	16
Tratamiento				Insulina de 250mg	Insuficiencia renal hace 4 años, se somete a diálisis	Insuficiencia renal hace 7 meses. Trasplante de riñón, actualmente toma insulina y ha tenido hormigueo en los pies

Tabla 10. *Datos de los participantes en las pruebas de marcha con el sistema de plantillas.*

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ANÁLISIS ECONÓMICO.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de las pruebas técnicas para la verificación de la información de los parámetros de la marcha obtenida con el sistema. Además de los resultados de las pruebas realizadas a sujetos normales y con pacientes diabéticos.

3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS TÉCNICAS

3.1.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA VERIFICAR LA PRESIÓN EJERCIDA CON PROTOTIPO DE PLANTILLAS MODO ON-LINE

En las Figuras 50 y 51 se muestran los resultados de la presión obtenidos con el pie derecho e izquierdo durante la marcha utilizando las plantillas durante las pruebas de presión.

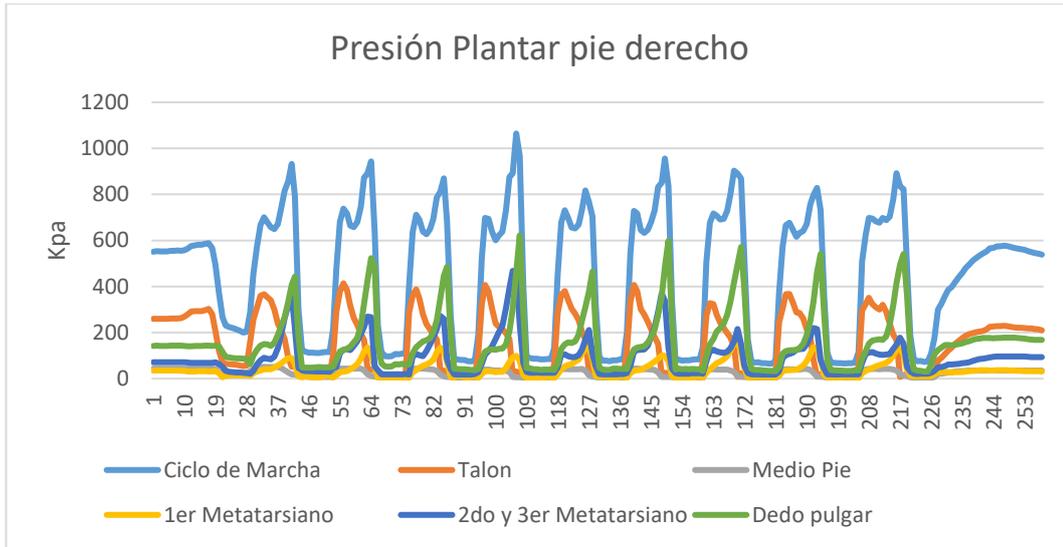


Figura 50. Señales de presión obtenidas del pie derecho en diferentes zonas plantares. Fuente: Autor.

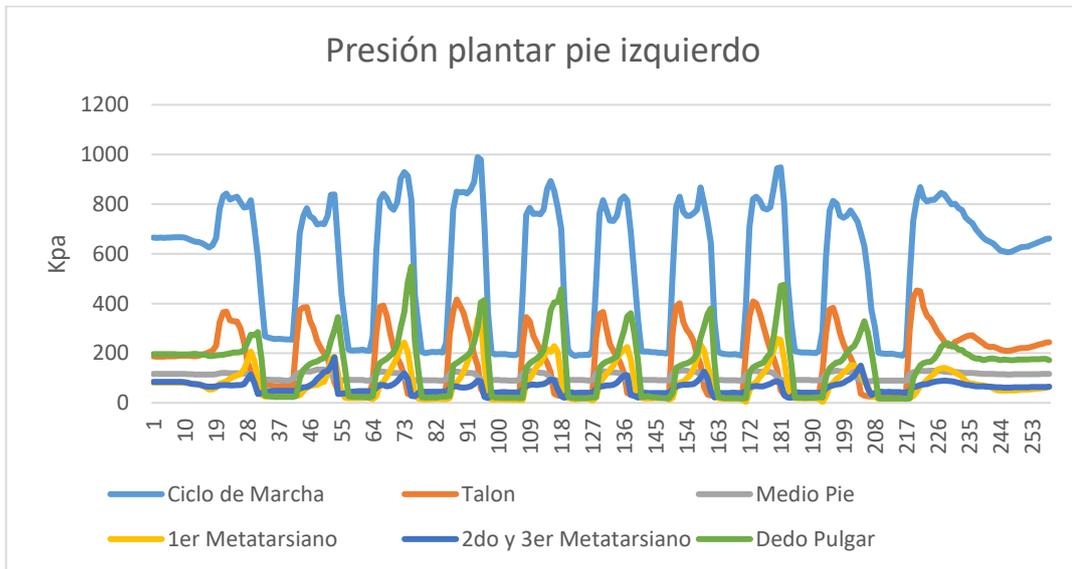


Figura 51. Señales obtenidas del pie izquierdo en diferentes zonas plantares. Fuente: Autor.

Los picos máximos obtenidos por cada señal dentro de la plantilla instrumentada son promediados de acuerdo al número de pasos que realizó el individuo durante la marcha, ver tabla 13 y 14, y los mismos serán comparados en la Tabla 15.

Zonas del pie derecho	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/ σ (Kpa)
Talón	376,70	376,92	325,92	346,22	322,55	349,66 \pm 26
Medio Pie	43,11	48,5	36,2	38,4	47,55	42,75 \pm 5
1er Metatarsiano	124,75	121,79	123,23	111,22	115,77	119,37 \pm 6
2do Metatarsiano	284,77	264,33	290,44	294,33	264	279,57 \pm 14

Dedo pulgar	532,23	445,79	516,074	529,22	508,33	506,32±35
--------------------	--------	--------	---------	--------	--------	-----------

Tabla 11. Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de sujeto 1. Fuente: Autor

Zonas del pie izquierdo	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/ σ (Kpa)
Talón	391,19	346,86	334,37	345,84	361,66	355,98±22
Medio Pie	127,4	133,44	133,2	138	140,11	134,43±5
1er Metatarsiano	221,05	206,51	194,89	236,25	236,5	219,04±18
2do Metatarsiano	116,3	139,2	155,5	160,33	178,1	149,88±23
Dedo pulgar	383,67	370,27	245,58	241,44	178,6	283,91±89

Tabla 12. Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha de sujeto 1. Fuente: Autor

Zonas del pie	Promedio pie derecho (Kpa)	Promedio pie izquierdo (Kpa)	Fuerzas a velocidad normal de marcha.
Talón	349,66	355,98	358 ± 87
Medio Pie	42,75	134,43	57 ± 44
1er Metatarsiano	119,37	219,04	299 ± 137
2do y 3er Metatarsiano	279,57	149,88	343 ± 133
Dedo pulgar	506,32	283,91	317 ± 116

Tabla 13. Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor

Como se puede observar en la tabla 15, la obtención de los valores medidos durante el ciclo de marcha a velocidad normal se encuentran dentro del rango de presiones para una persona que no padece ninguna enfermedad, otro aspecto que se puede visualizar tanto en las gráficas del ciclo de marcha como en los picos máximos obtenidos, es que el sujeto 1 presenta sobrepresiones en ciertos puntos de su pierna derecha lo que puede ocasionar dolor o molestias, lo cual ha sido constatado mediante preguntas realizadas sobre sensaciones extrañas o molestias que afecten a sus pies.

Los datos obtenidos de presión, altura y peso de los diversos sujetos de prueba se visualizan en la siguiente tabla.

Sujetos	Talla (m)	Peso (kg)	IMC	Nivel de peso	Presiones (kPa)	IMC	Nivel de peso
1	1,74	75	24,77	Normal	1254	21,41	Normal
2	1,64	66,77	24,83	Normal	1131	21,69	Normal
3	1,75	73,59	24,02	Normal	1266	21,33	Normal
4	1,51	52,09	22,84	Normal	759	17,15	Bajo peso

Tabla 14. Comparación de IMC obtenido a partir de báscula y plantillas instrumentadas. Fuente: Autor

Como se puede observar, los valores de IMC en la tabla 16 son cercanos, tanto los obtenidos mediante la báscula como con las plantillas instrumentadas. Se debe tener presente que nuestro dispositivo recibe las diversas fuerzas ejercidas por el

cuerpo de manera individual en cada sensor y estos no cubren toda la zona plantar por lo que no es posible calcular el peso exacto de la persona para una mayor presión en la obtención del índice de masa corporal. Al mismo tiempo este dispositivo indica que los diversos sujetos se encuentran en los mismos rangos de nivel de peso tanto para la báscula como para las plantillas instrumentadas.

3.2.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA VERIFICAR EL ÁNGULO DE APERTURA MODO ON-LINE

En las Figuras 52, 53, 54 y 55 se encuentran las gráficas del ciclo de marcha y la medición de ángulos de 0 y 30 grados para los pies derecho e izquierdo.

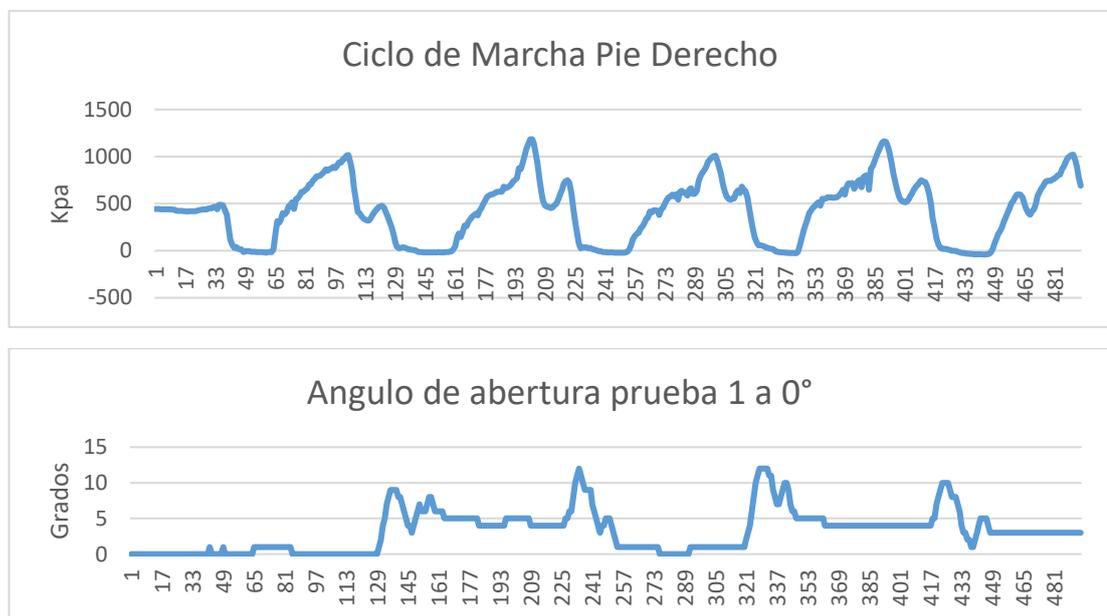


Figura 52. Ciclo de marcha y medición de ángulos a 0° pie izquierdo. Fuente: Autor





Figura 53. Ciclo de marcha y medición de ángulos a 0° pie derecho. Fuente: Autor

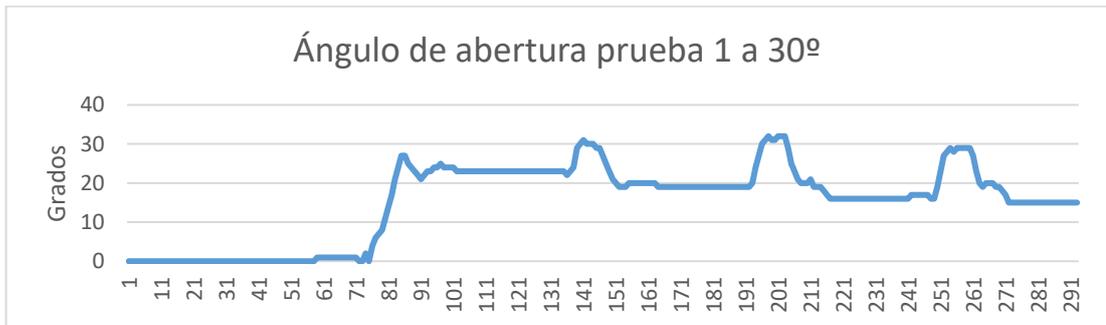


Figura 54. Ciclo de marcha y medición de ángulos a 30° pie izquierdo. Fuente: Autor

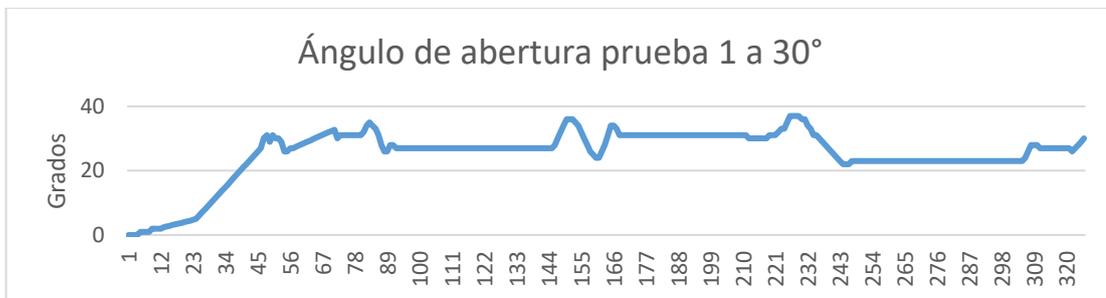


Figura 55. Ciclo de marcha y medición de ángulos a 30° en pie derecho. Fuente: Autor

Para este análisis se toman los ángulos que están dispuestos en los puntos de mayor presión que es donde se asienta el pie sobre el piso y forzosamente en la huella previamente dispuesta. Para calcular el error usamos una relación por regla de tres, en donde se usa la circunferencia como referencia y se calcula el error porcentual de un grado como se muestra a continuación:

$$360^{\circ} \rightarrow 100\%error$$

$$1^{\circ} \rightarrow x\%error$$

$$x\%error = \frac{1(100\%)}{360}$$

$$x\%error = 0,2777\%error \text{ por cada grado}$$

Este porcentaje de error se multiplica por el número de grados erróneos detectados en los puntos de mayor presión, luego se obtienen los errores promedios parcial y total como se detallan en las siguientes tablas:

Valores pico en el pie izquierdo durante la prueba de 0°

N° de prueba	Pico 1		Pico 2		Pico 3		Pico 4		Pico5		Promedio Error °
	Ángulo °	Error °									
1	-1	1	0	0	-3	3	-1	1	-1	1	1,2
2	-1	1	-1	1	0	0	-1	1	-1	1	0,8
3	0	0	-4	4	-7	7	-5	5	0	0	3,2
4	-1	1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0,4
5	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0,2
Promedio de error total %											1,16

Tabla 15. Ángulos y errores en el pie izquierdo durante la prueba de 0°. Fuente: Autor

Valores pico en el pie derecho durante la prueba de 0°

N° de prueba	Pico 1		Pico 2		Pico 3		Pico 4		Pico5		Promedio Error °
	Ángulo °	Error °									
1	0	0	5	5	0	0	4	4	3	3	2,4
2	-1	1	-1	1	-2	2	-3	3	-2	2	1,8
3	0	0	-1	1	-1	1	-1	1	-2	2	1
4	-1	1	2	2	0	0	-1	1	0	0	0,8
5	0	0	3	3	0	0	-1	1	-1	1	1
Promedio de error total %											1,4

Tabla 16. Ángulos y errores en el pie derecho durante la prueba de 0°. Fuente: Autor

Valores pico en el pie izquierdo durante la prueba de 30°

N° prueba	Pico 1		Pico 2		Pico 3		Pico 4		Pico5		Promedio Error °
	Ángulo °	Error °									
Prueba 1	29	1	30	0	30	0	30	0	31	1	0,4
Prueba 2	30	0	27	3	31	1	30	0	30	0	0,8
Prueba 3	29	1	30	0	30	0	31	1	30	0	0,4
Prueba 4	30	0	31	1	31	1	29	1	28	2	1
Prueba 5	29	1	30	0	30	0	31	1	31	1	0,6

Promedio de error total ° 0,64

Tabla 17. Ángulos y errores en el pie izquierdo durante la prueba de 30°. Fuente: Autor

Valores pico en el pie derecho durante la prueba de 0°

N° prueba	Pico 1		Pico 2		Pico 3		Pico 4		Pico5		Promedio Error °
	Ángulo °	Error °									
Prueba 1	0	0	5	5	0	0	4	4	3	3	2,4
Prueba 2	-1	1	-1	1	-2	2	-3	3	-2	2	1,8
Prueba 3	0	0	-1	1	-1	1	-1	1	-2	2	1
Prueba 4	-1	1	2	2	0	0	-1	1	0	0	0,8
Prueba 5	0	0	3	3	0	0	-1	1	-1	1	1

Promedio de error total % 1,4

Tabla 18. Ángulos y errores en el pie derecho durante la prueba de 30°. Fuente: Autor

3.3.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA PARA VERIFICAR LA LONGITUD DE PASO MODO OFF-LINE

En la Figura 56 se muestra detalles de la interfaz gráfica con la información de la longitud de paso medida por el sistema.

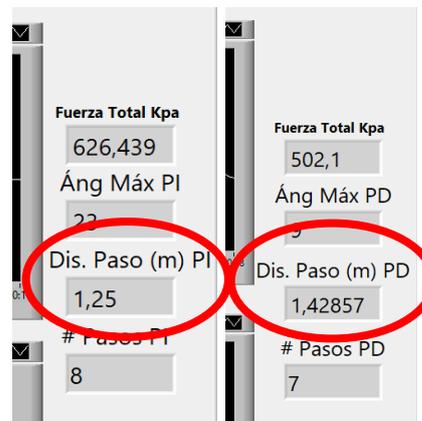


Figura 56. Distancia de paso en pie izquierdo y pie derecho obtenido en pruebas.

En la Tabla 21 se encuentra la información para la comprobación de error en longitud de paso del sistema con respecto a las huellas marcadas en la arena.

