



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL

TÍTULO DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

TEMA:

**“SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE PRESIÓN PLANTAR EN ESTÁTICA
PARA NIÑOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE APRENDIZAJE MÁQUINA”**

AUTOR: GODOY REINOSO ANDRÉS ESTEBAN

DIRECTOR: MSC. LUIS EDILBERTO SUÁREZ ZAMBRANO

IBARRA-ECUADOR

2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO			
Cédula de identidad	1003131263		
Apellidos y nombres	Godoy Reinoso Andrés Esteban		
Dirección	Ibarra, Los Ceibos		
E-mail	aegodoyr1@utn.edu.ec		
Teléfono fijo	062610165	Teléfono móvil	0990956184
DATOS DE LA OBRA			
Título	SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE PRESIÓN PLANTAR EN ESTÁTICA PARA NIÑOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE APRENDIZAJE MÁQUINA		
Autor	Godoy Reinoso Andrés Esteban		
Fecha	28/11/2022		
Programa	Pregrado		
Título	Ingeniero en Electrónica y Redes de Comunicación		
Director	Ing. Luis Eduardo Suárez Zambrano, MsC.		

Firma:

Nombre: Godoy Reinoso Andrés Esteban



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

En la ciudad de Ibarra, a los 28 días del mes de noviembre del 2022

EL AUTOR:

Godoy Reinoso Andrés Esteban

CI: 1003131263



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN.

MAGISTER LUIS SUÁREZ, DIRECTOR DEL PRESENTE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA:

Que, el presente trabajo de Titulación “SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE PRESIÓN PLANTAR EN ESTÁTICA PARA NIÑOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE APRENDIZAJE MÁQUINA” Ha sido desarrollado por el señor Godoy Reinoso Andrés Esteban bajo mi supervisión.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor de la verdad.

Ing. Luis Suárez MsC.

DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

A Mis Padres porque debido a su permanencia y constancia en mi vida, puedo lograr una meta más en mi vida y pido a Dios que les brinde salud para que sigan siendo esa compañía fundamental e incondicional para mí.

A mis Hermanos ya que por su amor brindado han logrado que pueda superar todo obstáculo, su amor por mí ha sido una pieza infaltable en cada logro que poseo y no tengo dudas que seguirán a mi lado apoyándome a levantarme en situaciones duras; con ellos pude, puedo y podré superarlo todo.

A mis Maestros de carrera que han puesto el conocimiento y valores en mí, pero con especial mención al MSC. Luis Suarez quien me ha brindado su apoyo, sabiduría, consejos y experiencia como tutor en la elaboración del presente trabajo de grado, al MSC. Jaime Michilena, por su ayuda infalible no solamente en la elaboración de este trabajo si no a lo largo de la carrera, él ha brindado su apoyo, sabiduría a sus estudiantes, ha sido un pilar para la culminación no solamente de mi título profesional si no de muchos otros, y a la Lic. Daniela Zurita por su ayuda y consejos, muchas gracias Maestros.

Andrés Godoy

DEDICATORIA

Dedico esta tesis,

A mis padres por todo el apoyo brindado a lo largo de mi vida, por su amor, su comprensión y su guía, su cuidado en todo ámbito de mi vida, en lo emocional, espiritual y profesional, sin su compañía no habría llegado a este punto de mi vida en el cual puedo decir que sus valores inculcados en mi desde mi niñez han rendido frutos y han forjado a un hombre.

A mis hermanos porque juntamente con mis padres han estado en momentos cruciales de mi vida, han sido el soporte en circunstancias difíciles y han sido los propulsores de mi felicidad, su cariño y apoyo me han brindado aliento a lo largo de mi vida y estoy seguro que seguirán haciéndolo el resto de mi vida.

Andrés Godoy

ÍNDICE DE CONTENIDOS

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	¡Error! Marcador no definido.
CONSTANCIAS	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XV
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I. Antecedentes	3
1.1. Introducción	3
1.2. Problema	3
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo General.	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	6
1.4. Alcance	6
1.5. Justificación	8
CAPÍTULO II. Revisión bibliográfica	10
2.1. Laboratorio de análisis de marcha.....	10
2.2. Sistema locomotor.....	11
2.2.1. Parte Axial.	11
2.2.2. Parte Apendicular.....	11
2.3. Pie.....	11
2.3.1. Huesos del pie.....	11
2.3.1.1. Tarso.	12
2.3.1.2. Metatarsianos.	12
2.3.1.3. Las falanges.....	12
2.3.2. Articulaciones del pie.....	13
2.3.2.1. Inversión o supinación.....	13
2.3.2.2. Eversión o pronación.....	14
2.3.3. Músculos del pie.	14
2.3.4. Bóveda plantar.	14

2.4.	Presiones plantares en estática	16
2.5.	Tipos de Pisada	16
2.5.1.	Patologías del pie.	17
2.5.1.1.	Pie plano.....	17
2.5.1.2.	Pie plano normal.	18
2.5.1.3.	Pie normal.	18
2.5.1.4.	Pie cavo normal.....	19
2.5.1.5.	Pie cavo.....	19
2.5.1.6.	Pie cavo fuerte.....	20
2.5.1.7.	Pie cavo extremo.	20
2.6.	Medición de las presiones plantares	21
2.6.1.	Podometría.....	21
2.6.1.1.	Podómetros cualitativos.	21
2.6.1.1.1.	Podoscopio.....	21
2.6.1.1.2.	Pedígrafo e impresión de tinta sobre papel.	22
2.6.1.2.	Podómetros cuantitativos.....	22
2.6.1.2.1.	Baropodometría.....	22
2.6.1.2.2.	Piedica.....	22
2.6.1.2.3.	Plataformas de pedografía EMED.....	23
2.6.1.2.4.	Tekscan.	24
2.6.2.	Método de Hernández-Corvo.....	24
2.6.3.	Método del Índice del Arco (IA).....	28
2.6.4.	Método del Índice de la impresión del Pie.	29
2.7.	Análisis de la huella plantar y patologías para definir los requerimientos.	29
2.8.	Adquisición de datos (DAQ).....	31
2.8.1.	Sistemas de adquisición de datos inalámbricos.....	32
2.8.2.	Sistemas de adquisición con comunicación en serie.....	32
2.8.3.	Sistemas de adquisición con comunicación ethernet.	33
2.8.4.	Sensores detectores de presión.....	33
2.8.4.1.	Sensores piezoeléctricos.....	33
2.8.4.2.	Sensores piezoresistivo.....	34
2.8.5.	Acondicionamiento de señal.....	34
2.8.5.1.	Transformación.....	35
2.8.5.2.	Amplificación.....	35
2.8.5.3.	Aislamiento.....	35
2.8.5.4.	Filtro.....	35

2.8.5.5.	Excitación.....	36
2.8.5.6.	Linealización.	36
2.8.6.	Sistemas embebidos.	36
2.8.6.1.	Microcontrolador.....	37
2.8.6.1.1.	Microprocesador.	38
2.8.6.1.2.	Memorias.	38
2.8.6.1.3.	Periféricos	38
2.8.6.2.	Programación del microcontrolador.	39
2.8.7.	Placas electrónicas de desarrollo.	40
2.9.	Ingeniería de software.	40
2.9.1.	Proceso de desarrollo de aplicaciones.	41
2.10.	Software de visualización de datos.....	41
2.10.1.	Matlab.	41
2.10.2.	Python.....	42
2.10.3.	Processing.	42
2.11.	Aprendizaje automático.....	42
2.11.1.	Aprendizaje supervisado.	43
2.11.2.	Aprendizaje no supervisado.	43
2.11.3.	Aprendizaje semi-supervisado.	44
2.11.4.	Aprendizaje por refuerzo.....	44
2.12.	Base de datos.....	44
2.12.1.	Base de datos jerárquicas	45
2.12.2.	Base de datos en red.....	45
2.12.3.	Base de datos relacional	45
2.12.4.	Base de datos orientada a objetos.	46
2.13.	Modelo iterativo	46
CAPÍTULO III. Desarrollo del sistema electrónico de detección de presión plantar en estática.		48
3.1.	Metodología.....	48
3.2.	Modelo Iterativo: Primera Iteración.....	49
3.2.1.	Requerimientos del sistema: Primera Iteración.....	49
3.2.1.1.	Nomenclatura y prioridad de requerimientos	49
3.2.1.2.	Requerimientos de Stakeholders	50
3.2.1.3.	Requerimientos del sistema.....	52
3.2.1.4.	Requerimientos de Arquitectura.....	53
3.2.2.	Análisis de la situación actual: Primera Iteración.....	53
3.2.3.	Diseño del sistema: Primera Iteración.....	56

3.2.3.1. Diseño estructural.....	56
3.2.3.2. Descripción general del funcionamiento del sistema.....	57
3.2.3.3. Diagramas del sistema.....	57
3.2.3.4. Integración de Hardware	61
3.2.3.4.1. Esquema de conexión.....	61
3.2.3.4.3. Bloque de Sensores.	62
3.2.3.4.4. Bloque de Acondicionamiento de la señal.....	65
3.2.3.4.5. Bloque de Adquisición de Datos	66
3.2.3.4.6. Bloque de comunicación	70
3.2.3.4.7. Bloque de Procesamiento	71
3.2.3.4.8. Bloque de Alimentación	73
3.2.3.3.9. Diseño de la placa PCB	74
3.2.4. Codificación de software: Primera Iteración	77
3.2.4.1. Back End.....	77
3.2.4.1.1. Lectura de datos analógicos.....	77
3.2.4.1.2. Comunicación de datos.....	80
3.2.4.1.3. Preprocesamiento de la información.....	82
3.2.4.1.4. Criterios para la selección del método de Aprendizaje de maquina	87
3.2.4.1.5. Aplicación de Aprendizaje de Maquina.....	89
3.2.4.1.6. Obtención del índice Hernández-Corvo.....	91
3.2.4.1.7. Almacenamiento en la Base de Datos.....	92
3.2.4.2. Front End	97
3.2.4.2.1. Presentación	99
3.2.4.2.2. Información.....	102
3.2.4.2.3. Generar y Analizar pisada	103
3.2.4.2.3. Índice Hernández Corvo.....	105
3.2.4.2.3. Almacenamiento y búsqueda de información	105
3.2.5. Pruebas: Primera Iteración	106
3.2.5.1. Pruebas de Hardware.....	107
3.2.5.1.1. Prueba de Alimentación	107
3.2.5.1.2. Prueba de sensores.....	107
3.2.5.1.3. Prueba de Acondicionamiento de señal	108
3.2.5.2. Pruebas de Software	109
3.2.5.2.1. Pruebas comunicación Módulo Adquisición de datos y Módulo Procesamiento.....	109
3.2.5.2.2. Pruebas del módulo de Aprendizaje de maquina	110
3.2.5.2.3. Pruebas de registro de usuario	111

3.2.5.2.4. Pruebas de Consulta y Borrado de registros	112
3.2.5.2.5. Pruebas de integración.....	114
CAPITULO IV. Desarrollo de pruebas	116
4.1. Pruebas del Sistema	116
4.1.1. Toma de Datos para pruebas de integración del sistema	116
4.1.2. Análisis de precisión de la huella física.....	118
4.1.3. Análisis de la Tasa de Error de la Huella Digital	121
4.2. Pruebas de Validación.....	123
4.2.1. Identificación de la población	124
4.2.2. Metodología de muestreo	124
4.2.3 Cálculo de la muestra	125
4.3. Métricas de eficiencia en las huellas físicas para pruebas de Validación	126
4.3.1. Tasa de error en huellas digitales para pruebas de Validación	128
4.4. Discusión de resultados.....	129
4.5. Análisis de costos.....	131
Conclusiones.....	133
Recomendaciones	134
Bibliografía	135
Anexos.....	141
Anexo 1. Hoja de especificaciones del sensor FSR 402.....	141
Anexo 2. Hoja de especificaciones del amplificador operacional LM324N.....	144
Anexo 3. Hoja de especificaciones del multiplexor demultiplexor CD74HC4067.....	146
Anexo 4. Código Arduino – Adquisición de datos.....	147
Anexo 5. Algoritmo Interfaz gráfica GUI de Python.	148
Anexo 6. Aceptación para realizar las pruebas en los niños de la unidad educativa Benito Juárez.	153
Anexo 7. Fotografías del trabajo realizado.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Estructura ósea del pie</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2 Estructura articular del pie.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3 Plano coronal frontal.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4 Arcos plantares</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5 Bóveda plantar.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6 Distribución del peso corporal en el pie</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7 Tipos de pisada más comunes</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8 Pie plano.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9 Pie plano normal</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10 Pie normal</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11 Pie cavo normal</i>	<i>19</i>
<i>Figura 12 Pie cavo</i>	<i>19</i>
<i>Figura 13 Pie cavo fuerte</i>	<i>20</i>
<i>Figura 14 Pie cavo extremo.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 15 Podoscopio</i>	<i>21</i>
<i>Figura 16 Pedígrafo e impresión de tinta sobre papel.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 17 Podómetro Piedica.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 18 Sistema EMED.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 19 Sistemas F-Scan Tekscan20</i>	<i>24</i>
<i>Figura 20 Paso 1 trazo inicial del método de Hernández Corvo</i>	<i>25</i>
<i>Figura 21 Paso 2 del método de Hernández Corvo</i>	<i>25</i>
<i>Figura 22 Paso 3 del método de Hernández Corvo</i>	<i>26</i>
<i>Figura 23 Paso 4 valoraciones de las impresiones plantares</i>	<i>27</i>
<i>Figura 24 Obtención del índice de arco</i>	<i>28</i>
<i>Figura 25 Zonas de mayor presión de las distintas patologías.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 26 Sensor piezoeléctrico</i>	<i>33</i>
<i>Figura 27 Sensor piezoresistivo Flexiforce.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 28 Componentes de un sistema embebido (nivel lógico).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 29 Esquema general de un microcontrolador.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 30 Componentes de un sistema embebido (nivel lógico).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 31 Fases del modelo iterativo</i>	<i>47</i>
<i>Figura 32 Fases del modelo iterativo</i>	<i>48</i>
<i>Figura 33 Niveles de abstracción en la programación de Machine Learning</i>	<i>55</i>
<i>Figura 34 Estructura del sistema.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 35 Diagrama en bloques del sistema</i>	<i>58</i>

<i>Figura 36 Diagrama del funcionamiento lineal del sistema</i>	59
<i>Figura 37 Diagrama de flujo de la información dentro del sistema</i>	60
<i>Figura 38 Diagrama de etapas operativas</i>	61
<i>Figura 39 Esquema de conexión de los módulos del sistema</i>	62
<i>Figura 40 Ubicación de sensores</i>	64
<i>Figura 41 Conexión divisor de voltaje</i>	65
<i>Figura 42 Circuito de acoplamiento para sensor SFR único</i>	66
<i>Figura 43 Multiplexor-demultiplexor analógico CD74HC4067</i>	69
<i>Figura 44 Diagrama de bloques del módulo de adquisición de datos</i>	69
<i>Figura 45 Diagrama de comunicación</i>	71
<i>Figura 46 Placa embebida Raspberry Pi</i>	72
<i>Figura 47 Dispositivo de alimentación</i>	74
<i>Figura 48 Simulación en protoboard del hardware diseñado</i>	75
<i>Figura 49 PCB del Hardware a implementarse</i>	76
<i>Figura 50 PCB con elementos electrónicos montados</i>	76
<i>Figura 51 Diagrama de flujo de lectura de datos</i>	78
<i>Figura 52 Canal de control del multiplexor – demultiplexor</i>	79
<i>Figura 53 Comunicación serial de Arduino para envío de datos recolectados</i>	80
<i>Figura 54 Diagrama de flujo de comunicación de datos</i>	81
<i>Figura 55 Programación para iniciar comunicación serial</i>	82
<i>Figura 56 Diagrama de flujo Preprocesamiento</i>	83
<i>Figura 57 Importación de librerías Python</i>	84
<i>Figura 58 Plantilla base de pie</i>	85
<i>Figura 59 Plantilla para Front End</i>	86
<i>Figura 60 Plantilla para Back End</i>	87
<i>Figura 61 Escala de grises de plantilla con lectura de sensores</i>	88
<i>Figura 62 Librerías para aprendizaje supervisado</i>	89
<i>Figura 63 Huella plantar final</i>	91
<i>Figura 64 Diagrama de almacenamiento en la Base de Datos</i>	93
<i>Figura 65 GUI de la aplicación DB Browser</i>	95
<i>Figura 66 Interfaz para crear tablas BD</i>	96
<i>Figura 67 Implementación de la base de datos</i>	96
<i>Figura 68 Entidad-Relación de la base de datos</i>	97
<i>Figura 69 Diagrama de flujo para la generación de Interfaz Gráfica</i>	98
<i>Figura 70 Ciclo de vida del Front End</i>	99
<i>Figura 71 Interfaz Gráfica de Usuario</i>	99
<i>Figura 72 Portada del Front End del sistema</i>	100

<i>Figura 73 Pestaña Usuarios.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 74 Ventanas emergentes para el ingreso de nuevos clientes.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 75 Pestaña Adquisición Datos.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 76 Pantalla con lectura de sensores.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 77 Pisada generada por el algoritmo de Aprendizaje Máquina.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 78 Cálculo del Índice Hernández Corvo.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 79 Pestaña de Consultas.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 80 Prueba de medición de voltaje de fuente de alimentación.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 81 Lectura de presión a los sensores.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 82 Visualización de sensores junto con el acondicionador en el IDE Arduino.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 83 Funcionamiento del módulo de Comunicación.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 84 Prueba de huella plantar final.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 85 Registro de medidas en Base de Datos.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 86 Registros de Paciente y Evaluador.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 87 Búsqueda de paciente por C.I.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 88 Paciente inicial después del borrado.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 89 Plataforma para la toma de datos del sistema.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 90 Reporte de paciente para imprimir.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 91 Método de impresión física de huella plantar.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 92 Trazos del método Hernández Corvo sobre la impresión de la huella plantar.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 93 Aproximación gráfica a la medida del error.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 94 Sistema de digitalización de huella plantar.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 95 Construcción de la placa PBC impresa.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 96 Construcción estructural del sistema.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 97 Construcción de base de soporte para los sensores del sistema.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 98 Pruebas de funcionamiento del sistema.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 99 Pruebas del sistema a niños y niñas, con 19 – 20,5 cm de longitud de sus pies.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 100 Pruebas del sistema a niños y niñas, con 20,5 – 22 cm de longitud de sus pies.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 101 Pruebas de funcionamiento del sistema.....</i>	<i>159</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Porcentajes para clasificar X el tipo de pie según el método de Hernández Corvo.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2 Valores para clasificar el tipo de pie según el método de índice de arco</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3 Nomenclatura para requerimientos</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4 Categorización de la prioridad de requisitos.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5 Lista de stakeholders</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6 Requerimientos de Stakeholders</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 7 Requerimientos del sistema.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 8 Requerimientos de Arquitectura</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 9 Comparación de los sensores disponibles en el país</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 10 Comparación entre plataformas de desarrollo</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 11 Comparación entre placas de desarrollo Arduino</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 12 Consumo energético del hardware del sistema.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 13 Estimación del error en la impresión de la huella física.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 14 Índices Hernández Corvo por huella física.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 15 Medidas de huella Digital.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 16 Índice Hernández Corvo en las pruebas de Validación</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 17 Índices H-C de huellas digitales</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 18 Resultados diagnósticos por precisión de medidas – validación</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 19 Costos de Hardware</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 20 Costos de Software</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 21 Costos de Oficina y varios</i>	<i>132</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Ecuación de índice de Hernández Corvo</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 2: Ecuación del método de índice de Arco</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 3: Cálculo de voltaje de salida.....</i>	<i>65</i>
<i>Ecuación 4: Tamaño de la muestra para una población conocida.</i>	<i>118</i>
<i>Ecuación 5 Tamaño de la muestra para una población conocida.</i>	<i>125</i>
<i>Ecuación 6: Reemplazando los valores en la ecuación de tamaño de la muestra.</i>	<i>126</i>

RESUMEN

El presente proyecto centra su estudio en el desarrollo de un sistema electrónico de detección de presión plantar en estática para niños. El principal objetivo es poder desarrollar un sistema que permita tomar muestras de pisadas en estática y clasificarlas en los siete tipos según la metodología de Hernández Corvo, con un costo menor a los sistemas comerciales.

En este contexto, el sistema está conformado por 16 sensores FSR que miden la presión ejercida sobre ellos. Basándose en estas mediciones genera una huella plantar, la cual es analizada en base a la metodología de Hernández Corvo. Consta de una interfaz gráfica, a través de la cual podemos ingresar los datos y permite mostrar y registrar los resultados.

Respecto al diseño del dispositivo, se emplea hardware y software libre, y su desarrollo está basado en el “Modelo Iterativo”, donde se siguen en secuencia sus distintas fases con cada uno de sus procedimientos, desde los requerimientos para la construcción del sistema hasta sus respectivas pruebas.

Para finalizar, el funcionamiento y validación del sistema está enfocado en el capítulo IV de este documento, a través de diferentes pruebas realizadas a un grupo de niños con distintas edades utilizando el sistema y comparar sus resultados con los del método de Hernández Corvo, obteniendo una eficacia mayor al 90%.

ABSTRACT

This project focuses its study on the development of an electronic system for the detection of static plantar pressure in children. The main objective is to develop a system that allows to take samples of static footprints and classify them into the seven types according to the methodology of Hernandez Corvo, with a lower cost than commercial systems.

In this context, the system consists of 16 FSR sensors that measure the pressure exerted on them. Based on these measurements, it generates a plantar footprint, which is analyzed according to Hernández Corvo's methodology. It has a graphical interface, through which we can enter the data and allows us to display and record the results.

Regarding the design of the device, free hardware and software are used, and its development is based on the "Iterative Model", where its different phases are followed in sequence with each of its procedures, from the requirements for the construction of the system to its respective tests.

Finally, the operation and validation of the system is focused in chapter IV of this document, through different tests performed on a group of children of different ages using the system and comparing their results with those of Hernández Corvo's method, obtaining an efficiency higher than 90%.

CAPÍTULO I. Antecedentes

1.1. Introducción

En este capítulo se establecerá los fundamentos necesarios para el desarrollo del presente trabajo de grado, comenzando por la problemática, los objetivos generales y específicos a lograr, el alcance que tendrá el proyecto y la justificación que avale la ejecución del trabajo.

1.2. Problema

El laboratorio de análisis de marcha es una técnica que permite hacer la evaluación de diferentes tipos de movimientos del cuerpo humano usados para el desplazamiento libre de las personas, mediante la utilización de equipos tecnológicos no invasivos se recolecta y registra información de los movimientos para ser analizados, permitiendo así detectar anomalías, patrones patológicos y a partir de esa información plantear un tratamiento específico para corregirlos (D. M. Haro, 2016). Uno de estos estudios es el análisis de presión plantar, el cual consiste en identificar las zonas del pie con mayor presión para determinar la aparición de lesiones en los pies; ya que, estos soportan todo el peso corporal distribuido equitativamente del cuerpo para mantenerlo en pie, además actúan como una palanca para propulsar el cuerpo hacia adelante (Palacios, 2014) citado por (Landázuri, 2017). Además, debido a la adaptación por el uso de calzado, la superficie irregular del terreno o por causas congénitas se presentan patologías como: pie plano, plano-normal, normal, normal-cavo, cavo, cavo-fuerte y cavo-extremo. Causantes de varias afecciones hacia quien las padecen, por lo que para la detección de dichas patologías se han empleado varios métodos como; fotopodograma, pedígrafo, método de Hernández Corvo, índice del Arco “Arch Index”, la inspección visual no cuantitativa, y la baropodometría, la cual es la encargada de estudiar las distribuciones plantares, por medio de una plataforma de registro electrónico (Aguilera, Heredia, & Peña, 2015).

Para acompañar el diagnóstico y tratamiento de las distintas patologías que una persona puede tener los profesionales; hacen uso de fuentes de recolección de diferentes variables

como, dinamometría, módulo de electromiografía, plataformas tecnológicas de fuerza y presión, sistemas de procesamiento de video, baropodómetro (Montoya-Leal & Pérez, 2016), dispositivos robóticos para rehabilitación, entre otros. A nivel internacional y nacional existen varios fabricantes de este tipo de sistemas; sin embargo, debido a su alto costo en los laboratorios de Fisioterapia Física de la Universidad Técnica del Norte no cuentan con equipos o sistemas necesarios para el estudio de laboratorio de análisis de marcha dinámica ni estática; por lo que las técnicas para la evaluación de presión plantar aplicadas son manuales, dando lugar a errores en las mediciones. Para este tipo de valoraciones los expertos recomiendan hacerlas a personas mayores a los seis años; debido a que, la mayoría de infantes menores a esa edad tienen pie plano y aún no podrían tener desarrollada alguna patología o no podría ser detectada y por otra parte en una entrevista realizada a la Lic. Daniela Zurita indica que el diagnóstico y tratamiento debe ser aplicado en la infancia porque el cuerpo está sometido a cambios, permitiendo que exista una adecuada corrección de alguna anomalía en la estructura del pie, mientras que en la adolescencia la patología ya puede estar instaurada, por lo que el tratamiento no puede llegar a ser del todo efectivo e incluso ya pueden presentarse otro tipo de patologías y a partir de los 21 años ya no hay cambios en las características fisiológicas, por lo que ya no es posible corregir patologías. En estos casos se realiza tratamiento preventivo de patologías en otras áreas del cuerpo como tobillos, rodillas, cadera, columna, asociadas o derivadas de la ya existente.

Como contribución para un posterior laboratorio de análisis de marcha dentro de la Universidad Técnica del Norte se propone realizar un sistema electrónico de detección de patologías del pie mediante sensores de presión el cual ayudaría a tener una mejor recolección de datos evitando las incómodas técnicas manuales en las que se usa tintas, una vez adquiridos los datos se procesaran para determinar el tipo de patología. Este sistema electrónico contará con una interfaz gráfica en la cual refleje el resultado de la valoración realizada por

especialistas como es el caso de ortopedistas, docentes y estudiantes de la carrera de fisioterapia siendo un instrumento de apoyo para dar un completo diagnóstico y posterior tratamiento ortopédico a una patología ya diagnosticada.

Por medio del laboratorio de análisis de movimiento se realizan evaluaciones de distintos movimientos del cuerpo humano para detectar anomalías, uno de los análisis es realizado según la huella plantar, el cual es trascendental hacerlo ya que al ser estas las extremidades que soportan el peso de todo el cuerpo pueden existir patologías, agravar las existentes o generar nuevas en otras partes del cuerpo que están directamente relacionadas; por ende, es importante realizar test para un adecuado diagnóstico y tratamiento. En los laboratorios de Fisioterapia Física de la universidad no existen sistemas que permitan tomar mediciones de la presión plantar para determinar el tipo de pisada y acompañen en el diagnóstico y presión de patologías, ya que una mala pisada lleva a una descarga inadecuada de peso, lo que deriva en nuevas patologías como: hernias de disco, operaciones de columna cervical o lumbar, problemas de rodillas, desbalanceo de tobillo, rodilla vara, rodilla valga, lesión de meniscos, desgaste de rodillas o caderas; por lo que se ve la necesidad de contar con un sistema el cual realice estas valoraciones en las personas y ayude a los docentes y estudiantes universitarios para el diagnóstico, tratamiento o investigaciones de patologías de los pies.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General.

Desarrollar un sistema de medición de presiones ejercidas por la planta del pie en estática, utilizando sensores de presión y aprendizaje de máquina, para detectar patologías en niños de 7 a 11 años en conjunto con el diagnóstico de un profesional.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Analizar la huella plantar con sus patologías para definir los requerimientos del sistema de hardware y software que permitan generar el prototipo de adquisición de datos.
- Realizar una etapa de análisis de algoritmos de aprendizaje supervisado que logre determinar el tipo de patología del pie con un rendimiento adecuado del sistema.
- Validar el funcionamiento del sistema a través de pruebas en un grupo de personas que tengan diferentes patologías de pie y comparar visualizando la información obtenida con el método de Hernández Corvo.

1.4. Alcance

Para la realización del sistema se implementará el método Iterativo. El cual se trata de un proceso de desarrollo de tecnología, en el cual, la realización del hardware y software se conciben como varios ciclos de vida en cascada. Con este método se pretende garantizar el ciclo de vida del desarrollo del sistema, así como la mejor elección de los componentes electrónicos encargados de la recolección de los datos de presión plantar de niños con un tamaño de pie entre 19 cm y 22 cm, y la parte de software encargada del tratamiento de los datos, evaluación, interpretación y visualización. El método puede tener una o varias iteraciones las cuales están compuestas por etapas que son análisis, diseño, codificación y pruebas, las cuales son mejoradas en cada iteración con el objetivo de que el sistema realice mediciones de presión plantar y mediante aprendizaje de máquina determine el tipo de patología junto con el especialista para un pronto y adecuado tratamiento.

Inicialmente, se recolectará información necesaria que ayude al desarrollo del proyecto, sobre laboratorio de análisis de marcha, podología, baropodometría; documentación que se la obtendrá de revistas científicas tecnológicas indexadas, libros referentes al tema. Luego del análisis bibliográfico se analizará la huella plantar utilizando el método de índice de

Hernández Corvo el cual va a permitir determinar los puntos de presión del pie para a continuación estudiar las patologías y así determinar el número y la ubicación estratégica de los sensores de presión. Una vez analizada la huella plantar y determinado el número de sensores se elegirá los sensores y el dispositivo embebido adecuados que conformarán el módulo de toma de datos, los cuales estarán ubicados en una plataforma diseñada para tomar datos de presiones de pies de un rango de medida de 19 cm a 22 cm, que corresponden a las tallas 29, 30, 31, 32, 33 de calzado (INEN, 2013) citado por (Arcos, 2015). Y de esta manera determinar los tipos de pisada usando un sistema embebido para interpretar y analizar los datos obtenidos, y a continuación enviar a un sistema embebido central el cual se encargará de aplicar un algoritmo que se determinará en la siguiente capa.

A partir de los datos de presiones plantares obtenidos de niños que tengan las tallas y patologías antes mencionadas, se procederá a almacenarlos en una base de datos para luego ser evaluados mediante un algoritmo de predicción, de esta manera el sistema podrá predecir las patologías de pie en niños. Para tratar y procesar la información se usará el método de descubrimiento de conocimiento en base de datos (Knowledge Discovery in Databases – KDD), ya que esta metodología se relaciona con el aprendizaje de máquina, además implementa un proceso de pasos en cadena para encontrar conocimiento en conjuntos de datos del mundo real, estos pasos son los siguientes: selección de datos, procesamiento, transformación de los datos, minería de datos, interpretación y evaluación, entendimiento del conocimiento. Este proceso permitirá identificar patrones válidos, útiles y entendibles para la predicción de patologías de pie a partir de un conjunto de datos y así apoyar al diagnóstico de un profesional.

Se procederá a realizar la evaluación del funcionamiento del sistema valorando la eficacia del algoritmo de predicción, evaluando el rendimiento que se obtuvo para verificar que cumpla con la meta de predecir patologías de pies de 19 a 22 cm. Para ejecutar la evaluación

se aplicará la técnica de Validación Cruzada la cual consiste en realizar una partición de datos, dividiéndolos entre entrenamiento y prueba, además de los resultados serán comparados con el método de Hernández Corvo y así comprobar la efectividad del sistema que pretende apoyar en el diagnóstico y futuro tratamiento de las distintas repercusiones causadas por las diferentes patologías que son 2 tipos de pie plano y 4 tipos de pie cavo (pie plano, plano-normal, normal, normal-cavo, cavo, cavo-fuerte y cavo-extremo).

1.5. Justificación

Justificación Tecnológica. - Un factor importante es el económico, ya que en la actualidad a nivel internacional existen una variedad de sistemas para la detección de patologías de pie, sin embargo, estos tienen costos elevados siendo un inconveniente para la adquisición de este tipo de sistemas por parte de los médicos especialistas en esta área. Por lo que el proyecto planteado busca crear un sistema capaz de realizar el diagnóstico junto con un especialista de este tipo de afecciones en los pies de los niños, teniendo un valor de construcción menor al de los existentes en el mercado esto se lo puede hacer gracias a plataformas de código abierto como es Arduino que a pesar de que sus dispositivos electrónicos tienen valor este no es alto y su software es gratuito, también existen otras plataformas de programación como Labview, Python o processing, mediante las cuales es posible reducir costos.

Justificación Teórica. - Según expertos en Medicina Física y Rehabilitación del Instituto Mexicano del Seguro Social alrededor del 80% de consultas en esta especialidad, se relaciona con defectos de postura (Villamares, 2013) citado por (Terán, 2019), y las patologías del pie causan 1 de cada 5 visitas a médicos en estas especialidades; por lo que es una razón importante tratarlas, ya que el dolor en el pie dificulta el caminar afectando a la movilidad. Este tipo de casos se pueden presentar en cualquier edad, aunque se tiene mayor registro en niños y ancianos.

Además, en una entrevista realizada a la Lic. Daniela Zurita docente de la carrera de Fisioterapia indica que este dispositivo sería un gran aporte para el aprendizaje de alumnos, investigaciones por parte de los docentes y en especial para la población infantil a la que está enfocado, ya que con una temprana detección de este tipo de afecciones permitirá corregir la estructura fisiológica con el tipo de plantillas correctivas adecuado antes de que llegue a instaurarse alguna patología. También servirá para hacer evaluaciones de características del pie y posturales de población en edades aproximadas de los 7 hasta los 11 años.

Justificación Metodológica. - En el presente proyecto se usará la metodología basada en el modelo iterativo que consiste en varios ciclos de vida en cascada llamada iteración en cada una de estas el sistema, debido a que esta se orienta en superar las dificultades implicadas en el desarrollo del proyecto, ya que cada ciclo ayuda a mejorar cada etapa del desarrollo.

CAPÍTULO II. Revisión bibliográfica

En este capítulo se establecen conceptos en relación con el laboratorio de análisis de marcha haciendo referencia al estudio del pie, el cual proporcionará información relevante para saber los tipos de pisadas y los efectos de una mala pisada. También se tratará temas relacionados a las tecnologías usadas para la detección de patologías.

2.1. Laboratorio de análisis de marcha

El análisis de los movimientos del cuerpo humano ha sido un tema de interés desde tiempos remotos. Su propósito es estudiar diferentes tipos de movimientos de cada una de las partes del sistema locomotor, como: la marcha, función de extremidades, posturografía, estrategias motoras “sit to stand”, actos deportivos o estudios ergonómicos, y así poder identificar alteraciones del patrón de marcha, definir sus causas, orientar sus tratamientos, cuantificar el resultado de estos y realizar el seguimiento de la evolución a lo largo del tiempo. La marcha consiste en una serie de movimientos coordinados y alternantes que permiten la movilización y para ello requiere del buen funcionamiento e interacción del sistema nervioso, palancas que provean el movimiento de los huesos y el sistema muscular para moverlos; por lo que, si hay alguna falla en una de las extremidades o partes del sistema locomotor la marcha puede alterarse.

Poder detectar una o varias patologías con un análisis observacional sería muy difícil, ya que existen muchos movimientos en todo el cuerpo humano de articulaciones y planos, o la persona mediante compensaciones algunas alteraciones pueden ser disimuladas; por lo que se ha hecho uso de tecnología que junto con el avance tecnológico se han ido introduciendo sistemas computacionales, permitiendo hacer los estudios más rápidos y precisos (M. Haro, 2014).

2.2. Sistema locomotor

Este sistema está compuesto de huesos, articulaciones, músculos; en donde los huesos forman la parte mecánica, las articulaciones relacionan varios huesos entre sí y el músculo es el que produce el movimiento permitiendo la movilidad de una persona. El esqueleto consta de una parte axial y una parte apendicular: (Reiriz, 2015)

2.2.1. Parte Axial.

Es la parte superior del cuerpo humano, está conformada por la cabeza (cráneo, cara), tronco (columna vertebral, costillas, esternón, tórax y abdomen).

2.2.2. Parte Apendicular.

Esta sección del cuerpo se encuentra formada por: huesos, articulaciones, músculos, arterias, venas, nervios y fosas de las extremidades superiores (conformada desde la base del cuello hasta la punta de los dedos de las manos) y extremidades inferiores (conformada desde la cintura pelviana hasta la punta de los dedos de los pies).

2.3. Pie

Es el miembro más distal de la extremidad inferior formado por el Retropié, Mediopié y Antepié; tiene como tarea el soporte del cuerpo humano para el desplazamiento bipodal. Considerado como una estructura compleja de diseño fuerte para soportar el peso corporal y flexible para absorber los impactos, permitir el equilibrio, movimiento coordinado y generar la suficiente fuerza de propulsión para lograr la marcha bípeda (Carreño & Cabrera, 2014).

2.3.1. Huesos del pie.

El pie es una plataforma arqueada que soporta el peso corporal y actúa como una palanca para propulsar el cuerpo hacia adelante, siendo, además, lo bastante elástico como para

amortiguar golpes bruscos. El pie está formado por 27 huesos formando 3 grupos óseos que son: (Reiriz, 2015)

2.3.1.1. *Tarso.*

Se encuentra en la zona trasera del pie entre el tobillo y el talón, está compuesto por el astrágalo, calcáneo, escafoides y cuboides. Como se puede apreciar en la Figura 1.