Sujeto 1	Largo de paso PI plantilla instrumentada	Largo de paso PI arena	Error absoluto en PI	Largo de paso PD plantilla instrumentada	Largo de paso PD arena	Error absoluto en PD
Prueba 1	1,42 m	1,36 m	4,22 %	1,25 m	1,30 m	4 %
Prueba 2	1,11 m	1,14 m	2,70 %	1,25 m	1,29 m	3,2 %
Prueba 3	1,25 m	1,26 m	0,8 %	1,25 m	1,27 m	1,6 %
Prueba 4	1,25 m	1,26 m	0,8 %	1,42 m	1,33 m	6,3 %
Prueba 5	1,11 m	1,17 m	5,4 %	1,25 m	1,28 m	2,4 %

Tabla 19. Comprobación de error en longitud de paso del sistema con respecto a las huellas marcadas en la arena. Fuente: Autor.

Como se puede visualizar en la tabla, el error obtenido durante la prueba es menor al 5%, esto se debe a los pasos iniciales y finales durante la prueba lo que puede generar un paso extra en el conteo lo que implicaría la disminución en el valor de la distancia recorrida.

3.4.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE VELOCIDAD DURANTE EL CICLO DE MARCHA MODO OFF-LINE

En la Tabla 22 se pueden observar los datos de velocidad obtenidos con el sistema de plantillas y con los otros dispositivos empleados para medir esta variable.

Sujeto 1	Velocidad plantillas instrumentadas	Velocidad App radar de velocidad	Error absoluto	Velocidad con cronometro	Error absoluto
Prueba 1	0,71 m/s	0,7 m/s	1,40%	0,71 m/s	0%
Prueba 2	0,66 m/s	0,6 m/s	9,09%	0,68 m/s	3,03%
Prueba 3	0,71 m/s	0,7 m/s	1,40%	0,70 m/s	2,81%
Prueba 4	0,71 m/s	0,7 m/s	1,40%	0,69 m/s	2,81%
Prueba 5	0,66 m/s	0,7m/s	6,06%	0,69 m/s	4,54%

Tabla 20. Comparaciones de datos de velocidad entre plantillas instrumentadas y otros dispositivos de medición. Fuente: Autor.

Como se puede observar, el error entre la aplicación y las plantillas instrumentadas es debido a que la aplicación entrega valores enteros sin decimales, lo que puede aumentar el error al momento de la comprobación. Los errores obtenidos por el cronómetro son pequeños y estos se pueden dar por la capacidad del controlador de la prueba para marcar los inicios y los finales de la prueba.

3.5.1 PRUEBAS PARA VERIFICAR LA TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO DURANTE LA MARCHA MODO OFF-LINE

En las Figura 57 y 58 se muestran las mediciones de la temperatura realizadas con el sistema de plantillas y con el sensor DS18B20.

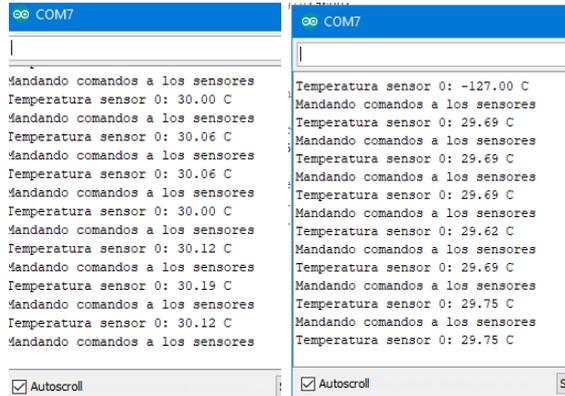


Figura 57. Temperatura obtenida en pie izquierdo al inicio y al final de la prueba de marcha mediante sensor DS18B20. Fuente: Autor

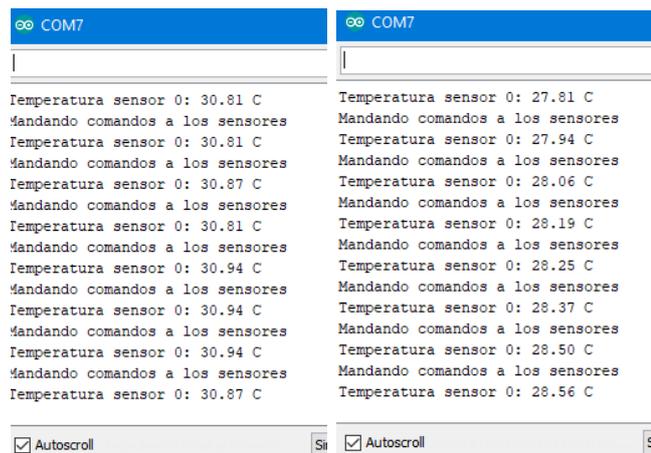


Figura 58. Temperatura obtenida en pie derecho al inicio y al final de la prueba de marcha mediante sensor DS18B20. Fuente: Autor

En la figura 59 se encuentra la gráfica de la variación de la temperatura obtenida en las pruebas.

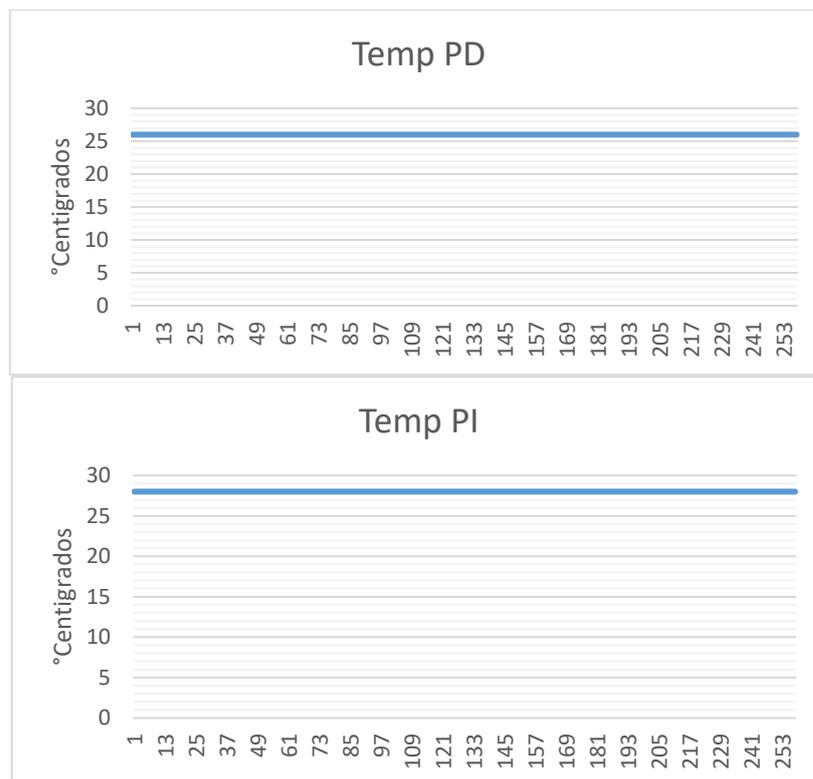


Figura 59. Gráfica de cambio de temperatura durante marcha para el sujeto 1. Fuente: Autor

En la tabla 23 se encuentra la información para comparar los valores de temperatura del sistema de plantillas con el sensor *DS18B20*.

N.º de prueba	Pie Izquierdo Plantilla instrumentada (°C)	Pie Izquierdo Sensor DS18B20 (°C)	Error absoluto pie	Pie Derecho Plantilla instrumentada (°C)	Pie Derecho Sensor DS18B20 (°C)	Error absoluto pie derecho %
1	28	28,85	3,03	26	26,35	1,34
2	27,35	27,83	1,75	26	26,90	3,46
3	27,50	27,90	1,45	25,90	26,15	0,96
4	27	27,32	1,18	25,47	26,02	2,15
5	27	27,77	2,85	25	25,71	2,84

Tabla 21. Comprobación de error en temperatura de plantilla instrumentada con respecto a sensor *DS18B20*. Fuente: Autor.

Como se puede observar, el error entre las mediciones tomadas con las plantillas instrumentadas frente al sensor de temperatura *DS18B20* es inferior al 5% lo cual indica que los valores tomados en las diversas pruebas son idóneos para un estudio posterior.

3.6.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CADENCIA O NÚMERO DE PASOS DURANTE LA MARCHA MODO OFF-LINE

En la Figura 60 se muestran los datos obtenidos con la aplicación podómetro la cual realiza el conteo de pasos en una distancia determinada.



Figura 60. Número de pasos obtenidos mediante app podómetro. Fuente: Autor

En la Figura 66 se muestran los datos obtenidos con el sistema de plantillas.

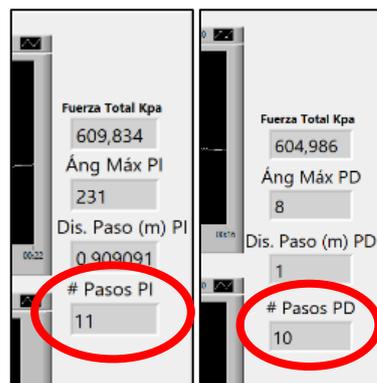


Figura 61. Número de pasos visualizados en pie derecho e izquierdo. Fuente: Autor

En la Tabla 24 se encuentran los datos para realizar las comparaciones entre las mediciones y el sistema para determinar el porcentaje de error de las pruebas.

Sujeto 1	#pasos plantilla instrumentada	#pasos visuales	#error absoluto	# pasos app podómetro	#error absoluto
Test 1	15	16	6,66%	16	6,66%
Test 2	18	18	0%	19	5,55%
Test 3	16	16	0%	17	6,25%
Test 4	14	15	7,14%	15	7,14%
Test 5	16	16	0%	17	6,25%

Tabla 22. Número de pasos en app e interfaz gráfica. Fuente: Autor.

Como se puede apreciar en la Tabla 24, el error en número de pasos con respecto a los pasos detectados de manera visual y mediante la aplicación podómetro es de ± 1 paso durante el ciclo de marcha. Este error se debe a la masa corporal y

estatura del sujeto, lo que hace que las presiones sean directamente afectadas y el valor de umbral utilizado para la detección sea variante en las diversas pruebas.

Todas estas tabulaciones realizadas a lo largo de este capítulo permiten corroborar que las plantillas instrumentadas son idóneas para pruebas de experimentación con diversos sujetos sin ningún tipo de enfermedad al igual que con pacientes diabéticos.

3.2 ANÁLISIS DE DATOS EN PACIENTES SALUDABLES

Una vez ya con los prototipos validados se procedió a las pruebas pertinentes con los sujetos saludables los cuales se les solicito que realizaran una caminata normal por una distancia de 10 metros.

Pruebas sujeto S1 saludable

En la Figura 62 se muestra el instante en el que el sujeto S1 realiza las pruebas.



Figura 62. *Sujeto 1 saludable*. Fuente: *Autor*.

Con los datos obtenidos en una entrevista, se procedió a realizar pruebas de marcha con el sujeto 1 obteniendo como resultado las gráficas de presión parcial y total que se muestran en las Figuras 63 y 64.

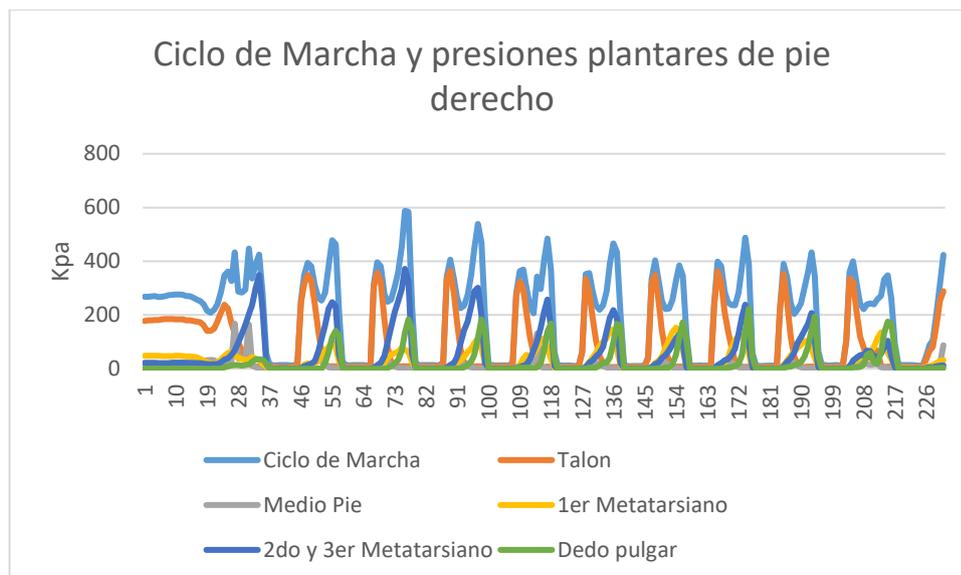


Figura 63. Patrones de presión del pie derecho sujeto 1 saludable. Fuente: Autor

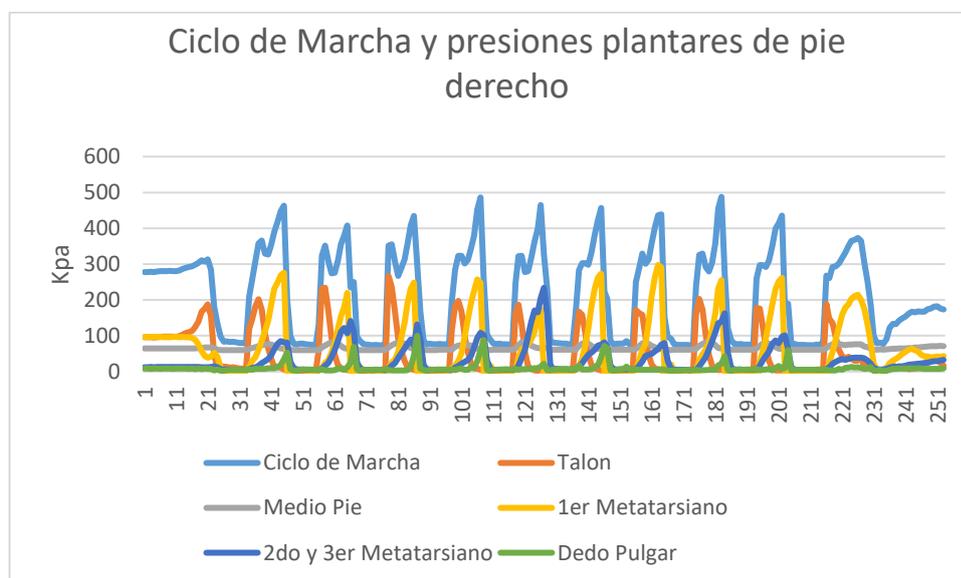


Figura 64. Patrones de presión del pie derecho sujeto 1 saludable.

En las tablas 25, 26, 27 y 28 se muestran los datos de presión del pie izquierdo y derecho del S1.

Zonas del pie derecho	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/ σ (Kpa)
Talón	325	350	350,3	315,27	349,8	338,074 \pm 17
Medio Pie	40	35	42,6	41,54	47,3	41,288 \pm 4
1er Metatarsiano	141,36	125,3	150,6	140,5	172,69	146,09 \pm 17
2do	293,18	250,7	250,99	250,6	280,54	265,202 \pm 20

Metatarsiano						
Dedo pulgar	190,72	200,56	199,5	220,87	180,5	198,43±15

Tabla 23. Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha del sujeto 1 saludable. Fuente: Autor.

Datos Offline Pie Derecho						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/σ
Ángulo Max PD(°)	12	14	12	10	17	13±3
Distancia de paso(m)	0,909	0,909	1	1	0,909	0,9454±0,05
Número de pasos	11	11	10	10	11	10,6±0,5
Tiempo de marcha(s)	14	14	12	12	12	12,8±1
Velocidad de marcha(m/s)	0,714	0,714	0,83	0,83	0,83	0,7836±0,04
Temperatura media(°C)	31	30	30	30	30	30,2±0,45

Tabla 24. Parámetros offline pie derecho sujeto 1 saludable. Fuente: Autor

Zonas del pie izquierdo	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/σ (Kpa)
Talón	210	175,8	180,56	207,85	215,98	198,038±18
Medio Pie	80,2	85,8	90,8	90	92,8	87,92±5
1er Metatarsiano	250,9	275,45	280,97	250,87	278,58	267,354±15
2do Metatarsiano	125	130,56	110	119,6	120,8	121,192±8
Dedo pulgar	70,8	100,5	70,2	69,3	65,8	75,32±14

Tabla 25. Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha del sujeto 1 saludable. Fuente: Autor.

Datos Offline Pie Izquierdo						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio
Ángulo Max PD(°)	22	21	24	20	19	21,2±2
Distancia de paso(m)	0,909	1	1	0,909	0,909	0,9454±0,05
Número de pasos	11	10	10	11	11	10,6±0,5
Tiempo de marcha(s)	14	15	12	12	12	13±1
Velocidad de marcha(m/s)	0,714	0,66	0,83	0,83	0,83	0,7728±0,08
Temperatura media(°C)	27	27	27	28	29	27,6±0,89

Tabla 26. Parámetros offline pie izquierdo sujeto 1 saludable. Fuente: Autor

Una vez ya tabulados los datos se procede a realizar las comparaciones de presiones con respecto a la literatura, ver tabla 29.

Zonas del pie	Promedio pie derecho (Kpa)	Promedio pie izquierdo (Kpa)	Fuerzas a velocidad normal de marcha,
Talón	338,074	198,038	358±87
Medio Pie	41,288	87,92	57±44
1er Metatarsiano	146,09	267,354	299±137
2do y 3er Metatarsiano	265,202	121,192	343±133
Dedo pulgar	198,43	75,32	317±116

Tabla 27. Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor.

Con los datos obtenidos para el sujeto 1 saludable se puede evidenciar que las presiones ejercidas en su pie derecho son mucho mayores en comparación a su pie opuesto, las zonas del talón, 2do y 3er metatarsiano se puede observar una gran cantidad presión ejercida lo que puede provocar molestias o dolores a este sujeto de prueba. Esta gran presión ejercida puede ser también comprobada por el aumento de temperatura en el pie derecho que llega a tener un valor de 30° C, consecuentemente el pie izquierdo al no ejercer sobre presiones su temperatura disminuye considerablemente siendo su media 27°C. Se puede visualizar también otros parámetros de marcha, como longitud de paso, velocidad, distancia y cadencia se repiten los valores en las pruebas lo que indica que el experimento ha tenido repetibilidad en el sujeto y estos datos son válidos.

Sujeto S2 saludable

En la Figura 65 se muestra al sujeto S2 realizando las pruebas.



Figura 65. Sujeto 2 saludable. Fuente: *Autor*

En las Figuras 66 y 67 se muestran los resultados de presión parcial y total para S2.

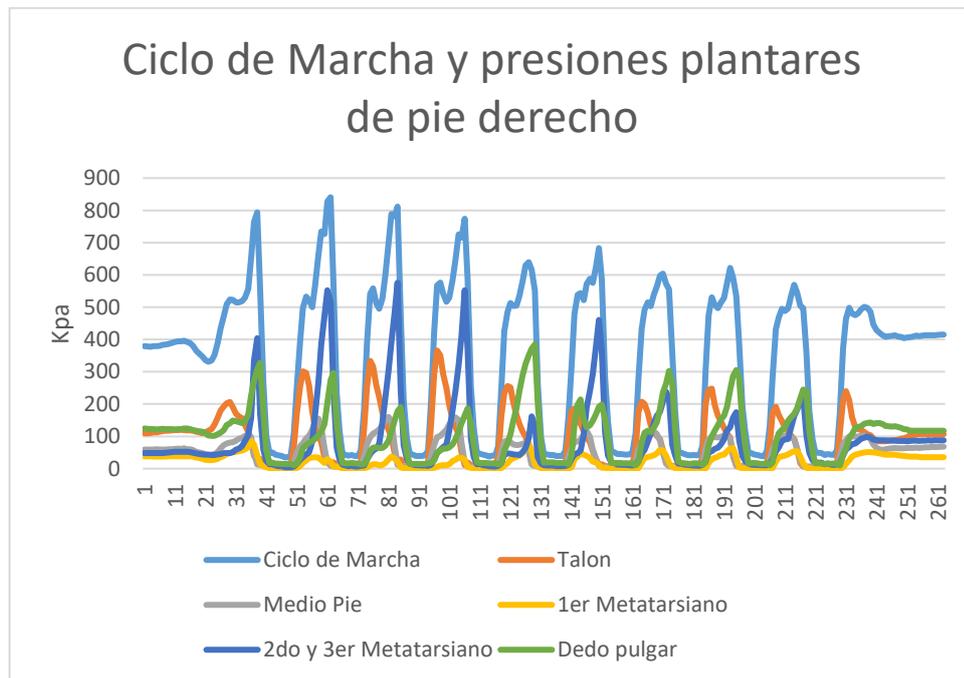


Figura 66. Patrones de presión del pie derecho sujeto 2 saludable. Fuente: *Autor*.

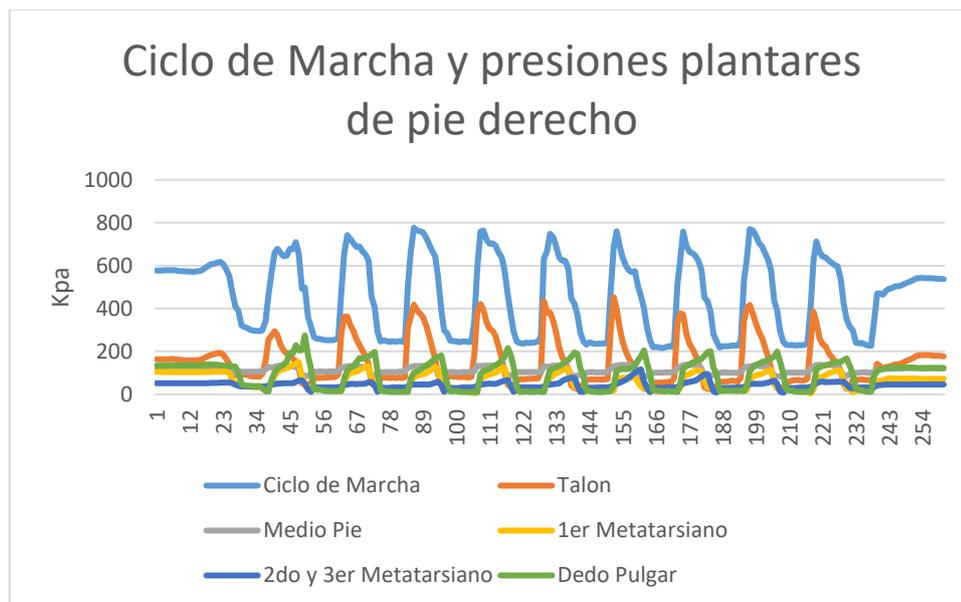


Figura 67. Patrones de presión del pie derecho sujeto 2 saludable. Fuente: Autor.

En las siguientes tablas se encuentran los resultados de presión del pie izquierdo y derecho para el S2.

Fuerzas ejercidas sobre pie derecho						
Zonas del pie derecho	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/ σ (Kpa)
Talón	250	275,21	300,87	350,65	346,5	304,646 \pm 44
Medio Pie	110,87	110,54	120,21	140,99	160,85	128,692 \pm 22
1er Metatarsiano	100,54	50,6	39,8	35,4	40,3	53,328 \pm 27
2do Metatarsiano	180	200,98	200,87	197,32	180,58	191,95 \pm 11
Dedo pulgar	275,51	246,96	278,65	300,56	289,65	278,266 \pm 20

Tabla 28. Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de sujeto 2 saludable.

Fuente: Autor

Datos Offline Pie Derecho						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/ σ
Ángulo Max PD(°)	13	10	15	15	11	12,8 \pm 2
Distancia de paso(m)	1,11	1	1,11	1	1,11	1,066 \pm 0,06
Número de pasos	9	10	9	10	9	9,4 \pm 1
Tiempo de marcha(s)	12	12	12	12	12	12 \pm 0
Velocidad de marcha(m/s)	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83 \pm 0

Temperatura media(°C)	29	28	28	27	28	29,2±0,7
------------------------------	----	----	----	----	----	----------

Tabla 29. *Parámetros offline pie derecho sujeto 2 saludable.* Fuente: Autor

Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo						
Zonas del pie izquierdo	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/σ (Kpa)
Talón	275	330	325,16	334,9	350,62	323,136±29
Medio Pie	115,87	130	140,87	150,98	160	139,544±17
1er Metatarsiano	140,87	110,36	91,5	80,65	70,58	98,792±28
2do Metatarsiano	88,9	75,6	103,58	105,9	120,58	98,912±17
Dedo pulgar	228,6	200	250	300,59	300	255,838±44

Tabla 30. *Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha del sujeto 2.* Fuente: Autor.

Datos Offline Pie Izquierdo						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/σ
Ángulo Max PD(°)	11	7	12	10	10	10±2
Distancia de paso(m)	1	1	1,11	1,11	1,11	1,066±0,06
Número de pasos	10	10	9	9	9	9,4±1
Tiempo de marcha(s)	12	12	12	12	12	12±0
Velocidad de marcha(m/s)	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83±0
Temperatura media(°C)	29	30	29	29	29	29,2±0,44

Tabla 31. *Parámetros offline pie izquierdo sujeto 2 saludable.* Fuente: Autor

En la tabla 34 se encuentran las comparaciones de los datos obtenidos con los datos de presión obtenidos en la literatura [8].

Zonas del pie	Promedio pie derecho (Kpa)	Promedio pie izquierdo (Kpa)	Fuerzas a velocidad normal de marcha
Talón	323,136	304,646	358±87
Medio Pie	139,544	128,692	57±44
1er Metatarsiano	98,792	53,328	299±137
2do y 3er Metatarsiano	98,912	191,95	343±133
Dedo pulgar	255,838	278,266	317±116

Tabla 32. *Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura.* Fuente: Autor

Con los datos obtenidos del sujeto S2 de prueba se puede visualizar sobrepresiones en la zona media del pie lo que indica que tendría pie plano, lo cual fue constatado con las preguntas realizadas al sujeto de prueba. También se puede observar que las temperaturas en ambos pies son aproximadamente iguales al igual que los valores de presión obtenidos demostrando que su distribución de presiones se encuentra equilibrada y que no le generaría molestias por sobrepresión.

Pruebas sujeto S3 saludable



Figura 68. Sujeto 3 saludable. Fuente: Autor.

En las figuras 69 y 70 se muestran las gráficas de presión parcial y total para el S3.

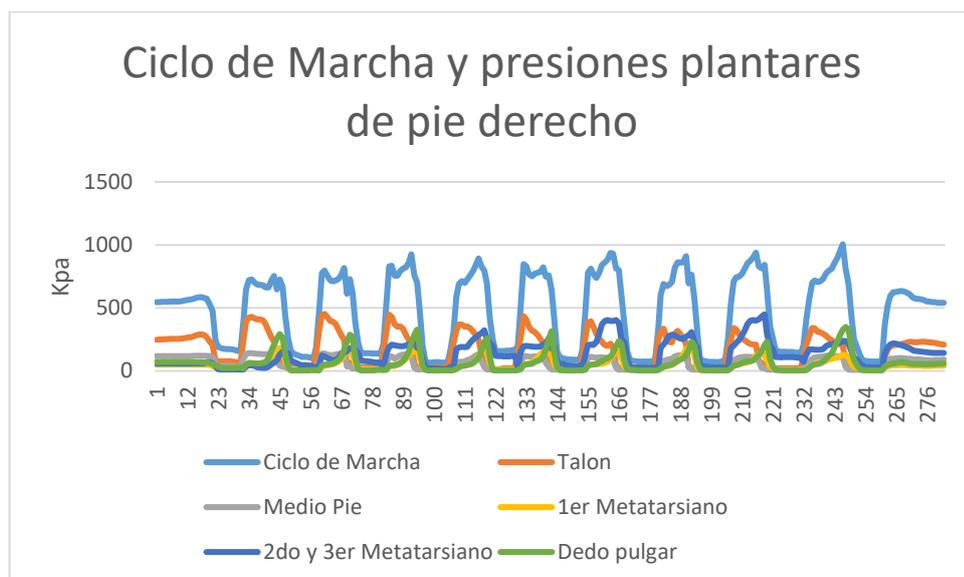


Figura 69. Patrones de presión del pie derecho sujeto 3 saludable. Fuente: Autor

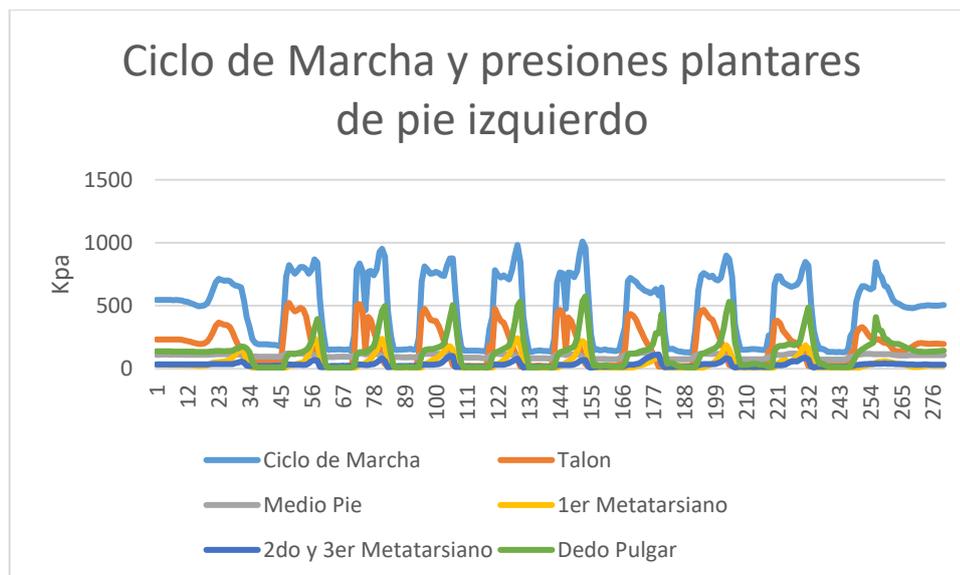


Figura 70. Patrones de presión del pie izquierdo sujeto 3 saludable. Fuente: Autor

En las siguientes tablas se encuentran los datos de presión para el pie izquierdo y derecho obtenidos en las pruebas con el S3.

Fuerzas ejercidas sobre pie derecho						
Zonas del pie derecho	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/σ (Kpa)
Talón	325,9	400,65	400	350,69	400,58	375,564 \pm 35
Medio Pie	130,89	140,58	139,56	149,66	150	142,138 \pm 8
1er Metatarsiano	120,5	120,44	120,55	109,58	139,58	122,13 \pm 11
2do Metatarsiano	225,67	175,89	200,11	198,65	200,58	200,18 \pm 18
Dedo pulgar	284,33	278,11	288,5	205,14	206,58	252,53 \pm 43

Tabla 33. Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de sujeto 3 saludable.
Fuente: Autor

Datos Offline Pie Derecho						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/σ
Ángulo Max PD(°)	20	17	16	15	15	16,6 \pm 2
Distancia de paso(m)	1	1	0,9	1	1	0,98 \pm 0,04
Número de pasos	10	10	11	10	10	10,2 \pm 0,4
Tiempo de marcha(s)	14	15	14	14	16	14,6 \pm 0,89
Velocidad de marcha(m/s)	0,714	0,66	0,714	0,714	0,625	0,6854 \pm 0,04

Temperatura media(°C)	28	26	26	27	25	26,4±1,14
------------------------------	----	----	----	----	----	-----------

Tabla 34. *Parámetros offline pie derecho sujeto 3 saludable.* Fuente: Autor

Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo						
Zonas del pie izquierdo	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/σ (Kpa)
Talón	400,96	325,33	310,89	386,55	359,25	356,596
Medio Pie	120,5	120	123,98	132,11	125,6	124,438
1er Metatarsiano	189,7	150,9	155,87	136,88	150,88	156,846
2do Metatarsiano	90,5	110,5	111,58	120,55	110,58	108,742
Dedo pulgar	320,96	352,1	289,55	300,44	300,58	312,726

Tabla 35. *Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha del sujeto 3.* Fuente: Autor

Datos Offline Pie Izquierdo						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/σ
Ángulo Max PD(°)	20	10	15	17	18	16±4
Distancia de paso(m)	1,11	1	0,909	0,909	1	0,9856±0,08
Número de pasos	9	10	11	11	10	10,2±1
Tiempo de marcha(s)	14	15	14	14	16	14,6±0,89
Velocidad de marcha(m/s)	0,714	0,66	0,714	0,714	0,625	0,6854±0,04
Temperatura media(°C)	29	27	27	27	27	27,4±0,89

Tabla 36. *Parámetros off-line pie izquierdo sujeto 3 saludable.* Fuente: Autor.

En la tabla 39 se muestra la comparación de las presiones de S3 con los datos de presión de estudios de presión.

Zonas del pie	Promedio pie derecho (Kpa)	Promedio pie izquierdo (Kpa)	Fuerzas a velocidad normal de marcha
Talón	375,564	356,596	358±87
Medio Pie	142,138	124,438	57±44
1er Metatarsiano	122,13	156,846	299±137
2do y 3er Metatarsiano	200,18	108,742	343±133
Dedo pulgar	252,53	312,726	317±116

Tabla 37. *Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura.* Fuente: Autor

Con los datos obtenidos del sujeto de prueba S3, se puede evidenciar que las presiones ejercidas tienen anomalías como la sobrepresión en el medio pie que podría indicar pie plano, sin embargo, después de preguntar al sujeto, éste no confirmó esta condición. Este hecho puede provocar molestias o dolores en las plantas de los pies e inclusive causar otro tipo de dolor a lo largo de su estructura ósea.

3.3 ANÁLISIS DE DATOS EN PACIENTES DIABÉTICOS

Para el análisis de los parámetros de marcha en pacientes diabéticos se desarrollaron pruebas en tres personas en donde a cada una de ellas se les sometió a caminatas de 10 metros con las plantillas colocadas sin zapatos. Se realizaron pruebas de 5 repeticiones por persona como se ve en la figura 71.

Pruebas pacientes diabético D1



Figura 71. Paciente diabético 1

En las Figuras 72 y 73 se muestran las gráficas de presión parcial y total del D1 durante las pruebas.