2.3.1.2. *Metatarsianos.*

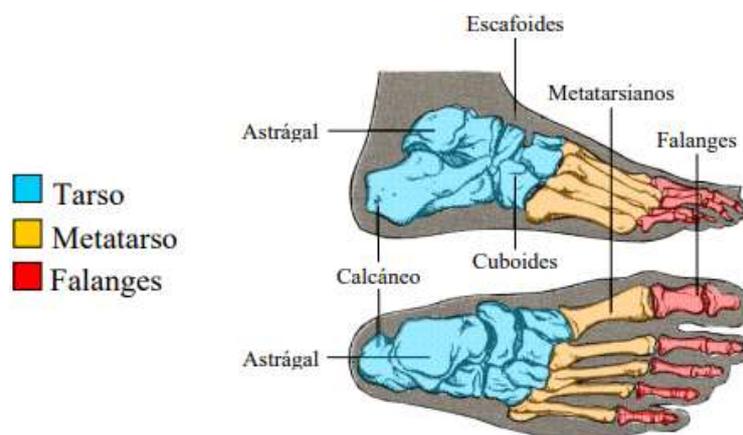
Son huesos largos, con un extremo superior, una zona cilíndrica intermedia y un extremo inferior y se numeran a partir del borde interno del pie. Se numeran comenzando por la parte externa; así, el dedo pulgar corresponde al primer metacarpiano.

2.3.1.3. *Las falanges.*

Son 14 huesos largos que forman los dedos del pie, hay 2 en el dedo pulgar y 3 en el resto de los dedos. Las falanges superiores son las más largas y las inferiores las más cortas. Las falanges inferiores terminan en los extremos ungueales en donde se encuentran las uñas, como se puede apreciar en la Figura 1.

Figura 1

Estructura ósea del pie



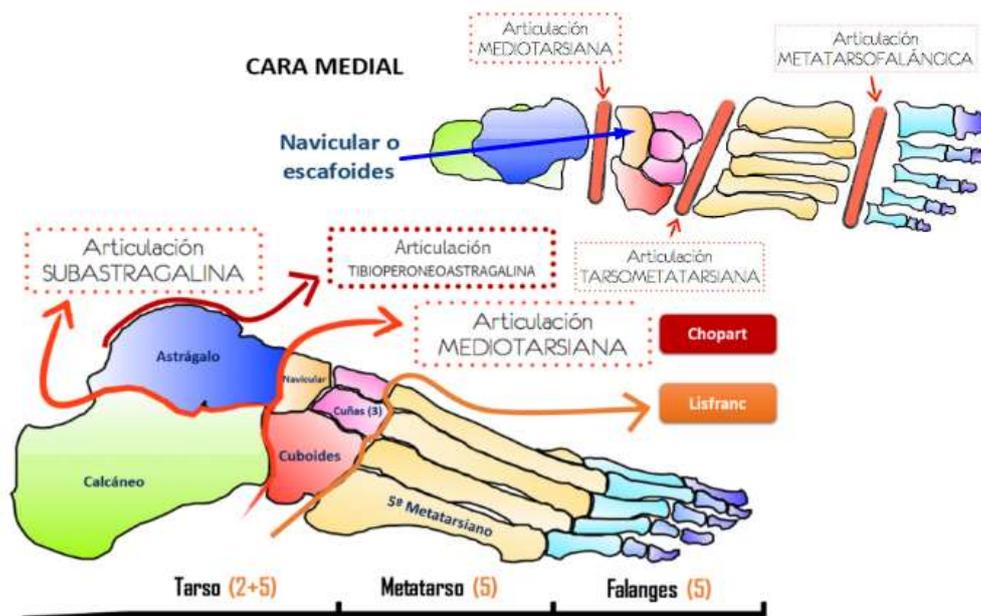
Fuente: (Monrroy, 2018)

2.3.2. Articulaciones del pie.

Las articulaciones se encargan de dos o más huesos entre sí permitiendo el movimiento. En la Figura 2 se mira las articulaciones que posee el pie, como: articulación mediotarsiana, tarsometatarsiana, metatarsofalángica, subastragalina, tibioperoneoastragalina (Reiriz, 2015).

Figura 2

Estructura articular del pie



Fuente: (Aguilera et al., 2015)

Los huesos y las articulaciones del tarso, metatarso y falanges permiten los movimientos que den realizarse al caminar en un terreno irregular, los tipos de movimientos son: (Reiriz, 2015)

2.3.2.1. Inversión o supinación.

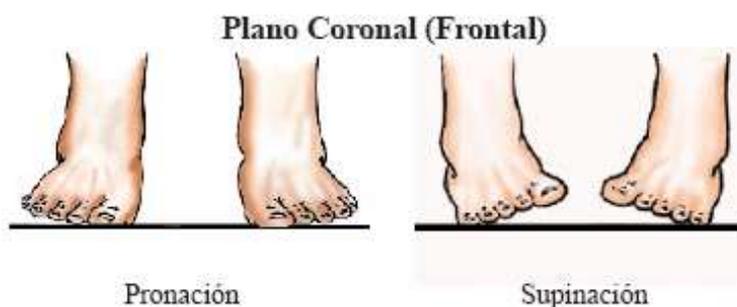
El pie es aducido (aproximado al plano medio), se eleva su borde interno y desciende su borde externo (Reiriz, 2015).

2.3.2.2. Eversión o pronación.

El pie es abducido (alejado del plano medio), se eleva su borde externo y desciende su borde interno. En la Figura 3 se puede observar los movimientos que debe realizar el pie para el desplazamiento de una persona.

Figura 3

Plano coronal frontal



Fuente: (Marino, González, González, & Rucpich, 2013).

2.3.3. Músculos del pie.

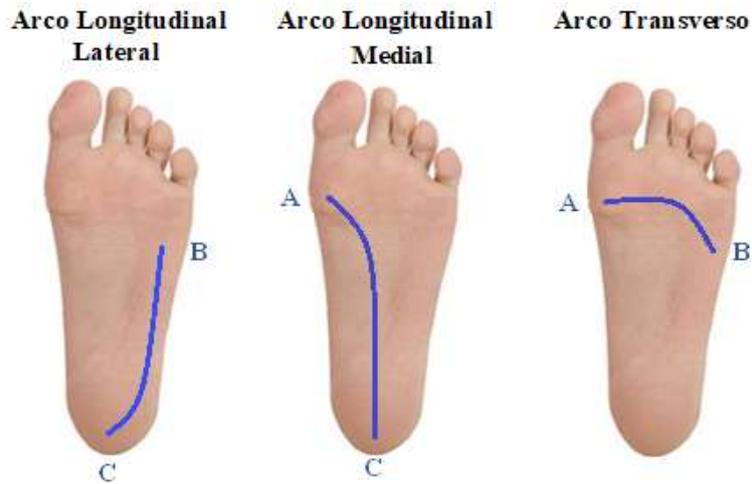
Son pequeños músculos que ayudan a mantener los arcos y mover los dedos del pie. El pie tiene músculos que producen flexión, se encuentran en la planta plantar ayudando a mantener el arco longitudinal interno y los músculos que producen extensión que están ubicados en la región dorsal del pie (Reiriz, 2015).

2.3.4. Bóveda plantar.

Existen tres puntos de apoyo de la carga corporal, entre el tarso y el metatarso conocido como trípede podálico. La unión de estos puntos forma, el arco medial (del punto C al A), el arco lateral (del punto B al C), y el arco transverso (del punto A al B); los cuales crean la bóveda plantar como se puede observar en la Figura 4.

Figura 4

Arcos plantares

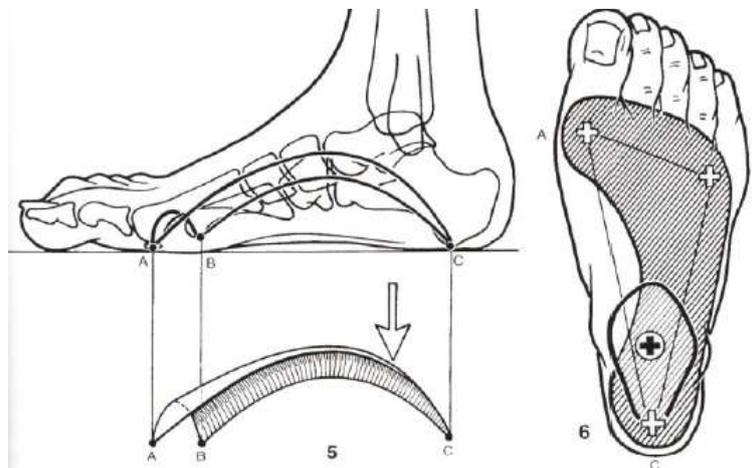


Fuente: Autoría.

El peso corporal se concentra en el centro de la bóveda plantar y a partir de ese punto se reparte el peso a través de los arcos también es capaz de amortiguar la marcha y adaptarse a cualquier terreno, en la Figura 5 se puede apreciar los arcos. Las alteraciones que aumenten o disminuyan sus curvas repercuten gravemente en la bipedestación, la marcha y la carrera (Kapandji, 2012).

Figura 5

Bóveda plantar



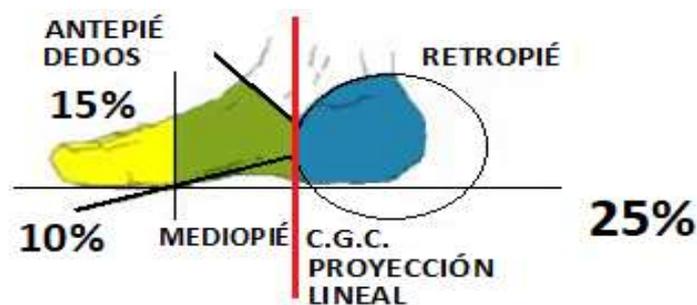
Fuente: (Kapandji, 2012)

2.4. Presiones plantares en estática

En el apoyo bipodal el peso del cuerpo se distribuye el 50% a cada una de las extremidades inferiores. Toda la carga cae sobre el centro de la bóveda plantar en el astrágalo, el cual distribuir el peso hacia los puntos de apoyo a través de los arcos plantares, como se muestra en la Figura 6. Existen varias teorías para determinar la distribución del peso en sus puntos de apoyo, pero casi todos los estudios concuerdan en que la presión soportada por el talón es mayor que la soportada por el resto del pie, en la banda externa del Medio pie los valores son muy bajos y en los dedos presenta un apoyo relativamente débil, aunque en el dedo gordo presentan valores mayores.

Figura 6

Distribución del peso corporal en el pie



Fuente: (Terán, 2019)

2.5. Tipos de Pisada

Existen muchos tipos de pisadas; sin embargo, los especialistas las han asociado en tres grupos más comunes, pronador, normal y supinador. Los pronadores son pies con una inclinación hacia la parte interna en donde el tobillo se mete hacia dentro teniendo un empuje hacia el interior del pie al momento de apoyarse. Mientras que los pies normales no suelen ejercer movimiento ni hacia dentro ni hacia fuera cuando pisan el apoyo se distribuye de manera uniforme. Por otra parte, los pies supinadores apoyan con mayor fuerza en la parte exterior del pie, recibiendo el mayor impacto sobre el suelo, como se puede observar en la Figura 7 (Batalla, 2017).

Figura 7

Tipos de pisada más comunes



Fuente: (Ronald, 2019)

2.5.1. Patologías del pie.

La patología es la rama de la medicina que estudia los trastornos fisiológicos y anatómicos de órganos y tejidos de cualquier sistema del cuerpo. A continuación, veremos las patologías que pueden presentarse en el pie.

2.5.1.1. *Pie plano.*

Este tipo de pie se caracteriza por la inexistencia de la bóveda plantar provocada por la disminución del arco interno del pie; por lo que el apoyo será en toda la planta del pie y no en los tres puntos de apoyo plantar. El tipo de movimiento que realizará el pie es pronador, es decir tendrá una pisada hacia el interior, como puede apreciarse en la Figura 8 (Carreño & Cabrera, 2014).

Figura 8

Pie plano



Adaptado de: (Puratich, 2011)

2.5.1.2. *Pie plano normal.*

La característica de este tipo de pie es que tiene la bóveda plantar reducida, al igual que el pie plano la forma de pisar es hacia dentro (pronadora). El apoyo será en gran parte la planta del pie, pero no en toda la planta del pie (Fuentes, 2019).

Figura 9

Pie plano normal



Adaptado de: (Martínez, 2009).

2.5.1.3. *Pie normal.*

El pie no rota a ningún lado, se caracteriza por tener una pequeña bóveda plantar tal punto que la superficie de apoyo en la parte media es igual a un tercio del ancho de la huella a la altura del antepié (Domínguez, 2007), como se puede apreciar en la Figura 10.

Figura 10

Pie normal



Adaptado de: (Puratich, 2011).

2.5.1.4. Pie cavo normal.

En este tipo pie el arco longitudinal disminuye horizontalmente, lo que provoca que la bóveda plantar sea de mayor elevación. En la Figura 11 se puede observar la forma de pisar es hacia fuera (supinador) por lo que al apoyo no será en la parte media, sino en la parte externa del pie.

Figura 11

Pie cavo normal



Adaptado de: (Fernández & Arcas, 2017), (Puratich, 2011).

2.5.1.5. Pie cavo.

La Figura 12 muestra el pie cavo, que se caracteriza por tener un aumento en la curvatura del arco longitudinal y por ende una elevación atípica de la bóveda plantar, los dedos quedan agarrotados hacia dentro y con una forma de pisar hacia fuera.

Figura 12

Pie cavo



Adaptado de: (Puratich, 2011).

2.5.1.6. *Pie cavo fuerte.*

Este tipo también tiene una bóveda plantar muy elevada y sus dedos flexionados a tal punto que llega a disminuir el tamaño del pie, como se observa en la Figura 13 su forma de pisar es hacia fuera (Carreño & Cabrera, 2014).

Figura 13

Pie cavo fuerte



Adaptado de: (Charcot, 2015)

2.5.1.7. *Pie cavo extremo.*

El pie cavo extremo tiene muy elevada la bóveda plantar a tal punto que el borde interno se encuentra elevado y el pie se apoya sobre el borde externo. Al no ser muy común este tipo de patología es más fácil identificar, ya que el pie no deja huella en la parte central de la planta del pie y en ocasiones ni en los dedos como se muestra en la Figura 14 (Carreño & Cabrera, 2014).

Figura 14

Pie cavo extremo



Adaptado de: (López, 2010).

2.6. Medición de las presiones plantares

2.6.1. Podometría.

Es una técnica que tiene como objetivo medir las presiones que se aplican sobre toda la planta del pie o una zona específica. En el campo clínico es usada para el diseño y construcción de plantillas, ortesis y evaluación de pacientes posterior a tratamientos quirúrgicos u otros tratamientos. Los equipos que permite realizar este tipo de análisis son los podómetros, y estos se clasifican en cualitativos y cuantitativos (Fuentes, 2019).

2.6.1.1. Podómetros cualitativos.

Se trata de equipos mecánicos, artesanales, que dan resultados numéricos repetibles. Al ser los más económicos son los más usados, los más comunes son los siguientes:

2.6.1.1.1. Podoscopio.

Permite obtener directamente la visualización de la superficie plantar en estática; se compone de una superficie de vidrio y por debajo un espejo como muestra la Figura 15; éste dispositivo permite al médico observar la planta del pie. El éxito del equipo radica en la experiencia del profesional, ya que las valoraciones se hacen visualmente (Carreño & Cabrera, 2014).

Figura 15

Podoscopio



Fuente: (Carreño & Cabrera, 2014).

2.6.1.1.2. *Pedígrafo e impresión de tinta sobre papel.*

El pedígrafo es una fina caja de goma que contiene tinta y un folio en el cual da como resultado una impresión plantar, misma que contiene la huella del pie cuando el paciente pise, se puede usar en estática y dinámica (Fuentes, 2019). La técnica de impresión de tinta es la más antigua, consiste en estudiar la pisada a partir de la impresión manual como se puede apreciar en la Figura 16 (Carreño & Cabrera, 2014).

Figura 16

Pedígrafo e impresión de tinta sobre papel



Adaptado de: (Carreño & Cabrera, 2014).

2.6.1.2. *Podómetros cuantitativos.*

Son dispositivos electrónicos los cuales muestran resultados numéricos repetibles para estudios de la planta del pie, la cual es capturada, digitalizada y almacenada para un posterior análisis.

2.6.1.2.1. *Baropodometría.*

Es el análisis de la distribución de las presiones de la planta del pie como medio de apoyo a los médicos en temas biomecánicos y funcionales; para ello se usa una plataforma de registro electrónico con sensores digitalizados.

2.6.1.2.2. *Piedica.*

Se trata de una empresa Italiana Mexicana con un sistema CAD-CAM el cual digitaliza la captura de los pies y procesa datos con una computadora para la elaboración de plantillas y analizar el apoyo del pie (Carreño & Cabrera, 2014), la Figura 17 muestra el dispositivo.

Figura 17

Podómetro Piedica



Fuente: (Carreño & Cabrera, 2014).

2.6.1.2.3. Plataformas de pedografía EMED.

Empresa Alemana fabricante de plataformas electrónicas de análisis de pisada y presiones plantares mediante sensores capacitivos para la captura, grabación y evaluación de distribución de presión plantar en estática y dinámica; la Figura 18 muestra el dispositivo.

Figura 18

Sistema EMED



Fuente:(Fuentes, 2019).

2.6.1.2.4. Tekscan.

Empresa de Estados Unidos fabricante de dispositivos electrónicos para el análisis de fuerza plantar, marcha y funciones del pie. Esta información es usada para la elaboración de ortesis, evaluar calados y técnicas de atletas.

Figura 19

Sistemas F-Scan Tekscan20



Fuente:(“F-Scan System”, s/f).

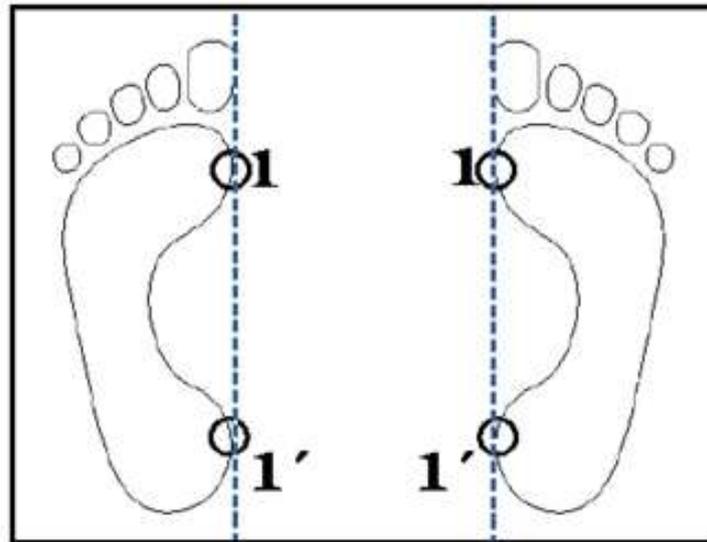
2.6.2. Método de Hernández-Corvo.

El método consiste en clasificar el tipo de pie según unas medidas que se realizan en base al registro de la huella plantar. El procedimiento consiste en marcar puntos y sobre ellos se trazan líneas, de la siguiente manera: (Cáceres Zoraya, 2014)

- Marcar los puntos 1 y 1' en los relieves más sobresalientes internos en la huella de cada pie, luego unir los puntos con una línea para formar el “trazo inicial”, como se indica en la Figura 20.

Figura 20

Paso 1 trazo inicial del método de Hernández Corvo

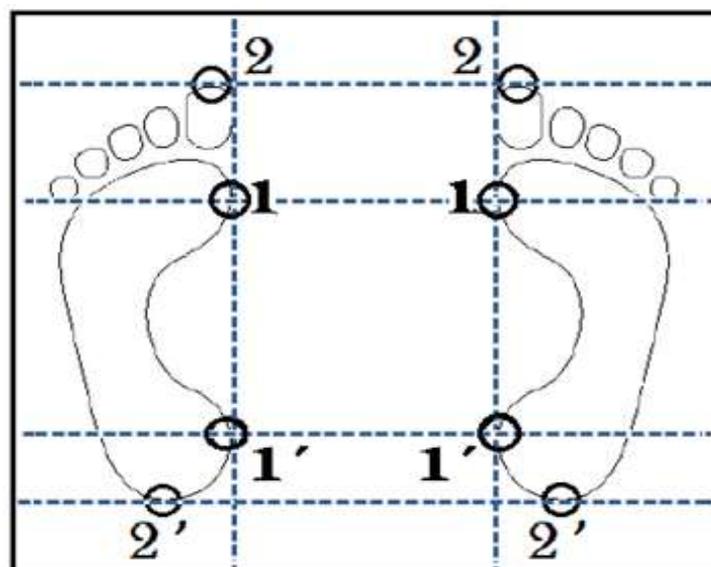


Fuente: Autoría.

- Se marcan los puntos 2 (este punto debe ser ubicado en el dedo más sobresaliente el pie) y 2', luego se debe trazar líneas perpendiculares al trazo inicial por cada punto (1, 1', 2, 2'), conforme se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Paso 2 del método de Hernández Corvo



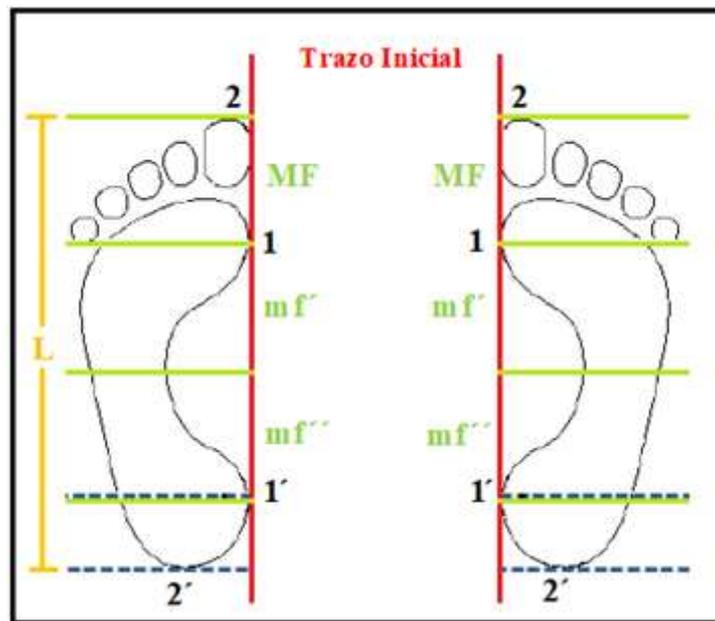
Fuente: Autoría.

“L” longitud de la impresión.

“MF” medida fundamental: Inicia desde el trazo que pasa por el punto 2 hasta el punto 1 y se repite sobre todo el trazo inicial (mf' , mf'' ,...) tantas veces como quepa en su valor íntegro.

Figura 22

Paso 3 del método de Hernández Corvo



Fuente: Autoría.

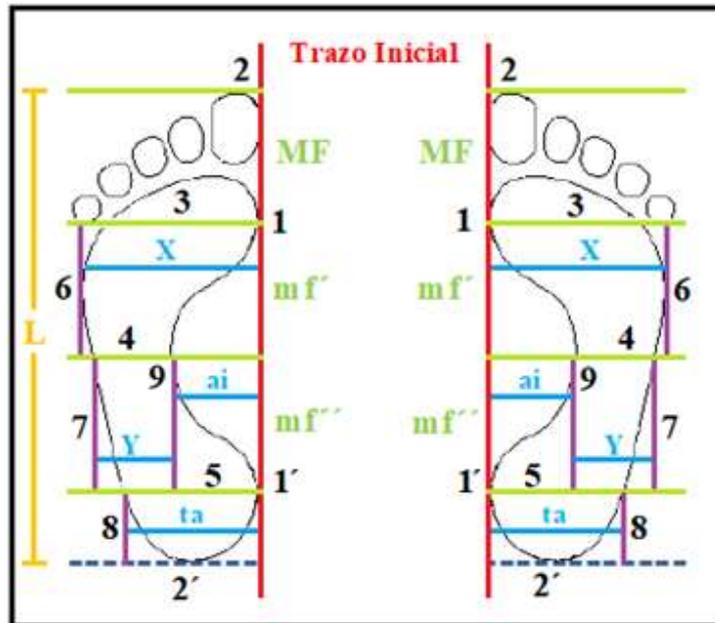
- Se marcan los trazos 3, 4, 5 perpendiculares al Trazo inicial en L, mf' y mf'' .
- Del lado externo del pie se hacen los trazos 6, 7 y 8 perpendiculares a las líneas 3, 4 y 5 que interceptan los límites de la impresión.
- La distancia entre el trazo inicial y 6 es “X” (anchura del metatarso).
- El trazo 9 es perpendicular a 4 y 5 que intercepta al punto más interno de la huella impresa.
- Se toma las distancias de “Y” entre las líneas 9 a 7 (arco externo, superficie apoyo medio pie) y la de “ai” (espacio interno) que va desde la línea 9 hasta el trazo inicial.

- También se debe tomar la medida de “ta” (talón) ubicada entre el trazo inicial y el trazo.

En la Figura 23 se puede observar los pasos descritos anteriormente.

Figura 23

Paso 4 valoraciones de las impresiones plantares



Fuente: Autoría.

- Finalmente, se aplica la ecuación para clasificar la pisada según Hernández Corvo y se compara con la tabla referencial para clasificar el tipo de pisada.

$$\frac{X - Y}{X} \times 100 = \text{---} \% X$$

Ecuación 1

Tabla 1

Porcentajes para clasificar X el tipo de pie según el método de Hernández Corvo

Clasificación huella plantar	Porcentaje
Pie plano	0 – 34 %
Pie plano-normal	3 – 39%
Pie normal	40 – 45 %
Pie cavo-normal	55 – 59 %

Pie cavo	60 – 74 %
Pie cavo fuerte	75 – 84 %
Pie cavo extremo	85 – 100 %

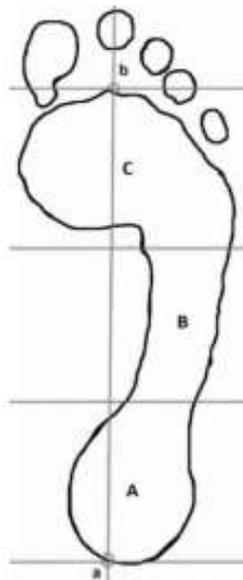
Fuente: (Aguilera et al., 2015).

2.6.3. Método del Índice del Arco (IA).

También conocido como Arch Index, es una técnica que evalúa la altura del arco interno para la cuantificación de la estructura y clasificación del pie. El método consiste en medir desde la parte posterior hasta la más anterior sin tomar en cuenta los dedos, se traza una línea que va desde el centro del talón hasta la punta del segundo dedo, luego se divide en tres tramos iguales y se etiqueta como se muestra en la Figura 24:

Figura 24

Obtención del índice de arco



Fuente: (Sánchez, 2017).

Las áreas obtenidas pertenecen a retropié, mediopié y antepié; se debe calcular cada una de estas tres áreas para luego usarlas en la siguiente fórmula, y así obtener el resultado del índice de arco para clasificar el tipo de pisada.

$$AI = \frac{B}{(A + B + C)}$$

Ecuación 2

Tabla 2

Valores para clasificar el tipo de pie según el método de índice de arco

Clasificación huella plantar	Porcentaje
Pie plano	IA > 0,26
Pie normal	0,21 < IA < 0,26
Pie cavo	IA < 0,21

Fuente: (Sánchez, 2017).

2.6.4. Método del Índice de la impresión del Pie.

Es un método usado para cuantificar la postura estática del pie; La valoración se la realiza mediante la observación de 8 criterios: palpación de la cabeza del astrágalo, curvatura inframaleolar y supramaleolar del maléolo peroneo o lateral, línea de Halbing, alineación del calcáneo en el plano frontal, prominencia en la región de la articulación astragaloescafoidea, congruencia del arco longitudinal medial, congruencia del borde lateral del pie, aducción del retropié respecto al antepié. Es considerado un método con limitaciones, ya que, es necesaria experiencia previa y destreza manual para la palpación del examinador (Lara Diéguez et al., 2011).

2.7. Análisis de la huella plantar y patologías para definir los requerimientos.

Los pies son uno de los órganos más importantes del cuerpo humano, una de sus funciones en la bipedestación es soportar todo el peso del cuerpo humano y distribuirlo en los puntos de apoyo del pie. Si su pisada está mal se generarán problemas ortopédicos y traumatológicos; lo que llegaría a desalinear varias áreas del cuerpo. Según (Campos & Luna, 2018) en su estudio realizado a niños en la ciudad de Cuenca, el 63% de niños tienen alteraciones en el pie derecho y el 60% de los niños alteraciones en el pie izquierdo. Por esta

razón es trascendental realizar valoraciones de presión de la huella plantar, para detectar alteraciones o patologías tempranamente, pudiendo brindar un tratamiento correctivo.

A partir de los 4 o 5 años inicia el completo desarrollo de los pies, sin embargo existen patologías que pueden aparecer de 4 a 6 años, según lo menciona (Clínica, 2018); también (Victoria, Mateos, & López, 2016) explican que entre los 7 y 9 años el niño consigue un patrón de marcha semejante al adulto y a partir de los 10 años todas las rotaciones y compensaciones comienzan a ser realizadas a nivel óseo; dando lugar a presentarse patologías en edades de los 8 a 12 años (Guerra & Montes, 2014). Además, en una entrevista realizada a la Lic. Daniela Zurita menciona que en la adolescencia una patología ya puede estar instaurada y el tratamiento no puede ser efectivo en su totalidad; por otra parte, a partir de los 21 años de edad no hay cambios en las características morfológicas del pie, ya que finaliza el crecimiento óseo, razón por la cual ya no es posible realizar correcciones de patologías. Por esta razón se ha enfocado el proyecto para edades entre 7 y 11 años, ya que posibles anomalías ya podrían ser detectadas y se estaría a tiempo para un tratamiento correctivo o hacer un seguimiento de los efectos del tratamiento.

Según el artículo (Lara Diéguez et al., 2011) publicado por la Universidad de Jaén, en donde realizan un análisis de los diversos métodos para obtener, analizar y clasificar la huella plantar; indica que las técnicas de inspección visual, uso de podoscopio, pedígrafo, altura del dorso del pie, altura del escafoides e índice de la impresión del pie son métodos basados en la observación del pie y para su análisis requieren de bastante experiencia clínica, ya que tienden a ser subjetivos pudiendo llevar a cometer errores a profesionales principiantes. También mencionan al método de índice de arco que excluye los dedos del pie, por lo que se producen errores al determinar la superficie del pie. Otro método es el Ángulo de Clarke, se dificulta la colocación de uno de sus trazos y no poseen normas determinadas para la clasificación. El método de Hernández Corvo tipifica en base a unas medidas obtenidas de una impresión

plantar, según el estudio antes mencionado es el más preciso en cuanto a la clasificación; pero toma tiempo el recoger la muestra; ya que, la toma de datos es individual para cada pie más el trazo de las líneas para aplicar la fórmula, también incómoda al paciente por el riesgo de manchas en la ropa o se seca la tinta.

Para definir el número de sensores se tomará como referencia la información recopilada en la sección 2.5.1. patologías del pie, en donde se identifica las zonas de mayor presión plantar de los distintos tipos de pisada que se muestran en la Figura 25.

Figura 25

Zonas de mayor presión de las distintas patologías



Adaptado de: (Puratich, 2011).

2.8. Adquisición de datos (DAQ).

Hablando de un modo general, existen varios métodos para la recolección de datos, como: la registro visual u observación, la encuesta, la entrevista, cuestionario o instrumentos de medición (Manrique, 2004). La adquisición de datos se trata del proceso de recopilar mediciones de fenómenos físicos como temperatura, voltaje, humedad, presión, distancia, etc.;

a través de transductores o sensores, quienes convierten dichos parámetros en señales eléctricas. Luego, por medio de un dispositivo electrónico recibe y convierte las señales análogas a digitales para registrarlas o documentarlas con el fin de realizar el análisis de los datos de un fenómeno.

Los sistemas de adquisición de datos digitales para realizar el proceso de medición y análisis de fenómenos físicos están formados por: sensores, acondicionamiento de señal, convertidores análogo-digital y computadora con software DAQ. (Dewesoft, 2020). A continuación, se presentan algunos tipos de sistemas de adquisición de datos, especialmente basados en el tipo de comunicación.

2.8.1. Sistemas de adquisición de datos inalámbricos.

Son sistemas que están conformados por uno o varios transmisores inalámbricos para enviar los datos a un receptor conectado a un ordenador. Los medios inalámbricos que se pueden usar son las: tecnologías inalámbricas de proximidad, redes WPAN, redes WLAN, redes WMAN, redes WWAN, redes de telefonía móvil, redes LPWAN, redes satelitales; estas tecnologías pueden llegar a cubrir grandes distancias, en otros casos reduce el costo del cableado de los sensores, reducir tiempo de instalación, en otros casos pueden hacer que un sistema sea portátil (Tecnología para los negocios, s/f).

2.8.2. Sistemas de adquisición con comunicación en serie.

Existen sistemas con distintos estándares de comunicación, como el RS232, que es el más común para comunicaciones punto a punto, usa transmisión síncrona a distancias de hasta 15 m y velocidades de 20 Kbps; el estándar RS422 permite hasta 10 conexiones, soporta distancias de hasta 1.2 Km a una velocidad máxima de 10 Mbps; el RS485 usa transmisiones full dúplex, permite hasta 32 conexiones en el mismo bus y soporta distancias de hasta 1.2 km a una velocidad máxima de 10 Mbps (Forero, 2012).

2.8.3. Sistemas de adquisición con comunicación ethernet.

En la actualidad es una opción muy popular, ya que los datos pueden ser compartidos fácilmente por la intranet de la organización y de ser necesario por internet, para permitir acceso remoto al personal autorizado. Además, el estándar Ethernet 802.3 permite la integración de los sistemas de control y administración en una sola plataforma a velocidades desde los 10 Mbps hasta 100 Mbps y su distancia depende del medio de transmisión (Bastidas & Torres, 2011).

2.8.4. Sensores detectores de presión.

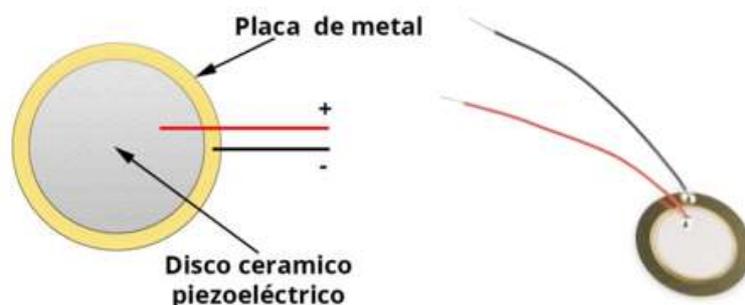
Es un dispositivo transductor usado para medir una variable física; está compuesto por un elemento detector de presión con el que mide la fuerza aplicada al sensor. Existen distintos tipos según su diseño, precisión, precio o tecnología, dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar.

2.8.4.1. Sensores piezoeléctricos.

Son sensores capaces de medir la fuerza aplicada sobre ellos, están compuestos por una lámina de metal, cables y material cerámico o cristales iónicos que debe ser tratado para reordenar sus cargas, para que al ser deformados generen pequeñas cantidades de energía eléctrica, en la Figura 26 se puede observar este tipo de sensores.

Figura 26

Sensor piezoeléctrico



Fuente: (IngenieríaMecafenix, 2018).

2.8.4.2. Sensores piezoresistivo.

Se trata de dispositivos que realizan cambios resistivos en las características de ciertos materiales semiconductores al estar sometidos a presiones mecánicas, provocando un cambio en la corriente eléctrica que pasa por el elemento. En la Figura 27 muestra un sensor de este tipo, el cual según como haya sido flexionado por una fuerza o acción mecánica, disminuirá su resistencia. (Terán, 2019).

Figura 27

Sensor piezoresistivo Flexiforce



Fuente: (Terán, 2019).

2.8.5. Acondicionamiento de señal.

En esta sección se genera una señal aceptable para los embebidos que se van a encargar de recibir la información obtenida de los sensores. Debido a la sensibilidad de los sensores, en ocasiones se obtiene valores erróneos; por esta razón es necesario contar con acondicionadores de señal encargados de convertir una señal de difícil lectura a una que se pueda leer fácilmente (Dewesoft, 2020). Existen varias maneras de acondicionamiento, dependiendo el sistema será el uso de una o varias de las siguientes formas.

2.8.5.1. Transformación.

Los sensores generan una diferencia de potencial, por lo que para usarla como medida esta va a variar. El acondicionador de señal primero va a transformar proporcionalmente las variaciones de voltajes recibidas por los sensores para que el embebido de adquisición de datos sea capaz de interpretarlas (HBM, 2021).

2.8.5.2. Amplificación.

En el caso de que la señal de entrada sea de valor muy bajo debe ser amplificada proporcionalmente a sus variaciones para poder ser interpretada correctamente por el embebido de adquisición de datos encargado de la digitalización; esta señal debe ser amplificada de forma que la tensión máxima se obtenga cuando el valor máximo del rango de entrada de la variable física medida (Bastidas & Torres, 2011).

2.8.5.3. Aislamiento.

En algunos sistemas se hace uso de un optoacoplador, en donde se convierte la señal eléctrica en una óptica. Este bloque permite proteger los elementos del sistema y aislar la sección de sensores con la de adquisición de datos mediante la separación de masas, y así evitar mediciones erróneas por diferencias de voltaje (Coloma, 2015).

2.8.5.4. Filtro.

Luego la señal pasa a ser filtrada el espectro de frecuencia, conservando solo datos válidos con el fin de bloquear interferencias eléctricas o ruidos de altas frecuencias para una mayor precisión. Estos filtros pueden ser pasivos, activos o mediante algoritmo digital y existen varios tipos como: filtros pasa bajo, filtros pasa alto, filtros de paso de banda y filtros de rechazo de banda (HBM, 2021).