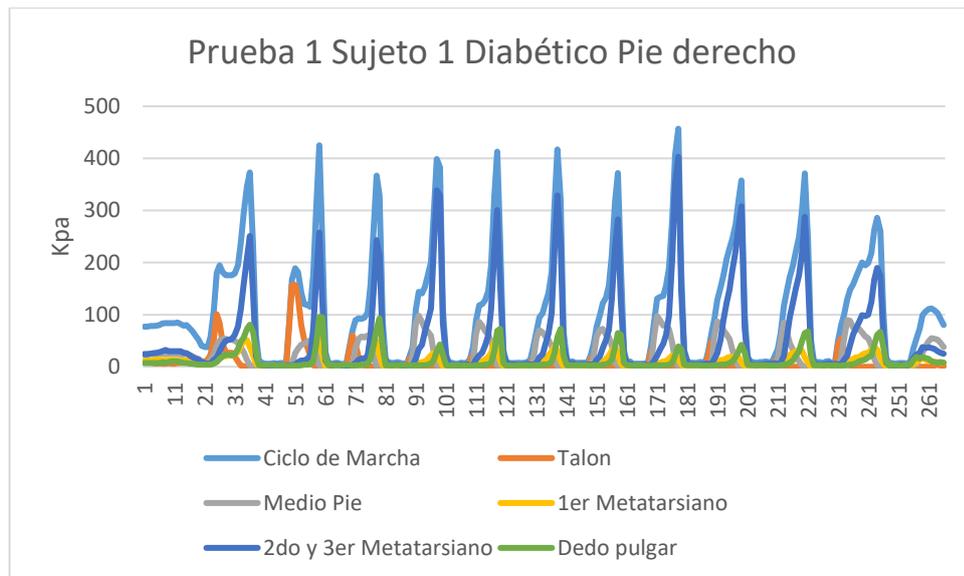


Figura 72. Patrones de presión del pie derecho paciente diabético 1. Fuente: Autor

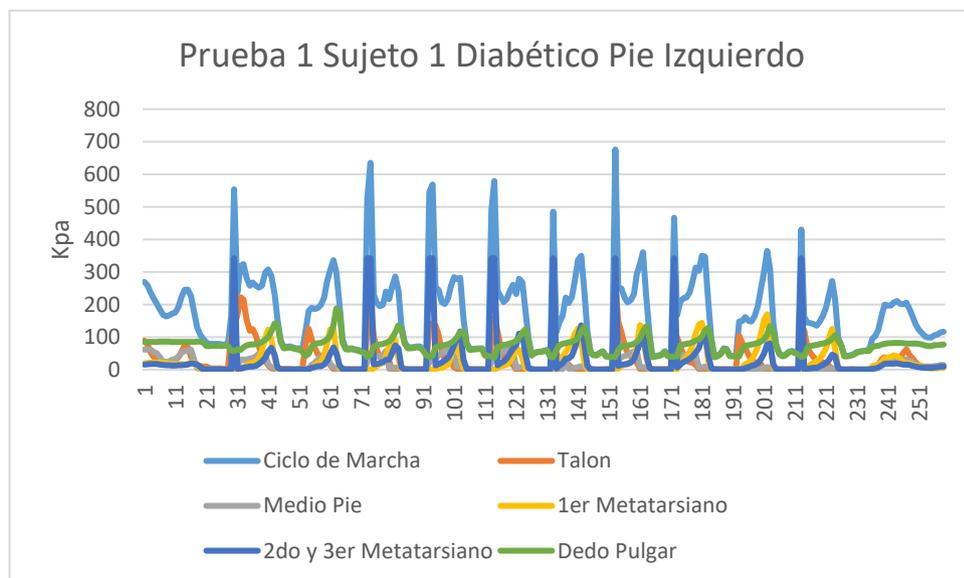


Figura 73. Patrones de presión del pie izquierdo paciente diabético 1

Una vez finalizada la prueba, la plataforma virtual calculó los parámetros de marcha que se muestran en las Figuras 74 y 75

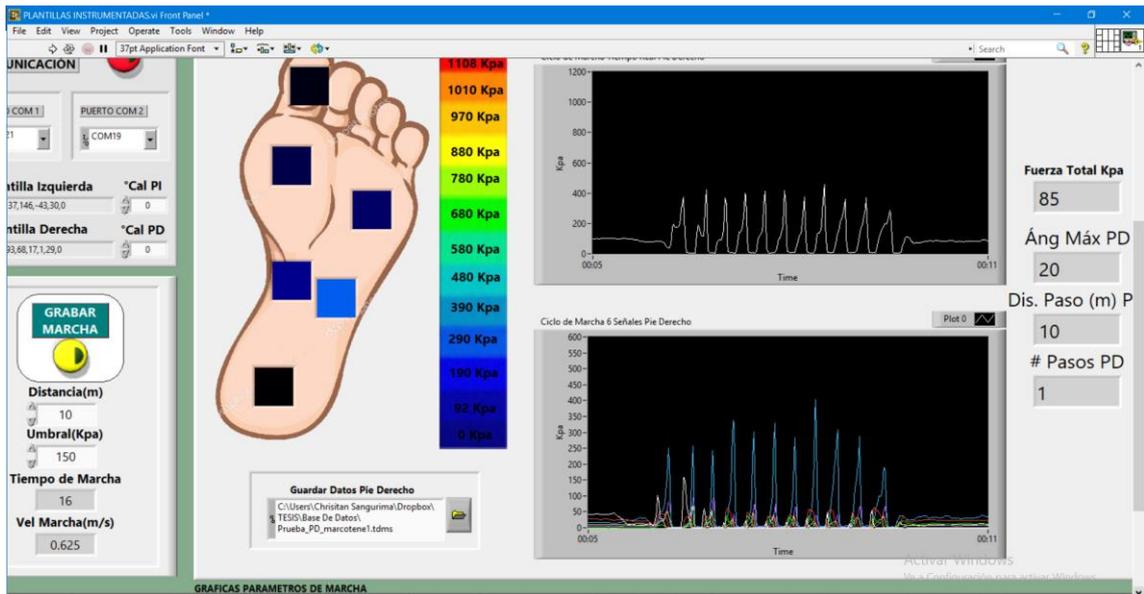


Figura 74. Parámetros off-line del pie derecho paciente diabético 1. Fuente: Autor.

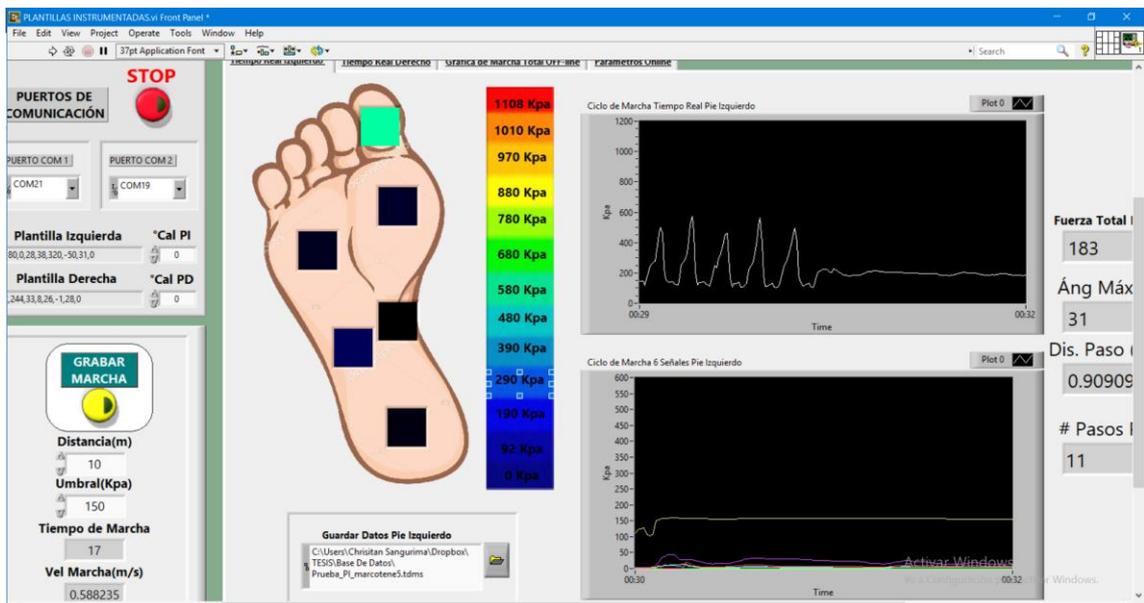


Figura 75. Parámetros off-line del pie izquierdo paciente diabético 1. Fuente: Autor.

En las siguientes tablas se encuentran los datos de presión de D1 del pie derecho e izquierdo.

Fuerzas ejercidas sobre pie derecho						
Zonas del pie derecho	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/ σ (Kpa)
Talón	46,81	65	41,6	43,8	55,8	50,602±10
Medio Pie	125,71	88,18	83,18	73,27	80,5	90,168±21
1er Metatarsiano	41,36	20,52	27,22	39,8	30,6	31,9±9
2do	293,18	138,5	194	145	115,65	177,266±71

Metatarsiano						
Dedo pulgar	69,72	123,8	83,33	137,8	125,3	107,99±30

Tabla 38. Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de sujeto 1 diabético. Fuente: Autor

Datos Offline Pie Derecho						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/σ
Ángulo Max PD(°)	20	22	25	24	25	23,2±2
Distancia de paso(m)	1	0,909	0,909	0,909	0,909	0,92±0,04
Número de pasos	10	11	11	11	11	10,8±0,44
Tiempo de marcha(s)	16	16	16	15	17	16±0,7
Velocidad de marcha(m/s)	0,625	0,625	0,625	0,666	0,588	0,62±0,02
Temperatura media(°C)	29	28	28	28	28	28,2±0,44

Tabla 39. Parámetros offline pie derecho sujeto 1 diabético. Fuente: Autor

Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo						
Zonas del pie izquierdo	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/σ (Kpa)
Talón	38	154,09	225	157,5	100,32	134,98±70
Medio Pie	40	56,42	52,54	38,54	37,5	45±9
1er Metatarsiano	159,44	115	129,44	200,45	175,26	155,91±34
2do Metatarsiano	342	350	183,33	155,36	150	236,13±101
Dedo pulgar	133,88	135	176,11	186,2	200,5	166,33±30

Tabla 40. Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha de sujeto 1. Fuente: Autor

Datos Offline Pie Izquierdo						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/σ
Ángulo Max PD(°)	7	30	9	9	31	17,2±12
Distancia de paso(m)	1	0,90	0,83	0,90	0,90	0,906±0,06
Número de pasos	10	11	12	11	11	11±1
Tiempo de marcha(s)	16	16	15	15	17	15,8±2,8
Velocidad de marcha(m/s)	0,625	0,625	0,666	0,66	0,58	0,63±0,03
Temperatura media(°C)	30	30	30	31	31	30,4±0,54

Tabla 41. Parámetros offline pie izquierdo sujeto 1 diabético. Fuente: Autor

En la Tabla 44 se encuentran los datos de presión del participante D1 comparados con los datos de presión encontrados en la literatura.

Zonas del pie	Promedio pie derecho (Kpa)	Promedio pie izquierdo (Kpa)	Fuerzas a velocidad normal de marcha.
Talón	50.602	134.98	358±87
Medio Pie	90.168	45	57±44
1er Metatarsiano	31.9	155.91	299±137
2do y 3er Metatarsiano	177.266	236.13	343±133
Dedo pulgar	107.99	166.33	317±116

Tabla 42. Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor

Con los datos obtenidos del paciente diabético D1, se puede apreciar que las presiones ejercidas en su pierna izquierda se encuentran muy elevadas con respecto a su pierna derecha, teniendo zonas de muy alta presión en los metatarsianos y al mismo tiempo provocando que la temperatura de este pie llegue a alcanzar los 30°C. Esta temperatura es muy elevada respecto al otro pie. En este paciente las sobrepresiones y la alta temperatura podría provocar una llaga o úlcera si no se aplica un método de prevención para sobrepresiones plantares.

Pruebas pacientes diabético D2



Figura 76. Paciente diabético 2. Fuente: Autor

En las Figuras 77 y 78 se encuentran las gráficas de presión parcial y total para el participante D2.

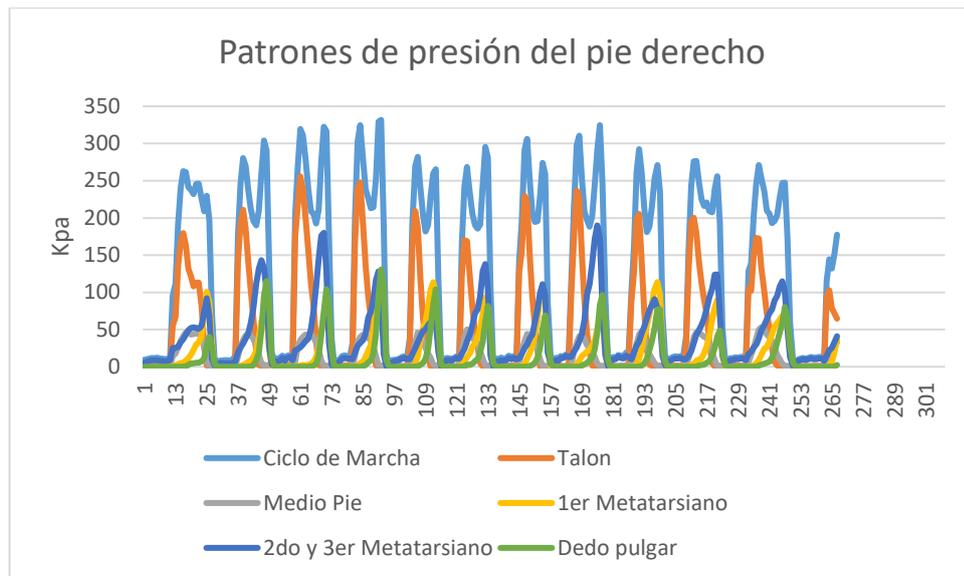


Figura 77. Patrones de presión del pie derecho paciente diabético 2. Fuente: Autor

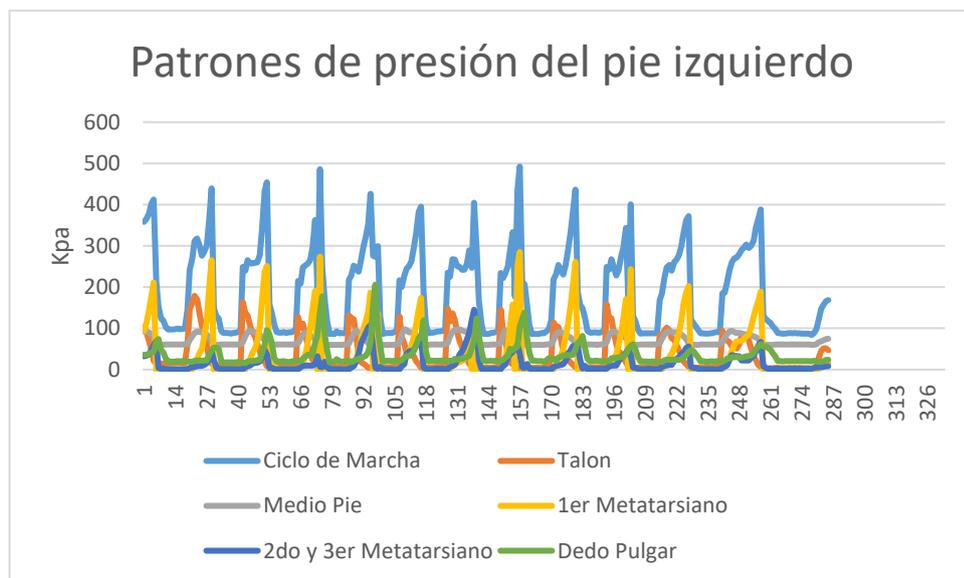


Figura 78. Patrones de presión del pie izquierdo paciente diabético 2. Fuente: Autor

En las figuras 79 y 80 se muestran los parámetros de marcha para D2, calculadas por el sistema.

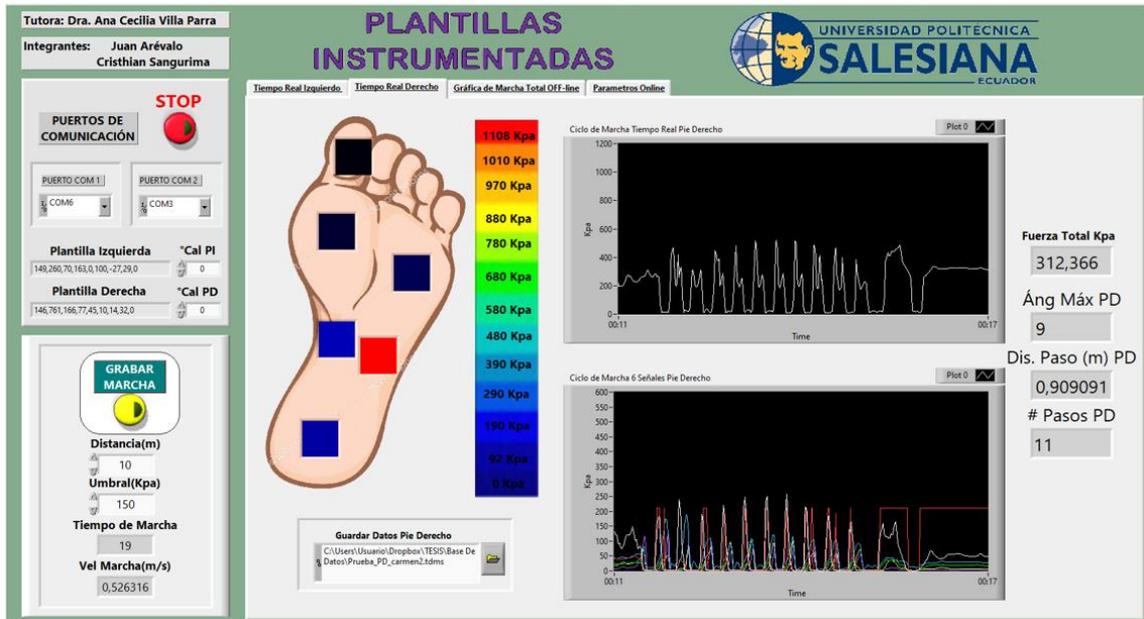


Figura 79. Parámetros off-line del pie derecho paciente diabético 2. Fuente: Autor.

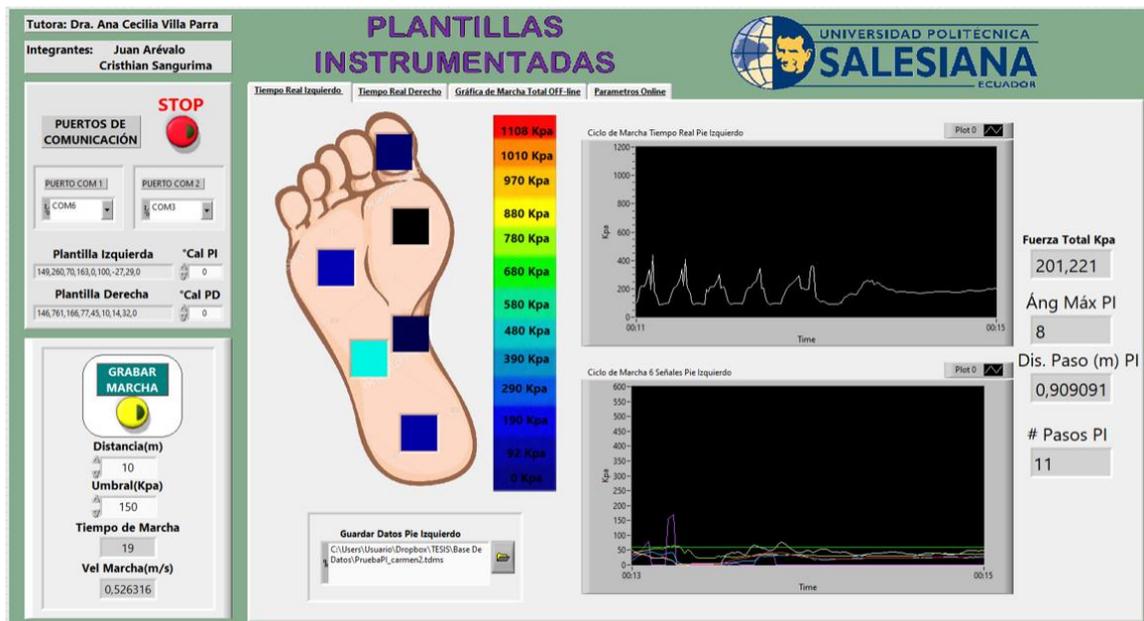


Figura 80. Parámetros off-line del pie izquierdo paciente diabético 2. Fuente: Autor.

En las siguientes tablas se encuentran los datos de presión para el pie izquierdo y derecho de D2.

Fuerzas ejercidas sobre pie derecho						
Zonas del pie derecho	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/ σ (Kpa)
Talón	200,32	200	141,58	140,3	130	162,44 \pm 35
Medio Pie	46	50	100,01	78,3	88	72,46 \pm 24
1er Metatarsiano	90,1	80,6	99,21	70,21	65,3	81,08 \pm 14

2do Metatarsiano	117,5	115,36	118,2	110,69	125,8	117,51±5
Dedo pulgar	86,9	85	88,97	116	100,8	95,53±13

Tabla 43. Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de paciente diabético 2.

Fuente: Autor

Datos Offline Pie Derecho						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/ σ
Ángulo Max PD(°)	9	9	23	9	19	13,8±7
Distancia de paso(m)	0,9	0,9	1	0,9	1	0,94±0,05
Número de pasos	11	11	10	11	11	10,8±0,44
Tiempo de marcha(s)	19	19	19	20	18	19±0,7
Velocidad de marcha(m/s)	0,52	0,52	0,52	0,5	0,55	0,522±0,01
Temperatura media(°C)	32	32	32	32	32	32±0

Tabla 44. Parámetros offline pie derecho paciente diabético 2. Fuente: Autor

Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo						
Zonas del pie izquierdo	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/ σ (Kpa)
Talón	140	100,3	110,69	98	80,47	105,89±22
Medio Pie	95,3	99,25	97	100	96,5	97,61±2
1er Metatarsiano	225,63	185,65	210,21	186,45	156	192,78±27
2do Metatarsiano	80,2	75,32	62,33	83	81,5	76,47±8
Dedo pulgar	100,88	110,9	110	140,7	145,3	121,55±20

Tabla 45. Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha de paciente diabético 2.

Fuente: Autor

Datos Offline Pie Izquierdo						
Parámetros	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	prueba 5	Promedio/ σ
Ángulo Max PD(°)	8	8	5	10	4	7±2
Distancia de paso(m)	0,9	0,9	1	1	0,9	0,94±0,05
Número de pasos	11	11	10	10	11	10,6±1
Tiempo de marcha(s)	19	19	19	20	18	19±0,7
Velocidad de marcha(m/s)	0,59	0,52	0,52	0,5	0,55	0,54±0,03

Temperatura media(°C)	29	30	29	29	29	29,2±0,44
------------------------------	----	----	----	----	----	-----------

Tabla 46. Parámetros offline pie izquierdo paciente diabético 2. Fuente: Autor

Una vez ya tabulados los datos, se procede a hacer las comparaciones de presiones con respecto a la literatura, que se encuentra en la Tabla 49.

Zonas del pie	Promedio pie derecho (Kpa)	Promedio pie izquierdo (Kpa)	Fuerzas a velocidad normal de marcha,
Talón	162,44	105,89	358±87
Medio Pie	72,46	97,61	57±44
1er Metatarsiano	81,08	192,78	299±137
2do y 3er Metatarsiano	117,51	76,47	343±133
Dedo pulgar	95,53	121,55	317±116

Tabla 47. Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: Autor

En este paciente D2, se puede observar que las presiones ejercidas en el medio pie con respecto al peso y la estatura de la persona se encuentran elevadas, al igual que las zonas de los 1er, 2do y 3er metatarsiano. Esto ha sido esperado debido a que la paciente D2 presenta hinchazón en sus pies. La temperatura en su pie derecho es alta con 32°C respecto a su otro pie que presenta 29°C. Esta medición también es un indicativo de sobrepresiones en el pie derecho que pueden ser la causa para la aparición de llagas o úlceras en un futuro sino se toma prevenciones para su marcha normal o actividades diarias.

Pruebas paciente diabético D3



Figura 81. Paciente diabético 3. Fuente: Autor

En las Figuras 82 y 83 se pueden observar las gráficas de presión parcial y total del participante D3.

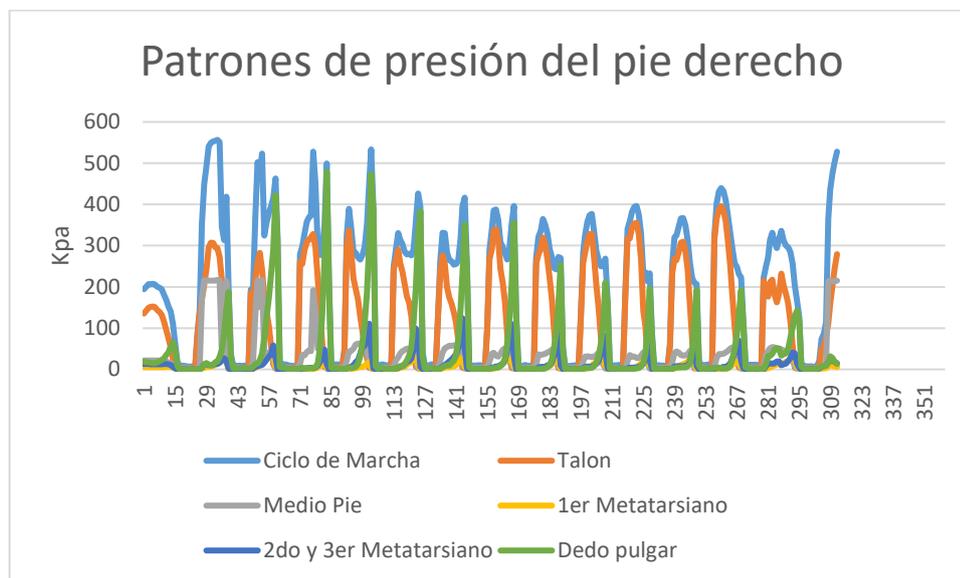


Figura 82. Patrones de presión del pie derecho en paciente diabético 3. Fuente: Autor

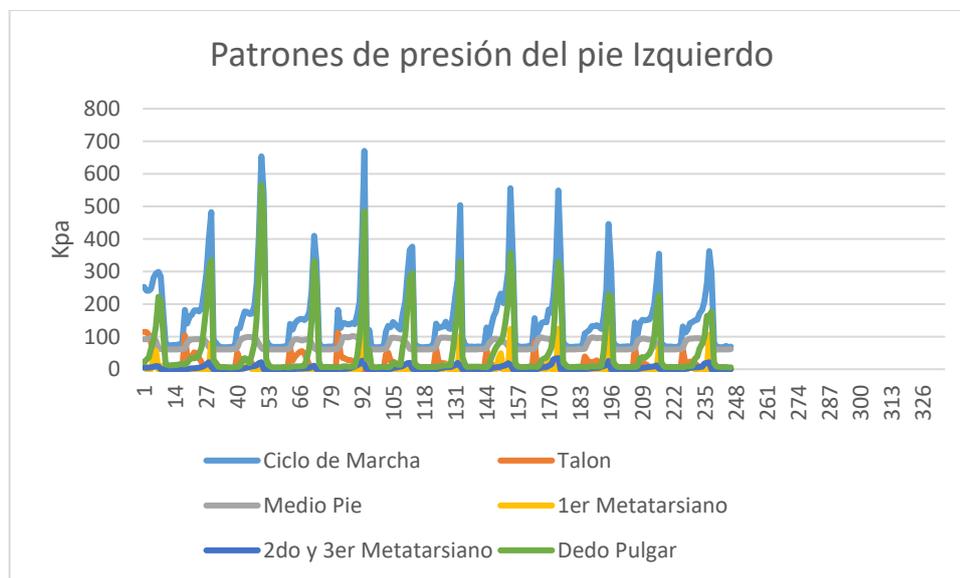


Figura 83. Patrones de presión del pie izquierdo en paciente diabético 3. Fuente: Autor

En las figuras 84 y 85 se encuentran los resultados de los parámetros calculados por el sistema para D3.

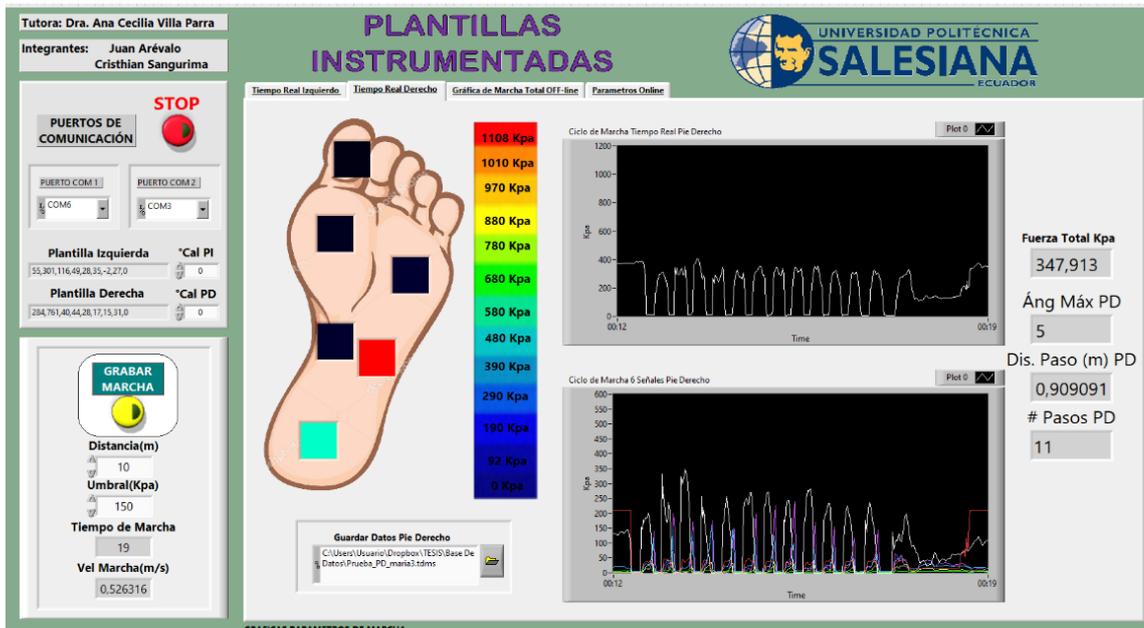


Figura 84. Parámetros off-line del pie derecho paciente diabético 3. Fuente: Autor

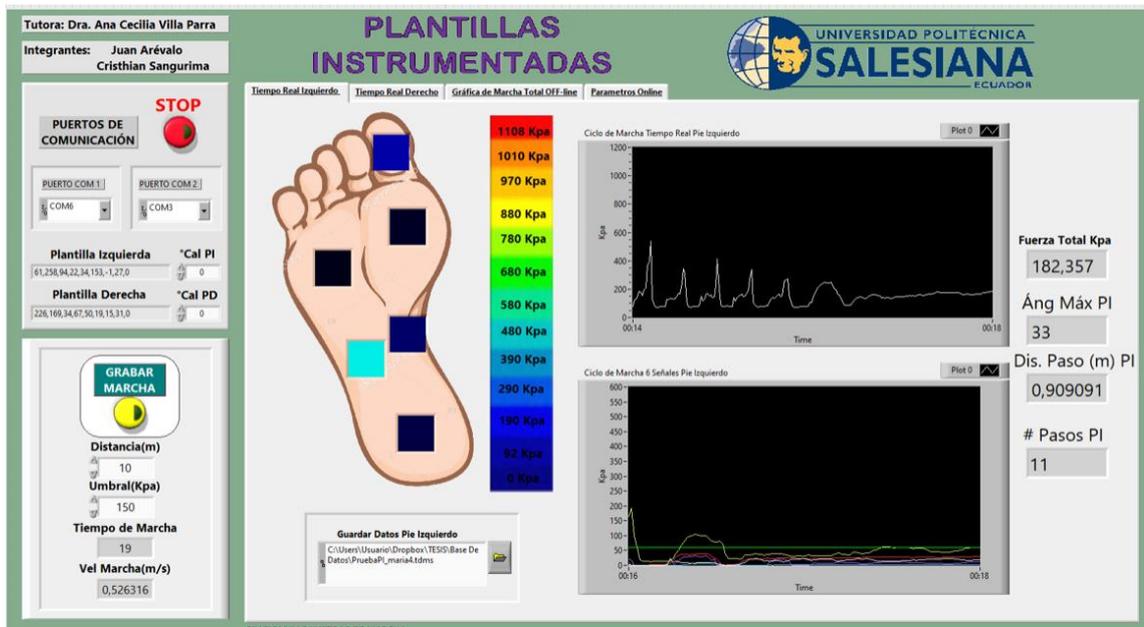


Figura 85. Parámetros off-line del pie izquierdo paciente diabético 3. Fuente: Autor

En las siguientes tablas se encuentran los datos de presión para pie derecho e izquierdo del participante D3 durante las pruebas.

Fuerzas ejercidas sobre pie derecho						
Zonas del pie derecho	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/ σ (Kpa)
Talón	275,5	300	250	238,99	225,9	258,078 \pm 30
Medio Pie	60	50,5	50	80,74	50	58,248 \pm 13
1er	30,6	40,8	35,9	62,9	41,6	42,36 \pm 12

Metatarsiano						
2do	80,25	100,89	95,3	252,97	110,96	128,074±71
Metatarsiano						
Dedo pulgar	200	224,3	135,9	<u>180,9</u>	199,65	188,15±33

Tabla 48. Fuerzas ejercidas sobre pie derecho en varios test de marcha de paciente diabético 3.
Fuente: Autor

Datos Offline Pie Derecho						
Parámetros	prueba	prueba	prueba	prueba	prueba	Promedio/σ
	1	2	3	4	5	
Angulo Max PD(°)	5	9	5	10	8	7,4±2
Distancia de paso(m)	0,909	0,909	0,909	0,909	0,909	0,909±0
Numero de pasos	11	11	11	11	11	11±0
Tiempo de marcha(s)	19	18	19	19	19	18,8±0,44
Velocidad de marcha(m/s)	0,52	0,55	0,52	0,52	0,52	0,526±0,01
Temperatura media(°C)	30	30	30	31	30	30,2±0,44

Tabla 49. Parámetros offline pie derecho paciente diabético 3. Fuente: Autor

Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo						
Zonas del pie izquierdo	Prueba 1 (Kpa)	Prueba 2 (Kpa)	Prueba 3 (Kpa)	Prueba 4 (Kpa)	Prueba 5 (Kpa)	Promedio/σ (Kpa)
Talón	85	81	60	63,24	66,7	71,188±11
Medio Pie	84	92,6	100,98	100	100	95,516±7
1er Metatarsiano	50,6	62,3	60,99	70,1	65,27	61,852±7
2do Metatarsiano	51,2	32,9	40,89	42,3	45,22	42,502±7
Dedo pulgar	225,7	250,98	265,88	280,6	200,81	244,794±32

Tabla 50. Fuerzas ejercidas sobre pie izquierdo en varios test de marcha de paciente diabético 3.

Fuente: Autor

Datos Offline Pie Izquierdo						
Parámetros	prueba	prueba	prueba	prueba	prueba	Promedio/σ
	1	2	3	4	5	
Ángulo Max PI(°)	33	24	30	30	31	29,6±3
Distancia de paso(m)	0,909	0,909	0,909	0,909	0,99	0,9252±0,03
Número de pasos	11	11	11	11	11	11±0
Tiempo de marcha(s)	19	18	19	19	18	18,6±0,5

Velocidad de marcha(m/s)	0,52	0,55	0,52	0,52	0,55	0,532±0,01
Temperatura media(°C)	27	27	27	27	27	27±0

Tabla 51. Parámetros offline pie izquierdo sujeto 3 diabético. Fuente: *Autor*

En la siguiente tabla se encuentran los datos de presión de D3 para su comparación con los datos de estudios de presión de la literatura.

Zonas del pie	Promedio pie derecho (Kpa)	Promedio pie izquierdo (Kpa)	Fuerzas a velocidad normal de marcha.
Talón	258,078	71,188	358±87
Medio Pie	58,248	95,516	57±44
1er Metatarsiano	42,36	61,852	299±137
2do y 3er Metatarsiano	128,074	42,502	343±133
Dedo pulgar	188,15	244,794	317±116

Tabla 52. Comparación de valores obtenidos de presión con respecto a literatura. Fuente: *Autor*

Finalmente, en el paciente diabético D3, se puede observar que las presiones ejercidas en el pie derecho son superiores a las del pie izquierdo. La temperatura en este pie llega a 30°C con respecto al otro pie que llega a 27°C. Este es un indicativo de sobrepresiones en el pie derecho. Se puede apreciar además que las zonas del talón y del 2do y 3er metatarsiano son las que soportan mayor presión por la alta temperatura que se presenta. El probable que si no existe cuidado en el tratamiento de los pies del participante D3 puedan presentarse con el tiempo llagas o úlceras en este pie.

En las pruebas realizadas en los pacientes diabéticos se obtuvieron datos de gran importancia debido a que nuestra investigación sobre la enfermedad de la diabetes y sus principales consecuencias como el pie diabético indican que al tener variaciones en temperatura y presiones pueden ser propensos a padecer úlceras en sus pies. Se pudieron obtener gráficas de presiones en donde se puede apreciar que existen regiones las cuales están sobre presionadas y estos datos se han repetido en las pruebas realizadas al mismo paciente, estas sobrepresiones también se deben a otros factores externos que se han ido generando a raíz de la enfermedad como la hinchazón en los pies en diversos momentos del día de manera aleatoria. Se pudo apreciar también que la temperatura obtenida en las personas con diabetes es ligeramente superior a la de pacientes no diabéticos lo cual implica un mayor

cuidado en este aspecto para dichos pacientes en el tipo de calzado que deben ocupar diariamente.

3.4 ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROTOTIPO IMPLEMENTADO

Para conocer el precio con que nuestro prototipo deberá tener en el mercado teniendo en cuenta nuestras utilidades y la mano de obra se ha realizado un análisis de costos. La materia prima utilizada puede subducirse en directa como indirecta. La materia prima directa son todos aquellos elementos que forman parte de la construcción del prototipo, cuya lista de componentes se detallan en la Tabla 55.