2.8.5.5. *Excitación.*

Algunos sensores o transductores emiten señales de bajo nivel, por lo que requieren de una fuente externa de tensión o corriente para producir la variación proporcional a la magnitud a medir y mejorar la señal, dicha fuente es conocida como fuente de excitación (Alcivar, Polo, Torres, Sevilla, & Velez Cynthia, 2010).

2.8.5.6. *Linealización.*

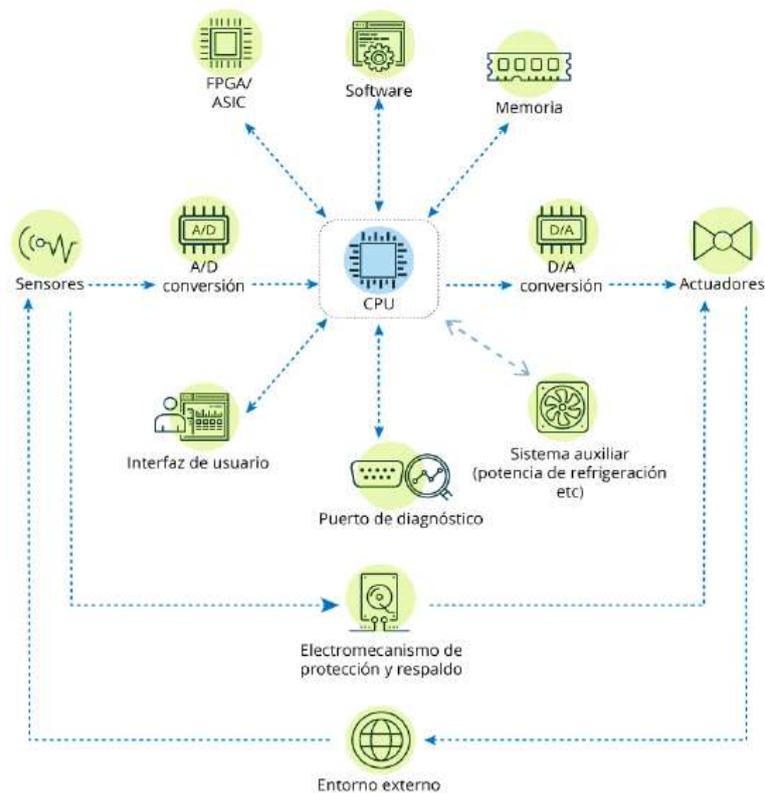
En el caso de que los sensores no brinden una linealidad con la magnitud física, los acondicionadores también pueden linealizar mediante software con una interpretación de la señal. Con esta técnica al calibrar los sensores se llega a obtener exactitud (HBM, 2021).

2.8.6. *Sistemas embebidos.*

Se trata de una plataforma embebida conformada por una placa electrónica, un microcontrolador reprogramable y el software. Las placas pueden tener entradas y salidas análogas o digitales para conexión de sensores y otros elementos electrónicos; existen microcontroladores reprogramables para que cumplan con cierta tarea específica, pudiendo ser modificarla basándose en las necesidades del sistema. En la Figura 28 se indica los diferentes elementos que constituyen a un sistema embebido (INCIBE, 2018).

Figura 28

Componentes de un sistema embebido (nivel lógico)



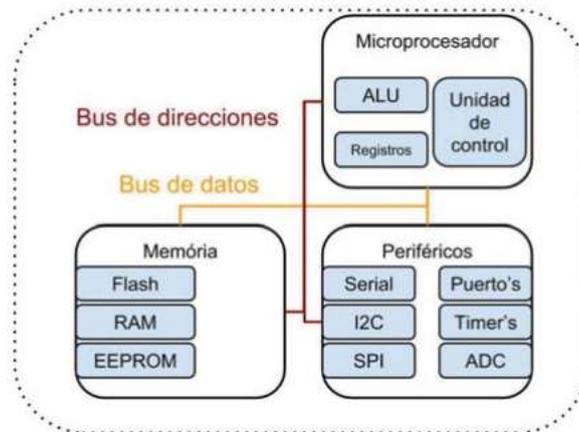
Fuente: (INCIBE, 2018).

2.8.6.1. Microcontrolador.

Es como un mini ordenador y tiene como función principal automatizar procesos y procesar información. Posee un circuito integrado como su componente principal, además de, sistemas para controlar periféricos de entrada y salida, microprocesador y memoria; a continuación, se presenta en la Figura 29 su esquema general (Cruz, 2020).

Figura 29

Esquema general de un microcontrolador



Fuente: (Choquehuanca, 2019).

2.8.6.1.1. Microprocesador.

El microprocesador contiene la ALU (unidad aritmética y lógica) que se encarga de realizar operaciones por medio de circuitos digitales, la unidad de control que permite distribuir la lógica de las señales usando un conjunto de sistemas digitales secuenciales, y los registros que son las memorias de los procesadores (Choquehuanca, 2019).

2.8.6.1.2. Memorias.

Puede tener las siguientes memorias: la memoria FLASH que almacena la programación de cada instrucción, la memoria volátil RAM es la encargada de almacenar datos y variables, mientras que la memoria externa EEPROM es donde se almacenan las configuraciones, mediciones, datos de calibración o para programar y escribir (Choquehuanca, 2019).

2.8.6.1.3. Periféricos

Son módulos electrónicos digitales que están embebidos en el microcontrolador, que permiten controlar funciones de los puertos. Entre los puertos tenemos: el UART (unidad de recepción y transmisión serial asíncrona) que permiten la comunicación mediante de mensajes

binarios con otros sistemas digitales a través de dos cables, el I2C (comunicación serial síncrono) admite comunicación hasta con 127 dispositivos conectados un mismo bus conformado por los cables SDA (serial data) y SCL (serial clock), el SPI (interfaz serial periférica) de comunicación serial síncrona para envío de información binaria mediante cuatro cables de conexión, el MISO (entrada de maestro y salida de esclavo), el MOSI (salida del maestro entrada del esclavo), el SCK es el reloj serial, el ADC (convertidor de señales análogas a digitales), DAC (convertidor de señales digitales a análogas) (Cruz, 2020).

2.8.6.2. Programación del microcontrolador.

Para poder controlar a un microcontrolador requiere de programación, en donde cada uno de ellos tiene su propio conjunto de instrucciones aritméticas, lógicas, transferencia de bits, misceláneas. Generalmente, el código ejecutable se representa como una serie de números hexadecimales y para escribir dicho código el proceso era arduo, por lo que fue creado el primer lenguaje de programación llamado ensamblador que permitía entender y escribir el código fácilmente. Cada instrucción en ensamblador son abreviaturas que por medio del programa ensamblador compila las instrucciones a lenguaje máquina; sin embargo, sigue siendo un lenguaje extenso y difícil de usar; por lo que se han desarrollado programas de alto nivel en donde una sola sentencia representa a varias instrucciones haciéndolos más ágiles y fáciles de usar, los lenguajes de alto nivel son: Basic, Pascal, C, C++, Matlab, Python, JavaScript, AJAX, NET (MikroElektronika, 2021). Para programar a un microcontrolador se requiere de un compilador que es el que traduce del lenguaje de alto nivel a lenguaje máquina, también de un IDE (entorno de desarrollo integrado) software desarrollados para programas que por medio del compilador crea y copia la programación, y un programador o grabador (Choquehuanca, 2019).

2.8.7. Placas electrónicas de desarrollo.

Son plataformas con dispositivos electrónicos que cuentan con un microcontrolador reprogramable. En el mercado existe una gran variedad de placas de desarrollo, ya sea de hardware y software libre o privado, entre las más populares tenemos: ARTIK 710, SensorTile, ADALM-PLUTO, AudioSmart 2-Mic, familia Raspberry PI. Familia Arduino, Thunderboard Sense 2, familia i.MX, Jetson TX2, SmartEverything, Onion, familia ODroid-X, familia Cubieboard, Hackberry, Beaglebone Black, familia Wandboard, entre otros (Arrow Electronics, 2018). En la Figura 30 se muestra algunos de los embebidos más populares.

Figura 30

Componentes de un sistema embebido (nivel lógico)



Fuente: (Arrow Electronics, 2018).

2.9. Ingeniería de software.

Es la rama que se encarga de los aspectos del diseño, desarrollo y creación del software. Las aplicaciones de software se realizan mediante un proceso de ingeniería, en el que incluye herramientas, metodologías, técnicas de desarrollo; para aumentar las posibilidades de que los objetivos de negocios o aplicación de software se cumplan en tiempo, calidad y

funcionamiento. Es la base de ejecución de procesos de desarrollo (Ramos, Noriega, Laínez, & Durango Alicia, 2017).

2.9.1. Proceso de desarrollo de aplicaciones.

Una aplicación se crea mediante un proceso de desarrollo, puede ser formal o empírico. Los procesos formales permiten aprovechar la experiencia y conocimiento de sus creadores; mediante la gestión de desarrollo de software a través de procesos, actividades, herramientas y modelos propuestos para lograr un mejor producto a menor tiempo y costo, los procesos son un conjunto de actividades y resultados, que se centran en aspectos técnicos como la especificación, desarrollo, validación y evolución del software (Ramos et al., 2017).

Mientras que el proceso empírico depende netamente de la experiencia, habilidades y conocimientos que posea el equipo de trabajo, para resolver problemas, prevenir problemas y completar las tareas, con el fin obtener un producto terminado (Ramos et al., 2017).

2.10. Software de visualización de datos.

Es el encargado de la representación gráfica de la interpretación y construcción de información a partir de datos mapeados para ser comunicada. La representación se la puede presentar mediante mapas, gráficos, tablas. Existen diversas plataformas utilizadas para la visualización de datos, a continuación se detallan algunos de ellos (Fuentes, 2019).

2.10.1. Matlab.

Es una herramienta de software que permite realizar cálculos complejos a partir de valores basados en matrices. La herramienta tiene funciones, librerías y hace uso de lenguajes C y C++ para ofrecer un entorno interactivo que permite la programación, entrada y salida de datos de forma versátil y funcional; el software se encuentra disponible para sistemas operativos como: Windows, Apple, UNIX, iOS, Android (Reinoso, Jiménez Luis, Payá Luis, Gil Arturo, & Peidró Adrián, 2018).

2.10.2. Python.

Es un lenguaje de programación de alto nivel lanzado en 1991, que soporta programación imperativa, programación interpretada y programación orientada a objetos, funcional. Actualmente, es un software muy utilizado por su licencia de código abierto que comparada con otros lenguajes no utiliza muchas líneas de código para realizar una función(Arias, 2015).

2.10.3. Processing.

Es un lenguaje que surgió en el 2001 en Massachusetts Institute of Technology (MIT), se puede usar tanto en sistemas Linux, Windows y Macintosh., fue pensado para introducir al mundo de la programación a diseñadores, artistas visuales y entusiastas sin formación previa. Es usado para aprender a codificar dentro del contexto de las artes visuales y un cuaderno de bocetos de software flexible (Pacheco L., 2016).

2.11. Aprendizaje automático.

También conocido como Machine Learning (ML por sus siglas en inglés) es un tipo de inteligencia artificial que realiza el estudio y creación de máquinas capaces de procesar información e ir incrementando sus habilidades para hacer una o más tareas a través de experiencias acumuladas de manera autónoma, es decir aprendizaje automático mediante observaciones del mundo real. Los algoritmos examinan una gran cantidad de variables en busca de combinaciones que predigan resultados de manera confiable sin programación de reglas o lógica por parte del ser humano, sino a través de datos de entrenamiento (Obermeyer & Emanuel, 2016). En este sentido se han propuesto algunos métodos para el aprendizaje automático y así desarrollar sistemas para solución de distintos tipos de problemas, estas técnicas se dividen en tres enfoques principales, tales como: aprendizaje supervisado, aprendizaje semi-supervisado y aprendizaje no supervisado (Chacua, 2019).

2.11.1. Aprendizaje supervisado.

Este tipo de aprendizaje trabaja con datos etiquetados (labeled data) con su respectivo resultado, es decir, de la forma (x_i, y_i) y así entrenar al algoritmo mediante el aprendizaje o mapeo para encontrar f a partir de una función $f(x_i) = y_i$, y de esta manera se pueda predecir valores y a partir de valores de x ;. Entre más grande sea el banco de datos de entrenamiento mayor precisión, y cuando se le entregue datos sin etiquetar, el algoritmo basado en su aprendizaje adquirido podrá predecir un resultado. (Rodríguez, 2018).

Hay diferentes formas de función de mapeo $f(,)$, como: regresión lineal, univariable y multivariable, árboles de decisión, bosques de decisión aleatoria (RDF), regresión logística (LR), máquinas de vector soporte (SVM), redes neuronales artificiales (ANN), máquinas de Kernel, clasificación de Naive Bayesianos, regresión por mínimos cuadrados y métodos de Ensemble. Este tipo de aprendizaje es aplicado en problemas de clasificación y regresión, en clasificación puede identificar dígitos o diagnósticos, mientras que en la regresión se puede obtener predicciones meteorológicas, expectativa de vida, crecimiento y muchas otras más (Recuero de los Santos, 2017).

2.11.2. Aprendizaje no supervisado.

Se lo denomina como aprendizaje no supervisado porque a diferencia del aprendizaje supervisado, en este caso no existen datos etiquetados para el entrenamiento, es decir se tiene los valores de entrada x , mas no el de salida y correspondiente. Por lo que debe modelar la estructura, distribución subyacente de los datos para descubrir una estructura interesante; es decir, solo se puede describir la estructura de los datos intentando encontrar algún tipo de organización o similitudes entre los datos de entrada que simplifique el análisis mediante categorización. Hay diferentes tipos de aprendizaje supervisado, los más comunes son:

algoritmos de clustering, análisis de componentes principales, descomposición en valores singulares, análisis de componentes principales. Este tipo de aprendizaje es aplicado en problemas de clustering, agrupamientos de co-ocurrencias y perfilado profiling (Recuero de los Santos, 2017).

2.11.3. Aprendizaje semi-supervisado.

El método de aprendizaje semi-supervisado se ubica entre el aprendizaje supervisado y el no supervisado. Este tipo de aprendizaje es usado en los casos que haya una gran cantidad de datos de entrada y solo algunos de los datos de salida, es decir, solo ciertos datos estarían etiquetados (Chacua, 2019).

2.11.4. Aprendizaje por refuerzo.

Trata de una técnica de aprendizaje basada en prueba y error, trata de mejorar la respuesta usando un proceso de retroalimentación al observar el mundo que lo rodea, en donde los datos de entrada es la retroalimentación que obtiene del mundo exterior como respuesta a sus acciones. Se aplica cuando no se tiene datos de salida, por lo que el sistema debe explorar el entorno y observar o monitorizar el resultado de las acciones tomadas (Recuero de los Santos, 2017).

2.12. Base de datos.

Las bases de datos son conjuntos de datos ordenados y estructurados de modo sistemático para su posterior recuperación, análisis y transmisión. Típicamente, se modelan por filas y columnas en una serie de tablas para lograr eficiencia en la consulta de la información; pueden ser compartidos por usuarios y aplicaciones diferentes. Generalmente, una base de datos es controlada por DBMS (sistemas para gestión de base de datos), que permiten almacenamiento y rápida recuperación de un gran volumen de información, junto con

aplicaciones asociadas a ellos. Existen varios modelos de bases de datos, cada uno con distintas características como a continuación (Raffino, 2020).

2.12.1. Base de datos jerárquicas

Va estructurando los campos en nodos jerarquizados, en donde los nodos son puntos conectados entre sí formando una especie de árbol y cada entrada tiene su nodo padre, el cual puede tener varios nodos hijos con el fin de archivar datos organizados. Es un modelo fácil de entender estructuralmente, una vez encontrado el primer registro ya no es necesario realizar una exploración de índice, ya que sigue el puntero principal que dirige al siguiente registro (Dataprix, 2010).

2.12.2. Base de datos en red

Organización jerárquica de nodos, pero en este caso un nodo hijo puede tener más de un nodo padre. Existen conexiones adicionales entre nodos padre y nodos hijo, para poder acceder a un nodo por distintas vías se almacena un registro con los enlaces. Tiene una capacidad mayor para mantener datos, y al existir un vínculo padre e hijo mantiene la integridad de los datos (Dataprix, 2010).

2.12.3. Base de datos relacional

Es el modelo brinda mayor flexibilidad al almacenar los datos en tablas diferentes, cada tabla estará conformada por filas que contienen los registros y columnas que representan los campos; cada tabla se denomina una relación. Las tablas relacionadas tienen un campo clave en común, el cual sirve para enlazar la información de una tabla con otra; y para cada acceso se lo realiza mediante una consulta escrita en un programa llamado interfaz estándar SQL (organización de base de datos relacional), que es el más común por su sencillez para realizar operaciones como: añadir, eliminar o editar (Dataprix, 2010).

2.12.4. Base de datos orientada a objetos.

Se trata de una base de datos que consta de objetos, los cuales son la representación detallada, concreta y particular de algo; la cual, determina su identidad, estado y comportamiento. Su identidad para ser diferenciado entre otros objetos. El estado del objeto es el conjunto de valores característicos concretos, estos pueden ser peso, color, precio, etc. El comportamiento particular en cierto momento define de funciones que el objeto es capaz de llevar a cabo.

Una clase representa una familia de objetos concretos, y una instancia de una clase sería un objeto en particular, estas clases permiten definir datos que no están incluidos. Las clases pueden intercambiar datos a través de métodos y son capaces de almacenar diferentes tipos de datos, como audio, video, imágenes, etc. (Dataprix, 2010).

2.13. Modelo iterativo

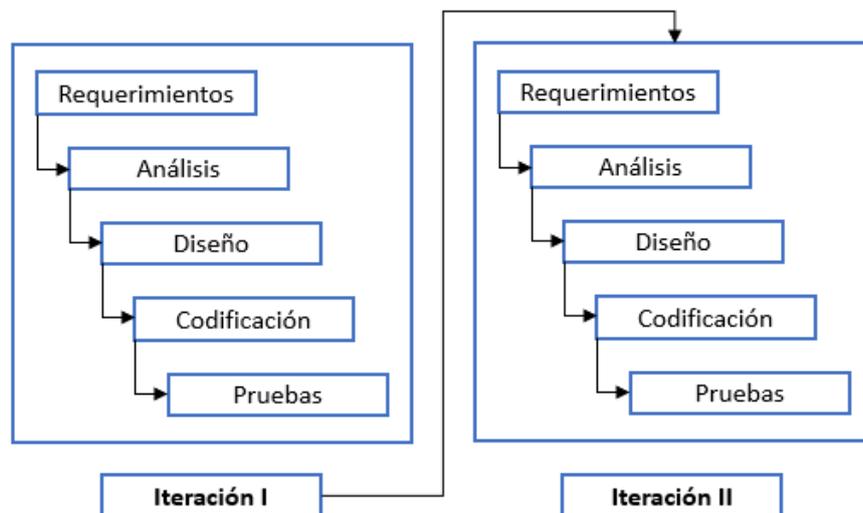
Un sistema de desarrollo puede llegar a requerir cambios; por lo que el modelo es ideal para este tipo de proyectos con equipos de trabajo pequeños o individuales con poca retroalimentación y se adapta fácilmente a los cambios de necesidades tanto como del sistema o del cliente. Según (Powell-Morse, 2016) se trata de un proceso cíclico en donde sus iteraciones pueden repetirse una y otra vez, presentando mejoras de sus fases en cada una de ellas, hasta llegar a obtener un trabajo final lo suficientemente pulido. Con este modelo es posible iniciar con ciertos requerimientos y más adelante en cada iteración ir agregando o quitando requerimientos según las necesidades del sistema. Dichas iteraciones están formadas por las fases de análisis, diseño, programación y pruebas, que tratan de resolver el problema, obteniendo una implementación inicial de un prototipo en el menor tiempo posible para ser evaluado y hacer las respectivas correcciones de ser necesario.

No se debe confundir con la metodología incremental, ya que su objetivo es agregar funcionalidades y en el iterativo es mejorar la funcionalidad por iteraciones sucesivas, las cuales le permiten ser un modelo flexible a cambios e ir avanzando en el desarrollo del diseño e implementación.

El proceso consta de requerimientos que es el primer paso para iniciar tener las especificaciones de software y hardware; diseño, en la cual se establece una solución para cumplir con los requerimientos planteados en la fase anterior, obteniendo un borrador de las partes que comprenden el sistema; luego viene la etapa de implementación en donde el proceso se ejecuta armado y codificación desarrollada en la fase anterior; pruebas y evaluación. A continuación, en la Figura 31 se muestra las fases de las iteraciones.

Figura 31

Fases del modelo iterativo



Fuente: Autoría.

En esta metodología no es necesario que los requisitos estén totalmente definidos al iniciar el desarrollo, lo que hace que cada versión o iteración garantice versiones mejores a las anteriores y si esta no es buena se puede volver a la versión anterior.

CAPÍTULO III. Desarrollo del sistema electrónico de detección de presión plantar en estática.

El desarrollo de este capítulo inicia con una descripción de la metodología “modelo iterativo”, usada para la elaboración del sistema, también se detallan los requerimientos, diseño del sistema, diagramas, arquitectura y análisis de datos necesarios para el desarrollo y funcionamiento del sistema.

3.1. Metodología

El proceso de diseño mediante metodología iterativa indica que, para no confundirse con la metodología incremental, se debe desarrollar un prototipo funcional desde la primera instancia del desarrollo y en posteriores iteraciones se mejoran las cualidades y características que ya posee, por ello se hace necesario encontrar los requerimientos mínimos pero representativos en general del dispositivo electrónico y empezar a desarrollarlo a partir de ello, en la Figura 32 se describe los procesos de cada fase del modelo.

Figura 32

Fases del modelo iterativo



Adaptado de: (Powell-Morse, 2016).

La metodología iterativa es una metodología operativa, es decir, es aquella que se utiliza en la etapa de desarrollo de los elementos de hardware y software, por lo que previamente se necesita incorporar una etapa de planificación que permitan iniciar y finalizar con éxito el presente trabajo de titulación.

3.2. Modelo Iterativo: Primera Iteración

La metodología iterativa es operativa, es decir, es aquella que se utiliza en la etapa de desarrollo de los elementos de hardware y software, por lo que previamente se necesitan incorporar otras estrategias que permitan iniciar y finalizar con éxito el presente trabajo de titulación.

3.2.1. Requerimientos del sistema: Primera Iteración

De acuerdo al estándar internacional ISO/IEC / IEEE 29148: 2011 orientado al proceso de desarrollo de software, se pueden diferenciar tres tipos de requerimientos: requerimientos de stakeholders, requerimientos del sistema y requerimientos de arquitectura.

El conjunto de requerimientos más generales surge de aquellos entes que proporcionan una razón para su realización, es decir, aquellos entes involucrados en el proyecto, siendo directos e indirectos como desarrolladores, usuarios, administradores, docentes, etc. Los requerimientos más específicos se refieren a la conformación de una idea del producto que será generado a partir de las necesidades recopiladas con los requerimientos más generales. Finalmente, la tercera etapa en la colección de requerimientos del sistema se encuentra aquellas que corresponde a los detalles de construcción del prototipo o producto.

3.2.1.1. Nomenclatura y prioridad de requerimientos

De acuerdo a los tres tipos de requerimientos que se deben evidenciar se puede realizar la tabla 3 que presenta una nomenclatura para cada uno de ellos, esto ayudara a agilizar y organizar el trabajo posterior.

Tabla 3*Nomenclatura para requerimientos*

Nomenclatura	Definición
SH-R	Requerimientos de Stakeholders
S-R	Requerimientos del sistema
Ar-R	Requerimientos de arquitectura

Fuente: Autoría.

Todos los posibles requisitos que puedan ser enunciados por cada stakeholders es muy importante para el desarrollo del sistema, sin embargo, se deben priorizar para poder obtener un resultado alcanzable. La priorización de cada requerimiento se cataloga en tres categorías descritas en la tabla 4.

Tabla 4*Categorización de la prioridad de requisitos*

Categoría	Descripción
Baja	Requerimiento de implementación opcional, ya que no depende de este el funcionamiento el sistema propuesto
Media	Es un requerimiento de implementación no opcional, sin embargo, es posible omitirlo o reemplazarlo por otro cuando no existe otra opción
Alta	Requisito de implementación obligatoria, ya que constituye una parte fundamental para la formación del sistema

Fuente: Autoría.

3.2.1.2. Requerimientos de Stakeholders

Los requerimientos del sistema son procedentes de la observación directa de las necesidades de los usuarios y la investigación realizada en cuanto a métodos y sistemas de medición plantar usados por médicos y especialistas en tratamientos de este tipo de patologías, es por ello que deben ser valorados por diferentes actores, como se enlista en la Tabla 5,

involucrados directos e indirectos con el desarrollo del presente proyecto con el fin de garantizar el desarrollo y correcto funcionamiento del sistema con la posibilidad de mejorar o quitar aquellos no necesarios durante las siguientes iteraciones.

Tabla 5

Lista de stakeholders

Lista De Stakeholders		
1	Usuarios directos	Pacientes a valorar su pisada plantar. Especialistas de salud encargados de la valoración plantar.
2	Administradores	Andrés Godoy
3	Director y asesor del proyecto	MSc. Luis Suárez MSc. Jaime Michilena

Fuente: Autoría.

Ya que este requerimiento comprende directamente las necesidades que se generan tanto para usuarios como para personal que tiene bajo su manipulación, el uso del sistema, se pueden enlistar los siguientes requerimientos de la tabla 6.

Tabla 6

Requerimientos de Stakeholders

Requerimientos Operacionales	Prioridad		
	Alta	Media	Baja
El sistema deberá tener la capacidad de detectar la huella plantar	x		
Está enfocado a usuarios entre 7 a 12 años	x		
Debe contar con una interfaz gráfica para el manejo del sistema y visualización de resultados	x		
El sistema debe tener una base de datos para el registro de las mediciones	x		
El costo de su desarrollo debe ser menor al de los comerciales que rondan entre los \$2800		x	
El dispositivo debe funcionar sin la necesidad de conexión a internet.	x		
Requerimientos de Usuarios			

Fácil uso del sistema tanto software como hardware para la toma de diagnósticos	x		
Debe visualizar los resultados para su respectivo interpretación y análisis	x		
Fácil búsqueda y acceso a la información registrada		x	
Sistema con orientación del proceso Hernández Corvo			x

Fuente: Autoría.

3.2.1.3. Requerimientos del sistema

Los requerimientos del sistema definen el conjunto de funcionalidades que conformaran el sistema propuesto tal como se muestra en la tabla 7. Tiene carácter más específico que los requerimientos de stakeholders.

Tabla 7

Requerimientos del sistema

Requerimientos del sistema	Prioridad		
	Alta	Media	Baja
La estructura deberá ser capaz de soportar el peso de niños de 7 a 12 años	x		
Subsistema para procesar señales eléctricas de los sensores	x		
Subsistema que procese la información y sea capaz de trabajar con imágenes	x		
Comunicación entre subsistema de adquisición de datos y de procesamiento	x		
Costo de inversión para el desarrollo deberá ser menor a \$2800		x	
El dispositivo deberá contar con una base portable		x	
Deberá contar con GUI para el manejo del sistema y visualización de información	x		
Filtrado de datos por identificación	x		
Lenguaje de programación escalable			x

Fuente: Autoría.

3.2.1.4. Requerimientos de Arquitectura

A continuación, en la tabla 8 se puede resumir los requerimientos de arquitectura que recaerán sobre el funcionamiento del dispositivo electrónico en cuestión. Estos requerimientos se refieren a aquellos aspectos que proporcionan una toma de decisión respecto características más específicas para la implementación del sistema propuesto.

Tabla 8

Requerimientos de Arquitectura

Requerimientos de Arquitectura	Prioridad		
	Alta	Media	Baja
Los sensores deben cubrir el antepié, medio pie y retropié	x		
El tamaño de la estructura debe ser superior a 22 cm x 25 cm		x	
Sensores pequeños, flexibles e imperceptibles para los usuarios.	x		
Los sensores deben ser ubicados estratégicamente en base a análisis	x		
Hardware capaz de soportar la adquisición de datos de todos los sensores a usar	x		
Switch de encendido y apagado del sistema.		x	
Comunicación entre hardware de adquisición de datos y procesamiento.		x	
Software para el tratamiento de la información	x		
Alimentación principal del sistema de 110 VCA.		x	
Acondicionamiento de señal para sensores.		x	

Fuente: Autoría.

3.2.2. Análisis de la situación actual: Primera Iteración

La medición de las presiones plantares es parte de la técnica del análisis de movimientos corporales conocido como laboratorio de análisis de marcha, la cual hace uso de distintas tecnologías y métodos manuales para realizar análisis de los movimientos de todas las partes del cuerpo con el fin de encontrar anomalías en el patrón de marcha, para luego tratarlas y dar un mejor seguimiento a los tratamientos y llegar a tener una recuperación pronta y efectiva. Por lo que con el paso del tiempo se ha ido prestando mayor atención a esta metodología de

estudio de los movimientos corporales, y con mayor razón a las extremidades inferiores, debido a que los pies son los órganos encargados de soportar el peso distribuido equitativamente de todo el cuerpo para mantenerlo en pie o en marcha. El análisis de huella plantar en edades tempranas es indispensable para la detección oportuna de cualquier patología podológica que a posterior pueda desarrollarse con severidad, e incluso puedan derivar en patologías o afecciones en otras partes del cuerpo humano. Distintos sistemas se han desarrollado a nivel comercial que permiten obtener una medición e impresión de huella plantar, sin embargo, presentan muy altos costos de adquisición. Por lo que se hace difícil para instituciones educativas y profesionales la adquisición de este tipo de sistemas para su uso en investigaciones, o tratamientos a sus pacientes.

Es indispensable que la propuesta del presente proyecto presente características de bajo costo, por lo que se deben elegir en todo momento, herramientas de desarrollo de acceso libre o de costos accesibles tanto para hardware como para software. Y así pueda ser usado por los profesionales en esta rama con fines de terapéuticos, estudios en distintas poblaciones, diagnósticos, entre otros.

En la actualidad existen un conjunto de entornos hardware de desarrollo conocidos por Arduino, ESP, IceStudio, Raspberry Pi, Onion, Micro:bit o Lilypad entre otros que permiten ser configurados para la lectura de señales eléctricas y procesarlas hasta obtener una huella plantar.

El software disponible para el desarrollo de aplicaciones también es muy variado, sin embargo, se necesita que exista compatibilidad con entornos embebidos con soporte para procesos medianamente extensos para el análisis de información e implementación de interfaz gráfica, entre ellos destacándose Java, JavaScript y Python. Python es uno de los lenguajes de programación por excelencia en la implementación de algoritmos de inteligencia artificial y

aprendizaje de máquina debido a que tiene a disposición diferentes librerías de las cuales se puede hacer uso, tales como las mostradas en la Figura 33:

Figura 33

Niveles de abstracción en la programación de Machine Learning



Fuente:(Dot CSV, 2019).

En la anterior imagen se describe, de cierta manera, el conjunto de herramientas disponibles en Python y los niveles de abstracción necesarios para la implementación de algoritmos de machine learning, es así que en cada uno de ellos es posible implementar los mismos algoritmos, pero con sus diferencias correspondientes. A medida que se utiliza una herramienta de mayor nivel de abstracción, disminuye su nivel de complejidad y se pueden lograr algoritmos más extensos, sin embargo, disminuye la capacidad de control sobre los detalles del funcionamiento final.

Más que una librería, SKLearn es un entorno de desarrollo dedicado a la aplicación de algoritmos de Machine Learning dentro de seis tipos de procedimientos generales como:

Clasificación, Regresión, Clustering, Reducción de dimensión, Selección de modelos y Preprocesamiento (Pedregosa et al., 2011).

3.2.3. Diseño del sistema: Primera Iteración

A continuación, se presenta un conjunto de apartados que permitan planificar el desarrollo del presente trabajo.

3.2.3.1. Diseño estructural

Estructuralmente, el dispositivo debe tener en consideración aquellas características que corresponden a su constitución dimensional, material y disposición de elementos. Las dimensiones del prototipo deben presentar como mínimo un área de 22x22cm, ya que son las medidas de pie de mayor tamaño a las cuales está enfocado el dispositivo, a esto se debe incorporar ciertas dimensiones que corresponden al marco de sujeción de elementos y circuitos electrónicos. El material que lo compone debe permitir soportar el peso medio de los niños que se encuentran en el rango de estudio, siendo los 12 años de edad; por lo que se utilizará un armazón de aluminio por su ligereza y resistencia. Además, de otra parte, de madera para el soporte y cuidado de los elementos electrónicos, recubierta con material resistente a líquidos. Se considera que el dispositivo se encuentra orientado al uso en un entorno Indoor, ya sea que constituya como un sistema médico o ya sea como elemento de laboratorio, en la Figura 34 se puede observar la estructura del proyecto.

Figura 34

Estructura del sistema



Fuente: Autoría.

3.2.3.2. Descripción general del funcionamiento del sistema

El presente trabajo puede describirse como un sistema destinado a detectar el tipo de pisada en niños con longitudes de pies entre 19 cm a 22 cm, mediante el uso de sensores de bajo costo, una interfaz de usuario y métodos de aprendizaje computarizado que ayuden al procesamiento de información y una posterior estimación de la pisada. Los datos procesados y los resultados obtenidos del índice de pisada deberán ser almacenados para posteriores análisis o revisión histórica en caso de ser necesario.

De lo anterior se puede decir que el proyecto está conformado por dos partes bien diferenciadas que son el hardware y el software. El primero es el punto de partida, ya que está conformado por aquellos elementos que proporcionan las señales eléctricas que en primera instancia representan los puntos de mayor presión en la huella plantar. En segunda instancia, el software constituye el entorno de procesamiento de las señales previamente tomadas y presentadas ante el usuario del sistema a través de una interfaz gráfica

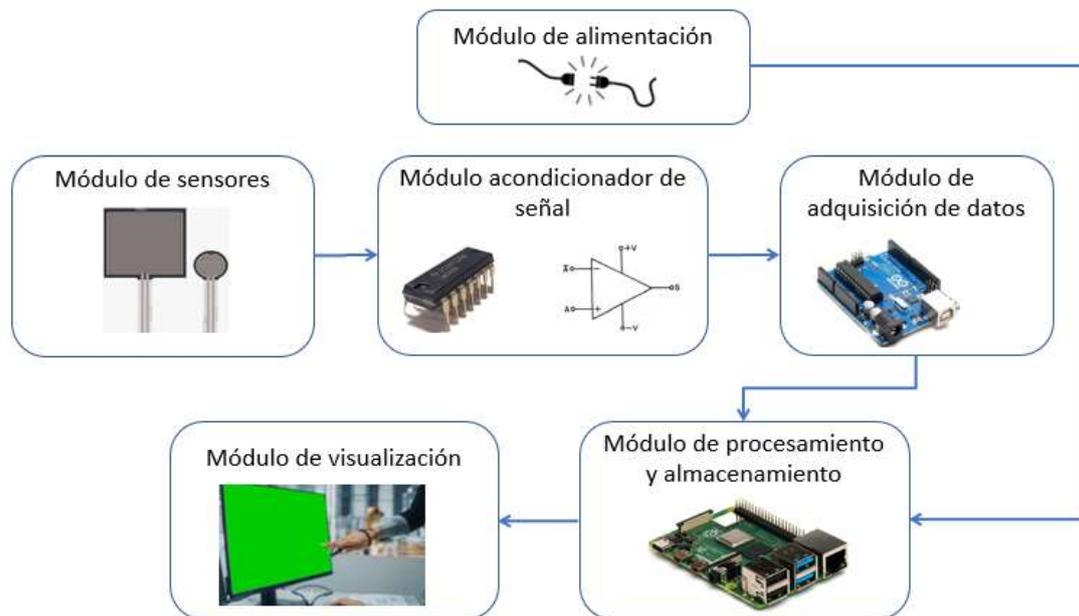
3.2.3.3. Diagramas del sistema

Es conveniente describir el funcionamiento del sistema propuesto mediante gráficas que permitan evidenciar los procesos que deben ejecutarse, es así que a continuación en la

Figura 35 se presenta un enfoque general del comportamiento del sistema que describe los bloques funcionales como una conexión lineal en cascada.

Figura 35

Diagrama en bloques del sistema



Fuente: Autoría.

En la Figura 36 se puede visualizar a detalle la representación del flujo de información, empezando desde el censado de la presión plantar hasta la visualización del mismo en una GUI de usuario.