MATERIA PRIMA DIRECTA			
Elementos	Costo Unitario	Cantidad	Costo total
Resistencias	\$ 0,01	12	\$ 0,12
Led	\$0,10	2	\$0,20
Arduino Nano	\$ 8,00	2	\$ 16,00
Modulo bluetooth HC-05	\$ 5,00	2	\$ 10,00
AO LM324	\$ 1,00	2	\$ 2,00
AO LM328	\$ 0,50	2	\$ 1,00
Estabilizador 7805	\$ 0,50	2	\$ 1,00
Placa PCB MPU6050	\$ 2,50	2	\$ 5,00
MPU6050	\$ 6,00	2	\$ 12,00
Filamento PLA 10m	\$ 2,00	2	\$ 4,00
Prototipo Impresión 3D	\$ 8,00	2	\$ 16,00
Mecanizado de plantilla en material Sintra	\$ 9,00	2	\$ 18,00
Sensores FSR A401	\$ 19,12	12	\$ 229,44
Sockets 10 pines	\$0,20	2	\$ 0,40
Micro Pulsantes	\$0,10	4	\$ 0,40
Micro Switch	\$0,10	2	\$ 0,20
Tornillos 2mm	\$0,05	8	\$ 0,40
Peineta 10 pines	\$0,50	4	\$ 2,00

Protector térmico 2m	\$1,50	2	\$ 3,00
Cables de conexión	\$0,05	32	\$ 1,60
Batería 9V recargable	\$9,00	2	\$ 18,00
Terminales	\$0,05	40	\$ 2,00
Suscripción en la plataforma virtual	\$50,00	1	\$ 50,00
TOTAL			\$ 392,76

Tabla 53. Materia prima directa. Fuente: Autor

La materia prima indirecta es el material utilizado durante el proceso de producción, pero que no se pueden cuantificar en su totalidad en el producto terminado.

MATERIA PRIMA INDIRECTA			
Elementos	Costo Unitario	Cantidad	Costo total
Estaño por metro	\$ 0,07	1	\$ 0,07
Pasta de Soldar	\$ 5,00	1	\$ 5,00
Cinta aislante	\$ 0,50	1	\$ 0,50
pegamento	\$ 1,00	1	\$ 1,00
Total			\$ 6,57

Tabla 54. Materia prima indirecta. Fuente: Autor

La materia prima total utilizada se obtiene con la suma de la materia prima directa y la indirecta como se indica en la siguiente ecuación.

$$Materia_{prima} = Materia_Prima_{directa} + Materia_Prima_{indirecta}$$

$$Materia_{prima} = \$392.76 + \$6.57$$

$$\mathbf{Materia_{prima} = \$399.33 \rightarrow por\ dispositivo}$$

Cada dispositivo consta de un par de plantillas instrumentadas en talla 40, dos transmisores de datos y una interfaz de visualización para PC.

Para tener un análisis más completo se necesita calcular tanto costos fijos como costos variables que intervienen en el desarrollo del este prototipo. En cambio, los costos fijos son los elementos que no dependen del volumen de producción y los costos variables son directamente dependientes del volumen de producción. La Tabla 57 muestra el detalle de los costos fijos y variables.

Costos Fijos		Costos Variables unitarios	
Elemento	Costo	Elemento	Costo
Arriendo	\$ 150.00	Materia Prima	\$ 399.33
Servicios Básicos	\$ 70.00	Mano de obra	\$ 400.00
Total	\$ 220.00	Total	\$ 799.33

Tabla 55. Costos fijos y variables. Fuente: Autor.

Para el cálculo de la mano de obra utilizó la siguiente ecuación:

$$ManoDeObra = \frac{SueldoMensual * 2}{HorasMensuales} HorasElaboraciónPrototipo$$

$$ManoDeObra = \frac{1200 * 2}{240} (40) = 400$$

Para calcular el precio de venta al público del prototipo, se toma en cuenta el valor total del costo variable, el costo fijo y un margen por cada unidad.

- Costos fijos por unidad.

En este rubro se considera el gasto del arriendo con un valor mensual, esto se divide para los 30 días del mes y luego se divide para las 24 horas del día, obteniendo el costo por hora del dispositivo. Este precio por hora se multiplica por el número de horas que implica la elaboración de cada dispositivo como se detalla en la siguiente ecuación:

$$CostoArriendo = \frac{\left(\frac{Precio Arriendo}{\#Dias Mes}\right)}{\#Horas Dia} (\#Horas de Fabricación)$$

$$Arriendo = \frac{\left(\frac{150}{30}\right)}{24} (40) = 8,33$$

Para calcular el costo fijo del arriendo por unidad se divide el precio del arriendo para el número de días que tiene el mes. Luego se divide también por el número de horas de la jornada laboral (8 horas) y finalmente se multiplica por el número de horas de fabricación del dispositivo como se indica en la siguiente ecuación:

$$CostoServiciosBásicos = \frac{\left(\frac{Precio Arriendo}{\#Dias Mes}\right)}{\#HorasJornadaLaboral} (\#HorasFabricación)$$

$$ServiciosBásicos = \frac{\left(\frac{70}{30}\right)}{8} (40) = 11,66$$

Por último, se sumans estos rubros para obtener el costo fijo por unidad como se indica en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{CostoFijo}_u &= \text{CostoArriendo} + \text{CostoServiciosBásicos} \\ \text{CostoFijo}_u &= \$8.33 + \$11.66 = \$20 \end{aligned}$$

Precio sin margen de utilidad

Para calcular el precio final del dispositivo sin utilidad, se debe sumar el costo fijo unitario con el costo variable unitario, como se indica en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Precio} &= \text{CostoFijo}_{\text{unitario}} + \text{CostoVariable}_{\text{unitario}} \\ \text{Precio} &= \$20 + \$799.33 \\ \text{Precio} &= \mathbf{\$819.33} \end{aligned}$$

Precio con margen de utilidad

Para este proyecto se consideró un margen de utilidad del 20% para calcular el precio de venta al público (PvP).

$$\begin{aligned} x &= \mathbf{30\%} \rightarrow \mathbf{Margen\ de\ Utilidad} \\ \text{PvP} &= \text{Precio} + \text{Margen de utilidad} \\ \text{PvP} &= \$819.33 + 30\% \\ \text{PvP} &= \$819.33 + \$819.33(0.30) \\ \text{PvP} &= \mathbf{\$983.20} \end{aligned}$$

Dejando a un valor cerrado

$$\mathbf{PvP = \$985}$$

Con este precio se calcula el punto de equilibrio como se indica en la siguiente ecuación:

$$QE = \frac{CF}{PvP - CV_u} \quad (7)$$

Donde: CF son los costos fijos, Pvp el precio de venta y CVu el costo variable unitario.

$$\begin{aligned} QE &= \frac{220}{\$985 - \$799.33} = 1,18 \\ QE &\approx \mathbf{2} \rightarrow \mathbf{Unidades} \end{aligned}$$

Este dato indica que para que el proyecto sea rentable es necesario producir más de 2 dispositivos mensuales. Como se necesitan para la fabricación de cada dispositivo 40 horas, 5 días laborables, 1 dispositivo semanal, considerando una jornada laboral de 8 horas diarias la capacidad de producción mensual es de 4 dispositivos. Multiplicado por los 12 meses que dura el año se tiene una capacidad de producción anual de 48 dispositivos.

En la Tabla 58 se encuentra la información del flujo de caja. Considerando una tasa del 1%, que según la CEPAL es la traza de crecimiento anual para los próximos 5 años.

Flujo de Caja						
AÑOS	0	1	2	3	4	5
INGRESOS						
VENTA DISPOSITIVO		\$ 47,280.00	\$47,752.80	\$ 48,230.33	\$ 48,712.63	\$49,199.76
EGRESOS						
COSTO DE DISPOSITIVO		\$ 38,367.84	\$38,751.52	\$ 39,139.03	\$ 39,530.42	\$39,925.73
ACTIVIDADES DE OPERACION		\$ 2,640.00	\$ 2,666.40	\$ 2,693.06	\$ 2,719.99	\$ 2,747.19
SERVICIOS BASICOS		\$ 840.00	\$ 848.40	\$ 856.88	\$ 865.45	\$ 874.11
ARRIENDO		\$ 1,800.00	\$ 1,818.00	\$ 1,836.18	\$ 1,854.54	\$ 1,873.09
ACTIVIDADES DE INVERSION						
inversion	\$ 15,280.00					
flujo de caja neto	\$ (15,280.00)	\$ 6,272.16	\$ 6,334.88	\$ 6,398.23	\$ 6,462.21	\$ 6,526.83

Tabla 56. Flujo de caja con proyección anual. Fuente: *Autor*.

Con el respectivo flujo de caja armado se procede a calcular el TIR (Tasa Interna de Retorno) y VAN (Valor Actual Neto), los cuales son indicadores para saber si el proyecto es rentable. Para el cálculo de estos indicadores se debe contar con una inversión inicial, la cual se calculamos con base al tiempo invertido para desarrollar el prototipo completo. En la siguiente tabla se encuentra el valor del monto de inversión inicial considerando un tiempo de 10 meses.

Inversión Prototipo

Elementos	Costo
Programación	\$ 10000,00
Servicios Básicos	\$ 560,00
Comida	\$ 960,00
Transporte	\$ 200,00
Computadora	\$ 1200,00
Balanza	\$ 50,00
Generador	\$ 350,00
Fuente	\$ 800,00
Plan Celular	\$ 160,00
Inmueble	\$ 500,00
Pruebas fallidas	\$ 500,00
TOTAL	\$ 15280,00

Tabla 57. Inversión para el prototipo. Fuente: *Autor*.

Se han considerado los precios de los equipos empleados, el costo por hora del tiempo invertido como desarrolladores del presente prototipo, el costo por las fallas generadas hasta llegar al prototipo final y el costo de los inmuebles necesarios para el desarrollo. Con el monto de inversión de \$15280, se procede a calcular el TIR y VAN con las siguientes ecuaciones:

$$VAN = -A + \frac{Q_1}{(1+k)^1} + \frac{Q_1}{(1+k)^1} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n}$$

Donde A es la Inversión Inicial, k es la Tasa de descuento y Qn los Flujos de caja.

Obteniendo que:

$$VAN = -15280 + \frac{6272.16}{(1+0.12)^1} + \frac{6334.88}{(1+0.12)^2} + \frac{6398.23}{(1+0.12)^3} + \frac{6462.21}{(1+0.12)^4} + \frac{6526.83}{(1+0.12)^5}$$

$$VAN = 7734$$

Como el VAN es mayor a cero se considera al proyecto rentable y sustentable.

Para el cálculo del TIR se emplea la siguiente ecuación:

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n}$$

En donde Fn vienen siendo el flujo de caja a lo largo de un periodo n, n es el número de periodos en nuestro caso el número de años proyectados e i el valor en dólares que se invirtió inicialmente. Obteniendo entonces:

$$TIR = \sum_{T=0}^5 \frac{-15280}{(1 + 0.12)^0} + \frac{6272.16}{(1 + 0.12)^1} + \frac{6334.88}{(1 + 0.12)^2} + \frac{6398.23}{(1 + 0.12)^3} + \frac{6462.21}{(1 + 0.12)^4} + \frac{6526.83}{(1 + 0.12)^5}$$

$$TIR = 31\%$$

El proyecto con respecto a los indicadores calculados es viable, considerando que el BCE, para noviembre del 2019, indicó que la tasa anual efectiva pasiva se ubicaba alrededor 8,11% para periodos igual o mayores a un año.

A continuación, una comparación entre el prototipo desarrollado y el dispositivo extranjero, tanto en características y precio de venta.

3.5 CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPO Y DE DISPOSITIVOS DISPONIBLES EN EL MERCADO.

En el mercado hay varios dispositivos que permiten realizar análisis como los indicados en este proyecto. Entre estos se pueden citar los siguientes:

Plataforma de presiones Pedistar :

- Precio \$3747
- Permite realizar estudios estáticos, posturológicos y dinámicos.
- Toma y visualización de tomas de datos de presiones.
- Interfaz virtual en 3D.
- Dimensiones de 45 cm ancho x 57,5 cm alto x 4 cm profundidad y un peso de 2 kilogramos.
- Toma de angulaciones.

Plataforma de presiones Dinascan

- Plataforma que puede realizar el estudio dinamométrico durante la marcha.
- Permite analizar tanto marcha normal como patológica.
- Permite realizar valoraciones de la discapacidad como también su evolución.

Sistemas de sensores de fuerza novel

- Plantilla que ocupa sensores de presión capacitivos de alta precisión.
- Permite análisis tanto estáticos como dinámicas.
- Los datos pueden verse en tiempo real a través de fibra óptica o bluetooth.
- Los datos también pueden ser almacenados en una memoria SD.

- Este tipo de plantilla incluye un software para el análisis en 2D, 3D e isobárico.

Plantillas electrónicas para ortopedia y rehabilitación moticon

- Son plantillas que miden las presiones plantares, aceleraciones y trayectorias de centro de gravedad.
- Tienen sincronización con video.
- Es liviana, precisa, inalámbrica, ultra delgada y robusta.
- Rango de operación: 2 -5m.

Plantillas Biofoot

- Pack comercial con cinco plantillas de diversas tallas.
- Incluye módulo transmisor y tarjeta de recepción.
- Software específico del dispositivo.
- Cada plantilla cuenta con 64 sensores

Plantilla instrumentada desarrollada

- Sistema de adquisición de presión plantar mediante 6 sensores de presión y 1 acelerómetro.
- Prototipo desmontable y ajustable de talla.
- Adquisición y visualización de temperatura.
- Trasmisión inalámbrica hasta un rango de 10 metros.
- Interfaz gráfica amigable con el usuario.
- La interfaz permite visualizar datos como el patrón de presión, velocidad, ángulo de pisada, longitud de paso, numero de pasos y el ciclo de marcha.
- Plantilla liviana, robusta y ergonómica para el usuario.
- Precio a venta al público después de desarrollar un estudio de costos de \$806.

3.6 ANÁLISIS DE LOS DISPOSITIVOS

Precio y disponibilidad en el mercado local

En el mercado local estos tipos de dispositivos no están a la venta y el único dispositivo con el precio de venta publicado en su página web es la plataforma Pedistar con un precio de \$3747. El dispositivo desarrollado en este proyecto en un primer instante se cotiza a \$ 806.

Comodidad

Hay dos tipos de dispositivos para el análisis de marcha, éstos son las plataformas de marcha y las plantillas instrumentadas, las primeras permiten únicamente un análisis estático sin embargo son más fáciles de conseguir en el mercado. Las plantillas

instrumentadas en cambio permiten un análisis estático como dinámico, pero son más difíciles de adquirir y muchas están en fases de desarrollo.

Adquisición de datos

Tanto las plataformas como las plantillas instrumentadas basan su funcionamiento principalmente en la adquisición presiones plantares mientras que nuestro prototipo aparte de la adquisición de las presiones plantares también censa ángulos, aceleraciones y temperatura permitiendo hacer análisis más completos.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados que hemos obtenido durante el desarrollo de este trabajo de titulación indican que se han logrado cumplir los objetivos planteados. Se desarrolló una plantilla con 6 sensores de fuerza dispuestos en las zonas de mayor presión plantar, con la adquisición y envío de datos de manera inalámbrica. Los sensores Flexi Force A401 poseen una vida útil aceptable y un funcionamiento con alto rendimiento. Se realizaron pruebas con sujetos saludables y con pacientes diagnosticados con diabetes y se pudo verificar la diferencia en el patrón de presiones y de los parámetros de marcha. Esto confirmó la necesidad de realizar el seguimiento a los pacientes con diabetes como medida preventiva de pie diabético.

La interfaz gráfica desarrollada permite que el usuario tenga acceso rápido a todos los datos obtenidos por el sistema. Permite una fácil configuración para el inicio y fin de la transmisión, para el almacenamiento de datos y para la visualización de gráficas de presión en tiempo real. En la interfaz gráfica se pudo obtener las curvas de presión durante el ciclo de marcha y los patrones de presión ejercidos por diversos pacientes a lo largo de las pruebas. Otros parámetros de marcha como velocidad, ángulo de apertura y longitud de paso también son visualizados al momento de finalizar una prueba de marcha y pueden ser almacenados en una base de datos para cada paciente. Todos los parámetros fueron validados en numerosas pruebas con varias personas para que el error obtenido por parte de las plantillas instrumentadas sea mínimo y los datos puedan servir para un análisis posterior

La plantilla permite desmontar fácilmente los sensores y como recomendación se debe colocar de manera fija el MPU6050 o con terminales o sockets que no tengan la posibilidad de desconexión al momento de las pruebas. Esto debido a que se podrían generar problemas en la interfaz gráfica y pérdida de comunicación sin recuperación de transmisión.

Se realizaron pruebas con personas saludables y con personas que han sido diagnosticados con diabetes. Los resultados obtenidos fueron contrastados con datos de estudios publicados en la literatura, para poder comprobar si existen sobre presiones o datos anómalos obtenidos en las pruebas.

Durante las pruebas se debe tener en cuenta que la explicación sobre los fines a los cuales se quiere llegar debe ser clara y precisa, siempre teniendo en cuenta la confidencialidad de los datos, imágenes o videos que se puedan realizar durante las mismas.

Los datos obtenidos nos han ayudado a confirmar algunas molestias o afecciones que pueden estar teniendo los sujetos de prueba o los pacientes con diabetes, como sobrepresiones en diversas zonas del pie que pueden estar afectando directamente al pie en análisis. Esto causa molestias en el pie opuesto, debido a que este intenta realizar una corrección o compensación en las fuerzas ejercidas en las zonas plantares.

Todos los datos obtenidos de estos pacientes para posteriores estudios fueron guardados en varios archivos específicos para cada sujeto o paciente, con un formato el cual pueda ser utilizado en diversas plataformas para su análisis.

De acuerdo a todos los aspectos analizados, se ha llegado a la conclusión de que el proyecto puede llegar a tener un gran impacto en el campo de la instrumentación biomédica. Para tener un mayor alcance se debe intentar lograr un menor costo con el desarrollo de una interfaz gráfica en software libre y la disminución de tamaños de los circuitos de adquisición y control. Otro factor importante es el mantener el tipo de sensores empleados por su calidad y buen funcionamiento, aunque el costo sea elevado su rendimiento es bueno.

Para un mejor análisis de los datos se debería lograr un algoritmo en el cual se puedan generar alertas automáticas sobre presiones elevadas en pacientes de acuerdo a su peso y estatura, logrando que al mismo tiempo las plantillas puedan ser utilizadas durante gran parte de las actividades diarias de los pacientes y que estas alertas sean enviadas tanto al paciente que utiliza las plantillas como al especialista que este al tanto del control y la prevención de problemas en el pie diabético.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. G. Calvo, P. Blasco y P. Laborda, «El pie diabetico,» Navarra España, 2003.
- [2] A. Z. R. B. Y. W. Abdul Hadi, «Sensors,» *Journal Sensors*, pp. 7-10, 2012.
- [3] INEC, «Diabetes segunda causa de muerte, despues de las enfermedades isquémicas del corazon,» 2016.
- [4] A. C. Ramírez, «Manejo multidisciplinar del pie diabetico,» de *Manejo conservador de la infección no grave del pie diabético*, Barcelona España, 2015, 2015, pp. 53-60.
- [5] podoactiva, «podoactiva,» podoactiva , 14 11 2018. [En línea]. Available: <https://www.podoactiva.com/es/blog/pie-diabetico-consejos-y-tratamientos-para-prevenir-ulceras>. [Último acceso: 3 9 2019].
- [6] N. Guglielmone y F. Noya, «Prototipo de plantilla para prevencion de ulceras plantares en personas con diabetes,» Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, 2016.
- [7] C. Marco, «Cinesiologia de la marcha humana normal».
- [8] Y. Montaña y D. Monroy, «Evaluacion de la presion plantar durante la marcha en el adulto mayor,» Bogota, 2016.
- [9] A. Reyes Castro, «SlideShare,» 22 Enero 2013. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/AngiieReyes/marcha-16121010>. [Último acceso: 4 Septiembre 2019].
- [10] Y. Montaña y D. Monroy, «Evaluacion de la presion plantar durante la marcha en el adulto mayor,» Bogota D.C, 2016.
- [11] R. R. S. R. Claudian Lescano, «Desarrollo de un sistema de registro dinamico de presiones plantares,» 2013.
- [12] I. Electronics, «FSR 402 Data Sheet».
- [13] Tekscan, «Tekscan Pressure Mapping, Force Measurement & Tactile Sensors,» [En

- línea]. Available: <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a401>. [Último acceso: 23 Enero 2019].
- [14] Jecrespom, «Aprendiendo Arduino,» 13 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/hc-05/>. [Último acceso: 23 Enero 2019].
- [15] Arduino, «Arduino,» 5 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://jamangandi2012.blogspot.com/2012/10/que-es-arduino-te-lo-mostramos-en-un.html#targetText=Arduino%20es%20una%20plataforma%20de,c%C3%B3digo%20abierto%20para%20prototipos%20electr%C3%B3nicos..> [Último acceso: 02 Septiembre 2019].
- [16] Arduino.cl, «Arduino,» MCI Electronics, [En línea]. Available: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>. [Último acceso: 4 Septiembre 2019].
- [17] E. Crespo, «Aprendiendo Arduino,» [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/arduino-nano/>. [Último acceso: 23 Enero 2019].
- [18] M. electronics, «Arduino.cl,» [En línea]. Available: <https://arduino.cl/arduino-nano/>. [Último acceso: 23 Enero 2019].
- [19] N. Mechatronics, «Naylamp Mechatronics,» [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html. [Último acceso: 4 Septiembre 2019].
- [20] N. Instruments, «National Instruments,» National Instruments Corporation, [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>. [Último acceso: 2 Septiembre 2019].
- [21] estuelectronic, «estuelectronic,» [En línea]. Available: <https://estuelectronic.wordpress.com/2012/08/06/que-es-y-para-que-sirve-labview/>. [Último acceso: 2 Septiembre 2019].
- [22] Autodesk, «Inventor,» Autodesk, [En línea]. Available: <https://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/overview>. [Último acceso: 4 Septiembre 2019].
- [23] fisaude.com, «fisaude.com,» fisaude.com, 30 8 2019. [En línea]. Available: <https://tienda.fisaude.com/plataforma-presiones-analisis-biomecanico-marcha-3d-pedistar-incluye-pasarela-regalo-p-43889.html>. [Último acceso: 30 8 2019].
- [24] M. Schmidt, «Desarrollo de un sistema compacto para la medición de propiedades atenuadoras de zapatillas deportivas,» Universidad Politecnica de Catalunya, Catalunya, 2013.
- [25] I. d. B. d. Valencia, «Instituto de Biomecanica de Valencia,» [En línea]. Available: <https://www.ibv.org/productos-y-servicios/productos/aplicaciones-biomecanicas/dinascanibv-plataformas-dinamometricas>. [Último acceso: 4

Septiembre 2019].

- [26] novel.de, «novel.de,» novel.de, 23 7 2019. [En línea]. Available: <https://www.novel.de/products/pedar/>. [Último acceso: 25 9 2019].
- [27] B. C. e. Movimiento, «Plantillas electrónicas para ortopedia y rehabilitación,» Bogota.
- [28] L. Cerda, «Manejo del transtorno de marcha del adulto mayor,» 2014.
- [29] X. Aguado y L. Alegre, «Cuaderno de Practicas de Biomecanica de las Tecnicas Deportivas,» Toledo.
- [30] Electronilab, «Electronilab,» [En línea]. Available: <https://electronilab.co/tienda/arduino-nano-v3-atmega328-5v-cable-usb/>. [Último acceso: 22 Agosto 2019].
- [31] trimaker, «trimaker,» Trimaker, [En línea]. Available: <https://trimaker.com/pla-y-abs-que-filamento-elegir-en-impresion-3d-por-fdm/>. [Último acceso: 22 Agosto 2019].
- [32] C. p. e. c. y. l. p. d. enfermedades, «CDC,» [En línea]. Available: https://www.cdc.gov/healthyweight/spanish/assessing/bmi/adult_bmi/metric_bmi_calculator/bmi_calculator.html. [Último acceso: 7 12 2019].
- [33] U. Formulas, «Universo Formulas,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.universoformulas.com/estadistica/descriptiva/muestra-estadistica/>. [Último acceso: 12 Febrero 2019].
- [34] Autodesk.com, «3D Cad Portal,» [En línea]. Available: <http://www.3dcadportal.com/autocad.html>. [Último acceso: 4 Septiembre 2019].

ANEXOS

ANEXO 1: PROGRAMACIÓN PARA CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS BLUETOOTH HC-05.

```
//-----//
//          UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA          //
//-----//
// INTEGRANTES:                                     //
//          JUAN DIEGO AREVALO MARQUEZ                //
//          CRISTHIAN XAVIER SANGURIMA TENEPAGUAY     //
//-----//
//          PROYECTO TECNICO PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO //
//          COMO INGENIERO ELECTRONICO                //
//          CON APLICACION A LA BIOMEDICINA           //
//-----//
//          CONFIGURACIONES DE MODULO BLUETOOTH HC-05 //
//-----//
/*
 * Conexiones
 * Arduino HC-05
 * 11 Pin  TX
 * 10 Pin  RX
 * 9 Pin   EN
 * 8 Pin   VCC
 * GND    GND
 */
#include <SoftwareSerial.h>

// Definimos el objeto para la comunicación serie
SoftwareSerial BT(10, 11); // 10 RX, 11 TX.

int VCC = 8; // Pin digital para alimentar el módulo Bluetooth HC-05
int EN = 9; // Pin digital para la habilitación del módulo Bluetooth HC-05

//-----//
void setup()
{
  pinMode(VCC, OUTPUT); // Pin digital 8 como salida
  pinMode(EN, OUTPUT); // Pin digital 9 como salida

  digitalWrite(EN, HIGH); // Habilitamos el módulo Bluetooth HC-05
  delay(500); // Esperamos 500 ms
  digitalWrite (VCC, HIGH); // Encendemos el módulo Bluetooth HC-05
```

```

Serial.begin(9600); // Comienzo la comunicación con el monitor serie
BT.begin(38400); // Comienzo de la comunicación con el módulo Bluetooth HC-05 (por
defecto)

Serial.println("Esperando comandos AT ... ");
}

//-----//
void loop()
{
// Si hay datos disponibles en el monitor serie
if (Serial.available())
{
// Escribimos los valores en el módulo bluetooth HC-05
BT.write(Serial.read());
}
// Si hay datos disponibles en el módulo bluetooth HC-05
if (BT.available())
{
// Mostramos los valores en el monitor serie
Serial.write(BT.read());
}
}
}

```

ANEXO 2: PROGRAMACIÓN PARA ADQUISICIÓN DE SEÑALES EN SENSORES FLEXI FORCE A401 Y MPU6050.

```

//-----//
//          UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA          //
//-----//
//          PROYECTO TECNICO PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO          //
//          COMO INGENIERO ELECTRONICO                          //
//          CON APLICACION A LA BIOMEDICINA                          //
//-----//
//          ADQUISICION DE DATOS EN SENSORES Y MPU6050          //
//          PARA ENVIO VIA BLUETOOTH                          //
//-----//
//DECLARACION DE LIBRERIAS, VARIABLES Y PINES          //
//-----//
//GND - GND
//VCC - VCC
//SDA - Pin A4
//SCL - Pin A5
#include "I2Cdev.h"
#include "Wire.h"
#include "MPU6050.h"
#define MPU 0x68          //Dirección I2C de la IMU
#define A_R 16384.0      //Radios de conversion
#define G_R 131.0        //Radios de conversion
#define RAD_A_DEG = 57.295779 //Conversión de radianes a grados 180/PI
//MPU-6050 da los valores en enteros de 16 bits
int16_t AcX, AcY, AcZ, GyX, GyY, GyZ, Tmp;          //Valores sin refinar
int s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,gx, gy, gz,ax,ay,az, angulo, temperatura;
int velocidad;
char buffer [40];
long tiempo_prev;
float dt,temp;
//Angulos
float Acc[2];
float Gy[3];
float Angle[3];
MPU6050 mpu;
//-----//
//INICIALIZANDO SERIAL Y MPU          //
//-----//
void setup()
{
Wire.begin();
Wire.beginTransmission(MPU);

```

```

Wire.write(0x6B);
Wire.write(0);
Wire.endTransmission(true);
// Configura el acelerometro con (2g)
Wire.beginTransaction(MPU);
Wire.write(0x1C);
Wire.write(0x00); // 00000000 = 2g. Sensibilidad = 16384
Wire.endTransmission(true);
// Configura el giroscopio con (250°/s)
Wire.beginTransaction(MPU);
Wire.write(0x1B);
Wire.write(0x00); // 00000000 = 250°/s. Sensibilidad = 131
Wire.endTransmission(true);
Serial.begin(9600);
}
//-----//
//OBTENCION DE PARAMETROS DE LA MARCHA
//-----//
void loop()
{
  //Leer los valores del Acelerómetro de la IMU
  Wire.beginTransaction(MPU);
  Wire.write(0x3B); //Pedir el registro 0x3B - corresponde al AcX
  Wire.endTransmission(false);
  Wire.requestFrom(MPU,8,true); //A partir del 0x3B, se piden 8 registros
  AcX=Wire.read()<<8|Wire.read(); //Cada valor ocupa 2 registros
  AcY=Wire.read()<<8|Wire.read();
  AcZ=Wire.read()<<8|Wire.read();
  Tmp=Wire.read()<<8|Wire.read(); //Estamos pidiendo el registro de temperatura
  //-----//
  //RESULTADOS DE CALIBRACION
  //-----//
  //-----Izquierdo-----//
  //mpu.setXGyroOffset(-3);
  //mpu.setYGyroOffset(8);
  //mpu.setZGyroOffset(40);
  //mpu.setZAccelOffset(16378);
  //-----Derecho-----//
  mpu.setXGyroOffset(-7);
  mpu.setYGyroOffset(-5);
  mpu.setZGyroOffset(5);
  mpu.setZAccelOffset(16397);
  //Obtención de temperatura con MPU6050
  temp = (Tmp/340.00+36.53); //Transformación a grados Centígrados

  //Leer los valores del Giroscopio
  Wire.beginTransaction(MPU);
  Wire.write(0x43);

```

```

Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(MPU,6,true); //A diferencia del Acelerómetro, solo se piden 6 registros
GyX=Wire.read()<<8|Wire.read();
GyY=Wire.read()<<8|Wire.read();
GyZ=Wire.read()<<8|Wire.read();
//Obtener velocidad de marcha con giroscopio
mpu.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
mpu.getRotation(&gx, &gy, &gz);
float ax_m_s2 = ax * (9.81/16384.0);
float ay_m_s2 = ay * (9.81/16384.0);
float az_m_s2 = az * (9.81/16384.0);
float gx_deg_s = gx / 131.0;
float gy_deg_s = gy / 131.0;
float gz_deg_s = gz / 131.0;
float v = sqrt(pow(ax_m_s2,2) + pow(ay_m_s2,2) + pow(az_m_s2,2)); //prueba1
velocidad = (int)v-19; //prueba1
//Calculo del ángulo del Giroscopio
Gy[0] = GyX/G_R;
Gy[1] = GyY/G_R;
Gy[2] = GyZ/G_R;
//Obtención de la derivada para obtener ángulo en eje Z
dt = (millis()-tiempo_prev)/1000.0;
tiempo_prev = millis();
//Aplicar el Filtro Complementario
//Calculo del Angulo en Z integración respecto al tiempo para calcular YAW(dirección)
Angle[2]=0.98989*Angle[2]+Gy[2]*dt;
//-----//
//Leer Datos Sensores //
//-----//
s1=analogRead(A0);
s2=analogRead(A1);
s3=analogRead(A2);
s4=analogRead(A3);
s5=analogRead(A6);
s6=analogRead(A7);
s7=Angle[2];
angulo=(int)s7;
temperatura=temp;
//-----//
//Envío de Datos Bluetooth //
//-----//
sprintf(buffer, "%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d",s3,s2,s5,s1,s6,s4,angulo,temperatura,velocidad); //Pie Derecho
//sprintf(buffer, "%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d",s4,s3,s2,s5,s1,s6,angulo,temperatura,velocidad); //Pie Izquierdo
Serial.println(buffer);
delay(50); //Nuestra dt sera, pues, 0.050, que es el intervalo de tiempo en cada medida
}

```

ANEXO 3: PROGRAMACIÓN DE INTERFAZ GRÁFICA EN SOFTWARE LABVIEW

Tutora: Dra. Ana Cecilia Villa Parra

Integrantes: Juan Arévalo
Cristhian Sangurima

PUERTOS DE COMUNICACIÓN

STOP

PUERTO COM.1

PUERTO COM.2

Plantilla Izquierda

Plantilla Derecha

Cal PI

Cal PD

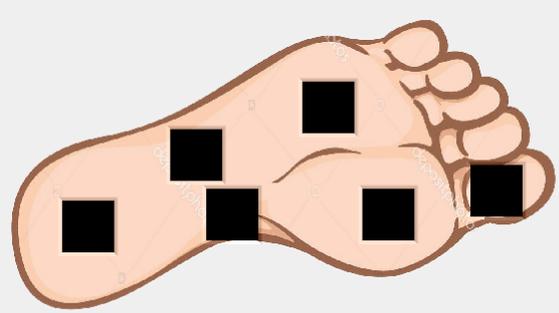
Distancia(m)

Umbral(Kpa)

Tiempo de Marcha

Vel Marcha(m/s)

PLANTILLAS INSTRUMENTADAS



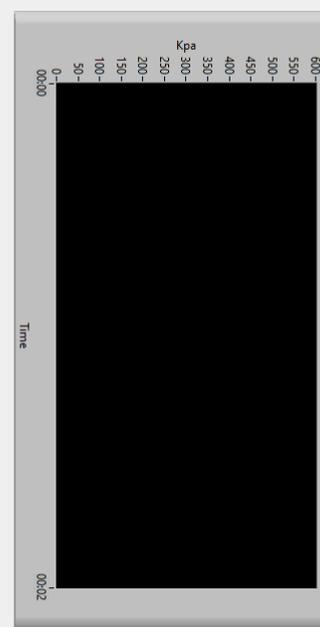
1108 Kpa
1010 Kpa
970 Kpa
880 Kpa
780 Kpa
680 Kpa
580 Kpa
480 Kpa
390 Kpa
290 Kpa
190 Kpa
92 Kpa
0 Kpa