Figura 36

Diagrama del funcionamiento lineal del sistema

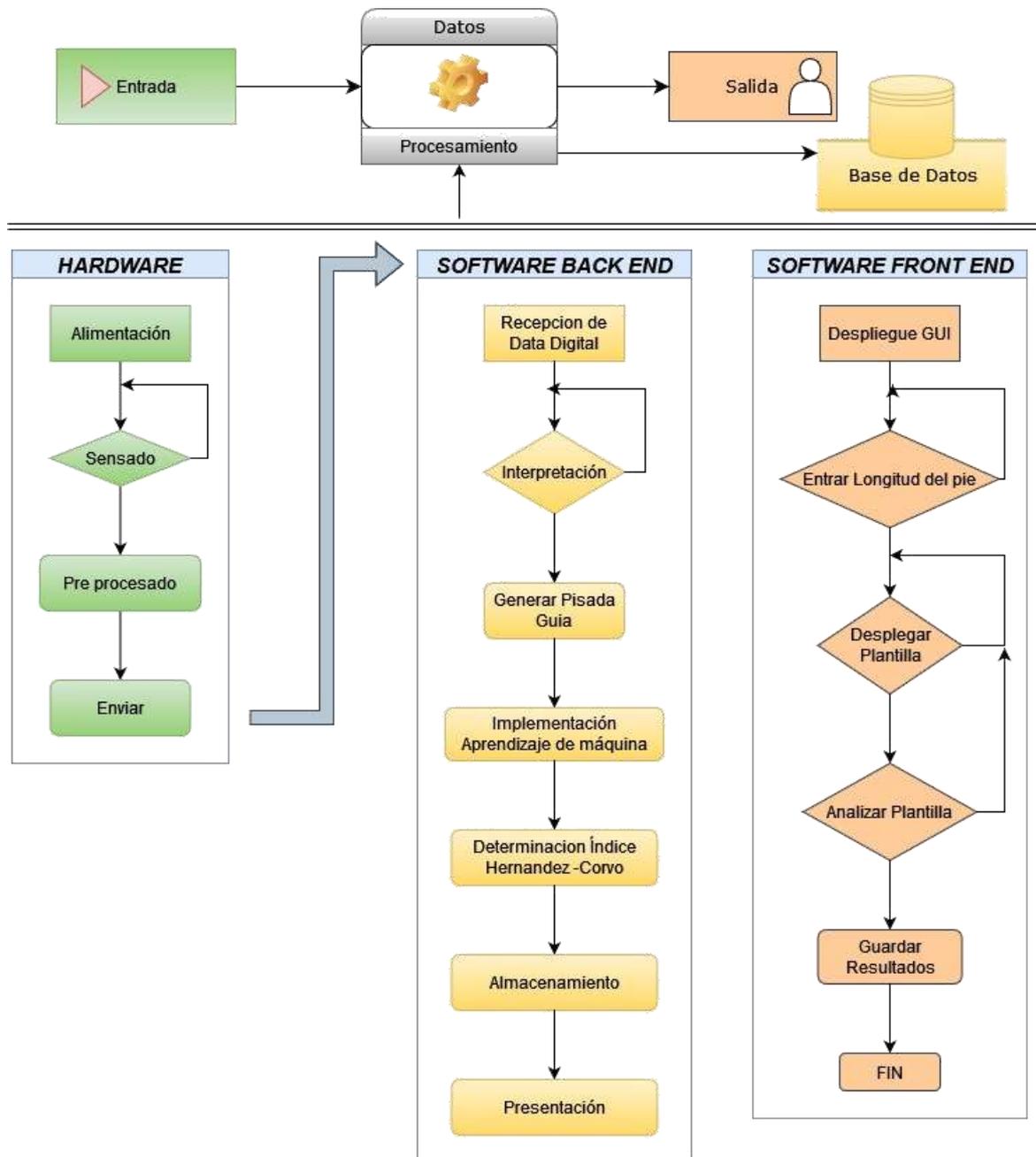


Fuente: Autoría.

Mediante un diagrama de flujo en la Figura 37 se puede observar la secuencia de los procesos que deberá realizar el sistema.

Figura 37

Diagrama de flujo de la información dentro del sistema



Fuente: Autoría.

En consistencia con la planificación previa, se plantea una ejecución del proyecto de acuerdo a las etapas mostradas en la Figura 38.

Figura 38

Diagrama de etapas operativas



Fuente: Autoría.

3.2.3.4. Integración de Hardware

En este apartado se presenta el desarrollo del esquema de conexión de los bloques que conforman el sistema de detección de huella plantar.

3.2.3.4.1. Esquema de conexión

Para desarrollar un sistema que permita cubrir los requerimientos mínimos de un dispositivo electrónico es necesario diferentes componentes de hardware que permitirán poner en marcha el funcionamiento de un dispositivo analizador de la huella plantar, tal como se describe en la Figura 39. Tomando en cuenta la dinámica de la corriente eléctrica será necesario un bloque de alimentación energética, un bloque de acondicionamiento de la señal, seguido por uno de adquisición de datos, posterior a ello en el bloque de procesamiento se deberá tratar y almacenar la información hasta tenerla lista para la aplicación de técnicas superiores de análisis y detección de huellas.

Figura 39

Esquema de conexión de los módulos del sistema



Fuente: Autoría.

3.2.3.4.3. Bloque de Sensores.

El módulo de sensores desempeña la tarea de recibir los datos de las presiones durante la pisada en forma estática. Según Veletanga (Veletanga, 2018) los datos estadísticos de las curvas de crecimiento adaptados a la población ecuatoriana indica que el peso promedio de niños y niñas para las edades estimadas entre los 7 a 12 años es de 30.5 kg, dato que será considerado para la elección de los sensores.

Para la elección del sensor, aparte de cumplir con los requerimientos, es necesario realizar una comparación de ciertas características necesarias para la implementación satisfactoria, tal como se puede visualizar en la Tabla 9, a continuación:

Tabla 9

Comparación de los sensores disponibles en el país

Sensor	FSR 400	FSR 402	FSR 406	FSR 408	LDTM-028K	FlexiForce A201
Flexible	Si cumple	Si cumple				

Rango mínimo de lectura de 0-10 Kg	No cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple
Forma	Circular	Circular	Cuadrada 38,8 mm x	Rectangular 609,22mm x	Rectangular 23,5 mm x	Circular
Zona activa	5,1mm	12,7 mm	38,8 mm	5,08 mm	10,2 mm	9,53 mm
Precio	\$11,85	\$14	\$19	\$85,90	\$45,00	\$40,00

Fuente: Autoría.

De acuerdo con la tabla comparativa de las características de sensores, se decide trabajar con los modelos 402 y posiblemente con el 406 de la familia de sensores FSR InterLink, ya que sus diseños permiten cubrir una mayor área. Su costo es menor comparado con otras marcas de sensores, además que es factible encontrarlos en el mercado ecuatoriano, pero más aun principalmente porque cumplen con los requisitos mencionados en la sección 3.1.1.

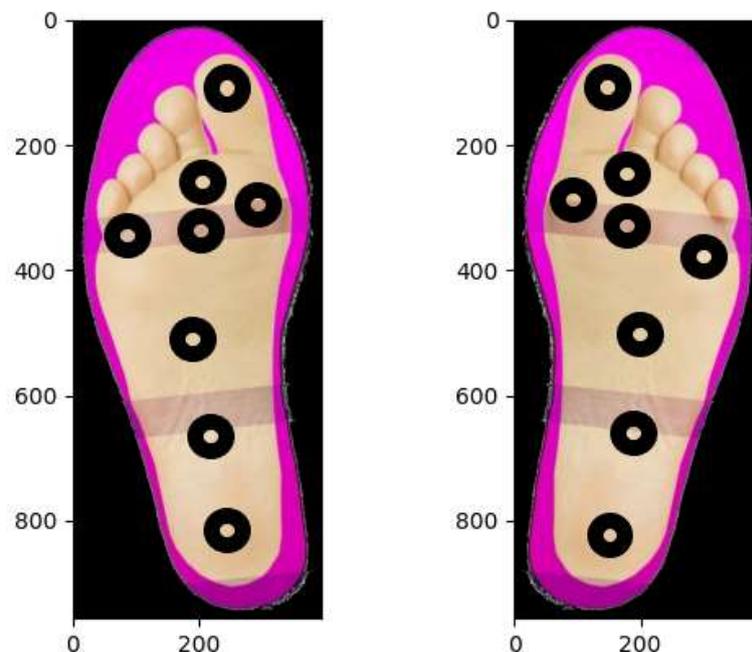
Basado en la información recopilada acerca de las patologías del pie en la sección 2.7, se identifica las zonas de mayor presión plantar ejercida de los distintos tipos de pisada, datos que nos servirán para poder analizar las zonas que deben ser cubiertas por los sensores. De acuerdo al análisis, cada tipo de pie genera un mapa de presión; en base a eso nos permite determinar una cantidad mínima de sensores FSR necesarios para determinar una pisada, la cual es de ocho. Ubicados estratégicamente como se muestra en la Figura 40 que además presenta la posición en el pie izquierdo como derecho.

Una de los requisitos para el desarrollar este dispositivo es presentar un costo de producción reducido frente a soluciones ya implementadas en el mercado, es por ello que se elige la mínima cantidad de sensores. Su ubicación está determinada esencialmente basándose en el análisis realizado anteriormente en la sección 2.7 tanto por los puntos de mayor presión plantar, como por una estrategia de lectura para obtener la huella plantar.

La estrategia de lectura de medición consiste en dos partes. La primera parte considera que casi todos los tipos de pie ejercen presión en los bordes externos del pie, por lo que no es estrictamente necesario colocar un sensor en dichas regiones del pie más, sin embargo, si la patología del niño es extrema, se podrá identificar por la ausencia de presión en el mediopié, además, de ser visible para el profesional que se encuentre a cargo del manejo del dispositivo. La segunda parte de la estrategia para la reducción de la cantidad de sensores y la ubicación correspondiente es considerar que la medida de la presión plantar en los sensores inferiores se pueden traducir a distancias en línea recta horizontalmente, es así que al obtener la lectura de máxima presión se considera que la impresión plantar cubre todo el sensor y al obtener una lectura mínima o ninguna, se considera que la presión plantar se encuentra por detrás del sensor correspondiente, a continuación en la Figura 40 se representa gráficamente la ubicación de los sensores.

Figura 40

Ubicación de sensores



Fuente: Autoría.

3.2.3.4.4. Bloque de Acondicionamiento de la señal.

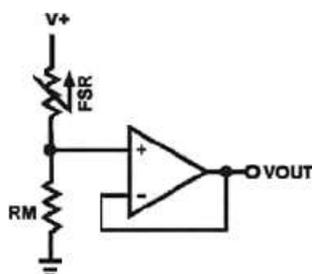
Las señales procedentes de los sensores tienen un nivel de ruido indeseado, lo que representa un problema en el tratamiento efectivo de las señales. Para disminuir errores y garantizar los valores adquiridos se utilizará un acondicionador de señales, ajustando la sensibilidad y calibrando la fuerza máxima de medición; en ese sentido, la marca de sensores InterLink Electronics recomienda la siguiente técnica de medición que puede ser usada en los sensores FSR para la correcta lectura de los valores eléctricos. Para transformar la fuerza en voltaje, el sensor FSR se conecta a una resistencia de medición en un circuito divisor de voltaje; la tensión de salida se calcula mediante la ecuación 3.

$$V_{OUT} = \frac{R_M V +}{(R_M + R_{FSR})} \quad \text{Ecuación 3}$$

Al aplicar la conexión de divisor de voltaje sugerida por la marca FSR de la Figura 41, la fuerza de presión sobre el sensor genera una variación de resistencia inversamente proporcional a la cantidad de corriente que lo puede atravesar, por lo que es posible su calibración de acuerdo al peso promedio de los niños que serán los potenciales usuarios.

Figura 41

Conexión divisor de voltaje



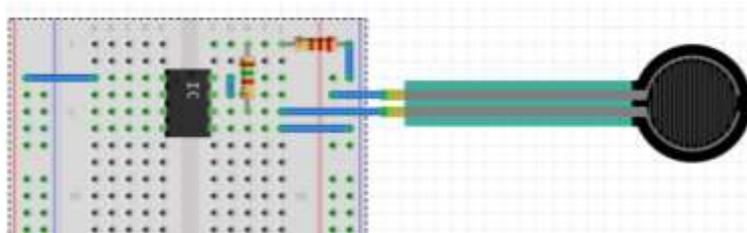
Fuente: (Electronics Interlink, 2013).

Mediante el uso de un potenciómetro lineal, se procede a determinar el valor resistivo necesario para representar la presión máxima que puede generar un niño de 12 años. Este

procedimiento permite calibrar y linealizar el comportamiento del sensor con una resistencia RM de 365 ohm, tal como puede verse en la simulación de la Figura 42. Ya que comercialmente no se encuentra una resistencia exacta del valor requerido, se procede a incorporar dos de ellas en serie para que la suma sea igual a 365 ohm.

Figura 42

Circuito de acoplamiento para sensor SFR único



Fuente: Autoría.

Como se puede observar en el circuito acondicionador de señal consta de un amplificador operacional y una resistencia; este circuito se debe repetir para cada uno de los sensores involucrados, generando un desborde de componentes electrónicos, es por ello que se debe optar por utilizar un circuito integrado LM324 para que se puedan agrupar cuatro amplificadores operacionales, además es el recomendado por la marca fabricante de los sensores.

3.2.3.4.5. Bloque de Adquisición de Datos

Este módulo tiene como característica principal la lectura de los datos analógicos provenientes de los sensores y transformarlos en datos digitales que puedan ser leídos y posteriormente procesados. Para este cometido es necesario realizar una comparación de características técnicas y prestaciones de diferentes fabricantes de placas de desarrollo basados en microcontroladores.

Tabla 10

Comparación entre plataformas de desarrollo

Características principales	Plataforma Arduino			Plataforma Freedom		
	Arduino UNO	Arduino MEGA		Freedom KL25Z		Freedom K64F
Precio	\$9	\$25		\$25		\$50
Microcontrolador núcleo velocidad	ATMEGA328P AVR	ATMEGA2560 AVR		KL25Z Cortex-M0 32bit-48MHz		ARM K63F Cortex-4F 32bit-120MHz
Flash/RAM	8bit-16MHz 32 K /2 K	8bit-16MHz 256 K /8 K		128K/16K		1M/256K
Pines totales ADC	32	6 86		16 64		6 64
E/S digital	14	54		48		40
Ampliaciones	Shields	Shields		Shields		Shields
Extras	1 Led	1 Led		Acelerómetro Led tricolor Slider capacitivo		Acelerómetro magnetómetro Led tricolor Slider capacitivo Ethernet

Adaptado de: (Perales, Barrero, & Toral, 2016).

Del cuadro comparativo se puede determinar que en varias circunstancias se comparten ciertas capacidades entre diferentes familias de dispositivos embebidos. Cabe destacar que los precios referenciales corresponden a fabricantes certificados, sin embargo, en la actualidad se han ido incrementando la cantidad de empresas desarrolladoras de este tipo de placas, sobre todo en la familia Arduino, por lo que se pueden adquirir placas de desarrollo en costos muy bajos a partir de los 6 USD, siendo el candidato idóneo para ser elegido para el desarrollo de este proyecto.

Dentro de la familia Arduino también se pueden encontrar distintas placas de desarrollo de acuerdo al tipo de microcontrolador utilizado en su interior, por lo que se hace necesario realizar también una comparativa de estos dispositivos, tal como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 11

Comparación entre placas de desarrollo Arduino

	Arduino UNO	Arduino MEGA	Arduino MICRO
Características principales			
Precio	\$9	\$25	\$17,50
Dimensión	53.4mm x 68.6mm	53.3mm x 101.5mm	18mm x 33mm
Procesador	ATMEGA328P	ATMEGA2560	ATMEGA32U4
Cloock Speed	16MHz	16MHz	16MHz
Flash/RAM	32K	256K	32K
EPROM	1KB	4KB	1KB
SRAM	2KB	8KB	2.5KB
Pines Análogos	6	16	12
E/S digital	14	54	20
USB	Standard A/B USB	Standard A/B USB	Micro USB

Adaptado de: (Gudiño, 2017).

En el mercado existe una variedad muy grande de dispositivos que realizan este trabajo, pero es necesario elegir aquel que presente costo mínimo, de fácil adquisición, facilidad de uso e implementación y prestaciones suficientes y necesarias para los requerimientos planteados anteriormente. Por lo que el candidato perfecto es la placa Arduino UNO, ya que cumple con lo establecido en cuanto a costo y funcionalidad. Sin embargo, esta placa no tiene las suficientes entradas análogas, por lo que es necesario incrementar un multiplexor-demultiplexor CD74HC4067 que tiene un costo de \$3, el cual se encargará de transmitir los datos de los sensores al Arduino UNO.

Las señales antes acondicionadas serán conmutadas digitalmente mediante el multiplexor-demultiplexor analógico de la Figura 43, quien se encargará de obtener de forma

ordenada las señales emitidas por los sensores; para luego ser llevadas una por una al puerto analógico del módulo de adquisición de datos.

Figura 43

Multiplexor-demultiplexor analógico CD74HC4067

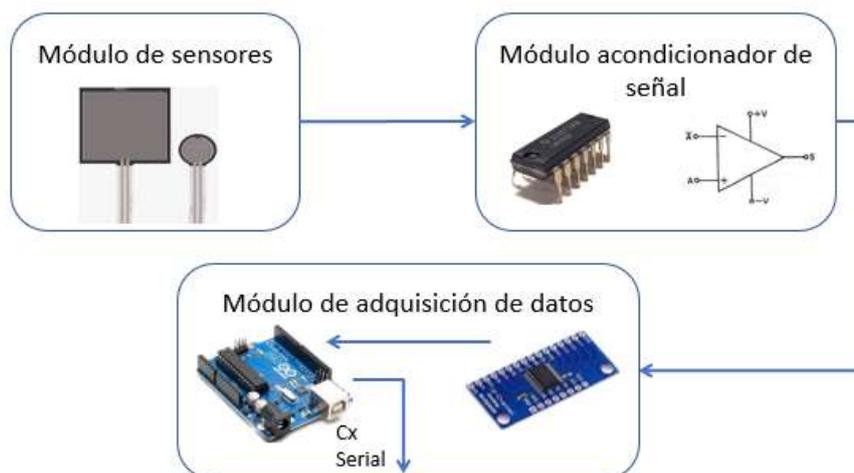


Fuente: (Ferretrónica, 2022).

La placa de adquisición de datos y digitalización se encarga de recibir las señales analógicas y digitalizarlas ordenadamente para luego incorporar una tercera función, que es la comunicación de los datos digitales al módulo de procesamiento, en este sentido se utiliza el puerto serial para comunicarse vía cable con el módulo de procesamiento. En la Figura 44 se representa gráficamente el proceso hasta este punto.

Figura 44

Diagrama de bloques del módulo de adquisición de datos



Fuente: Autoría.

3.2.3.4.6. Bloque de comunicación

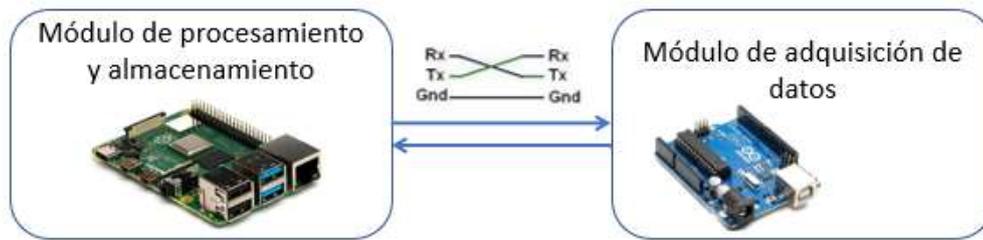
Esencialmente, la necesidad de comunicaciones se presenta entre el bloque de adquisición de datos y el bloque de procesamiento, Arduino y Raspberry Pi correspondientemente. Ambas placas de desarrollo presentan diferentes vías de comunicación con dispositivos externos, tales como puertos digitales y analógicos de propósito general, UART serial, I2C y SPI. A diferencia de Arduino, Raspberry Pi también presenta comunicación HDMI, Jack de audio y Ethernet.

El presente proyecto implementa una comunicación USB en los dos dispositivos mediante una rapidez de baudio de 9600, aunque a nivel de software es posible incrementarlo. Para su elección es necesario tomar en cuenta que esta característica es una medida indirecta de la cantidad de bits por segundo, proporcionando una mayor cantidad de bit de transmisión/recepción cuando se incrementa esta rapidez, aunque con un incremento de probabilidad de error debido a la sincronización entre los relojes del transmisor y receptor. De aquí se desprende que para una comunicación exitosa se debe configurar una misma tasa de baudios en ambos dispositivos.

Para la placa Arduino, el uso de una comunicación USB también le permite tener una vía de alimentación energética, ya que Raspberry Pi puede suministrar la suficiente corriente como para cubrir las demandas de la placa Arduino y sus elementos electrónicos, como se muestra en el diagrama de conexión representado en la Figura 45.

Figura 45

Diagrama de comunicación



Fuente: Autoría.

3.2.3.4.7. Bloque de Procesamiento

En el mundo de la electrónica de microprocesadores existe una gran variedad de dispositivos que pueden cumplir con el cometido de tomar la información y procesarla hasta obtener el resultado requerido. Las posibilidades de microprocesadores se pueden enlistar desde los más potentes hasta los más comunes como:

- Computación en la nube
- Computación virtualizada
- Computación de escritorio
- Computación personal
- Computación embebida

Sin embargo, al tomar en cuenta los requisitos planteados para el presente proyecto y que pueda ser utilizado de forma sencilla, rápida y con suficientes potencialidades en el momento de cumplir con el principal objetivo del dispositivo que es determinar el tipo de pisada. Y por ello el dispositivo debe ser capaz de proceder con su funcionamiento en un ambiente sin conexión a internet, de bajos recursos de inversión y sobre todo que tenga la capacidad de ejecutar algoritmos de aprendizaje de máquina.

Desde este punto de vista es posible descartar el uso de la computación en la nube y la computación virtualizada basada en servidores externos, de la misma manera basándose en la necesidad de proporcionar costos bajos al producto se puede descartar el uso de cómputo de escritorio o personal por lo que la mejor elección para la implementación del presente proyecto son los dispositivos embebidos con suficientes capacidades de procesamiento de señales y gráficos.

El procesamiento de las señales eléctricas provenientes de los sensores puede ser fácilmente analizados mediante el mismo módulo de adquisición, sin embargo, en el planteamiento del plan de tesis consta que el procesamiento de datos implica usar un algoritmo con técnicas de aprendizaje de máquina y posteriormente presentar una interfaz gráfica al usuario con los resultados de los análisis. Estas últimas características requieren de un esfuerzo computacional que sobrepasa los recursos proporcionados por una placa Arduino, por lo que es necesario utilizar un dispositivo que posea un microprocesador que pueda manejar grandes cantidades de datos, imágenes y aprendizaje de máquina. Con esta perspectiva la elección del dispositivo idóneo toma en cuenta costos mínimos, facilidad de uso e implementación y prestaciones suficientes y necesarias a las requeridas para el proyecto, el candidato perfecto es la placa de desarrollo de la Figura 46, una Raspberry Pi4.

Figura 46

Placa embebida Raspberry Pi



Fuente: (Arrow Electronics, 2018).

Este módulo estará encargado de recibir por medio de comunicación serial los datos digitalizados y ordenados por parte del módulo de adquisición de datos, dicha información consta del valor y posición de cada sensor. Luego se encargará de procesar esta información formando una huella plantar; en donde se ejecutará el algoritmo de aprendizaje de máquina y posteriormente se aplicará el proceso de tipificación de pie según el método de Hernández Corvo, para posteriormente visualizar el resultado y almacenarlo.

3.2.3.4.8. Bloque de Alimentación

Si bien es el primer elemento que aparece en el diseño, es el último que debe desarrollarse debido a que es necesario tomar en cuenta los voltajes y corrientes que demandara el circuito funcional. En la actualidad existe una gran variedad de opciones a la hora de elegir un dispositivo de alimentación, el cual dependerá de las características de consumos de energía de los elementos utilizados para este sistema. En la siguiente tabla se muestra el detalle de los valores de tensión y de intensidad de corriente de cada elemento para al final obtener el consumo total del sistema.

Tabla 12

Consumo energético del hardware del sistema

Elemento	Tensión de trabajo (V)	Corriente (A)	Cantidad de elementos	Corriente Total
Raspberry Pi 4	5V	> 1.5 A, < 3A (500mA x USB)	1	1.5 A
Arduino Uno	5V	65 mA (40mA por pin)	1	65 mA
Multiplexor - Demultiplexor	3.3V – 6V	0.4 mA	1	0.4 mA
LM324 N	3V – 32V	0.18mA – 20mA	4	0.72 mA
FSR	3.3V – 5V	0.01 mA	16	0.16 mA

Fuente: (León, 2021), Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3.

El multiplexor, los LM324N y los sensores FSR conforman una sola placa de circuito integrado, por lo que al sumar sus consumos se puede determinar que dicha placa necesita una alimentación de 5 V y 1.28 mA como mínimo. Tomando en cuenta que la placa de circuito integrado y la placa de desarrollo Arduino consumen en total 66.28 mA se puede conectarlos a cualquier puerto USB de la placa Raspberry Pi 4 que puede proporcionar hasta 500 mA cuando se alimenta con 3 A. Al sumar el consumo interno mínimo de la placa Raspberry genera un total de 1.566 Amperes, pero hay que tomar en cuenta que el consumo de la placa embebida puede variar según su procesamiento a realizar. Con esta perspectiva, la demanda energética de hardware puede solventarse con la fuente de alimentación original del Raspberry de 5 V a 3 A. En la Figura 47 se representa una fuente de alimentación.

Figura 47

Dispositivo de alimentación



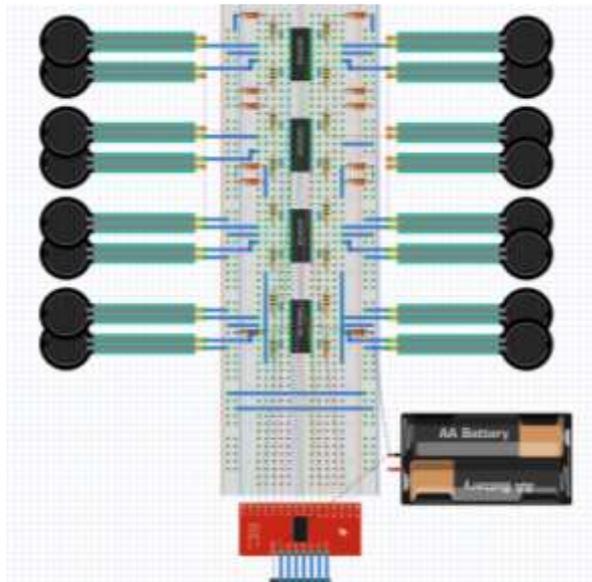
Fuente: (DAMYSUS NET S.L, 2022)

3.2.3.3.9. Diseño de la placa PCB

A continuación, los sensores se agrupan de cuatro para incorporarlos a un solo circuito integrado LM324 como en la Figura 48 y finalmente se destinan a las salidas al multiplexor-demultiplexor analógico CD74HC4067.

Figura 48

Simulación en protoboard del hardware diseñado

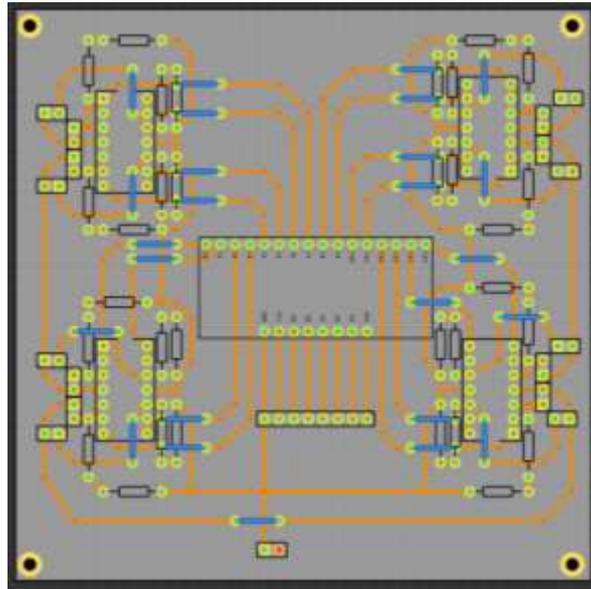


Fuente: Autoría.

Mediante el uso del software de simulación Fritzing Beta se obtiene la placa de circuito impreso PCB que se muestra en la anterior imagen. Dentro del conjunto de los softwares libres, Fritzing es uno de los más completos al presentar librerías de elementos electrónicos tan extensas como software con licencia, es decir incorpora incluso elementos de la familia Arduino, Microsoft, Samsung y muchos más. Otra gran ventaja es que presenta la posibilidad de generar librerías propias en caso de no poseerlas. A continuación, en la Figura 49 se presenta el diseño de la placa electrónica diseñada en PCB.

Figura 49

PCB del Hardware a implementarse



Fuente: Autoría.

La impresión en físico de la placa PCB se lo realiza de forma manual o artesanal, y consiguientemente se procede al montaje de los elementos electrónicos diseñados y determinados previamente para obtener la placa mostrada en la Figura 50.

Figura 50

PCB con elementos electrónicos montados



Fuente: Autoría.

3.2.4. Codificación de software: Primera Iteración

El desarrollo de un software implica dos aspectos importantes de manera general denominados back end y front end. El primero se refiere a todo el proceso informático que se debe realizar para que el sistema tome forma en un producto funcional, muchas de estas características son transparentes al usuario; mientras que el segundo se refiere a todo aquello que se presenta a primera vista a los ojos del usuario del sistema, es decir la interfaz gráfica.

3.2.4.1. Back End

En esta etapa se desarrollará la programación para la adquisición de datos en el entorno IDE de Arduino, y para la programación que permitirá el procesamiento de la información y la generación de una interfaz gráfica de usuario se utilizará Python como lenguaje de programación dentro del entorno Thonny; ya que es un software compatible con la placa de procesamiento Raspberry pi4, también posee la capacidad de procesar imágenes, videos y texto; por otro lado, también se encuentra a la vanguardia en la implementación de algoritmos de inteligencia artificial gracias a su gran cantidad de librería.

3.2.4.1.1. Lectura de datos analógicos

Para poder obtener la información de los sensores FSR es necesario el siguiente proceso que se debe realizar para la toma de datos:

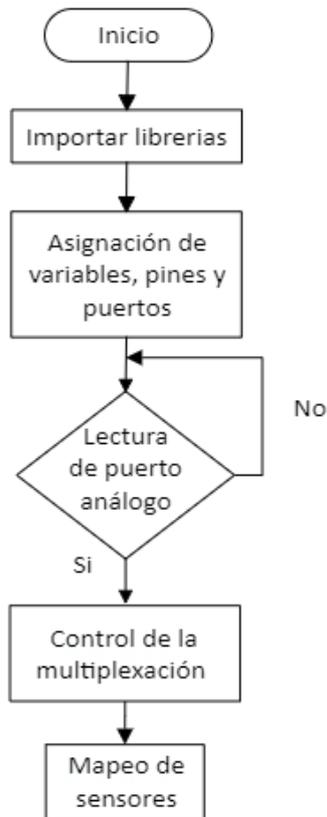
- Control de la multiplexación de los datos de los sensores.
- Lectura ordenada y constante de los datos de los sensores.
- Establecimiento de un canal de transmisión y recepción de datos entre el módulo de adquisición y el módulo de procesamiento.

El módulo multiplexor-demultiplexor analógico CD74HC4067 consiste en 16 puertos de entrada y una de salida controlada por un conjunto de cuatro pines digitales. Dichos pines de selección de puerto se conectan a cuatro pines digitales en la placa Arduino Uno, mientras

que la salida multiplexada se conecta a una entrada analógica para la lectura correspondiente de los sensores. En la Figura 51 se representa el proceso mediante un diagrama.

Figura 51

Diagrama de flujo de lectura de datos



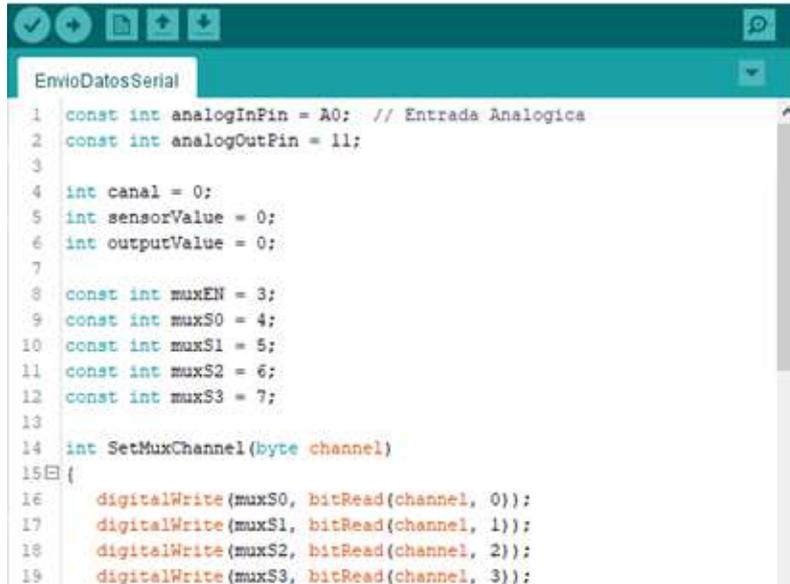
Fuente: Autoría.

La programación de la placa Arduino puede verse en la Figura 52, la cual consiste en declaración de variables, asignación de pines y de la lectura de las entradas analógicas provenientes de cada uno de los sensores ordenados de forma ascendente. Cada lectura realizada debe mapearse en una escala de 0 a 255 para luego ser enviada al módulo de procesamiento. A través de una comunicación serial, la placa Arduino envía los datos mapeados acompañados del número de puerto al que corresponde.

El control del multiplexor se facilita si se genera un puerto virtual de comunicación con la placa Arduino, permitiendo direccionar rápidamente el puerto analógico necesario mediante numeración decimal, como puede verse en la siguiente imagen.

Figura 52

Canal de control del multiplexor – demultiplexor



```
EnvioDatosSerial
1  const int analogInPin = A0; // Entrada Analogica
2  const int analogOutPin = 11;
3
4  int canal = 0;
5  int sensorValue = 0;
6  int outputValue = 0;
7
8  const int muxEN = 3;
9  const int muxS0 = 4;
10 const int muxS1 = 5;
11 const int muxS2 = 6;
12 const int muxS3 = 7;
13
14 int SetMuxChannel(byte channel)
15 {
16     digitalWrite(muxS0, bitRead(channel, 0));
17     digitalWrite(muxS1, bitRead(channel, 1));
18     digitalWrite(muxS2, bitRead(channel, 2));
19     digitalWrite(muxS3, bitRead(channel, 3));
```

Fuente: Autoría.

Con el control generado se debe proceder a la lectura de dichos canales para obtener la lectura de los sensores a través de un bucle infinito que se reinicia cada vez que llega a su valor máximo o último canal. La programación se puede ver en la Figura 53, también se manifiesta la inicialización de la comunicación serial con el módulo de procesamiento a una rapidez de baudios igual a 9600.

Figura 53

Comunicación serial de Arduino para envío de datos recolectados



```
21
22 void setup() {
23   Serial.begin(9600); // initialize serial communications at 9
24   pinMode(3, OUTPUT);
25   pinMode(4, OUTPUT);
26   pinMode(5, OUTPUT);
27   pinMode(6, OUTPUT);
28   pinMode(7, OUTPUT);
29 }
30 void loop() {
31   digitalWrite(muxEN, LOW); //habilitamos el multiplexor
32   SetMuxChannel(canal); //habilitamos el canal pra la
33
34   sensorValue = analogRead(analogInPin); //Se lee el v
35   outputValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 255); //Se mapean l
36   analogWrite(analogOutPin, outputValue); // Se envia e
37   Serial.print(canal); Serial.print(",");
38   Serial.println(outputValue);
39
40   canal++;
41   if(canal>=16){
42     canal=0;
43   }
44 }
```

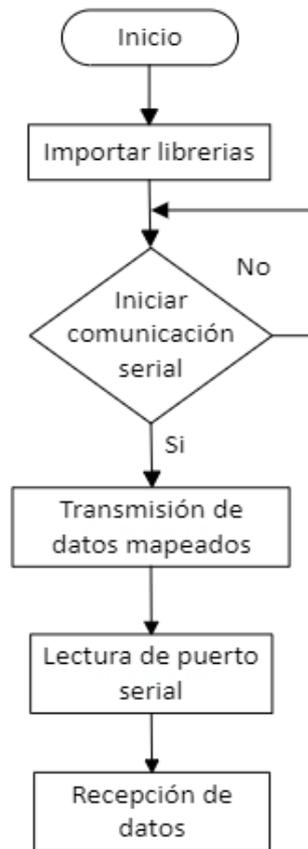
Fuente: Autoría.

3.2.4.1.2. Comunicación de datos

Del otro extremo, la placa procesadora Raspberry Pi 4 debe soportar la comunicación serial y tomar la información proveniente de Arduino como puede verse a continuación en la Figura 54 el proceso mediante.

Figura 54

Diagrama de flujo de comunicación de datos



Fuente: Autoría.

Para una comunicación exitosa entre el bloque de adquisición de datos y el bloque de procesamiento se debe configurar en la placa Raspberry Pi 4 la misma rapidez de baudios con la que Arduino transmite sus datos. En la placa de desarrollo se debe incorporar una librería necesaria para la comunicación serial que permitirá, crear un enlace con Arduino, como puede verse en el diagrama de flujo; la secuencia de datos consta de la lectura del sensor y el número de puerto (identificador de sensor) por lo que se debe separar estos dos elementos, a continuación, en la Figura 55 se puede observar la programación para la comunicación serial.

Figura 55

Programación para iniciar comunicación serial

```
1 import serial
2 ser = serial.Serial('/dev/ttyACM0',19200,timeout=1)
3 while 1:
4     val = ser.readline().decode('utf-8')
5     parsed = val.split(',')
6     parsed = [x.rstrip() for x in parsed]
7     if(len(parsed) > 1):
8         #print(parsed)
9         #a = int(int(parsed[0]+'0')/10)
10        b = int(int(parsed[1]+'0')/10)
11        #c = int(int(parsed[2]+'0')/10)
12        #print(a)
13        print(b)
14
```

Fuente: Autoría.

La secuencia de ejecución lineal del código consiste en:

1. Importar la librería denominada serial
2. Conformar un objeto, con la librería previamente cargada, con las características correspondientes a la comunicación con Arduino.
3. Leer el puerto serial a través del objeto
4. Se identifican y se eliminan los separadores de lectura e identificador de sensor
5. Verificar si el dato leído ha cambiado
6. Obtener el dato

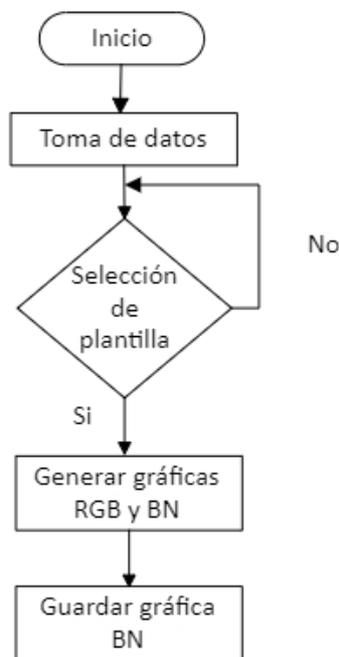
3.2.4.1.3. Preprocesamiento de la información

El procesamiento de la información obtenida de los sensores pasa por imprimirse sobre una plantilla de pie previamente establecida con la finalidad de posicionar las lecturas en los mismos puntos que se encuentran en el dispositivo físico. A continuación, se procede a superponer gráficamente nuevos puntos de referencia en los lugares de la huella donde se conoce que siempre habrá impresión, información obtenida del apartado 2.7 con el análisis de

los tipos de pisada; esto ayudará a generar la huella plantar. Este proceso puede visualizarse en la Figura 56 mediante un diagrama de flujo.

Figura 56

Diagrama de flujo Preprocesamiento



Fuente: Autoría.

Se generan dos gráficas del proceso anterior, una de ellas en color para ser utilizada como parte del front end y otra en escala de grises para poder procesarla de forma eficiente, en la mínima cantidad de tiempo posible. El procesamiento de imágenes demanda una gran cantidad de recursos de cómputo, ya que se deben procesar individualmente cada uno de los píxeles que lo componen, por ello es conveniente usar una imagen en escala de grises, porque posee un solo canal de información a diferencia de una imagen a color con tres o más canales RGB y en algunos formatos, el canal de brillo y luminosidad.

Convenientemente, a las longitudes de pie que serán valoradas en el dispositivo se deben generar dos tipos de plantillas, una para longitudes de pie de 19 a 20,5 cm y otra de 20,5 a 22 cm, ya que por su disposición cada una de estas plantillas tendrán ciertos sensores actuando

sobre ellos. En la plantilla más pequeña se tiene 6 sensores y en la más grande actuarán 8 sensores para generar la huella plantar; el mismo principio se cumple para los puntos de referencia donde siempre existirá impresión plantar, como es el caso de la zona del retropié.

En el lenguaje de programación Python, es necesario incorporar ciertas librerías que permitan leer, escribir y modificar fotografías; dichas librerías pueden ser importadas con un seudónimo como si de un objeto se tratasen, permitiendo acortar el nombre y separar sus atributos o funciones. En la Figura 57 consta la importación de las librerías Open CV como cv2, Numpy como np, Matplotlib como plt, y Math como Math.

Figura 57

Importación de librerías Python

```
1 import cv2
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import math
```

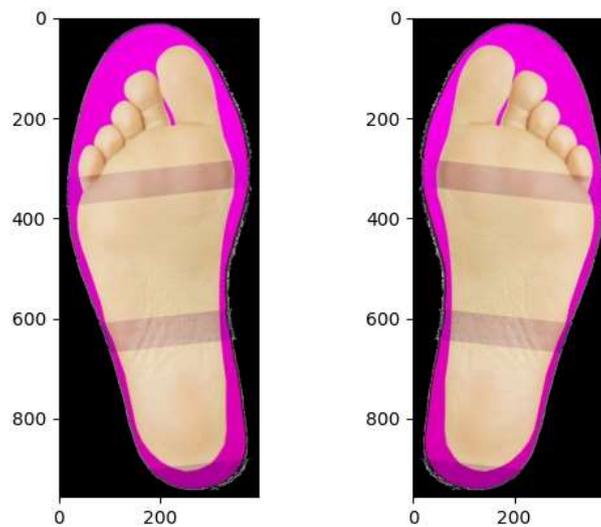
Fuente: Autoría.

A continuación, se debe realizar el siguiente procedimiento para obtener las imágenes necesarias tanto para back end como para front end:

1. Lectura de fotografía base, figura 58.

Figura 58

Plantilla base de pie



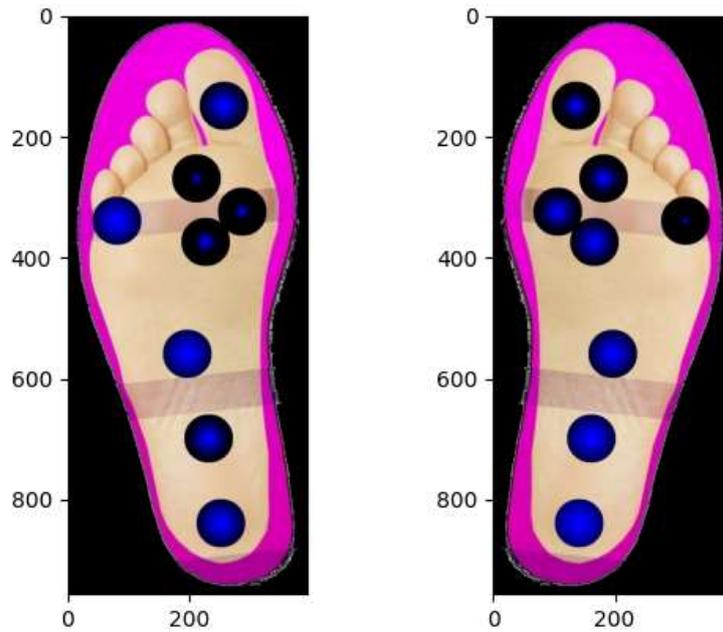
Fuente: Autoría.

2. Seleccionar de longitud de plantilla.
3. Incorporar lectura de sensores y referencias.

En la figura 59 se puede observar la incorporación de la lectura de los sensores; esta imagen será utilizada para el Front End, ya que es una representación fiel a la posición de los sensores en el dispositivo electrónico y dentro de las circunferencias de color negro se encuentran otras circunferencias de color azul del tamaño correspondiente a la presión ejercida sobre los sensores.

Figura 59

Plantilla para Front End



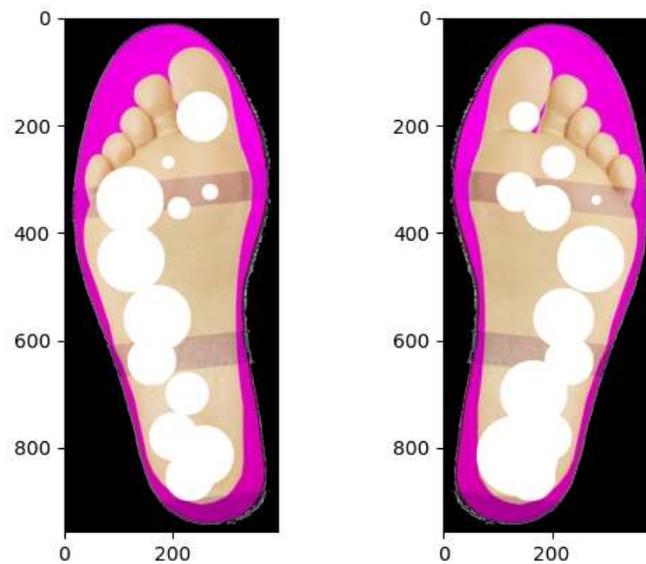
Fuente: Autoría.

4. Guardar nuevas fotografías a color y escala de grises.

En la Figura 60 se observa la misma gráfica anterior con la diferencia de que se incorporan las circunferencias de referencia que permitirán el análisis de la huella plantar en el siguiente paso. El comportamiento de los círculos de esta imagen también representa la presión ejercida sobre los sensores a diferencia de las circunferencias de referencia que tienen un tamaño conveniente para el análisis posterior.

Figura 60

Plantilla para Back End



Fuente: Autoría.

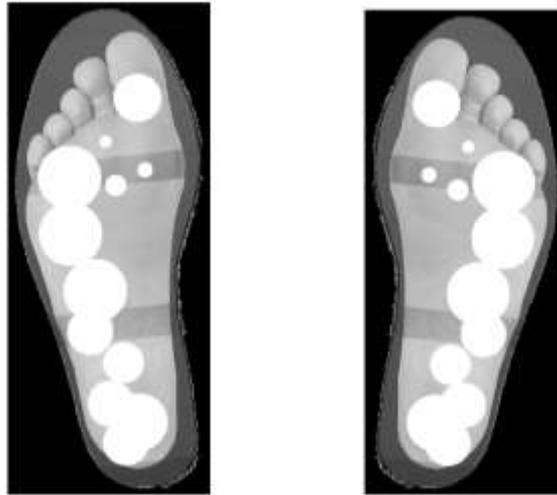
El código correspondiente al procedimiento antes descrito se encuentra en la sección de Anexos.

3.2.4.1.4. Criterios para la selección del método de Aprendizaje de maquina

Después de obtener la imagen con el degradado negro de la Figura 61, se puede diferenciar fácilmente las zonas en las que se encuentran las impresiones de los sensores, las zonas de las plantillas y las zonas sin información relevante. En este escenario es posible aplicar el algoritmo de inteligencia artificial que permita definir la huella plantar final.

Figura 61

Escala de grises de plantilla con lectura de sensores



Fuente: Autoría.

En las figuras anteriores se puede visualizar que la imagen es muy irregular, por lo que se necesita encontrar un mecanismo que permita transformarla en una imagen que represente una huella. En la actualidad se pueden encontrar una gran cantidad de algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje de máquina desarrollados para diferentes actividades. Para diferenciar y poder disminuir el conjunto de posibilidades, se debe tomar en cuenta que el algoritmo que se necesita debe orientarse al procesamiento de imágenes, este debe ser capaz de ejecutarse en un sistema embebido y sin la necesidad de una conexión a internet.

La perspectiva inicial para la aplicación de un algoritmo de aprendizaje consiste en el desarrollo de una red neuronal a partir de una unidad, posterior a ello entrenarla y aplicarla. En este escenario es necesario implementar una neurona artificial por cada uno de los píxeles de la fotografía, que para la imagen obtenida previamente de aproximadamente 910x410 da un total de 373.100 puntos. Con esta cantidad de neuronas artificiales la capacidad de procesamiento se eleva por sobre la capacidad del dispositivo embebido.

Dado el resultado previo, se debe optar por otra alternativa más eficiente para el desarrollo de esta tarea. A pesar de su simplicidad, los vecinos más cercanos han tenido éxito en una gran cantidad de problemas de clasificación y regresión, incluidos dígitos escritos a mano y escenas de imágenes satelitales. Al ser un método no paramétrico, suele tener éxito en situaciones de clasificación en las que el límite de decisión es muy irregular (Pedregosa et al., 2011).

Ya que el presente proyecto consiste en detectar los límites de las impresiones previas de los sensores dentro de la imagen base, se utilizará el algoritmo de Clasificación de acuerdo a la densidad de Vecinos más Cercanos de la librería SKLearn.

3.2.4.1.5. Aplicación de Aprendizaje de Maquina

Se importa las librerías indicadas en la sección anterior de acuerdo a la Figura 62 donde puede verse la llamada y la creación del objeto correspondiente para que al ser llamada pueda parametrizarse de acuerdo a las necesidades del proyecto.

Figura 62

Librerías para aprendizaje supervisado

```
2 import sklearn as sk
3 from sklearn.neighbors import RadiusNeighborsClassifier
```

Fuente: Autoría.

El procedimiento consiste en una primera etapa de entrenamiento del algoritmo ML y una segunda etapa de predicción. En primer lugar, se toma la figura 61 en escala de grises y se procesa la totalidad de la imagen realizando un mapa vectorial de cada pixel, es decir, es necesario conocer la ubicación por fila y columna de cada uno de los píxeles y determinar si corresponde a un pixel en blanco, negro o cualquier valor dentro de la escala de grises para utilizarlo como una etiqueta en la etapa de entrenamiento y aprendizaje del algoritmo de ML.

Los píxeles blancos son aquellos que corresponden a la ubicación de la lectura de los sensores sobre la plantilla y los puntos negros son aquellos que no corresponden a huella plantar, constituyendo de cierta manera una forma de delimitar el campo de acción del algoritmo de ML. Los puntos grises constituyen un área de transformación o decisión del algoritmo ML.

Al proporcionarle la ubicación y el etiquetado de cada uno de los píxeles al algoritmo de ML; este es entrenado para que pueda crear un mapa de decisión cuando se le proporcione los puntos grises. Un pixel gris es vulnerable a definirse como blanco o negro en consecuencia del algoritmo de K-vecinos más cercanos, es decir, predice el color del pixel basándose en la votación mayoritaria de los píxeles vecinos. Como resultado se obtiene la conformación de una huella plantar en cada una de las mediciones que se realicen. La principal ventaja de este algoritmo es que no necesita aprender la forma de una huella en específico, sino que debe predecirla en base a cada lectura realizada con los sensores sin importar el tamaño del pie que lo genere.

Con la aplicación de este algoritmo de Machine Learning se llega a obtener una impresión de la huella plantar, mostrada en la Figura 63; en donde es posible aplicar el método Hernández Corvo y mediante el resultado determinar el índice de huella.

Figura 63

Huella plantar final



Fuente: Autoría.

3.2.4.1.6. Obtención del índice Hernández-Corvo

El índice Hernández-Corvo es calculado de acuerdo al procedimiento descrito en el Marco Teórico de este documento. Al tratarse de un índice expresado en porcentaje no es necesario tener a disposición las medidas exactas de las longitudes del pie, sino más bien es importante que la generación de la huella sea un reflejo fiel de su forma real. El análisis del índice Hernández-Corvo, al igual que la aplicación del algoritmo de aprendizaje de máquina, es un proceso que se deriva de la obtención de las coordenadas de cada uno de los píxeles con su respectivo color. La representación del color en el rango de la escala de grises pasa desde 0 para el color negro hasta 255 para el color blanco, por lo que previamente se debe generar en memoria temporal un mapa de dichos elementos.

Del proceso de aplicación del algoritmo de ML se cuenta con el mapa vectorial de los píxeles blancos que serán utilizados para este procedimiento. Este mapa es un nuevo vector fila que se genera con un proceso de barrido de la imagen generada previamente en orden de

izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, tal como lo presenta el algoritmo de análisis del lenguaje Python, al final se obtiene un mapa vectorial conteniendo los valores de fila y columna de cada pixel blanco. Por facilidad de uso en ocasiones se transforma en un vector columna.

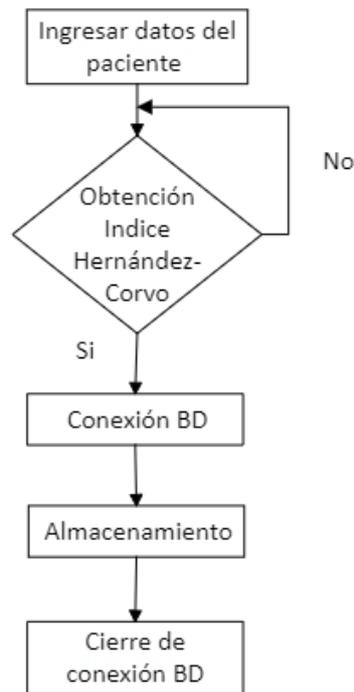
En el procedimiento del método Hernández-Corvo toma relevancia los puntos más sobresalientes de cada coordenada, es decir, el punto más al norte, el punto más este y el punto más al oeste de la huella plantar serán quienes definen el índice. El punto más al norte denominado (2) corresponde al primer elemento del mapa vectorial debido al orden del barrido. El punto más al este denominado (1) corresponde con el pixel que tiene la mayor posición columna de todos los píxeles y el punto más al oeste denominado (6) corresponde al pixel que tiene la menor posición columna de todos los píxeles. Para determinar el punto (9) se divide la imagen en dos partes orientadas por el punto (6) y se procede nuevamente a determinar los puntos más extremos. Al tener las posiciones fila-columna de estos cuatro puntos más extremos, simplemente se procede a realizar operaciones aritméticas para hallar las longitudes que distan unas de otras. Estas distancias son utilizadas en la ecuación Hernández Corvo para la determinación del índice correspondiente.

3.2.4.1.7. Almacenamiento en la Base de Datos

Cada una de las evaluaciones que se puedan realizar en el dispositivo deben ser almacenadas con el objetivo de tener al alcance dicha información para ser consultada en cualquier momento para mantener seguimiento del paciente o usar la información para datos estadísticos, sus procesos se pueden observar en el diagrama de la Figura 64. Ya que el sistema desarrollado tiene carácter de procesamiento local, la base de datos tiene que tener unos requerimientos compatibles con las cualidades del dispositivo Raspberry Pi 4 usado como placa de procesamiento y almacenamiento, es decir, tiene que proporcionar la capacidad suficiente a los requerimientos del proyecto, pero además debe poder ejecutarse dentro de dicha placa embebida.

Figura 64

Diagrama de almacenamiento en la Base de Datos



Fuente: Autoría.

El conjunto de datos más relevantes que deben almacenarse corresponde a nombres, apellidos, número de identificación e índice de pisada generada por el sistema; cada una de las entradas deben ser enumeradas para que puedan ser distinguibles. Con el fin de que la información pueda ser consultada, es necesario que se disponga de una alternativa de búsqueda mediante filtrado; las consultas tienen el objetivo de realizar un seguimiento a los pacientes. De acuerdo a los requerimientos planteados, se plantea utilizar el gestor de base de datos SQLite por las siguientes ventajas (Yarbi, 2020):

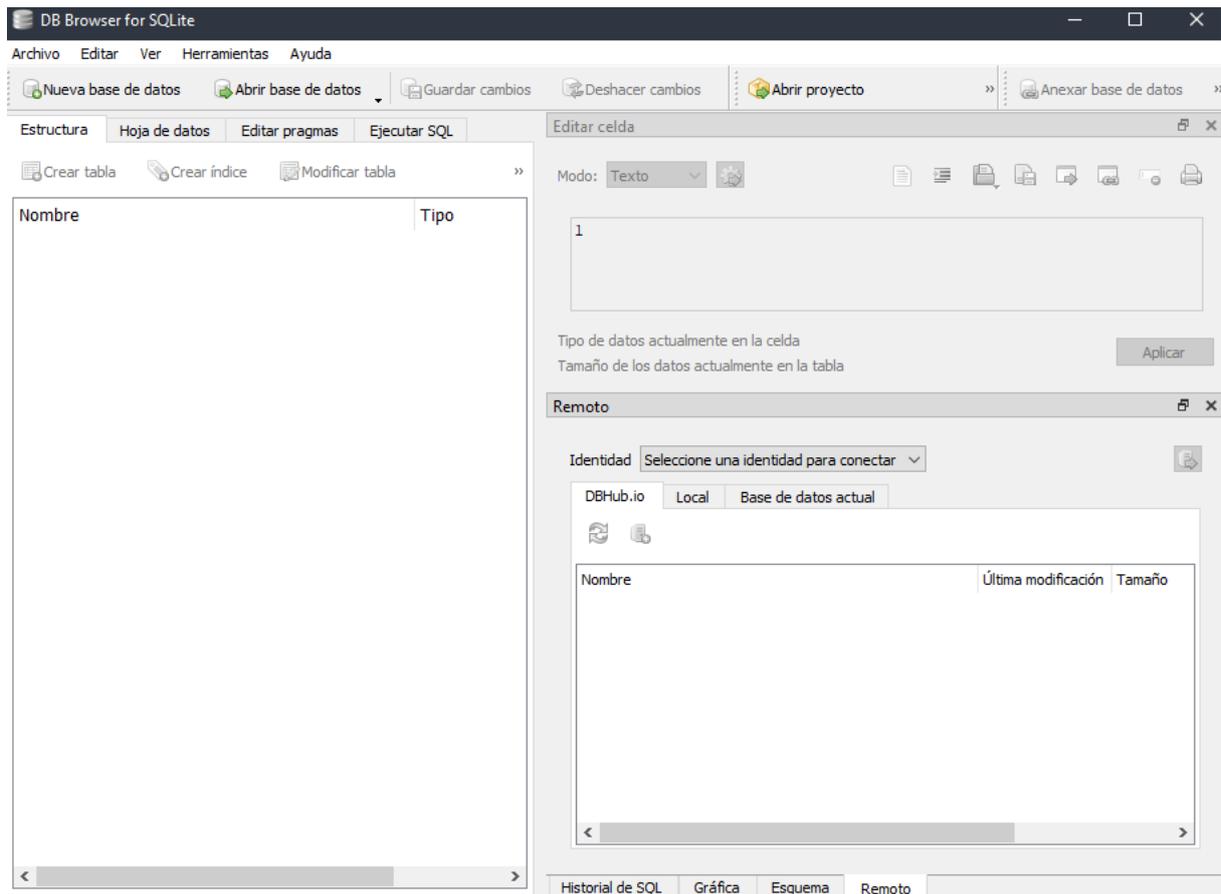
- SQLite es una base de datos relacional de código abierto, mucha de su información se puede encontrar disponibles para toda la comunidad de desarrolladores.
- Fácil configuración; SQLite no es una base de datos cliente-servidor, por ende no es necesario conectarse a algún puerto específico, sino que se comunicará con un archivo que será la base de datos.

- Persistencia de datos, es decir que, si se apaga el dispositivo que lo contiene, al encenderse nuevamente la información se mantendrá almacenada y disponible.
- Se puede obtener el contenido y actualizarlo mediante consultas SQL, lo que reduce bastante la complejidad del código de la aplicación.
- El almacenamiento de una base de datos SQLite se realiza en un solo archivo y tiene una huella de código pequeña (ocupa poco espacio). En comparación con MySQL, SQLite es una alternativa mucho más ligera, por lo que puede ser utilizada como *software* integrado en dispositivos como celulares, Smart TV, cámaras o placas de desarrollo (Felipe, 2021).

Una base de datos que soporte dichos requerimientos es posible implementarse mediante una herramienta visual de código abierto denominada DB Browser for SQLite, la cual permite crear, diseñar y editar archivos de bases de datos. Como puede verse en la Figura 65, la aplicación DB Browser presenta una interfaz gráfica amigable y muy descriptible para el manejo de una base de datos.

Figura 65

GUI de la aplicación DB Browser

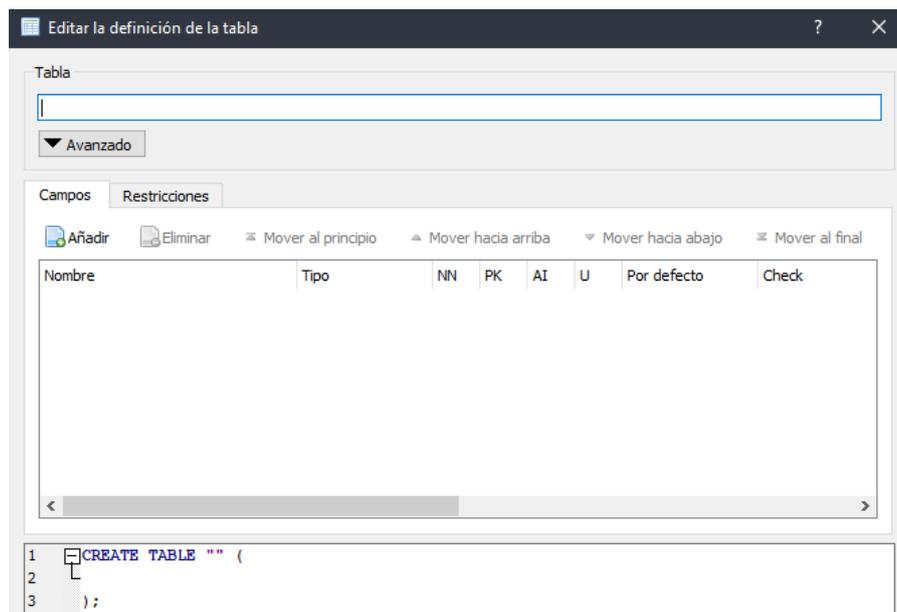


Fuente: Autoría.

Para la creación de una base de datos mediante DB Browser basta con seleccionar la opción “Nueva Base de Datos” e incorporar los campos necesarios en la tabla generada. Una de las ventajas de usar la GUI de DB Browser es que permite ingresar los campos necesarios mediante su ayuda y a la vez genera el código correspondiente en la sección inferior, de esta forma puede ser utilizado en cualquier lenguaje de programación, en la Figura 66 y Figura 67 se puede observar la creación de la base de datos y la implementación de los campos que corresponden a un usuario tipo paciente.

Figura 66

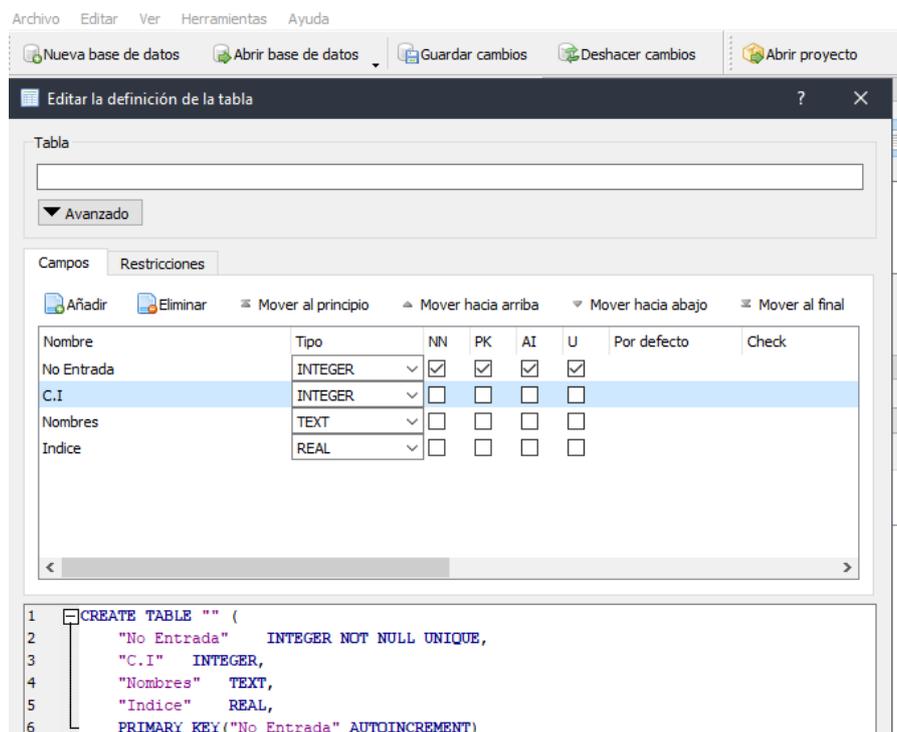
Interfaz para crear tablas BD



Fuente: Autoría.

Figura 67

Implementación de la base de datos



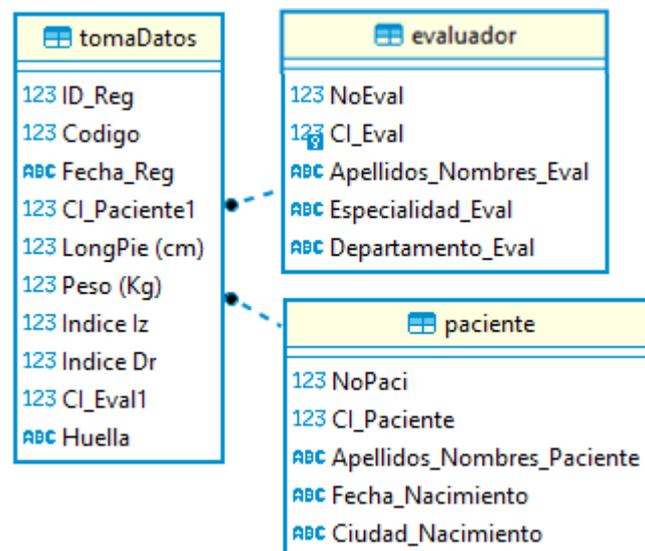
Fuente: Autoría.

El primer campo de la base de datos “No Entrada” permite numerar automáticamente y de forma incremental cada una de las entradas registradas en el sistema, de esta manera no existe conflicto por los demás campos.

Al implementar la Entidad-Relación de los requerimientos de la base de datos, se obtiene la gráfica de la Figura 68, en donde se puede visualizar tres entidades descritas por sus respectivos atributos.

Figura 68

Entidad-Relación de la base de datos



Fuente: Autoría.

3.2.4.2. Front End

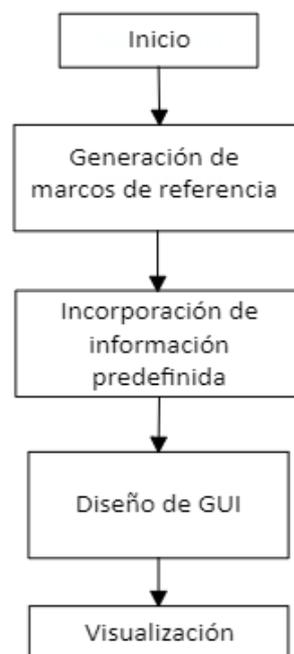
El Front End es todo aquello que el usuario tiene frente a sus sentidos cuando se ejecuta un software tales como: organización de contenidos, visualización principal y secundaria, menús, estilos, etc. De acuerdo a Somerville (2017) el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario debe cumplir con ciertos requisitos orientados a su usabilidad, tales como interacción para el usuario, presentación de la información y soporte. El autor indica que una interfaz de usuario debe ser relativamente fácil de aprender a manejarlo tomando en cuenta la falta de

experiencia en su manejo por una nueva persona; la información debe ser presentada mediante ventanas para poder presentar diferentes contextos de forma simultánea y finalmente la interfaz de usuario debe permitir el acceso a cualquier parte de la misma para retroalimentar el proceso que está siguiendo o para determinar la acción que se debe seguir a partir de donde se encuentra.

Si bien la interfaz gráfica debe permitir la libre circulación sobre sí misma, esto no indica que la información deba estar disponible en cualquier momento, por ello el diseño del presente trabajo restringirá con su procedimiento el acceso a información intermedia con el objetivo de disminuir la posibilidad de cometer errores indeseados. El procedimiento que debe seguir la interfaz gráfica de usuario se describe en la Figura 69.

Figura 69

Diagrama de flujo para la generación de Interfaz Gráfica



Fuente: Autoría.

Cuando ya se conoce el proceso que se debe seguir para la generación de la interfaz gráfica, también es necesario diseñar la estructura organizativa de cada uno de los ítems de la interfaz, denominado también como ciclo de vida del front end presentado en la Figura 70.

Figura 70

Ciclo de vida del Front End



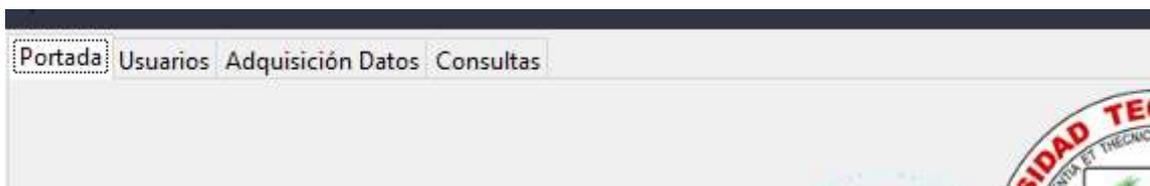
Fuente: Autoría.

3.2.4.2.1. Presentación

Para dar cumplimiento al criterio de disponibilidad simultánea de diferentes contextos se elige por realizar una ventana basada en pestañas. Esta distribución de la información, mostrada en la Figura 71, permite la navegación libre y sencilla del usuario en cualquier momento del proceso.

Figura 71

Interfaz Gráfica de Usuario



Fuente: Autoría.

Se utilizan cuatro pestañas para la presentación de la Portada, Usuarios, Adquisición de Datos, y Consultas, tomando en cuenta que corresponden a los procesos generales que componen el sistema. Cada pestaña contiene botones de ejecución de procesos internos y son quienes habilitan la ejecución de los procesos de las siguientes pestañas.

La portada es el espacio que puede utilizarse en cualquier momento para incorporar nueva información ya sea sobre el sistema o sobre el manejo del mismo, en este caso se aprovecha para proporcionar los datos personales del responsable del proyecto y la institución educativa, como puede verse en la Figura 72.

Figura 72

Portada del Front End del sistema



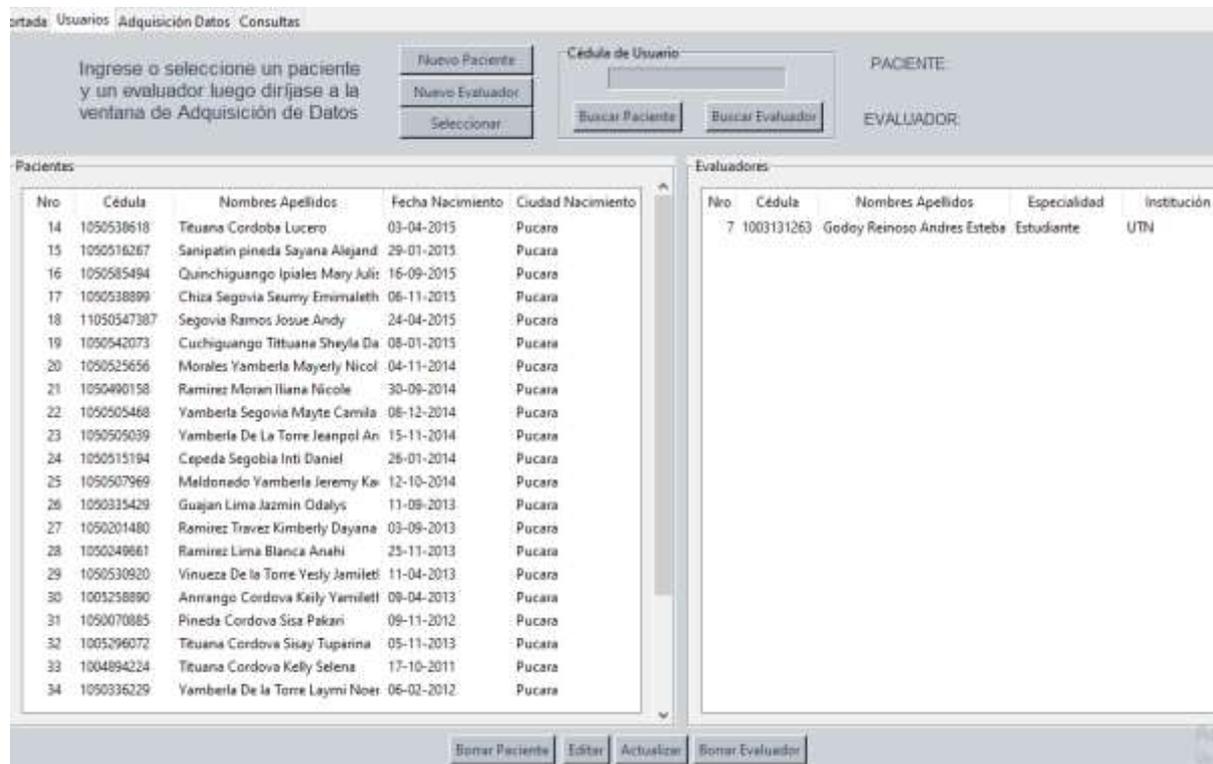
Fuente: Autoría.

Como segunda pestaña del sistema se presenta a los “Usuarios”, tomando en cuenta que tanto pacientes como evaluadores son considerados como usuarios. Se acompaña de botones de acción para diferentes actividades como Actualizar, Seleccionar, Editar, Borrar Paciente,

Borrar Evaluador, Nuevo Paciente, Nuevo Evaluador. En la Figura 73 se observa también un área de búsqueda de usuarios mediante filtrado por número de cédula.

Figura 73

Pestaña Usuarios



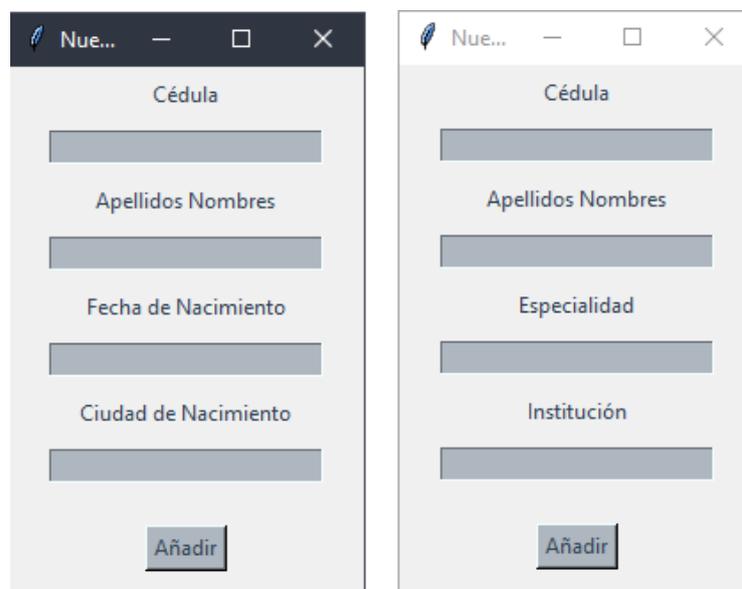
Fuente: Autoría.

Al ingresar un número de cédula válido en la sección para dicho destino se puede proceder con la búsqueda correspondiente, dejando de visualizarse los demás elementos. Cuando haya terminado la búsqueda, el botón actualizar permite visualizar nuevamente a todos los usuarios ordenados por número de registro.