Guardar Datos Pie Izquierdo

C:\Users\Usuario\Dropbox\TESS\Base De Datos\Fuadelfr_1.dms

Gráficas Parametros de Marcha

Ciclo de Marcha o Señales Pie Izquierdo



Time

Ciclo de Marcha Tiempo Real Pie Izquierdo



Time

Fuerza Total kpa

0

Áng Máx PI

0

Dis. Paso (m) PI

0

Pasos PI

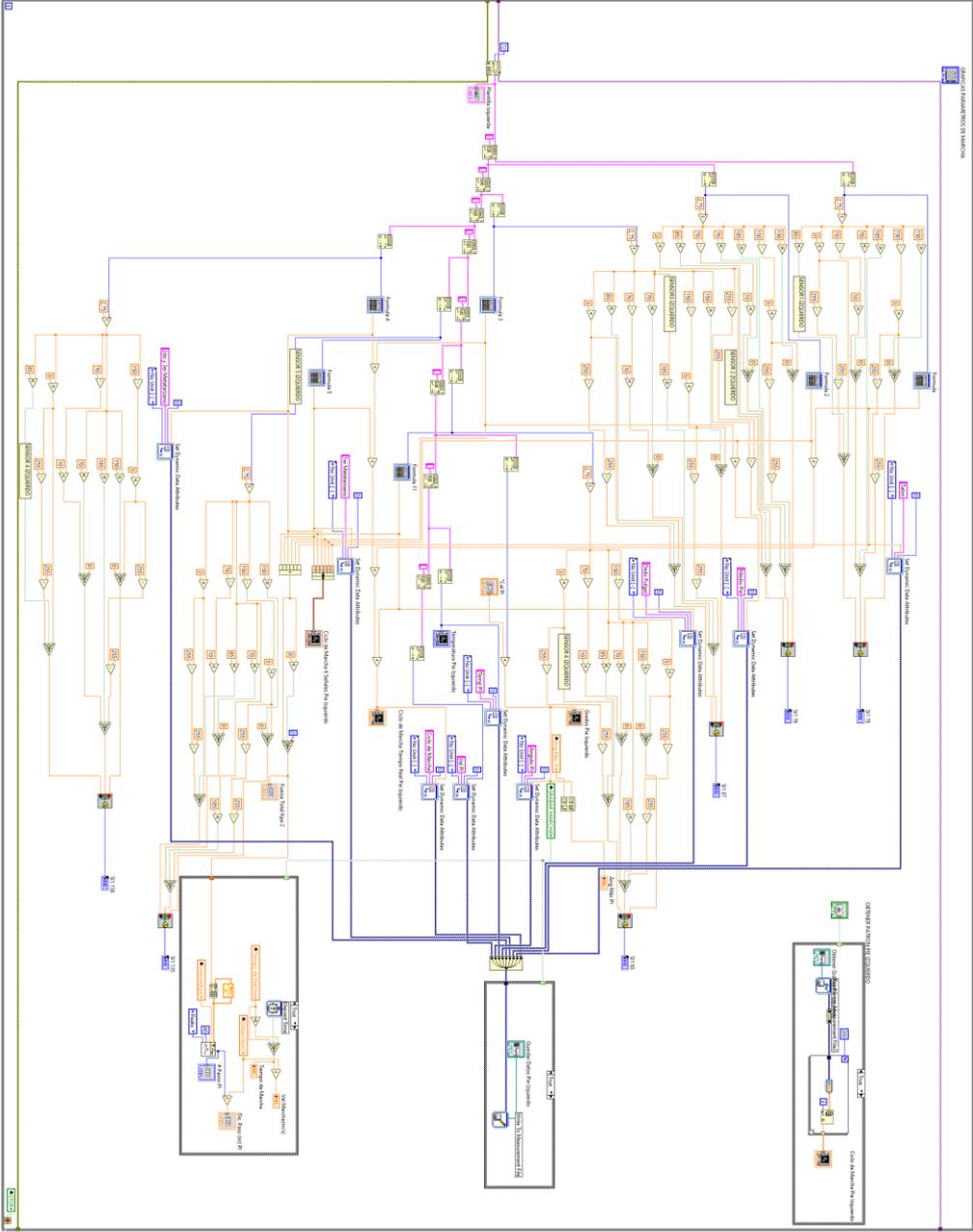
0

Parámetros Online

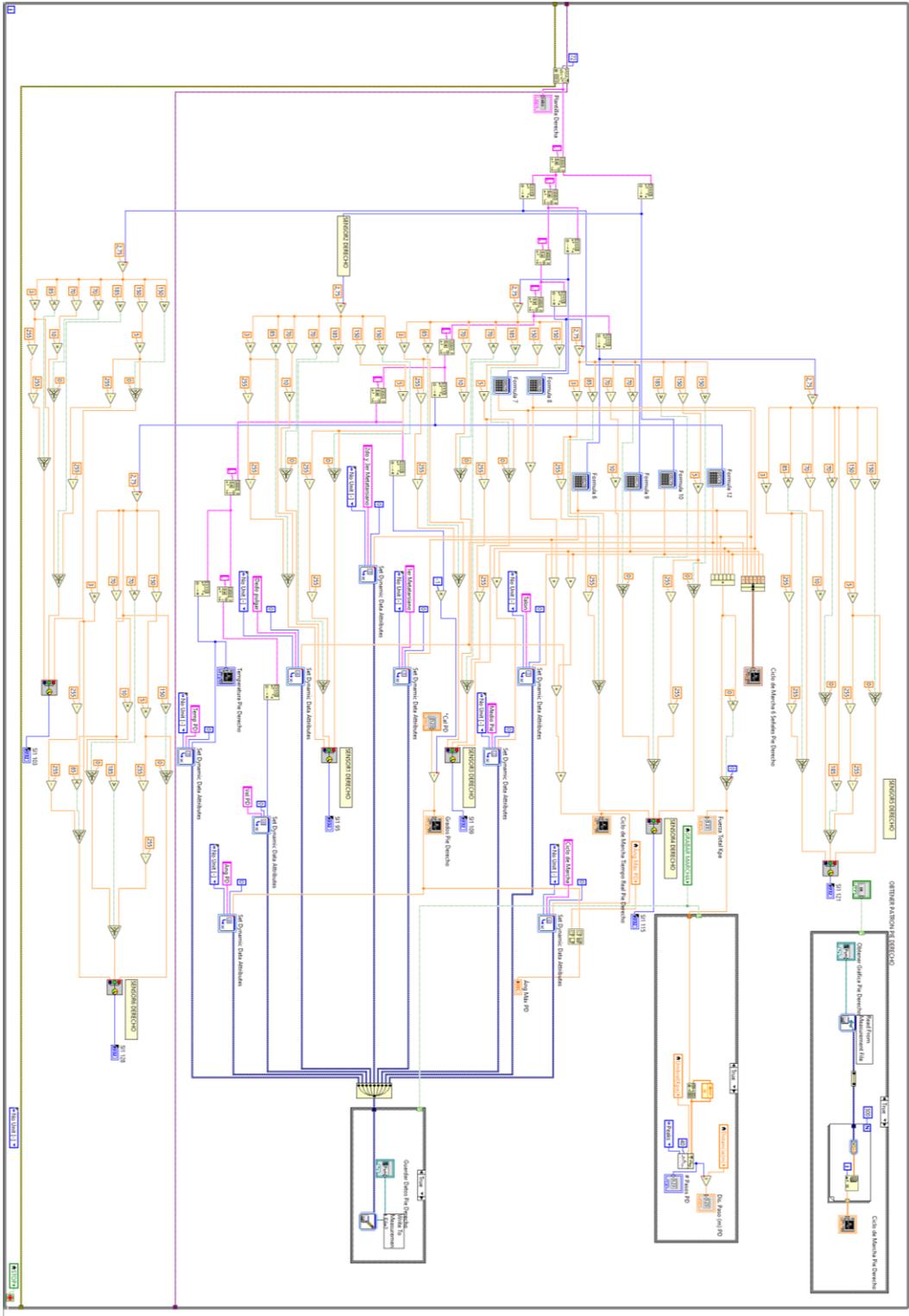


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

PROGRAMACIÓN PIE IZQUIERDO



PROGRAMACIÓN PIE DERECHO



ANEXO 4: MANUAL DE USUARIO HARDWARE Y SOFTWARE

Plantillas instrumentadas hardware:

Paso 1: Colocar sensores Flexi Force A401 en orificios paralelos en plantillas.

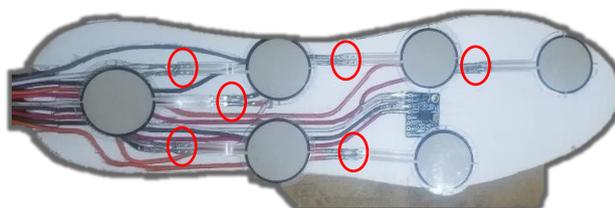


Figura 86. *Disposición de sensores dentro de plantilla instrumentada.* Fuente: Autor.

Paso 2: Colocar tela de protección sobre plantilla.



Figura 87. *Tela de protección colocada sobre sensores.* Fuente: Autor.

Paso 3: Colocar y ajustar plantillas en los pies del paciente.



Figura 88. *Colocación de plantillas en pies de paciente.* Fuente: Autor

Paso 4: Colocar una batería de 9v dentro de la caja contenedora en los sockets dispuestos para estas baterías.

Paso 5: Colocar caja contenedora en ambos tobillos del paciente

Paso 6: Conectar sockets de bus de datos entre plantillas y caja contenedora.



Figura 89. Colocación de caja contenidora en tobillo y conexión entre dispositivos. Fuente: Autor.

Plantillas instrumentadas software:

Paso 1: Agregar dispositivos bluetooth

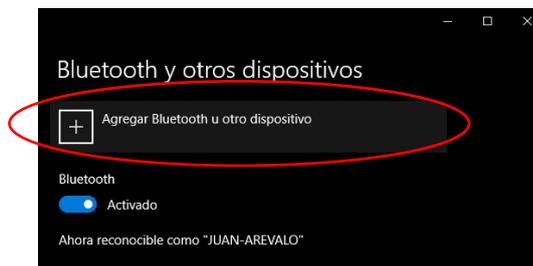


Figura 90. Paso 1 agregar dispositivos. Fuente: Autor.

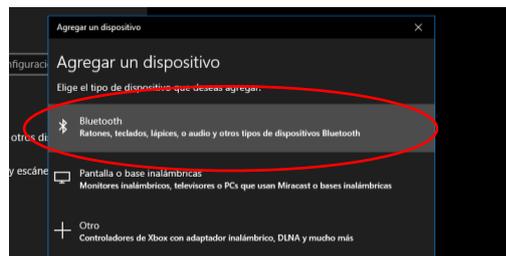


Figura 91. Paso 1 agregar dispositivos bluetooth. Fuente: Autor.

Paso 2: Escoger dispositivos con nombre "Pie_derecho" y contraseña 1234

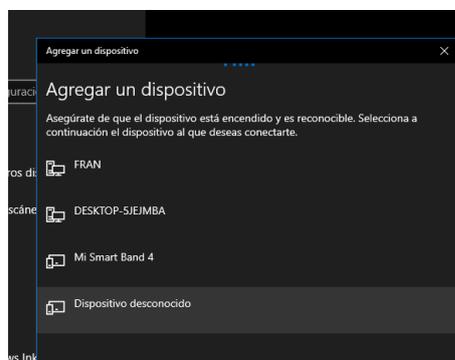


Figura 92. Selección de dispositivo para emparejamiento. Fuente: Autor.

Paso 3: Realizar el paso 1 y 2 para conexión con “Pie_izquierdo” con contraseña 1234

Paso 4: Revisión de puertos COM.

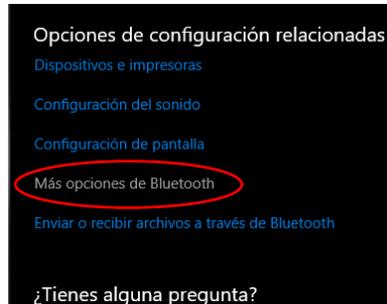


Figura 93. Paso 4 revisión de puertos COM. Fuente: Autor.

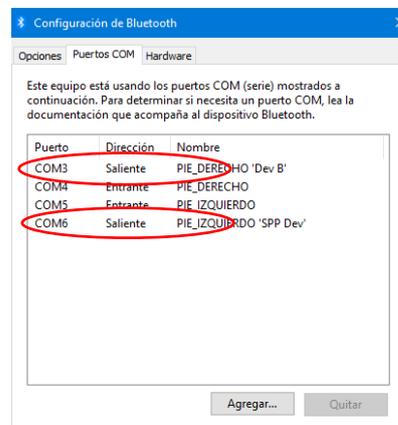


Figura 94. Reconocimiento de puertos COM para dispositivos transmisores. Fuente: Autor.

Los puertos a utilizar para la interfaz gráfica serán aquellos con dirección saliente para el pie derecho y pie izquierdo que en este caso son COM3 y COM6.

Paso 5: Doble Click en icono con nombre “Plantilla_Instrumentada_UPS”.



Figura 95. Visualización de icono de aplicación ejecutable del sistema. Fuente: Autor.

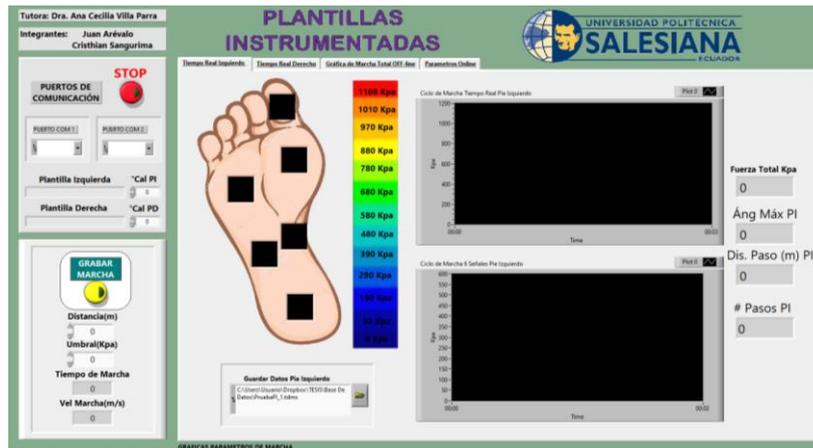


Figura 96. Interfaz gráfica del sistema abierta. Fuente: Autor.

Paso 6: Escoger en PUERTO PI el nombre del COM saliente para pie izquierdo revisado en el paso 4

Paso 7: Escoger en PUERTO PD el nombre del COM saliente para pie derecho revisado en el paso 4



Figura 97. Selección de puertos COM previamente revisados. Fuente: Autor.

Paso 8: Encender los dos dispositivos físicos de transmisión en el switch ON/OFF, verificar que comience a parpadear las luces de los dispositivos.

Paso 9: Dar click en el botón de color rojo “stop”.

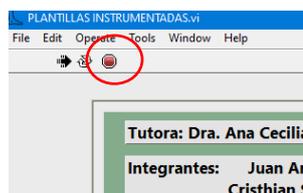


Figura 98. Detener arranque por defecto del programa. Fuente: Autor.

Paso 10: Dar click en el botón “correr continuamente”.

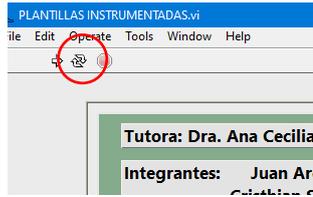


Figura 99. Inicio o arranque del programa para recepción de datos. Fuente: Autor.

Paso 11: Para comprobar la correcta transmisión y recepción de datos debe comprobar la variación de datos en las siguientes secciones.



Figura 100. Revisión de recepción de datos en interfaz gráfica. Fuente: Autor.

Se visualizará el cambio de colores en las plantas de los pies dispuestos en la interfaz gráfica al igual que una gráfica en tiempo real de las presiones adquiridas.

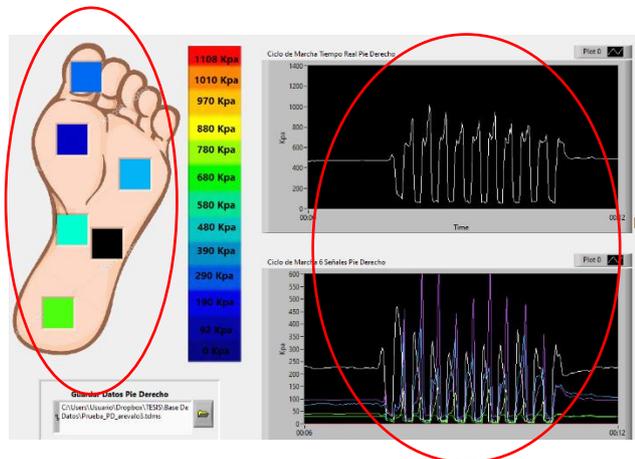


Figura 101. Revisión de funcionamiento de gráficas y ciclos de marcha por recepción de datos. Fuente: Autor.

De existir algún inconveniente en la transmisión de datos reiniciar los dispositivos transmisores al igual que el archivo ejecutable de la interfaz gráfica, y en caso de persistir este daño revisar funcionamiento de batería de alimentación.

GUARDADO DE DATOS:

Paso 13: Para el guardado de datos se debe ingresar los datos de umbral y distancia de prueba.



Figura 102. Configuración de valores en umbral y distancia de marcha. Fuente: Autor.

Paso 14: Se debe escoger la ubicación de guardado de archivos para las pruebas que se realice, el archivo deberá tener la extensión “.tdms”.

Paso 15: Debe repetirse estos pasos para el pie derecho como para el pie izquierdo.

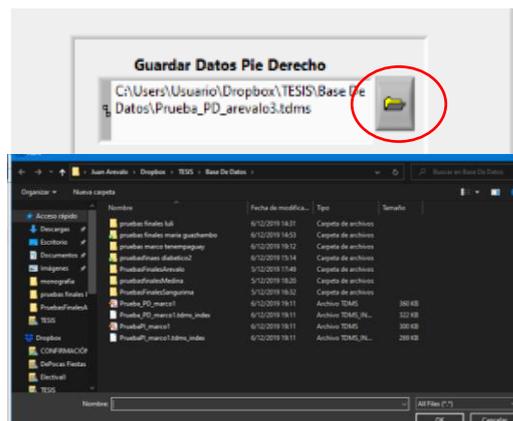


Figura 103. Selección de ubicación para guardado de datos de pacientes.

Paso 16: Dar click en el botón de color amarillo con nombre “GRABAR MARCHA” en el cual quedara encendida una pequeña luz amarilla dentro del botón.



Figura 104. Botón para inicio de grabación de marcha de pacientes. Fuente: Autor.

Para detener grabación de datos debe dar click por segunda vez en el botón de color amarillo “GRABAR MARCHA” en cual tomara un color amarillo en toda la superficie del botón.

ANEXO 5: CARTA DE CONSENTIMIENTO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA BIOMÉDICA “GIIB”

TESIS: Prototipo de Plantilla Instrumentada para la Adquisición de Presión Plantar y Parámetros de la Marcha Orientada a la Prevención de Úlceras en Pie Diabético

Fecha: _____

Yo, _____, ciudadano(a) ecuatoriano(a) con documento de identidad No. _____ certifico que he sido informado(a) con claridad y veracidad respecto al desarrollo de las pruebas del Prototipo de Plantilla Instrumentada para la Adquisición de Presión Plantar y Parámetros de la Marcha Orientada a la Prevención de Úlceras en Pie Diabético, correspondiente al trabajo de Titulación para Ingeniero Electrónico al que los estudiantes Juan Diego Arévalo Márquez y Christian Xavier Sangurima Tenepaguay me han invitado a participar. Informo que actúo consecuente, libre y voluntariamente como colaborador y que he comprendido satisfactoriamente la naturaleza y propósito de las mencionadas pruebas. Indico que se me ha dado la oportunidad de aclarar todas mis dudas, de que soy consiente que en cualquier momento puedo formular preguntas sobre alguna duda que se me presente en torno al procedimiento y de que se respetará la buena fe, confiabilidad y confidencialidad de la información por mí suministrada, lo mismo que mi seguridad física y psicológica.

Estudiante Juan Diego Arévalo Márquez

CI: _____

Estudiante Christian Xavier Sangurima Tenepaguay

CI: _____

Participante _____

CI: _____