En la sección inferior de la pestaña se posiciona un botón que permite seleccionar un usuario para su posterior registro conjuntamente con las medidas tomadas del paciente en la pestaña cuatro. También se tienen dos botones para el borrado de cualquier usuario, mientras que los dos botones de ingreso de nuevo usuario permiten visualizar una ventana emergente con los campos de información necesarios, tal como puede verse en la siguiente Figura 74.

Figura 74

Ventanas emergentes para el ingreso de nuevos clientes



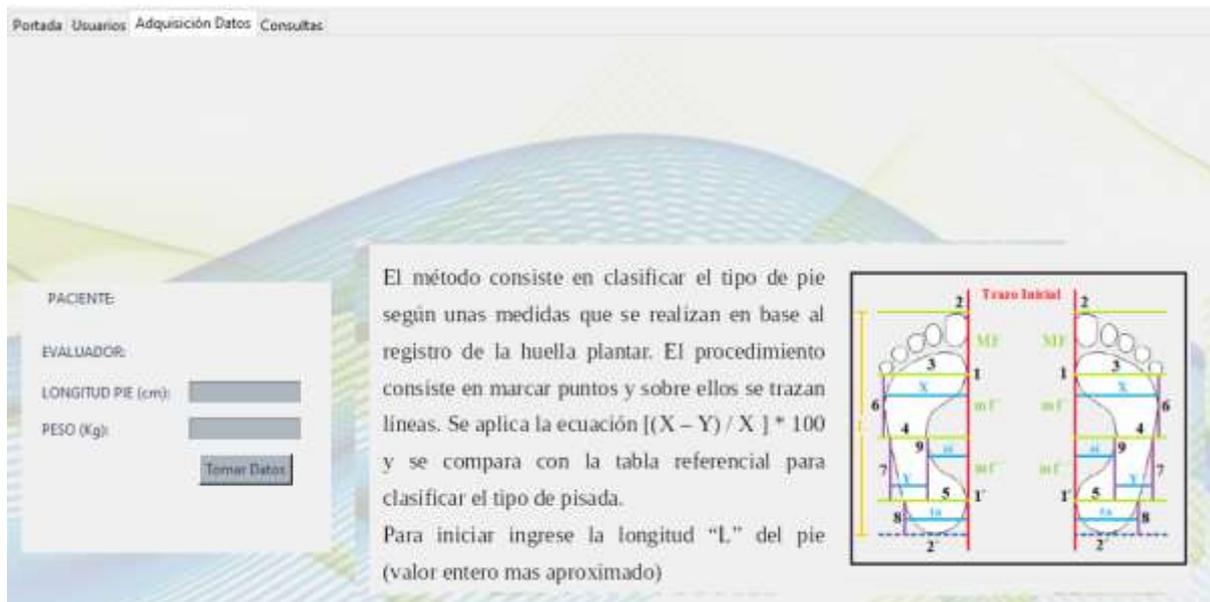
Fuente: Autoría.

3.2.4.2.2. Información

En concordancia con el criterio de tener presente la información suficiente para que la persona encargada de manejar el dispositivo tenga conocimiento del proceso que ejecuta el software, se implementa en la tercera pestaña denominada “Adquisición Datos” un resumen del método Hernández Corvo para la detección de tipos de pisada. En la siguiente Figura 75 puede verse la información correspondiente, además de contenedores de la longitud del pie y el peso que debe usarse para la medición de la huella.

Figura 75

Pestaña Adquisición Datos



Fuente: Autoría.

Como se expresó en el desarrollo del Back End, el sistema contiene dos tipos de plantillas disponibles para separar tallas de 19 – 20,5 cm y de 20,5 – 22 cm ya que cada uno tiene capacidad de cubrir diferente cantidad de sensores físicamente. La longitud del pie “L” desde el talón hasta la punta del dedo más largo, así como el peso, se debe tomar previamente e incorporarlo como requisito para la toma de los datos de los sensores.

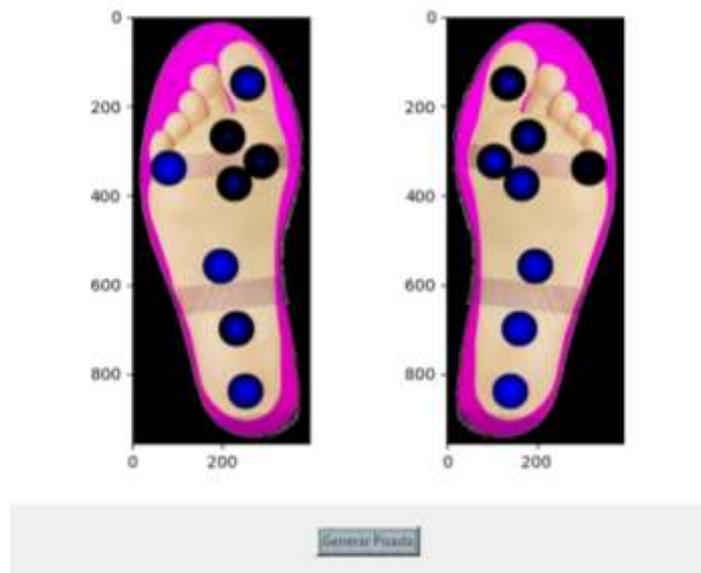
3.2.4.2.3. Generar y Analizar pisada

A continuación, y en la misma segunda pestaña, se presenta seguido una plantilla general de pies con el objetivo de orientar al usuario y cumplir con otro de los principios de desarrollo de interfaces gráficas indicado por Somerville (2017) que consiste en disminuir las sorpresas que puede tener el usuario al utilizar el sistema. Al ingresar la talla del pie y el peso y apretar sobre el botón Tomar Datos se incorpora la plantilla conteniendo las lecturas de los sensores, adicional se habilita un nuevo botón que permitirá generar la pisada como resultado

de la aplicación del algoritmo de aprendizaje de máquina desarrollado en el apartado de Back End y mostrado en las siguientes Figuras 76 y 77.

Figura 76

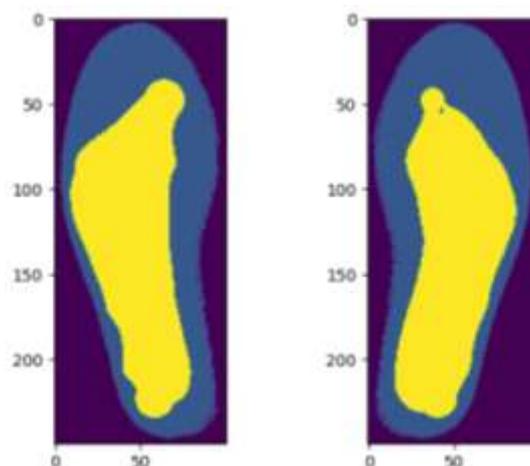
Pantalla con lectura de sensores



Fuente: Autoría.

Figura 77

Pisada generada por el algoritmo de Aprendizaje Máquina



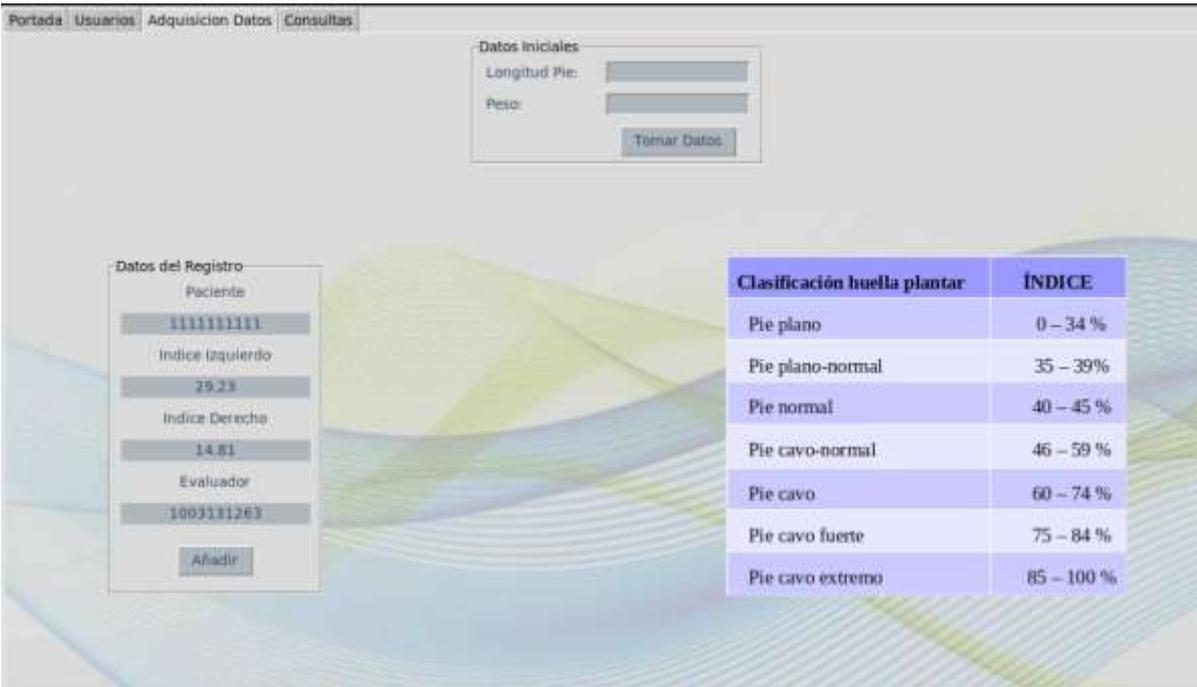
Fuente: Autoría.

3.2.4.2.3. Índice Hernández Corvo

Al generarse la pisada se habilita nuevamente en la siguiente pestaña “Análisis” un botón que permite generar el índice Hernández Corvo a partir de las impresiones obtenidas. En la Figura 78 se puede ver el resultado junto con el botón “Añadir” el cual permite guardar en un registro, para más adelante poder interpretar los resultados fácilmente.

Figura 78

Cálculo del Índice Hernández Corvo



Clasificación huella plantar	ÍNDICE
Pie plano	0 – 34 %
Pie plano-normal	35 – 39%
Pie normal	40 – 45 %
Pie cavo-normal	46 – 59 %
Pie cavo	60 – 74 %
Pie cavo fuerte	75 – 84 %
Pie cavo extremo	85 – 100 %

Fuente: Autoría.

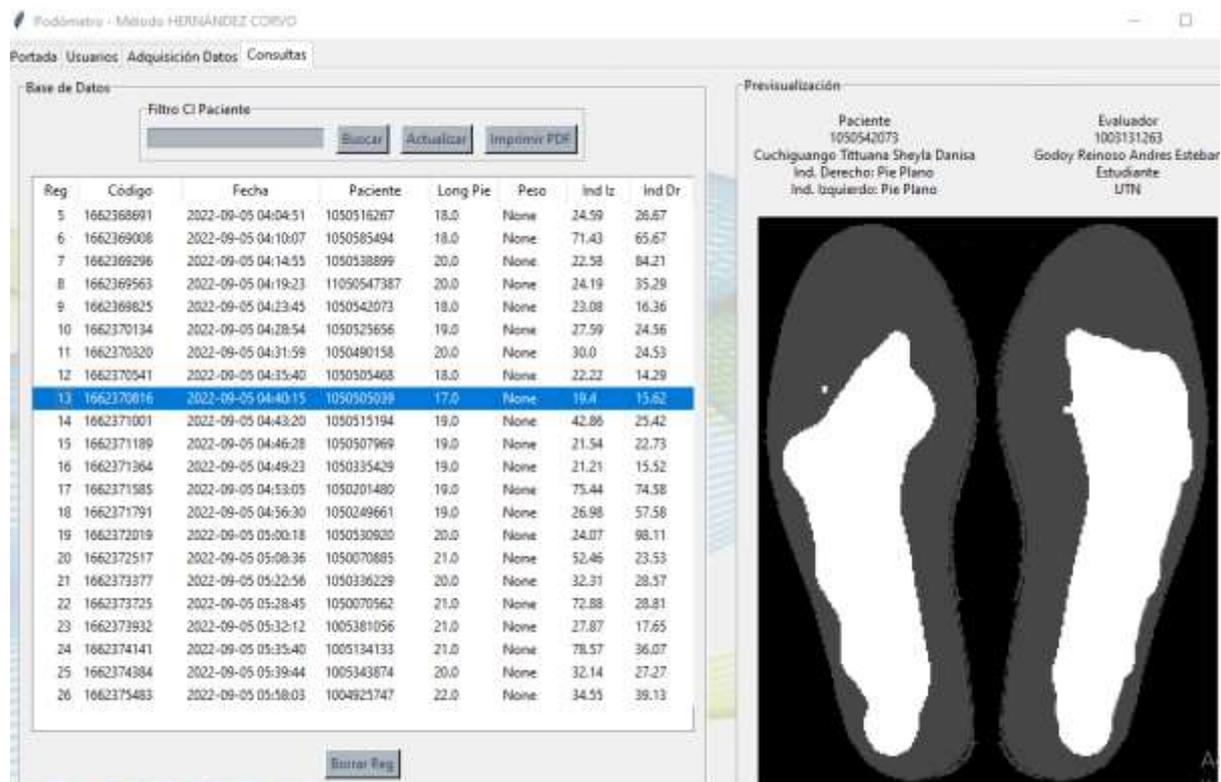
3.2.4.2.3. Almacenamiento y búsqueda de información

El proceso anterior habilita la sección de almacenamiento de los resultados obtenidos, para ello en la pestaña “Consultas” hay una sección de filtrado de pacientes, insertando el número de cédula del paciente directamente en el campo correspondiente se puede obtener los datos registrados o mediante una búsqueda en los registros guardados. En la Figura 79 se puede visualizar una sección que permite desplegar cada uno de los registros incorporados en la base de datos, al tener un espacio de visualización limitado, es necesario incrementar un campo de

búsqueda por filtrado. Además, cuenta con un botón “Imprimir PDF” que nos permite guardar el registro con los datos más relevantes para su posterior impresión por parte del evaluador.

Figura 79

Pestaña de Consultas



Fuente: Autoría.

La sección de manejo de la base de datos tiene la capacidad no solamente de almacenar información sino también de eliminarla, el proceso consiste en seleccionar la entrada deseada y apretar sobre el botón Borrar.

3.2.5. Pruebas: Primera Iteración

En esta sección, conforme lo indica la metodología de desarrollo aplicada, se realizará un conjunto de pruebas con el fin de verificar el funcionamiento adecuado del sistema; por lo que se iniciará desde hardware comprobando el correcto funcionamiento de las partes importantes. Luego se prueba la funcionalidad completa del sistema, con esto se sabrá si el

software cumple con las necesidades establecidas tanto del hardware como del software y su visualización; dichas comprobaciones serán realizadas en un ambiente de laboratorio.

3.2.5.1. Pruebas de Hardware

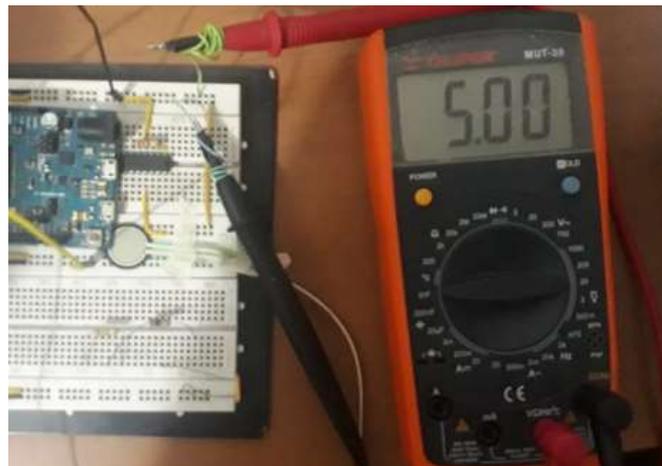
En esta sección se realizará un conjunto de pruebas unitarias, de esta manera se verificará el funcionamiento de cada sección.

3.2.5.1.1. Prueba de Alimentación

Para verificar el funcionamiento correcto de la fuente de alimentación, en esta sección se procedió a realizar mediciones de salida de voltaje tanto en la salida de la fuente, como en las salidas del Raspberry pi4. En la Figura 80 podemos observar las mediciones realizadas para la verificación del voltaje y así poder garantizar la alimentación al circuito que contiene los sensores, acondicionamiento y multiplexor, adquisición y acondicionamiento.

Figura 80

Prueba de medición de voltaje de fuente de alimentación



Fuente: Autoría.

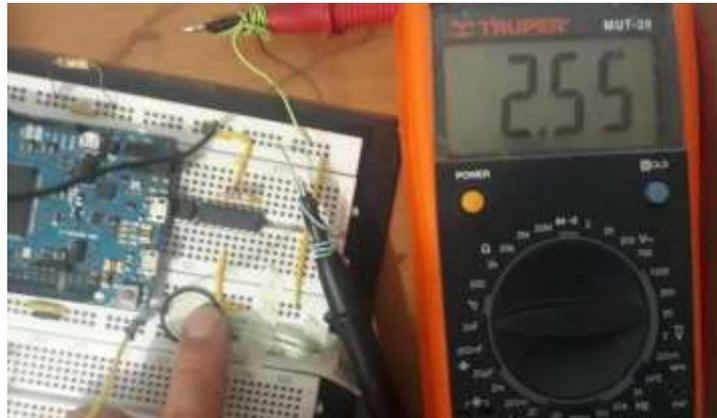
3.2.5.1.2. Prueba de sensores

En esta prueba se procedió a comprobar el funcionamiento individual de cada uno de los sensores, en la Figura 81 se puede apreciar el comportamiento del sensor al variar la presión

ejercida, varía el valor referencial 0-1255 en la lectura el IDE del Arduino, mientras que en la medición física el voltaje tiende a variar.

Figura 81

Lectura de presión a los sensores



Fuente: Autoría.

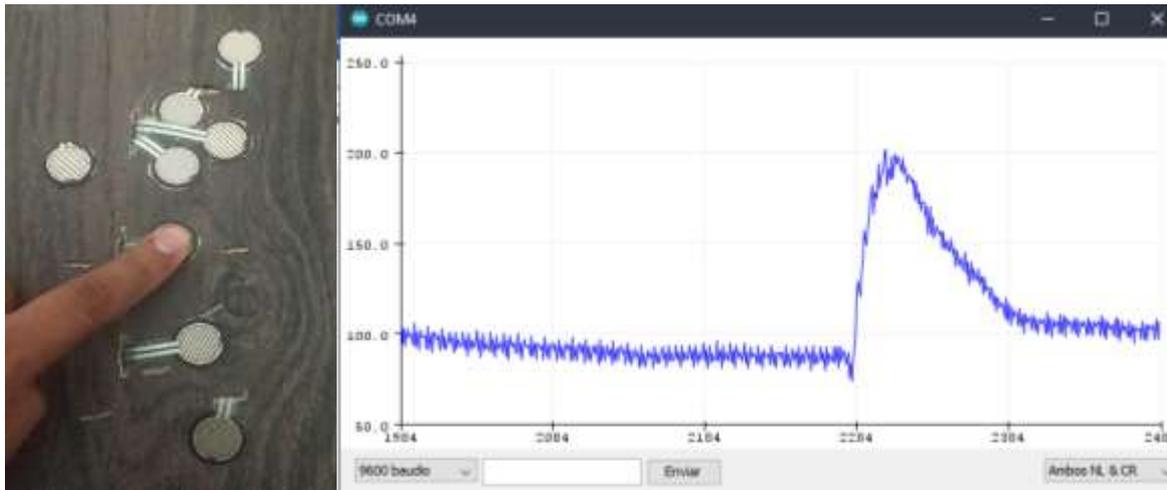
3.2.5.1.3. Prueba de Acondicionamiento de señal

El sensor FSR utilizado consiste en una resistencia variable dependiente de la presión sobre su área impresa, esto hace que su comportamiento no sea lineal, por lo que se debe acondicionarle

En este bloque se procedió con pruebas unitarias obteniendo los datos con la mayor relación señal a ruido, como lo indica en las recomendaciones y especificaciones del fabricante empleando un divisor de tensión y un amplificador operacional para obtener una señal lo más lineal posible, como podemos verificar Figura 82 obtenida de la herramienta Serial Plotter del Arduino.

Figura 82

Visualización de sensores junto con el acondicionador en el IDE Arduino



Fuente: Autoría.

3.2.5.2. Pruebas de Software

En esta sección se realizarán las pruebas de lo que comprende tanto el black end como el front end para verificar el procedimiento adecuado de las secciones del sistema.

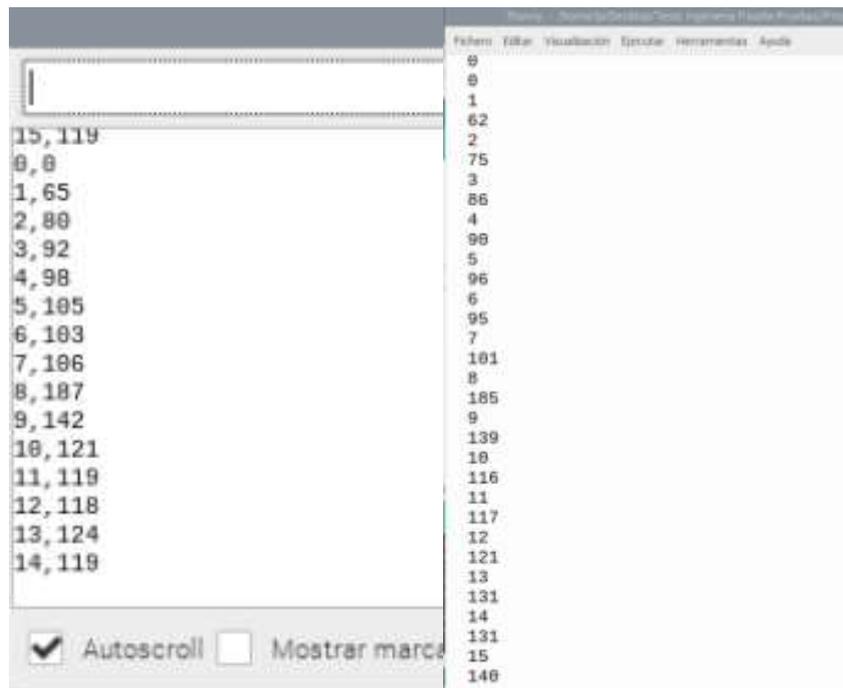
3.2.5.2.1. Pruebas comunicación Módulo Adquisición de datos y Módulo

Procesamiento

La placa Arduino, que toma las señales analógicas provenientes de los 16 sensores; los digitaliza y envía hacia el módulo de procesamiento de datos que consiste en la placa de desarrollo Raspberry Pi 4. En la Figura 83 se puede evidenciar dicho proceso de comunicación de datos donde se envía el número de sensor y la lectura correspondiente separados por una coma que debe ser insertada en el transmisor y eliminado en el receptor.

Figura 83

Funcionamiento del módulo de Comunicación



Fuente: Autoría.

Nota: La imagen izquierda corresponde a los datos que se envían desde Arduíno y la derecha corresponde a los datos recibidos por Raspberry Pi 4.

3.2.5.2.2. Pruebas del módulo de Aprendizaje de máquina

El aprendizaje de máquina se basa en transformar en una huella plantar las imágenes impresas de los valores de los sensores. Para conseguir este objetivo, se empieza por separar a la imagen en escala de grises, obteniendo un conjunto de vectores hacia los píxeles en blanco y otro conjunto hacia los píxeles en negro. Estos vectores son el conjunto de entrenamiento para la red neuronal, permitiendo aprender a distinguir tanto la diferencia de color entre ambos, así como la posición de cada uno de ellos y de esta manera logra determinar al conjunto que corresponden los nuevos píxeles que se encuentran en color gris y los agrupa donde corresponda. De esta manera se logra obtener la imagen de la Figura 84.

Figura 84

Prueba de huella plantar final



Fuente: Autoría.

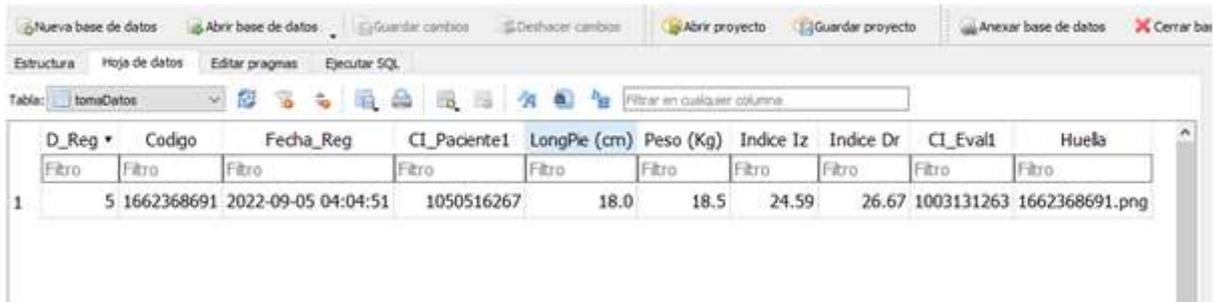
3.2.5.2.3. Pruebas de registro de usuario

Cuando el usuario ya tiene generado el índice Hernández-Corvo correspondiente, se procede a almacenarlo en la base de datos conjuntamente con la información de identificación personal del paciente. El resultado de dicho procedimiento se puede evidenciar en la Figura 85, en donde consta el registro de prueba número 1.

Ya que la numeración de los registros es automática e incremental, el sistema asigna esta numeración con cada uno de los registros sin importar que en lo posterior pueda ser borrado, por lo que a continuación en la figura se muestra un nuevo registro de prueba cuya información debe ser introducida en la sección “Datos del Paciente” como C.I. 0509638462 y Nombres Benítez Marcelo; y posterior a presionar en el botón “Añadir” se puede visualizar en la sección “Base de Datos – Datos encontrados”.

Figura 85

Registro de medidas en Base de Datos



The screenshot shows a database application window with a table named 'tomaDatos'. The table has the following columns: D_Reg,Codigo, Fecha_Reg, CI_Paciente1, LongPie (cm), Peso (Kg), Indice Iz, Indice Dr, CI_Eval1, and Huella. A single record is displayed with the following values: 1, 5, 1662368691, 2022-09-05 04:04:51, 1050516267, 18.0, 18.5, 24.59, 26.67, 1003131263, and 1662368691.png.

D_Reg	Codigo	Fecha_Reg	CI_Paciente1	LongPie (cm)	Peso (Kg)	Indice Iz	Indice Dr	CI_Eval1	Huella
1	5	1662368691	2022-09-05 04:04:51	1050516267	18.0	18.5	24.59	26.67	1003131263 1662368691.png

Fuente: Autoría.

De la misma manera se puede contrastar la Imagen mostrada anteriormente con la siguiente figura 86, donde se puede visualizar en la base de datos el registro de pacientes y evaluador que se genera desde la interfaz.

Figura 86

Registros de Paciente y Evaluador



The screenshot shows a database application window with a table containing patient and evaluator information. The table has the following columns: Ni_Eval, CI_Eval, Apellidos_Nombres_Eval, Especialidad_Eval, and Departamentos_Eval. A single record is displayed with the following values: 7, 1003131263, Godoy Rencoso Andres Estaban, Estudiante, and UTN.

Ni_Eval	CI_Eval	Apellidos_Nombres_Eval	Especialidad_Eval	Departamentos_Eval
7	1003131263	Godoy Rencoso Andres Estaban	Estudiante	UTN

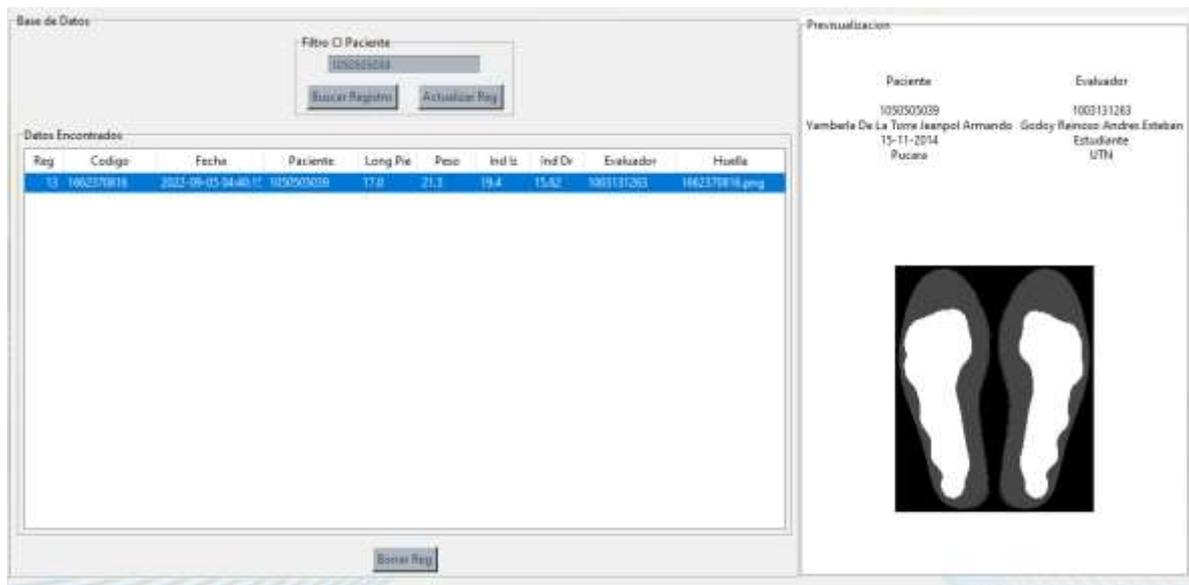
Fuente: Autoría.

3.2.5.2.4. Pruebas de Consulta y Borrado de registros

Cuando el espacio de visualización de registros se satura y se tiene una gran cantidad de ingresos, se hace necesario incorporar el mecanismo de búsqueda mediante filtrado por identificación para poder visualizarlo instantáneamente y consultar sus datos. En la Figura 87 se puede visualizar el usuario requerido al incorporarse su número de cédula en el espacio de búsqueda y apretar en el botón correspondiente.

Figura 87

Búsqueda de paciente por C.I.

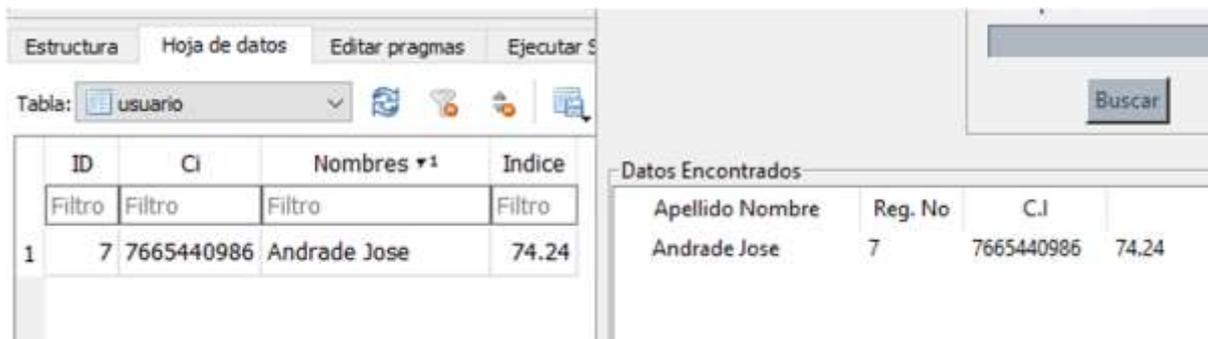


Fuente: Autoría.

Para el proceso de eliminación de un registro simplemente se debe seleccionarlo y proceder a apretar en el botón “Borrar Reg” como puede verse en la Figura 88, de esta manera desaparece de la interfaz y de la base de datos.

Figura 88

Paciente inicial después del borrado



Fuente: Autoría.

En todo momento del proceso del sistema se implementa el requerimiento de facilidad de manejo y uso para el usuario reflejado principalmente en la incorporación de espacios de texto y botones que intuitivamente llevan al usuario a manejarlo con satisfacción.

3.2.5.2.5. Pruebas de integración

A continuación, en la Figura 89 se puede observar la integración del dispositivo final, el cual es un sistema capaz de identificar el tipo de pie a usuarios entre 7 a 12 años de edad basado en la metodología Hernández Corvo, no necesita conexión a internet y mediante su interfaz gráfica permite visualizar e interpretar los resultados. Cuenta con extensiones de 2 conectores USB, cable HDMI para conectar a una pantalla y un puerto RJ45.

Figura 89

Plataforma para la toma de datos del sistema



Fuente: Autoría.

Por otra parte, en cuanto al funcionamiento del sistema en las pruebas anteriores se pudo evidenciar el registro de usuarios, toma de la muestra del paciente y almacenamiento de

los registros. A continuación, en la Figura 90 podemos evidenciar que luego de haber realizado una medición guardada podemos guardar un documento PDF con la información más relevante.

Figura 90

Reporte de paciente para imprimir

INFORME DE HUELLA PLANTAR DIGITAL

Datos del Evaluador: CI, Nombres, Especialidad, Institución
1003131263 Godoy Reinoso Andres Esteban Estudiante UTN

Datos del Paciente: CI, Nombres, Fecha Nacimiento, Lugar Nacimiento
1050538899 Chiza Segovia Seumy Emimalethh 06-11-2015 Pucara

Datos de Huella Plantar: Código, Fecha, CI, Longitud Pie, Peso, Ind Iz, Ind Dr
1862369296 2022-09-05 04:14:55 1050538899 20.0 None 22.58 84.21



Fuente: Autoría.

CAPITULO IV. Desarrollo de pruebas

El proceso de desarrollo se complementa con una prueba de integración y posterior a ello con una prueba de validación de resultados.

4.1. Pruebas del Sistema

Las pruebas de integración corresponden a la puesta en funcionamiento del dispositivo diseñado e implementado, considerándolo como una nueva unidad orientada a realizar cierto proceso y posterior la entrega de resultados. En el capítulo 3 se presentó pruebas parciales de cada una de las partes que componen el dispositivo, tanto hardware como software, por lo que en este apartado se procede a evaluar el funcionamiento integral observando el resultado proporcionado por el mismo.

Ya que el objetivo de las pruebas de integración es observar el funcionamiento del sistema en su totalidad, se toma muestras aleatorias con cierta orientación al proceso de conglomerados, es decir, se toma la medida plantar a niños que se encuentren en diferentes grupos de edad para de esta manera extender el rango de posibles pacientes en el momento de su puesta en funcionamiento. El proceso de puesta en funcionamiento del dispositivo diseñado consiste en la toma de la información digital de la presión del pie sobre el plano que contiene el conjunto de sensores dispuestos de manera descrita en apartados anteriores, y la toma física de la huella mediante el método de impresión. De esta manera se dispone de dos tipos de información tomados del mismo elemento que pueden ser utilizados para la observación de sus características y mediante procesos de comparación, disyunción y adición se puede obtener medidas de la precisión y el error que se puede cometer.

4.1.1. Toma de Datos para pruebas de integración del sistema

Para la toma de la información mediante la metodología de impresión física de la huella plantar se esparce pintura no nociva sobre la totalidad del pie del paciente y de forma natural se coloca sobre una hoja de papel blanca, al retirar el pie se puede visualizar la huella plantar.

Con este procedimiento se realizó una toma de 25 muestras tanto físicas como digitales con el objetivo de tener un mecanismo de comparación entre las huellas obtenidas. La Figura 91 es una muestra de la toma de huella plantar por impresión física en la que se procede a aplicar diferentes análisis para determinar su validez.

Figura 91

Método de impresión física de huella plantar



Fuente: Autoría.

Como puede visualizarse en la siguiente Figura 92, se procede a obtener el índice de huella de acuerdo a los trazos indicados en el procedimiento Hernández – Corvo. Para cada paciente se toma la información de identificación personal tales como: nombres y apellidos, edad, peso y longitud del pie. En este proceso se omitió la adquisición del número de cédula del paciente, ya que, al tratarse de un proceso aleatorio, la mayoría de ellos no lo poseían y tampoco se lo recordaba.

Mediante la aplicación de la relación matemática propuesta por el mismo método y el uso de las medidas obtenidas por los trazos, es posible determinar la relación pseudo

cuantitativa que representa ya sea un pie normal o la presencia de cualquier anomalía, es así que se puede obtener un índice para cada pie de la siguiente manera:

Índices:

$$Iz = \frac{6,8-3,15}{6,8} \times 100 = 53,6 \quad Id = \frac{6,6-2,6}{6,6} \times 100 = 60,6 \quad \text{Ecuación 4}$$

Figura 92

Trazos del método Hernández Corvo sobre la impresión de la huella plantar



Fuente: Autoría.

4.1.2. Análisis de precisión de la huella física.

La precisión de la impresión física puede encontrarse influenciada por la postura del paciente en el momento de la pisada, la cantidad de pintura en los puntos más extremos del pie o movimientos de inestabilidad en el proceso. Si se utiliza el concepto de error cuadrático en

la impresión física, se puede medir este error y finalmente hallar el error cuadrático medio. Se procede generando circunferencias de referencia en la huella, como en la Figura 93, para con sus áreas poder determinar cuantitativamente el error de precisión que puede cometerse.

Figura 93

Aproximación gráfica a la medida del error



Fuente: Autoría.

Es preciso generar la mayor cantidad de circunferencias para disminuir el error al máximo, por lo que en el modelo de análisis se obtuvieron siete circunferencias que arrojaron los siguientes resultados de la tabla 13 con una estimación de error de 3 mm en cada radio medido lo cual se traduce una variación en el contorno de la huella:

Tabla 13*Estimación del error en la impresión de la huella física*

Círculo	Radio (cm)	Área (cm²)	R + error	Área + error	Error cuadrático
1	0,875	2,405281875	1,175	4,337361357	3,7329311
2	3	28,27433388	3,3	34,211944	35,255214
3	0,65	1,327322896	0,95	2,83528737	2,2739569
4	1,425	6,379396582	1,725	9,34820164	8,8138035
5	1	3,141592654	1,3	5,309291585	4,6989187
6	1,05	3,463605901	1,35	5,725552611	5,1164029
7	2,5	19,63495408	2,8	24,6300864	24,951347
	Área total	64,62648788		Error cuadrático medio	12,120368
				% De error =	18,754489

Fuente: Autoría.

De la tabla anterior se puede visualizar que el proceso de impresión física de la huella se encuentra sometida a cometer un error del 18.7%.

En la realización de los trazos se pudo evidenciar que es posible cometer un error de aproximadamente de 2 mm por cada trazo, generando una desviación de 0.5 grados. Si se considera que una desviación de 90 grados corresponde al 100% del error, se tiene un 0.5% de error de imprecisión en los trazos. Existen mayor cantidad de momentos del proceso en el que se puede cometer errores, sin embargo, no pueden cuantificarse, por lo que simplemente se suman los resultados obtenidos para la determinación del error de precisión en la obtención del índice, dando un total del 19.2% reflejados en la siguiente tabla 14.

Tabla 14*Índices Hernández Corvo por huella física*

No	Nombres	Izquierdo			Derecho		
		Min	Medición	Max	Min	Medición	Max
1	Aguirre Arcos Carla Fernanda	37,2	46,0	54,8	34,7	43,0	51,3
2	Alcocer Andrade María Belén	53,3	66,0	78,7	50,9	63,0	75,1

3	Andrade Cerna Diego José	49,8	61,6	73,4	49,3	61,0	72,7
4	Anrango Revelo Dylan Sammael	5,4	6,7	8,0	8,6	10,7	12,8
5	Barahona Solano Hipólito Javier	61,0	75,5	90,0	58,2	72,0	85,8
6	Benítez Andrade David Nicolay	32,3	40,0	47,7	35,9	44,4	52,9
7	Cabrera Vaca Alex Samir	28,8	35,7	42,6	5,3	6,6	7,9
8	Cabrera Vaca Elvis Fabricio	41,8	51,7	61,6	40,4	50,0	59,6
9	Cando Rosero Juan Carlos	28,3	35,0	41,8	21,9	27,1	32,3
10	Castro Pupiales Sofia Daniela	12,9	16,0	19,1	10,5	13,0	15,5
11	Chávez Sandoval Camila Maely	61,2	75,7	90,2	47,3	58,5	69,7
12	Delgado López Daniela Dánae	43,3	53,6	63,9	49,0	60,6	72,2
13	Esteves Castro Joffre Uriel	29,7	36,8	43,9	33,1	41,0	48,9
14	Ger Morillo Santiago Dariel	41,5	51,4	61,2	40,4	50,0	59,6
15	Ibujes Esteves Fabricio José	60,7	75,1	89,5	61,4	76,0	90,6
16	Losa Losa Wilson Sebastián	58,2	72,0	85,8	57,9	71,6	85,3
17	Losa Solano Dariel Alexander	13,9	17,2	20,5	11,3	14,0	16,7
18	Montesdeoca Lima Pedro José	59,0	73,0	87,0	62,2	77,0	91,8
19	Pupiales Arévalo Sebastián Andrés	39,0	48,3	57,6	32,9	40,7	48,5
20	Ramírez Mayanquer Vanessa Bailey	48,2	59,7	71,2	26,9	33,3	39,7
21	Recalde Benítez Jorge Manuel	49,0	60,6	72,2	51,7	64,0	76,3
22	Rivadeneira Manrique Carla Esther	55,3	68,5	81,7	42,5	52,6	62,7
23	Tito Fuentes Erica Fernanda	12,5	15,5	18,5	14,7	18,2	21,7
24	Toapanta Duque Ángel Francisco	20,6	25,5	30,4	11,7	14,5	17,3
25	Vilca Méndez Fernando Marcelo	46,8	57,9	69,0	49,3	61,0	72,7

Fuente: Autoría.

En esta tabla se realiza un cálculo de los valores máximos y mínimos tomando en cuenta el valor porcentual de error de precisión hallado previamente para que en lo posterior se tenga como referencia de comparación con la impresión de huella digital.

4.1.3. Análisis de la Tasa de Error de la Huella Digital

Como se muestra en la siguiente Figura 94, con la ayuda del dispositivo diseñado se procede a la toma de la huella digital y se enlista los resultados en la siguiente tabla 15.

Figura 94

Sistema de digitalización de huella plantar



Fuente: Autoría.

Tabla 15

Medidas de huella Digital

No	Nombres	Índice Iz	Índice Dr
1	Aguirre Arcos Carla Fernanda	46,1	47
2	Alcocer Andrade María Belén	63,9	53
3	Andrade Cerna Diego José	69,6	68
4	Anrango Revelo Dylan Sammael	18,8	12
5	Barahona Solano Hipólito Javier	78,1	80
6	Benítez Andrade David Nicolay	33,0	41
7	Cabrera Vaca Alex Samir	30,9	7
8	Cabrera Vaca Elvis Fabricio	49,3	52
9	Cando Rosero Juan Carlos	34,2	28
10	Castro Pupiales Sofia Daniela	30,9	27.8
11	Chávez Sandoval Camila Maely	81,2	53
12	Delgado López Daniela Dánae	47,0	68

13	Esteves Castro Joffre Uriel	36,5	35
14	Ger Morillo Santiago Dariel	55,2	50
15	Ibujes Esteves Fabricio José	72,3	76
16	Losa Losa Wilson Sebastián	75,3	62
17	Losa Solano Dariel Alexander	17,9	13
18	Montesdeoca Lima Pedro José	71,6	67
19	Pupiales Arévalo Andrés Sebastián	48,2	45
20	Ramírez Mayanquer Vanessa Bailey	65,9	36
21	Recalde Benítez Jorge Manuel	60,9	56
22	Rivadeneira Manrique Carla Esther	80,7	57
23	Tito Fuentes Erica Fernanda	17,0	20
24	Toapanta Duque Ángel Francisco	29,7	12
25	Vilca Méndez Fernando Marcelo	56,3	59

Fuente: Autoría.

De los resultados arrojados en la tabla se puede observar que, de 25 elementos seleccionados al azar, dos de ellos (el 4 y 9 de la lista) se encuentran fuera del rango establecido por el análisis de precisión de la sección previa, por lo tanto, estos elementos se consideraran como error cometido en el proceso de medición de la huella digital representando un 8% del total de muestras. De aquí se puede concluir que el dispositivo cumple con un 92% de resultados válidos.

4.2. Pruebas de Validación

Las pruebas de validación tienen un carácter más riguroso que el proceso de pruebas de integración, ya que es necesario determinar una población y su respectiva muestra de estudio para que dicho conjunto universo pueda proporcionar resultados que avalen el funcionamiento correcto del sistema diseñado.

4.2.1. Identificación de la población

Se desarrolla el conjunto de pruebas de funcionamiento del dispositivo diseñado en la comunidad rural de nombre Santa Isabel de Pilascacho que pertenece a la parroquia de Andrade Marín de la ciudad de Atuntaqui, cantón Antonio Ante, provincia de Imbabura.

En concordancia con el portal web del GAD Municipal del cantón Antonio Ante (GADMAA., 2015), la parroquia de Andrade Marín es urbana y conjuntamente con la parroquia de Atuntaqui conforman la cabecera cantonal con una población de, 19216 habitantes. Al respecto, el (INEC, 2010) contabiliza un total de 2399 niños en el rango de 5 a 9 años y 2398 niños en el rango de 10 a 14 años. De la misma manera se puede resaltar que son 256 niños pertenecientes al sector rural en el primer rango y 241 rurales en el segundo rango de edad.

Es importante resaltar a los niños pertenecientes al sector rural, ya que la comunidad en intervención forma parte de este sector y al no tener una contabilización exacta de la cantidad de niños habitantes de dicha comunidad, es posible tomarlos como referencia para obtener una perspectiva cuantitativa de ellos, por lo tanto, se tiene un total de 497 niños y niñas en el rango de 5 a 14 años que serán quienes conformen la población de estudio.

4.2.2. Metodología de muestreo

Al considerar una población de naturaleza comunitaria donde los elementos de estudio no se encuentran reunidos de alguna manera, es conveniente utilizar una metodología mixta de selección de la muestra que será objeto de estudio (Carrillo, 2015). La metodología mixta consiste en utilizar un muestreo probabilístico conjuntamente con el muestreo no probabilístico planificado de la siguiente manera.

Como primer paso se aplica el proceso de muestreo aleatorio simple, donde se considera que todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser elegidos en el muestreo y que a

su vez una elección de un individuo es aleatoriamente independiente de otra. A partir de la determinación del tamaño de la muestra se procede a utilizar el muestreo aleatorio por conglomerados para poder subdividir el conjunto muestral en rangos de edad representativos para la necesidad del presente trabajo. Y como tercer paso, en el momento de la aplicación se pondrá en práctica los procesos de muestreo, no probabilísticos denominados muestreo voluntario y muestreo accidental. Este proceso garantizará la aleatoriedad en el proceso de muestreo disminuyendo en gran medida los errores que puedan cometerse debido a la imposibilidad de reunir a todos los individuos que conforman la muestra y de esta manera conformar un grupo representativo real de la población universal.

4.2.3 Cálculo de la muestra

Siguiendo la planificación de la sección anterior y de acuerdo al proceso de muestreo aleatorio simple, se puede determinar el tamaño de la muestra a partir del conocimiento del conjunto universo mediante la siguiente ecuación 1:

$$n = \frac{\lambda_{\alpha}^2 * N * P * Q}{e^2(N - 1) + \lambda_{\alpha}^2 * P * Q} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

λ_{α} = nivel de confianza

N = población

P = probabilidad de éxito o proporción esperada

Q = probabilidad de fracaso

e = precisión o error máximo admisible

Anteriormente, se encontró que la población universal consiste de 248.5 niños, por lo que se aproximara al inmediato superior y se tiene que $N = 249$. Claramente, el nivel de confianza en el resultado del muestreo se espera que sea el más alto posible, sin embargo, siempre se incorpora errores en el proceso de medición, por lo que para este caso se puede plantear que $\lambda_{\alpha} = 98\%$, por lo tanto, $\lambda_{\alpha}^2 = 2.33$. La probabilidad de éxito en el proceso de selección de muestras se espera que sea totalmente aleatorio e independiente cada una de ellas por lo que de acuerdo a (Baltazar, 2011) se elige $P = 0.5$ que además permite maximizar el tamaño de la muestra; en consecuencia, también $Q = 0.5$. Para finalizar y según (Pérez, 2005) la precisión o nivel máximo admisible para el error que pueda cometerse varía entre el 1% al 5% siendo una característica que complementa al nivel de confianza, por lo que se toma $e = 2\%$ para este caso.

Incorporando todas estas consideraciones se puede obtener el siguiente resultado para el número de muestra que se tomara de la población:

$$n = \frac{2.33 * 249 * 0.5 * 0.5}{(0.02 * 248) + 2.33 * 0.5 * 0.5} = 27.56 \cong 28 \text{ niños} \quad \text{Ecuación 6}$$

De acuerdo al proceso de muestreo aleatorio por conglomerados, podemos subdividir al conjunto universal de estudio en subconjuntos de edad por cada año desde los 7 a los 11, tal como se encuentra planteado en plan inicial, es decir, se tienen 5 subconjuntos que mediante una regla de tres se les puede asignar un 20% de elementos muestrales a cada uno, lo cual indica que por cada año de edad se deben utilizar 5.2 niños o 5 niños para la evaluación del proyecto implementado.

4.3. Métricas de eficiencia en las huellas físicas para pruebas de Validación

La toma de las muestras y la determinación del índice en la huella impresa físicamente se procede de la misma forma que en la sección 4.2, de la misma manera, sabiendo que los

procesos físicos que generan error en la medida son los mismos que los ya analizados en la misma sección anterior, se tomara el 18.7% calculado como porcentaje de error de precisión y gracias a ello se puede presentar la siguiente tabla 15 con las medidas físicas y los límites máximos y mínimos que genera dicho error.

Tabla 16

Índice Hernández Corvo en las pruebas de Validación

CI_Paciente	Índice Iz			Índice Dr		
	Min	Medido	Max	Min	Medido	Max
1050516267	51,55	63,41	75,27	51,14	62,9	74,6623
1050585494	43,33	53,30	63,27	39,19	48,2	57,2134
1050538899	41,79	51,4	61,01	46,91	57,7	68,4899
1050547387	28,62	35,2	41,78	17,64	21,7	25,7579
1050542073	49,87	61,34	72,81	52,21	64,22	76,22914
1050525656	50,00	61,5	73,00	49,11	60,4	71,6948
1050490158	40,96	50,38	59,80	35,53	43,7	51,8719
1050505468	58,78	72,3	85,82	53,74	66,1	78,4607
1050505039	43,33	53,3	63,27	50,08	61,6	73,1192
1050515194	23,01	28,3	33,59	16,37	20,14	23,90618
1050507969	16,75	20,6	24,45	26,67	32,8	38,9336
1050335429	43,11	53,03	62,95	43,24	53,19	63,13653
1050201480	51,38	63,2	75,02	53,5	65,8	78,1046
1050249661	52,68	64,8	76,92	52,68	64,8	76,9176
1050530920	61,12	75,18	89,24	52,52	64,6	76,6802
1050070885	49,92	61,4	72,88	54,96	67,6	80,2412
1050336229	26,02	32	37,98	23,58	29	34,423
1050070562	57,72	71	84,28	23,58	29	34,423
1005381056	42,41	52,17	61,93	43,9	54	64,098
1005134133	57,72	71	84,28	50,61	62,25	73,89075
1005343874	50,81	62,5	74,19	52,76	64,9	77,0363
1004925747	43,09	53	62,91	37,4	46	54,602
1005258890	52,60	64,7	76,80	49,25	60,58	71,90846
1050156171	43,70	53,75	63,80	49,76	61,2	72,6444
1005296072	56,50	69,5	82,50	49,11	60,4	71,6948

1004894224	50,49	62,1	73,71	52,36	64,4	76,4428
1050538618	33,09	40,7	48,31	31,54	38,8	46,0556
1050140175	35,53	43,7	51,87	35,61	43,8	51,9906

Fuente: Autoría.

4.3.1. Tasa de error en huellas digitales para pruebas de Validación

Siguiendo el mismo razonamiento que en la sección 4.1.3, a continuación, en la tabla 17 se presentan los resultados de medida digital de las huellas de los niños enlistados previamente en la tabla anterior.

Tabla 17

Índices H-C de huellas digitales

ID_Reg	CI_Paciente	índice Iz	índice Dr
1	1050516267	63,9	62,7
2	1050585494	57,2	54,4
3	1050538899	47,0	57,9
4	1050547387	35,2	25,4
5	1050542073	52,5	75,8
6	1050525656	73,4	65,9
7	1050490158	42,4	51,7
8	1050505468	63,0	68,3
9	1050505039	63,1	63,7
10	1050515194	25,2	21,8
11	1050507969	23,4	31,4
12	1050335429	49,5	56,8
13	1050201480	66,8	58,2
14	1050249661	65,7	54,9
15	1050530920	73,4	62,2
16	1050070885	71,9	56,6
17	1050336229	30,7	27,8
18	1050070562	49,2	51,1
19	1005381056	52,5	63,2
20	1005134133	60,2	65,6
21	1005343874	68,9	77,2

22	1004925747	60,9	47,8
23	1005258890	69,8	76,8
24	1050156171	45,5	51,9
25	1005296072	74,1	52,6
26	1004894224	65,9	71,6
27	1050538618	39,0	33,7
28	1050140175	47,1	37,1

Fuente: Autoría.

Como resultados destacables en la tabla 17 se puede observar que, de 28 elementos seleccionados al azar, dos de ellos (el 18 y 23 de la lista) se encuentran fuera del rango establecido por el análisis de precisión de la sección previa, constituyendo, así como error cometido en el proceso de medición de la huella digital representando un 7.14% del total de muestras. Significa además que el dispositivo cumple con un 92.86% de eficiencia.

4.4. Discusión de resultados

En la actualidad se han desarrollado una gran cantidad de algoritmos basados en inteligencia artificial, desde una neurona artificial hasta una red compleja de ellas, permitiendo proporcionar mejores resultados en el momento de ponerlos a prueba, sin embargo, cada uno de ellos están orientados a diferentes propósitos, por lo que es necesario elegir adecuadamente el que más se apegue a la realidad a la que se quiera aplicar.

En primera instancia se realizó una fase de pruebas, con el fin de calibrar la posición de sensores y analizar posibles errores al momento de la toma de las muestras. Dichas evaluaciones se realizaron a un grupo de niños de forma totalmente aleatoria sin ningún tipo de procedimiento estadístico enfocado a su edad, género o zona; de las cuales se obtuvo una eficiencia del 92%. Mientras que, al seleccionar estadísticamente una población de una zona específica con su muestra correspondiente, su eficiencia se incrementó al 92.86% permitiendo reflejar un resultado mucho más acorde con el dispositivo.

En el segundo grupo de evaluación se pudieron obtener los siguientes resultados diagnósticos en base a los índices físicos y digitales mostrados en la tabla 18 expuesta a continuación.

Tabla 18

Resultados diagnósticos por precisión de medidas – validación

CI_Paciente	índice Iz				índice Dr			
	Digital	Físico	Promedio	Diagnostico	Digital	Físico	Promedio	Diagnostico
1050516267	63,9	63,41	63,66	Cavo	62,7	62,9	62,79	Cavo
1050585494	57,2	53,30	55,23	Cavo Normal	54,4	48,2	51,30	Cavo Normal
1050538899	47,0	51,4	49,18	Cavo Normal	57,9	57,7	57,79	Cavo Normal
1050547387	35,2	35,2	35,20	Plano Normal	25,4	21,7	23,56	Plano
1050542073	52,5	61,34	56,90	Cavo Normal	75,8	64,22	70,00	Cavo
1050525656	73,4	61,5	67,44	Cavo	65,9	60,4	63,13	Cavo
1050490158	42,4	50,38	46,38	Cavo Normal	51,7	43,7	47,71	Cavo Normal
1050505468	63,0	72,3	67,65	Cavo	68,3	66,1	67,21	Cavo
1050505039	63,1	53,3	58,21	Cavo Normal	63,7	61,6	62,67	Cavo
1050515194	25,2	28,3	26,75	Plano	21,8	20,14	20,97	Plano
1050507969	23,4	20,6	21,99	Plano	31,4	32,8	32,10	Plano
1050335429	49,5	53,03	51,27	Cavo Normal	56,8	53,19	54,99	Cavo Normal
1050201480	66,8	63,2	65,01	Cavo	58,2	65,8	62,02	Cavo
1050249661	65,7	64,8	65,25	Cavo	54,9	64,8	59,87	Cavo
1050530920	73,4	75,18	74,29	Cavo	62,2	64,6	63,39	Cavo
1050070885	71,9	61,4	66,63	Cavo	56,6	67,6	62,08	Cavo
1050336229	30,7	32	31,36	Plano	27,8	29	28,38	Plano
1050070562	49,2	71	60,10	Cavo	51,1	29	40,05	Normal
1005381056	52,5	52,17	52,34	Cavo Normal	63,2	54	58,58	Cavo Normal
1005134133	60,2	71	65,62	Cavo	65,6	62,25	63,92	Cavo
1005343874	68,9	62,5	65,70	Cavo	77,2	64,9	71,06	Cavo Fuerte
1004925747	60,9	53	56,97	Cavo Normal	47,8	46	46,91	Cavo Normal
1005258890	69,8	64,7	67,25	Cavo	76,8	60,58	68,69	Cavo
1050156171	45,5	53,75	49,63	Cavo Normal	51,9	61,2	56,55	Cavo Normal
1005296072	74,1	69,5	71,81	Cavo	52,6	60,4	56,52	Cavo Normal
1004894224	65,9	62,1	64,01	Cavo	71,6	64,4	68,01	Cavo
1050538618	39,0	40,7	39,83	Normal	33,7	38,8	36,23	Plano Normal
1050140175	47,1	43,7	45,41	Normal	37,1	43,8	40,43	Normal

Fuente: Autoría.

Los resultados de esta segunda evaluación son congruentes entre sí, proporcionando un resultado en ambos pies, ya sea similar o cercano.

4.5. Análisis de costos

El proyecto hace uso de diferentes tipos de materiales que se pueden presentar como sensores, elementos electrónicos y de oficina, de acuerdo a las siguientes tablas 19, 20 y 21. Sus costos se encuentran descritos en dólares americanos (USD).

Tabla 19

Costos de Hardware

Hardware	Descripción	Cantidad	Costo Real	Costo Actual
Sensor de presión	FSR402	16	197,00	197,00
Resistencias	R	32	2,00	2,00
Amplificador Operacional	A.O.	4	4,00	4,00
Multiplexor	Mux/Demux 8 canales	1	3,00	3,00
Cables	puentes	50	2,50	0,00
Arduino Uno	Rev 3	1	11,00	0,00
Raspberry	4B+ / Micro SD 32Gb	1	230,00	230,00
Placa impresa	Baqelita 8x8	1	10,00	0,00
Fuentes	Alimentación	1	6,00	6,00
Infraestructura	28x50 cm	1	50,00	50,00
Cables conectores	USB, HDMI, Alimentación	4	12,00	8,00
Costo Total			523,50	500

Fuente: Autoría.

Tabla 20*Costos de Software*

Software	Descripción	Cantidad	Costo Real	Costo Actual
Arduino	Lenguaje de programación de CI	1	0	0
Python	Lenguaje de programación	1	0	0
Office	Edición de textos	3	45	0
Debian	S.O. para la placa C.I	1	0	0
Draw.io	Generación de graficas	3	0	0
DB Browser	Gestor de Base de Datos	1	0	0
Dbeaver	Gestor de Base de Datos	1	0	0
Desarrollo	Diseño desarrollo e implementación de sistema	1	400	400
Costo Total			445	400

Fuente: Autoría.

Tabla 21*Costos de Oficina y varios*

Oficina	Descripción	Cantidad	Costo Real	Costo Actual
Laptop	Edición, Simulación, Desarrollo	1	700	0
Internet	Consultas bibliográficas	6	120	0
Documentación	Documentación del proyecto e impresión de huellas	1	20	0
Pruebas	Traslados, pintura, toallas de limpieza	1	40	40
Costo Total			880	40

Fuente: Autoría.

Finalmente, el costo total del proyecto se obtiene de la suma de los distintos costos anteriores, se obtiene que la construcción desde 0 sin ningún material del prototipo tendría un costo real de 1848,50 USD; mientras que el costo actual haciendo uso de materiales que ya se tenían a la mano es de 940,00 USD.

Conclusiones

Para la identificación de tipos de pies existen varias metodologías manuales, pero por su precisión la más usada es Hernández corvo, en la que se basó este proyecto. El cual en base al análisis de la huella plantar se puede categorizar en los 7 tipos de pisada.

El algoritmo de aprendizaje maquina K-vecinos más cercanos es el que mejor se apegó al proyecto, porque nos permite procesar imágenes y por su simplicidad pueda ser ejecutado en el Raspberry pi 4 con una buena eficiencia en el funcionamiento total del sistema. Ya que si se usan otros más robustos o se escala a algoritmos basados en inteligencia artificial requerían base de datos más grandes y mayor capacidad de procesamiento.

Mediante las pruebas realizadas al dispositivo, de sus resultados finales se obtuvo una eficiencia en el sistema del 92,86% de precisión en cuanto a la tipificación de tipos de pisada comparado con las medias obtenidas del método de Hernández Corvo; el cual, se trata de un proceso manual.

Entre los requerimientos de desarrollo del sistema se tenía el costo de su construcción, el cual fue de \$1848,50, que más bajo comparado con sistemas similares en cuánto a su funcionalidad los cuales están con un costo superior a los \$2500,00. Lo que nos permite evidenciar que es posible construir sistemas más económicos enfocados a un laboratorio de análisis de marcha y así cubrir las necesidades de terapistas o médicos para valoraciones o estudios en la población de áreas rurales.

Recomendaciones

Se recomienda realizar una extracción de la información para su posterior almacenamiento y análisis, ya que el dispositivo tiene una capacidad de almacenamiento limitado aproximadamente a 1000 registros guardados.

Es importante realizar estudios de análisis de tipo de pisada en niños a partir de los 6 años, con el fin ayudar con una detección temprana de patologías en los pies, y de esa manera evitar otras patologías a futuro.

No se debe instalar herramientas o aplicaciones que requieran de un alto procesamiento en la placa de desarrollo Raspberry Pi, debido a que afectaría sus capacidades de procesamiento en el sistema para el cual se lo está aplicando.

Para aumentar la eficacia del dispositivo se debería incrementar el número de sensores, los cuales permitirían generar una huella de pisada más precisa, además que se evitaría restricciones en cuanto al tamaño de pies.

Bibliografía

- Aguilera, J., Heredia, J., & Peña, G. (2015, abril 21). Huella plantar, biomecánica del pie y del tobillo: propuesta de valoración - Instituto Internacional de Ciencias del Ejercicio Físico y Salud. *Instituto Internacional de Ciencias del Ejercicio Físico y la Salud*. Recuperado de <https://g-se.com/huella-plantar-biomecanica-del-pie-y-del-tobillo-propuesta-de-valoracion-bp-b57cfb26db4ec3>
- Arcivar, K., Polo, J., Torres, E., Sevilla, J., & Velez Cynthia. (2010). *INVESTIGACIÓN DE LOS EQUIPOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB 6009 PARA SU IMPLEMENTACIÓN Y USO EN LOS LABORATORIOS DE TELECOMUNICACIONES DE LA FET DE UCSG*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL, Guayaquil.
- Arcos, E. (2015). *Análisis de la competitividad y tecnificación de la industria del calzado en el Ecuador*. (UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO). Recuperado de <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/4862/1/120707.pdf>
- Arias, Á. (2015). *Aprende a Programar en Python* (2º Edición; IT Campus Academy, Ed.). Recuperado de https://books.google.es/books?id=oO_LCgAAQBAJ&dq=que+es+python&lr=&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Arrow Electronics. (2018). Las mejores diez placas de desarrollo de 2018. Recuperado el 16 de mayo de 2021, de <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/videos/the-top-10-development-platforms-dev-kits-2018>
- Baltazar, R. (2011). *POBLACION Y MUESTRA METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION* (UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO). Recuperado de <https://docplayer.es/74602132-Poblacion-y-muestra-metodologia-de-la-investigacion-alumno-ronal-baltazar-pari-mamani-docente-econ-octavio-perez-choque.html>
- Bastidas, R., & Torres, V. (2011). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS CON COMUNICACIÓN ETHERNET*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, QUITO.
- Batalla, J. (2017, febrero 8). Running: guía práctica para reconocer la pisada y evitar lesiones - Infobae. Recuperado el 23 de marzo de 2020, de <https://www.infobae.com/salud/fitness/2017/02/08/running-guia-practica-para-reconocer-la-pisada-y-evitar-lesiones/>
- Cáceres Zoraya. (2014, agosto). Tipificación de la huella plantar de escolares entre 6 y 8 años de edad de población urbana del municipio de Pamplona. *Academia.edu*, 48–49. Recuperado de https://www.academia.edu/37337432/TIPIFICACIÓN_DE_LA_HUELLA_PLANTAR_DE_ESCOLARES_ENTRE_6_Y_8_AÑOS_DE_EDAD_DE_POBLACIÓN_URBANA_DEL_MUNICIPIO_DE_PAMPLONA
- Campos, A., & Luna, K. (2018). *Incidencia de pie plano y cavo en estudiantes de tercero A séptimo grado de la escuela “Tomás Rendón”*.
- Carreño, J., & Cabrera, P. (2014). *Diseño e implementación de un sistema de análisis de las presiones plantares en estática basado en procesamiento de imágenes*. <https://doi.org/10.1016/j.jmig.2016.10.020>

- Carrillo, A. (2015). POBLACIÓN Y MUESTRA . *UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO ESCUELA PREPARATORIA TEXCOCO*.
- Chacua, B. (2019). *Diseño de un sistema prototipo de reconocimiento facial para la identificación de personas en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA) de la Universidad Técnica del Norte utilizando técnicas de Inteligencia Artificial*.
- Charcot, M. (2015, enero). Pie cavo (Charcot Marie Tooth). Recuperado el 2 de noviembre de 2022, de Clínica Las Condes website: <https://www.clinicalascondes.cl/CENTROS-Y-ESPECIALIDADES/Centros/pieytobillo/otras-patologias/pie-cavo>
- Choquehuanca, M. (2019). *DISEÑO Y ELABORACIÓN DE UN RESISTIVÍMETRO PARA PROSPECCIÓN ELÉCTRICA DE RESISTIVIDAD*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA , Perú.
- Clínica, E. (2018, noviembre 14). Estudio de la pisada del pie: ¿por qué hacer uno a tu hijo? | Clínica Eliana. Recuperado el 26 de enero de 2021, de Salud infantil website: <https://clinicaeliana.com/blog/hacer-hijo-estudio-de-la-pisada-del-pie/>
- Coloma, B. (2015). *Diseño y construcción de un sistema de enfoque y adquisición de imágenes para un Microscopio Óptico* (Quito : EPN, 2015.). Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9249>
- Cruz, M. (2020). *IMPLEMENTACIÓN DE CIRCUITOS PROGRAMABLES CON MICROCONTROLADORES MEDIANTE TARJETA RASPBERRY PI PARA PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA, DE LA CARRERA INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN Y REDES*. UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ , Jipijapa.
- DAMYSUS NET S.L. (2022, mayo 30). Cargador huawei g7 ascend. Recuperado el 1 de noviembre de 2022, de cargador.pro website: <https://www.cargador.pro/aviso-legal>
- Dataprix. (2010, marzo 10). 2.6.4 Bases de Datos Orientadas a Objetos (BDOO) . Recuperado el 20 de mayo de 2021, de <https://www.dataprix.com/es/mineria-datos-aplicada-encuesta-permanente-hogares/264-bases-datos-orientadas-objetos-bdoo>
- Dewesoft. (2020, enero 24). Qué es Adquisición de Datos - DAQ or DAS? Recuperado el 1 de octubre de 2020, de <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-adquisicion-de-datos>
- Domínguez, L. (2007). *Diseño y construcción de un podómetro*.
- Dot CSV. (2019, junio 18). Aprende a PROGRAMAR una RED NEURONAL - Tensorflow, Keras, Sklearn - YouTube. Recuperado el 1 de noviembre de 2022, de <https://www.youtube.com/watch?v=qTNUbPkR2ao>
- Electronics Interlink. (2013). *Electrónica de Interlink*.
- F-Scan System. (s/f). Recuperado el 1 de mayo de 2020, de Tekscan website: <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/f-scan-system>
- Felipe. (2021, octubre 1). SQLite: ventajas y desventajas. Recuperado el 1 de noviembre de 2022, de HostingPlus website: <https://www.hostingplus.cl/blog/sqlite-ventajas-y-desventajas/>
- Fernández, D., & Arcas, C. (2017). Pie Cavo . Recuperado el 3 de noviembre de 2022, de Clínica del Pie Embajadores website: <https://clinicadelpieembajadores.com/nuestros->

tratamientos/biomecanica-y-podologia-deportiva/pie-cavo/

- Ferretrónica. (2022). Multiplexor Demultiplexor Analogo 16 Canales CD74HC4067. Recuperado el 31 de mayo de 2022, de <https://ferretronica.com/products/multiplexor-demultiplexor-analogo-16-canales-cd74hc4067>
- Forero, N. (2012). Normas de Comunicación en Serie: RS-232, RS-422 y RS-485. *INGENIO LIBRE*, 86–93. Recuperado de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39953103/Normas_deComunicacion_en_Serie_RS-232__422__485.pdf?1447383504=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DNormas_de_Comunicacion_en_Serie_RS_232_4.pdf&Expires=1620024261&Signature=RJ7nWCXt5DtnfK0nieO~qGKZqONU5QRpQc40J5-96RkTQMpTFT-CeJB99W-1tZCEuwq8Cb4Bv1XHu-aFgPm~KoyVGoqG-L0IEHJbnIQE7B~gboIjx04JwJE9CXoo-NCAX46XH8SnZAJ9OvgTB0VtRLvcO~mgPQc160BQaWHIJz3SsBqJRopc3cYGnGStj1191Ku3PcpBdn9tSYLYTXWxYTEhd1kXhu5a8YYipyJYo4XH2VFUKYnMK35okYH~rjpaNjh4EFBl0DhqRZUKZYLt8NhgFFOer2skL-2PY49VqesEf4iZESyobObqa0IFyoZzGzEiJvDfUO169FkX2Xw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Fuentes, E. (2019). *Sistema electrónico de detección de problemas en pisada mediante algoritmos de aprendizaje de máquina*.
- GADMAA. (2015, julio 15). Población – Antonio Ante. Recuperado el 1 de noviembre de 2022, de G.A.D. Municipal Antonio Ante website: <https://antonioante.gob.ec/AntonioAnte/poblacion/>
- Gudiño, M. (2017, diciembre 22). Arduino Uno vs. Mega vs. Micro. Recuperado el 2 de noviembre de 2022, de Arrow website: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/arduino-uno-vs-mega-vs-micro>
- Guerra, A., & Montes, E. (2014). *Diseño e implementación de un sistema de baropodometría electrónica para niños*.
- Haro, D. M. (2016, diciembre 14). Laboratorio de Análisis de Marcha y Movimiento de Clínica Las Condes. Recuperado el 3 de noviembre de 2022, de Clínica Las Condes website: <https://www.clinicalascondes.cl/BLOG/Listado/Fisioterapia/Laboratorio-Analisis-Marcha-Movimiento-CLC>
- Haro, M. (2014). *Laboratorio de análisis de marcha y movimiento*. 25(2), 237–247.
- HBM. (2021). ¿Qué es un acondicionador de señal? Recuperado el 13 de mayo de 2021, de <https://www.hbm.com/es/7339/que-es-un-acondicionador-de-senal-funciones/>
- INCIBE. (2018, febrero 8). Introducción a los sistemas embebidos. Recuperado el 15 de mayo de 2021, de <https://www.incibe-cert.es/blog/introduccion-los-sistemas-embebidos>
- INEC. (2010, noviembre 28). Población y Demografía. Recuperado el 2 de noviembre de 2022, de Instituto nacional de estadística y censos website: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- INEN. (2013). ETIQUETADO DE CALZADO. *REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 080:2013*, 1. Recuperado de [https://www.aenor.com/INSEPECCINPDF/RTE INEN 080.Etiquetado calzado.pdf](https://www.aenor.com/INSEPECCINPDF/RTE%20INEN%20080.Etiquetado%20calzado.pdf)
- IngenieríaMecafenix. (2018, julio 3). Sensor piezoeléctrico (efecto piezoeléctrico) -

- Ingeniería Mecafenix. Recuperado el 28 de abril de 2021, de <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensor-piezoelectrico/>
- Kapandji, A. I. (2012). *Kapandji AI -Fisiología Articular 2 - Miembro Inferior Parte 4 de 4.pdf* (M. Panamericana, Ed.).
- Landázuri, N. (2017). *Prevalencia de Poliglobulia mediante la determinación de Biometría Hemática en el Cantón Ibarra 2016*. (UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE). Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7010/1/06 ENF 832 TRABAJO DE GRADO.pdf>
- Lara Diéguez, S., Jesús, A., Sánchez, L., Luisa, M., Sánchez, Z., & Martínez-López, E. J. (2011). *Análisis de los diferentes métodos de evaluación de la huella plantar Analysis of different methods to evaluate the footprint*. 19, 49–53. Recuperado de www.retos.org
- León, F. (2021). Arduino o raspberry Pi ¿Cual usar? Diferencias. Recuperado el 17 de noviembre de 2022, de DynamoElectronics website: <https://dynamoelectronics.com/arduino-o-raspberry-pi-cual-usar-diferencias/>
- López, D. (2010). Pie cavo. Recuperado el 1 de noviembre de 2022, de Obtenido de doctorlopezcapape website: <https://doctorlopezcapape.com/cirugia-ortopedica/pie-cavo>
- Manrique, F. (2004). *Monografía sobre métodos de recolección de datos* (Universidad de Carabobo). Recuperado de <https://studylib.es/doc/3284113/monografia-sobre-metodos-de-recoleccion-de-datos>
- Marino, L., González, Y., González, C., & Rupcich, M. (2013). Propuesta de modelo multisegmento del pie para el análisis de marcha. *Revista - Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela*, 28(2), 13–27. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652013000400015
- Martínez, G. (2009). Pie plano en la infancia y adolescencia. Conceptos actuales . *Revista Mexicana de ORTOPEdia PEDIÁTRICA*, 11, 5–13. Recuperado de <https://www.medigraphic.com/pdfs/opediatria/op-2009/op091b.pdf>
- MikroElektronika. (2021). 1.1 Introducción al Mundo de los microcontroladores. Recuperado el 16 de mayo de 2021, de ebooks website: <https://www.mikroe.com/ebooks/microcontroladores-pic-programacion-en-basic/introduccion-al-mundo-de-los-microcontroladores>
- Monrroy, S. (2018). *Capítulo dos: Anatomía de la pierna humana*.
- Montoya-Leal, V., & Pérez, V. Z. (2016). Valoración cuantitativa para la reincorporación ocupacional. *Salud Uninorte*, 32(2), 319–336. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/817/81748361013.pdf>
- Obermeyer, Z., & Emanuel, E. J. (2016, septiembre 29). Predicting the future-big data, machine learning, and clinical medicine. *New England Journal of Medicine*, 375(13), 1216–1219. <https://doi.org/10.1056/NEJMp1606181>
- Pacheco L. (2016). *“Creación de un Videojuego en Lenguaje Processing” Memoria para optar al título de Pintor*. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/145095/creacion-de-un-videojuego.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pedregosa, F., Michel, V., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., ... Duchesnay,

- É. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python . *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830. Recuperado de <http://scikit-learn.sourceforge.net>.
- Perales, M., Barrero, F., & Toral, S. Análisis comparativo de distintas plataformas para la enseñanza de Sistemas Electronicos Digitales. , Getting Started with the MSP430 Launchpad § (2016).
- Pérez, C. (2005). Muestreo estadístico conceptos y problemas resueltos. En Pearson-Prentice Hall (Ed.), *Prentice Práctica53207*. Madrid: Madrid, etc. .
- Powell-Morse, A. (2016, diciembre 15). Iterative Model: What Is It And When Should You Use It? Recuperado el 9 de julio de 2020, de Airbrake Enterprise website: <https://airbrake.io/blog/sdlc/iterative-model>
- Puratich, L. (2011, mayo 29). Podología: Pie Normal, Pie Plano, Pie Cavo. Recuperado el 2 de noviembre de 2022, de Productos y Servicios para tus pies y cuerpo website: <https://productosyserviciosparatuspiesycuerpo.blogspot.com/2011/05/podologia-pie-normal-pie-plano-pie-cavo.html>
- Raffino, M. (2020, junio 24). Base de Datos . Recuperado el 19 de mayo de 2021, de <https://concepto.de/base-de-datos/>
- Ramos, D., Noriega, R., Laínez, J., & Durango Alicia. (2017). *Curso de Ingeniería de Software* (2ª Edición; IT Campus Academy, Ed.). Recuperado de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=G2Q4DgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA71&dq=ingenieria+de+software&ots=wkuXiJNMvh&sig=821-ybqPq0f6p1fYZVd5x24MNMA#v=onepage&q&f=false>
- Recuero de los Santos, P. (2017, noviembre 16). Tipos de aprendizaje en Machine Learning: supervisado y no supervisado. Recuperado el 17 de mayo de 2021, de Think Big website: <https://empresas.blogthinkbig.com/que-algoritmo-elegir-en-ml-aprendizaje/>
- Reinoso, Ó., Jiménez Luis, Payá Luis, Gil Arturo, & Peidró Adrián. (2018). *MATLAB: conceptos básicos y descripción gráfica*. Recuperado de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ioVxDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR8&dq=que+es+matlab&ots=G3h4r_eoVn&sig=hiJLCoxw47Lq7af3b9K22gF6O18#v=onepage&q=que+es+matlab&f=false
- Reiriz, J. (2015, mayo 26). Sistema locomotor. Recuperado el 14 de marzo de 2020, de Infermera virtual website: <https://www.infermeravirtual.com/files/media/file/96/SistemaLocomotor.pdf?1358605377>
- Rodríguez, M. (2018). *Aplicación de técnicas de machine learning a la detección de ataques*. Manuel.
- Ronald, J. (2019, septiembre 26). Qual seu tipo de pisada: neutra, pronada ou supinada? *quinta-feira*. Recuperado de <https://rsaude.com.br/campina-grande/materia/qual-seu-tipo-de-pisada-neutra-pronada-ou-supinada/19952>
- Sánchez, C. (2017). Caracterización Morfológica del Arco Plantar Longitudinal Medial del Pie en una Población Chilena. *021687SR_OP*, 85–91. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ijmorphol/v35n1/art15.pdf>
- Tecnología para los negocios. (s/f). Infraestructuras (I) Redes Inalámbricas: Capítulo 11 | Guía de Industria 4.0. Recuperado el 8 de mayo de 2021, de <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la->

- Terán, B. (2019). *Diseño y construcción de un sistema baropodómetro electrónico con interfaz gráfica*.
- Veletanga, J. (2018, julio 19). Médicos elaboran primeras curvas de crecimiento adaptadas a la población ecuatoriana. Recuperado el 3 de diciembre de 2020, de ediciónmédica website: <https://www.edicionmedica.ec/secciones/profesionales/m-dicos-ecuatorianos-elaboran-los-primeros-referentes-nacionales-de-crecimiento-para-ni-os--92534>
- Victoria, M., Mateos, G., & López, P. P. (2016). *Analysis of the footprint in school age of 8-10 years old*. 10, 70–84.
- Yarbi, H. (2020, octubre 13). Ventajas de usar SQLite en una aplicación. Recuperado el 1 de noviembre de 2022, de Mira y Hazlo website: <https://mirayhazlo.com/ventajas-de-usar-sqlite-en-una-aplicacion/>

Anexos

Anexo 1. Hoja de especificaciones del sensor FSR 402.



INTERLINK
ELECTRONICS
Sensor Technologies

FSR 402 Data Sheet

FSR 400 Series Round Force Sensing Resistor

Features and Benefits:

- Actuation Force as low as 0.1N and sensitivity range to 10N.
- Easily customizable to a wide range of sizes
- Highly Repeatable Force Reading; As low as 2% of Initial reading with repeatable actuation system.
- Cost effective
- Ultra thin; 0.45mm
- Robust; up to 10M actuations
- Simple and easy to integrate

Industry Segments

- Game controllers
- Musical Instruments
- Medical device controls
- Remote controls
- Navigation Electronics
- Industrial HMI
- Automotive Panels
- Consumer Electronics

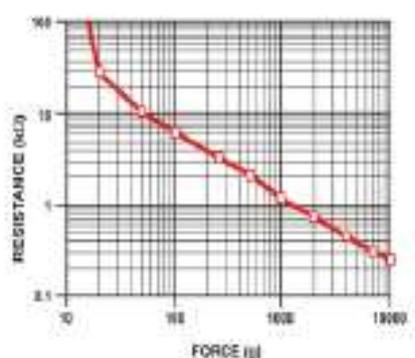
Description

Interlink Electronics FSR™ 400 series is part of the single zone Force Sensing Resistor™ family. Force Sensing Resistors, or FSRs, are robust polymer thick film (PTF) devices that exhibit a decrease in resistance with increase in force applied to the surface of the sensor. This force sensitivity is optimized for use in human touch control of electronic devices such as automotive electronics, medical systems, and in industrial and robotics applications.

The standard 402 sensor is a round sensor 18.28 mm in diameter. Custom sensors can be manufactured in sizes ranging from 5mm to over 600mm. Female connector and short tail versions can also be ordered.

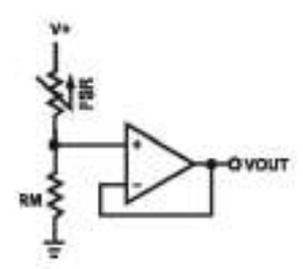


Figure 1 - Force Curve



Force (N)	Resistance (ohms)
10	10000
20	5000
50	2000
100	1000
200	500
500	200
1000	100
2000	50

Figure 2 - Schematic



Applications

Detect & qualify press

Sense whether a touch is accidental or intended by reading force

Use force for UI feedback

Detect more or less user force to make a more intuitive interface

Enhance tool safety

Differentiate a grip from a touch as a safety lock

Find centroid of force

Use multiple sensors to determine centroid of force

Detect presence, position, or motion

Of a person or patient in a bed, chair, or medical device

Detect liquid blockage

Detect tube or pump occlusion or blockage by measuring back pressure

Detect proper tube positioning

Many other force measurement applications

Device Characteristics

Feature	Condition	Value*	Notes
Actuation Force		0.1 Newtons	
Force Sensitivity Range		0.1 - 10.0 ² Newtons	
Force Repeatability ²	(Single part)	+2%	
Force Resolution ²		continuous	
Force Repeatability ²	(Part to Part)	+6%	
Non-Actuated Resistance		10M Ω	
Size		18.28mm diameter	
Thickness Range		0.2 - 1.25 mm	
Stand-Off Resistance		>10M ohms	Unloaded, unbrd
Switch Travel	(Typical)	0.05 mm	Depends on design
Hysteresis ²		+10%	$(R_{10} - R_1)/R_{10}$
Device Rise Time		<3 microseconds	measured w/stepped bell
Long Term Drift		<5% per log ₁₀ (time)	35 days test, 1kg load
Temp Operating Range	(Recommended)	-30 - +70 °C	
Number of Actuations	(Life time)	10 Million tested	Without failure

* Specifications are derived from measurements taken at 1000 grams, and are given as one standard deviation / mean, unless otherwise noted.

1. Max Actuation force can be modified in custom sensors.
2. Force Range can be increased in custom sensors. Interlink Electronics have designed and manufactured sensors with operating force larger than 50Kg.
3. Force sensitivity dependent on mechanics, and resolution depends on measurement electronics.

Contact Us

United States Corporate Offices

Interlink Electronics, Inc.
546 Flynn Road
Camarillo, CA 93012, USA
Phone: +1-805-484-8855
Fax: +1-805-484-9457
Web: www.
interlinkelectronics.com
Sales and support:
fsr@interlinkelectronics.com

Japan

Japan Sales Office
Phone: +81-45-263-6500
Fax: +81-45-263-6501
Web: www.interlinkelec.co.jp

Korea

Korea Sales Office
Phone: +82 10 8776 1972

Application Information

FSRs are two-wire devices with a resistance that depends on applied force.

For specific application needs please contact Interlink Electronics support team. An integration guide is also available.

For a simple force-to-voltage conversion, the FSR device is tied to a measuring resistor in a voltage divider configuration (see Figure 3). The output is described by the equation:

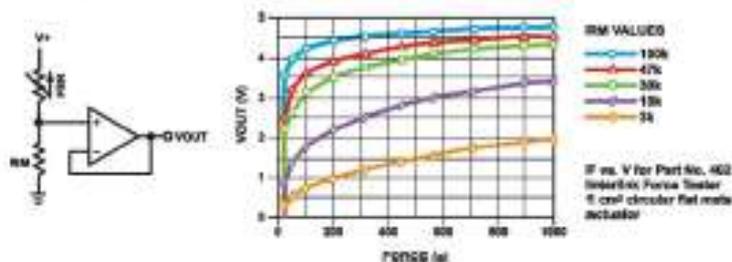
$$V_{OUT} = \frac{R_M V_+}{(R_M + R_{FSR})}$$

In the shown configuration, the output voltage increases with increasing force. If R_{FSR} and R_M are swapped, the output swing will decrease with increasing force.

The measuring resistor, R_M , is chosen to maximize the desired force sensitivity range and to limit current. Depending on the impedance requirements of the measuring circuit, the voltage divider could be followed by an op-amp.

A family of force vs. V_{OUT} curves is shown on the graph below for a standard FSR in a voltage divider configuration with various R_M resistors. A (V_+) of +5V was used for these examples.

Figure 3



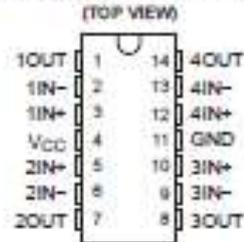
Anexo 2. Hoja de especificaciones del amplificador operacional LM324N.

LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V, LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS

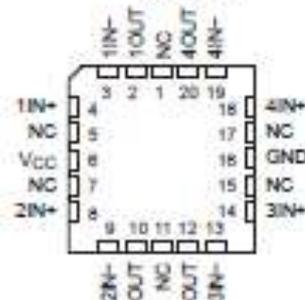
DS020608 - SEPTEMBER 1975 - REVISED JANUARY 2005

- 2-kV ESD Protection for:
 - LM224K, LM224KA
 - LM324K, LM324KA
 - LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV
- Wide Supply Ranges
 - Single Supply ... 3 V to 32 V (26 V for LM2902)
 - Dual Supplies ... ± 1.5 V to ± 16 V (± 13 V for LM2902)
- Low Supply-Current Drain Independent of Supply Voltage ... 0.8 mA Typ
- Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground, Allowing Direct Sensing Near Ground
- Low Input Bias and Offset Parameters
 - Input Offset Voltage ... 3 mV Typ
A Versions ... 2 mV Typ
 - Input Offset Current ... 2 nA Typ
 - Input Bias Current ... 20 nA Typ
A Versions ... 15 nA Typ
- Differential Input Voltage Range Equal to Maximum-Rated Supply Voltage ... 32 V (26 V for LM2902)
- Open-Loop Differential Voltage Amplification ... 100 V/mV Typ
- Internal Frequency Compensation

LM124 ... D, J, OR W PACKAGE
LM124A ... J PACKAGE
LM224, LM224A, LM224K, LM224KA ... D OR N PACKAGE
LM324, LM324K ... D, N, NS, OR PW PACKAGE
LM324A ... D, DB, N, NS, OR PW PACKAGE
LM324KA ... D, N, NS, OR PW PACKAGE
LM2902 ... D, N, NS, OR PW PACKAGE
LM2902K ... D, DB, N, NS, OR PW PACKAGE
LM2902KV, LM2902KAV ... D OR PW PACKAGE



LM124, LM124A ... FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC = No Internal Connection

description/ordering information

These devices consist of four independent high-gain frequency-compensated operational amplifiers that are designed specifically to operate from a single supply over a wide range of voltages. Operation from split supplies also is possible if the difference between the two supplies is 3 V to 32 V (3 V to 26 V for the LM2902), and V_{CC} is at least 1.5 V more positive than the input common-mode voltage. The low supply-current drain is independent of the magnitude of the supply voltage.

Applications include transducer amplifiers, dc amplification blocks, and all the conventional operational-amplifier circuits that now can be more easily implemented in single-supply-voltage systems. For example, the LM124 can be operated directly from the standard 5-V supply that is used in digital systems and provides the required interface electronics, without requiring additional ± 15 -V supplies.

PRODUCTION DATA: This data is for production use only. For production use, see the data sheet for the specific device. For the full range of Texas Instruments products, visit our website at www.ti.com. For more information on our products, visit our website at www.ti.com. For more information on our products, visit our website at www.ti.com. For more information on our products, visit our website at www.ti.com.

 **TEXAS
INSTRUMENTS**
POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2004, Texas Instruments Incorporated
This product may be used in any system without restriction, provided that the user agrees to indemnify and hold Texas Instruments harmless for any claims, damages, or losses, including reasonable attorneys' fees, arising from the use of this product in any system.

1

**LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,
LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV**
QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS
 SLOS066R - SEPTEMBER 1975 - REVISED JANUARY 2005

description/ordering information (continued)

ORDERING INFORMATION

TA	V _{omax} AT 25°C	MAX TESTED V _{CC}	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 70°C	7 mV	30 V	PDIP (N)	Tube of 25	LM324N	LM324N
						LM324KN
			SOIC (D)	Tube of 50	LM324D	LM324
				Reel of 2500	LM324DR	
				Tube of 50	LM324KD	LM324K
				Reel of 2500	LM324KDR	
			SOP (NS)	Reel of 2000	LM324NSR	LM324
				Tube of 50	LM324NS	LM324K
			TSSOP (PW)	Reel of 2000	LM324NSR	
				Tube of 90	LM324PW	
				Reel of 2000	LM324PWR	1.324
				Tube of 90	LM324KPW	1.324K
	Reel of 2000	LM324KPWR				
	3 mV	30 V	PDIP (N)	Tube of 25	LM324AN	LM324AN
				Tube of 25	LM324KAN	LM324KAN
			SOIC (D)	Tube of 50	LM324AD	LM324A
				Reel of 2500	LM324ADR	
				Tube of 50	LM324KAD	LM324KA
				Reel of 2500	LM324KADR	
			SOP (NS)	Reel of 2000	LM324ANSR	LM324A
				Tube of 50	LM324ANS	LM324KA
			TSSOP (PW)	Reel of 2000	LM324ANSR	
				Tube of 90	LM324APW	
				Reel of 2000	LM324APWR	1.324A
Tube of 90				LM324KAPW	1.324KA	
Reel of 2000	LM324KAPWR					
-25°C to 85°C	5 mV	30 V	PDIP (N)	Tube of 25	LM224N	LM224N
						LM224KN
			SOIC (D)	Tube of 50	LM224D	LM224
				Reel of 2500	LM224DR	
				Tube of 50	LM224KD	LM224K
				Reel of 2500	LM224KDR	
	3 mV	30 V	PDIP (N)	Tube of 25	LM224AN	LM224AN
				Tube of 25	LM224KAN	LM224KAN
			SOIC (D)	Tube of 50	LM224AD	LM224A
				Reel of 2500	LM224ADR	
				Tube of 50	LM224KAD	LM224KA
				Reel of 2500	LM224KADR	

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.



POST OFFICE BOX 655503 • DALLAS, TEXAS 75265

Anexo 4. Código Arduino – Adquisición de datos

```
const int analogInPin = A0; // Entrada Analogica
const int analogOutPin = 11; // Analog output pin that the LED is attached to
int canal = 0;
int sensorValue = 0; // value read from the pot
int outputValue = 0; // value output to the PWM (analog out)
const int muxEN = 3;
const int muxS0 = 4;
const int muxS1 = 5;
const int muxS2 = 6;
const int muxS3 = 7;
int SetMuxChannel(byte channel)
{
  digitalWrite(muxS0, bitRead(channel, 0));
  digitalWrite(muxS1, bitRead(channel, 1));
  digitalWrite(muxS2, bitRead(channel, 2));
  digitalWrite(muxS3, bitRead(channel, 3));
}
void setup() {
  Serial.begin(9600); // initialize serial communications at 9600 bps:
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
}
void loop() {
  digitalWrite(muxEN, LOW); //habilitamos el multiplexor
  SetMuxChannel(canal); //habilitamos el canal pra la lectura
  sensorValue = analogRead(analogInPin); //Se lee el valor del sensor analogico
  outputValue = map(sensorValue, 0, 400, 0, 255); //Se mapean los valores a otro rango
  analogWrite(analogOutPin, outputValue); // Se envia el valor mapeado al pin analogico
  Serial.print(canal); Serial.print(",");
  Serial.println(outputValue);
  canal++;
  if(canal>=16){
    canal=0;
  }
  delay(10);
  analogWrite(analogOutPin,0);
}
```

Anexo 5. Algoritmo Interfaz gráfica GUI de Python.

```
vRoot = tk.Tk()
vRoot.title("Podómetro - Método HERNANDEZ CORVO")
vRoot.geometry("1200x650")

#####_Interfaz principal_#####
***** 1.1.- Creacion del Cuaderno (Notebook)*****
cuaderno=ttk.Notebook(vRoot,height=80,padding=[2,2,2,2])
hoja1=ttk.Frame(cuaderno)
hoja2=ttk.Frame(cuaderno)
hoja3=ttk.Frame(cuaderno)
hoja4=ttk.Frame(cuaderno)
*****
***** 1.2.- Aderir las hojas al cuaderno creado *****
cuaderno.add(hoja1,text='Portada')
cuaderno.add(hoja2,text='Usuarios')
cuaderno.add(hoja3,text='Adquisición Datos')
cuaderno.add(hoja4,text='Consultas')
*****
***** 1.3.- Fondos sobre cada hoja del cuaderno *****
bg= [PhotoImage(file = "fondoRoot6.png"),
      PhotoImage(file = "fondoRoot0.png"),
      PhotoImage(file = "MetodoHC.png")]
hoja1=tk.Label(hoja1,image=bg[0])
hoja1.pack(fill = "both", expand=True)
hoja2=tk.Label(hoja2,image=bg[1])
hoja2.pack(fill = "both", expand=True)
hoja3=tk.Label(hoja3,image=bg[1])
hoja3.pack(fill = "both", expand=True)
fondo4=tk.Label(hoja4,image=bg[1])
fondo4.pack(fill = "both", expand=True)
*****
***** 1.4.- Ventana para Nuevos Usuarios *****
def ventNewUser(tipoUser):
    if tipoUser==1:
        TITULO='Nuevo Evaluador'
        TEXTO1='Especialidad'
        TEXTO2='Institución'
    if tipoUser==2:
        TITULO='Nuevo Paciente'
        TEXTO1='Fecha de Nacimiento'
        TEXTO2='Ciudad de Nacimiento'
    ventAbrir=tk.Tk()
    ventAbrir.title(TITULO)
    ventAbrir.geometry("200x300")
    txtCI=tk.Label(ventAbrir,text='Cédula',fg="#2E4053")
    txtCI.pack(side='top',padx=10, pady=5)
    ci_User=tk.Entry(ventAbrir, width=25,fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
    ci_User.pack(side='top',padx=10, pady=5)
    txtNames=tk.Label(ventAbrir,text='Apellidos Nombres',fg="#2E4053")
    txtNames.pack(side='top',padx=10, pady=5)
    namesUser=tk.Entry(ventAbrir, width=25,fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
    namesUser.pack(side='top',padx=10, pady=5)
    txtOp1=tk.Label(ventAbrir,text=TEXTO1,fg="#2E4053")
    txtOp1.pack(side='top',padx=10, pady=5)
    op1_In=tk.Entry(ventAbrir, width=25,fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
    op1_In.pack(side='top',padx=10, pady=5)
    txtOp2=tk.Label(ventAbrir,text=TEXTO2,fg="#2E4053")
    txtOp2.pack(side='top',padx=10, pady=5)
```

```

op2_In=tk.Entry(ventAbrir, width=25,fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
op2_In.pack(side='top',padx=10, pady=5)

btnInsertUser =
tk.Button(ventAbrir,text="Añadir",command=lambda:insertEntrada(tipoUser,ci_User,namesUser,op1_In,op2_In),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnInsertUser.pack(side='bottom',padx=10, pady=15)
ventAbrir.mainloop()
#####_Objetos sobre cada hoja del Notebook_#####
# ***** Hoja 2 *****
lblBDuser=tk.LabelFrame(hoja2, text='Detalle de Usuarios')
lblBDuser.pack(side='top',padx=3, pady=5)
fondoBDuser=tk.Label(lblBDuser,image=bg[1])
fondoBDuser.pack(fill = "both", expand=True)
btnNewPaci = tk.Button(hoja2,text="Nuevo Paciente",command=lambda:ventNewUser(2),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnNewPaci.pack(side='left',padx=25, pady=5)
btnBorrarPaci = tk.Button(hoja2,text="Borrar Paciente",command=lambda:borrarEntrada(2),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnBorrarPaci.pack(side='left',padx=15, pady=5)
btnNewEval = tk.Button(hoja2,text="Nuevo Evaluador",command=lambda:ventNewUser(1),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnNewEval.pack(side='right',padx=15, pady=5)
btnBorrarEval = tk.Button(hoja2,text="Borrar Evaluador",command=lambda:borrarEntrada(1),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnBorrarEval.pack(side='right',padx=15, pady=5)
lblBuscUser=tk.LabelFrame(fondoBDuser, text='Cédula de Usuario')
lblBuscUser.pack(side='top',padx=5, pady=5)
buscUser=tk.Entry(lblBuscUser, width=25,fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
buscUser.pack(side='top',padx=10, pady=5)
btnbuscPaci = tk.Button(lblBuscUser,text="Buscar Paciente",command=lambda:buscarUser(2,buscUser),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnbuscPaci.pack(side='left',padx=10, pady=5)
btnbuscEval = tk.Button(lblBuscUser,text="Buscar Evaluador",command=lambda:buscarUser(1,buscUser),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnbuscEval.pack(side='right',padx=10, pady=5)
lblDataPaci=tk.LabelFrame(fondoBDuser, text='Pacientes')
lblDataPaci.pack(side='left',padx=5, pady=5)
tablaPaci=ttk.Treeview(lblDataPaci,height=18,columns=("CI","Nomb","Fecha_Naci","Ciudad_Naci"))
tablaPaci.pack(side='left',padx=10, pady=10)
tablaPaci.heading('#0',text= 'Nro')
tablaPaci.column("#0", width=45)
tablaPaci.heading('#1',text= 'Cédula')
tablaPaci.column("#1", width=85)
tablaPaci.heading('#2',text= 'Nombres Apellidos')
tablaPaci.column("#2", width=180)
tablaPaci.heading('#3',text= 'Fecha Nacimiento')
tablaPaci.column("#3", width=110)
tablaPaci.heading('#4',text= 'Ciudad Nacimiento')
tablaPaci.column("#4", width=110)
scrollPaci = ttk.Scrollbar(lblDataPaci, orient=tk.VERTICAL)
scrollPaci.pack(side='right', fill='y')
tablaPaci.configure(yscrollcommand=scrollPaci.set)
scrollPaci.configure(command=tablaPaci.yview)
lblDataEval= tk.LabelFrame(fondoBDuser, text='Evaluadores')
lblDataEval.pack(side='right',padx=5, pady=5)
tablaEval= ttk.Treeview(lblDataEval,height=18,columns=("CI","Nomb","Espec","Instit"))
tablaEval.pack(side='left',padx=10, pady=10)
tablaEval.heading('#0',text= 'Nro')
tablaEval.column("#0", width=45)

```

```

tablaEval.heading('#1',text= 'Cédula')
tablaEval.column("#1", width=85)
tablaEval.heading('#2',text= 'Nombres Apellidos')
tablaEval.column("#2", width=180)
tablaEval.heading('#3',text= 'Especialidad')
tablaEval.column("#3", width=110)
tablaEval.heading('#4',text= 'Institución')
tablaEval.column("#4", width=110)
scrollEval = ttk.Scrollbar(lblDataEval, orient=tk.VERTICAL)
scrollEval.pack(side='right', fill='y')
tablaEval.configure(yscrollcommand=scrollEval.set)
scrollEval.configure(command=tablaEval.yview)
# ***** Hoja 3 *****
def actualizarHoja3(IMAGEN):
    global fondo3
    global lblTapiz
    lblTapiz = tk.Label(hoja3,image=bg[1])
    lblTapiz.pack(fill = "both", expand=True)
    lblSensLect = tk.LabelFrame(lblTapiz, text='Datos Iniciales')
    lblSensLect.pack(side='top',padx=10, pady=2)
    fondo3 = tk.Label(lblTapiz,image=IMAGEN)
    fondo3.pack(padx=10, pady=1)
    fondo3.image=IMAGEN
    txtLongPie = tk.Label(lblSensLect,text='Longitud Pie: ',fg="#2E4053")
    txtLongPie.grid(row=0, column=0,sticky = 'W',pady=5,padx = 10)
    longPie = tk.Entry(lblSensLect, width=15,fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
    longPie.grid(row=0, column=1,padx = 10)
    txtPeso = tk.Label(lblSensLect,text='Peso: ',fg="#2E4053")
    txtPeso.grid(row=1, column=0, sticky = 'W',pady=5,padx = 10)
    peso = tk.Entry(lblSensLect, width=15,fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
    peso.grid(row=1, column=1,padx = 10)
    btnTD = tk.Button(lblSensLect,text="Tomar
Datos",command=lambda:tomarDatos(longPie,peso),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
    btnTD.grid(row=2, column=1, sticky='S',pady=5,padx = 10)
    actualizarHoja3(bg[2])
# ***** Hoja 4 *****
# ***** Visualizacion DB Registros *****
lblVista= tk.LabelFrame(fondo4, text='Previsualización',bg="#FFFFFF")
lblVista.pack(side='right', padx= 30,pady=5)
visual= tk.Label(lblVista, width=60,height=25, text="AQUI SE MUESTRA LA
PISADA",fg="#2E4053",bg="#FFFFFF")
visual.pack(side='bottom',padx=10, pady=5)
visualTextP= tk.Label(lblVista, width=20,height=11, text="Datos Paciente", fg="#2E4053",bg="#FFFFFF")
visualTextP.pack(side='left',padx=10, pady=1)
visualTextE= tk.Label(lblVista, width=20,height=11, text="Datos Evaluador", fg="#2E4053",bg="#FFFFFF")
visualTextE.pack(side='right',padx=10, pady=1)
lblBDregistro= tk.LabelFrame(fondo4, text='Base de Datos')
lblBDregistro.pack(side='left', padx= 30, pady=5)
lblBusc= tk.LabelFrame(lblBDregistro, text='Filtro CI Paciente')
lblBusc.pack(side='top',padx=5, pady=5)
BuscReg= tk.Entry(lblBusc, width=25,fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
BuscReg.pack(side='top',padx=10, pady=5)
btnBuscReg = tk.Button(lblBusc,text="Buscar
Registro",command=lambda:buscarUser(3,BuscReg),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnBuscReg.pack(side='left',padx=10, pady=5)
btnBorrarReg = tk.Button(lblBDregistro,text="Borrar
Reg",command=lambda:borrarEntrada(3),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnBorrarReg.pack(side='bottom',padx=10, pady=5)
lblData= tk.LabelFrame(lblBDregistro, text='Datos Encontrados')
lblData.pack(side='bottom',padx=5, pady=5)

```

```

tablaReg= ttk.Treeview(lblData,height=19,columns=(0,1,2,3,4,5,6))
tablaReg.pack(side='left',padx=5, pady=5)
tablaReg.heading('#0',text= 'Reg')
tablaReg.column("#0", width=40)
tablaReg.heading('#1',text= 'Código')
tablaReg.column("#1", width=90)
tablaReg.heading('#2',text= 'Fecha')
tablaReg.column("#2", width=120)
tablaReg.heading('#3',text= 'Paciente')
tablaReg.column("#3", width=95)
tablaReg.heading('#4',text= 'Long Pie')
tablaReg.column("#4", width=60)
tablaReg.heading('#5',text= 'Peso')
tablaReg.column("#5", width=60)
tablaReg.heading('#6',text= 'Ind Iz')
tablaReg.column("#6", width=55)
tablaReg.heading('#7',text= 'Ind Dr')
tablaReg.column("#7", width=55)
scrollReg = ttk.Scrollbar(lblData, orient=tk.VERTICAL)
scrollReg.pack(side='right', fill='y')
tablaReg.configure(yscrollcommand=scrollReg.set)
scrollReg.configure(command=tablaReg.yview)
def item_Select(event):
    global visual
    global visualTextP
    global visualTextE
    registro=tablaReg.item(tablaReg.selection())[0]['values']
    directorioHuella=str(pathlib.Path('huellas',registro[8]).absolute())
    #bgFoto= PhotoImage(file = directorioHuella)
    bgFoto=PIL_imageTk.PhotoImage(file = directorioHuella)
    bgFoto=bgFoto._PhotoImage__photo.zoom(2)
    visual.destroy()
    visual=tk.Label(lblVista,image=bgFoto,width=420,height=485,bg="#FFFFFF")
    visual.pack(side='bottom', pady=4)
    visual.image=bgFoto
    orden1=f"SELECT*FROM paciente WHERE CI_Paciente = '{registro[2]}'"
    orden2=f"SELECT*FROM evaluador WHERE CI_Eval = '{registro[7]}'"
    conex=sql.connect(baseDatos)
    cursor=conex.cursor()
    cursor.execute(orden1)
    UserPaci=cursor.fetchall()
    cursor.execute(orden2)
    UserEval=cursor.fetchall()
    conex.commit()
    conex.close()
    UserPaci=UserPaci[0]
    UserEval=UserEval[0]
    TexToPaci="Paciente"+'\n\n'+str(UserPaci[1])+'\n'+str(UserPaci[2])+'\n'+str(UserPaci[3])+'\n'+UserPaci[4]
    TexToEval="Evaluador"+'\n\n'+str(UserEval[1])+'\n'+UserEval[2]+'\n'+UserEval[3]+'\n'+UserEval[4]
    visualTextP.destroy()
    visualTextE.destroy()
    visualTextP= tk.Label(lblVista,height=7,text=TexToPaci,anchor='center',bg="#FFFFFF")
    visualTextP.pack(side='left',padx=10, pady=1)
    visualTextE= tk.Label(lblVista,height=7,text=TexToEval,anchor='center',bg="#FFFFFF")
    visualTextE.pack(side='right',padx=10, pady=1)
tablaReg.bind('<<TreeviewSelect>>', item_Select)
btnSelecData = tk.Button(hoja2,text="Seleccionar",command=
lambda:selecInsert(),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnSelecData.pack(side='bottom',padx=10, pady=5)

```

```
btnActualizar1 =
tk.Button(lblBuscUser,text="Actualizar",command=lambda:actualizarVista(1),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnActualizar1.pack(side='right',padx=10, pady=5)
btnActualizar2 = tk.Button(lblBusc,text="Actualizar
Reg",command=lambda:actualizarVista(3),fg="#2E4053",bg="#AEB6BF")
btnActualizar2.pack(side='right',padx=10, pady=5)
actualizarVista(1)
actualizarVista(3)
cuaderno.pack(fill = "both", expand=True)
vRoot.mainloop()
```

Anexo 6. Aceptación para realizar las pruebas en los niños de la unidad educativa Benito Juárez.



República
del Ecuador

Ministerio de Educación

Ishkay Shimipi Yachanawasi
**UNIDAD EDUCATIVA COMUNITARIA INTERCULTURAL BILINGÜE
"BENITO JUÁREZ"**

*Dirección: Comunidad Pucará de San Roque - Telf. 2900038
Antonio Ante - Ecuador*



OFICIO: 22-23D-009
FECHA: 13/09/2022
ASUNTO: **Aceptación**

A quien corresponda

De mi consideración:

En calidad de Directora de la Unidad Educativa Comunitaria "Benito Juárez", en respuesta a la solicitud presentada el 06 de septiembre del 2022 en donde se solicita la autorización para realizar pruebas del dispositivo de detección de pisadas en los niños de la unidad educativa a la cual represento, por el sr Godoy Reinoso Andrés Esteban estudiante de la Universidad Técnica del Norte de la facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, se **autoriza** que el señor antes mencionado realice las pruebas de su dispositivo.

Atentamente,

Lic. Elsi Males
DIRECTORA
Ce.1002004214
Teléfono: 062900038
Correo: ebenitojuarez30@gmail.com



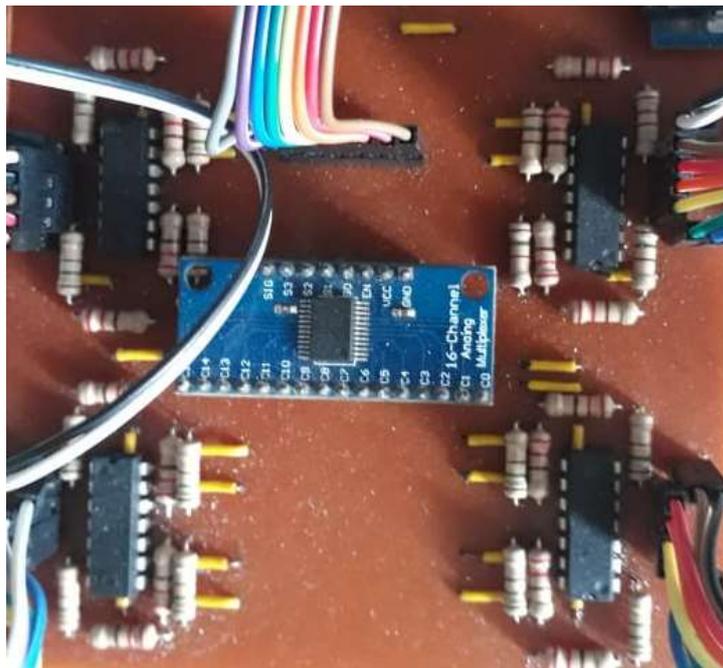
Anexo 7. Fotografías del trabajo realizado

Implementación del sistema

La Figura 95 evidencia la construcción de la placa electrónica para el módulo de censado.

Figura 95

Construcción de la placa PBC impresa



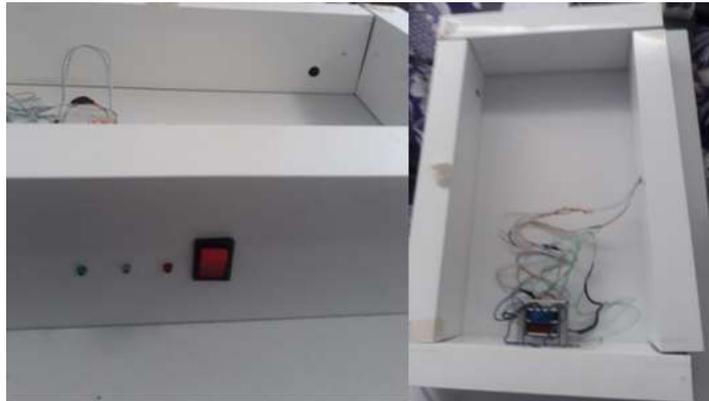
Fuente: Autoría

Construcción del sistema

Para la estructura se utilizó aluminio por su resistencia y peso más ligero, como se muestra en la Figura 96.

Figura 96

Construcción estructural del sistema



Fuente: Autoría

En la Figura 97, se puede apreciar, una vez finalizada la estructura de aluminio, se integra la parte de la base en donde van a ir los sensores FSR. En esta sección se trabajó en madera contrachapada, por su resistencia y comodidad para colocar los sensores.

Figura 97

Construcción de base de soporte para los sensores del sistema



Fuente: Autoría

Pruebas del sistema

Luego de culminar la parte de hardware y software se realizó una fase de pruebas del funcionamiento de todos los módulos del sistema en general, como se puede observar en la Figura 98.

Figura 98

Pruebas de funcionamiento del sistema



Fuente: Autoría

Mediante las pruebas realizadas anteriormente, se pudo calibrar la posición de los sensores, por lo que se procede a las pruebas finales en la Unidad Educativa Benito Juárez, como se puede apreciar en la figuras 99 y 100.

Figura 99

Pruebas del sistema a niños y niñas, con 19 – 20,5 cm de longitud de sus pies



Fuente: Autoría

Figura 100

Pruebas del sistema a niños y niñas, con 20,5 – 22 cm de longitud de sus pies



Fuente: Autoría

Junto con las pruebas realizadas a la muestra se aplicó el método manual de índice de Hernández Corvo que se visualiza en la figura 101, para fines comparativos con el dispositivo.

Figura 101

Pruebas de funcionamiento del sistema



Fuente: Autoría