



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 PROBLEMAS EN PISADA
MEDIANTE ALGORITMOS DE APRENDIZAJE DE MÁQUINA”**

AUTOR: FUENTES HERNÁNDEZ EDISON ALEXANDER

DIRECTOR: MSC. PAÚL DAVID ROSERO MONTALVO

IBARRA-ECUADOR

2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD **BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. 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 DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401533005		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Fuentes Hernández Edison Alexander		
DIRECCIÓN:	Virginia Pérez y Gral. Bayardo Tobar. Ibarra-Ecuador		
EMAIL:	eafuentesh@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2-224052	TELÉFONO MÓVIL:	0969933898

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“Sistema electrónico de detección de problemas en pisada mediante algoritmos de aprendizaje automático”
AUTOR (ES):	Fuentes Hernández Edison Alexander
FECHA: DD/MM/AAAA	26/03/2019
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Electrónica y Redes de Comunicación
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Paúl David Rosero Montalvo MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los veintiséis días del mes de marzo de 2019

EL AUTOR:

(Firma)

Edison Alexander Fuentes Hernández



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

MSC. PAÚL DAVID ROSERO MONTALVO, DIRECTOR DEL PRESENTE TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICA:

Que, el presente trabajo de titulación denominado: "SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE PROBLEMAS EN PISADA MEDIANTE ALGORITMOS DE APRENDIZAJE DE MÁQUINA", ha sido desarrollado por el señor Edison Alexander Fuentes Hernández bajo mi supervisión.

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

MSc. Paul David Rosero Montalvo

1003378039

DIRECTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis abuelos José y Yolanda, por ser el pilar más importante desde pequeño, por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones.

A mi madre Rosita, quien me demostró que, a pesar de las adversidades, es posible buscar un futuro mejor, a quién, por largos periodos de mi infancia, no pude tener a mi lado, a ella a quien más amo.

A mi padre Jairo, quien, a pesar de no llevar mi sangre, me ha querido como a nadie, a quien supo ganarse mi aprecio y cariño. Por su esfuerzo y dedicación en su trabajo, por convertirse en el padre que yo necesitaba.

Una dedicación especial a mis tíos Rubén, Danilo y Andrea quienes siempre me apoyaron en todo ámbito, por compartir momentos significativos conmigo. Por cada consejo, y ejemplo de trabajo duro que me brindan.

Edison Alexander Fuentes Hernández



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición y amor me ha guiado, con ello he podido tomar las decisiones correctas a lo largo de mi carrera universitaria. Agradezco a mis padres y abuelos, quienes me formaron como persona con valores y amor por la vida. Con ganas de luchar, de dar todo.

A mis tíos por su incondicional apoyo, quienes en cada momento estuvieron pendientes de mí. A mis familiares y amigos, quienes me apoyaron de una forma desinteresada con sus consejos, motivación y su buena voluntad.

Quiero agradecer a mi director de tesis el MSc. Paúl Rosero quien me supo guiar a lo largo de la realización de este proyecto. De igual manera agradezco a la Universidad Técnica del Norte, a mi carrera de Electrónica y Redes de Comunicación, a mis profesores en especial a los Ingenieros Carlos Vásquez y Jaime Michilena, los cuales se convirtieron en amigos, muchas gracias por ser unos de los mejores docentes que tuve a lo largo de mi carrera, pero más que nada gracias por sus consejos, con los cuales pude formarme mejor como ser humano.

Edison Alexander Fuentes Hernández

RESUMEN

El presente proyecto consiste en el desarrollo de PIEMEG, el cual es un sistema electrónico de problemas en pisada mediante algoritmos de Machine Learning (ML), el objetivo de este prototipo es la detección de tres diferentes tipos de pisadas, con lo cual busca convertirse en un sistema tecnológico de apoyo para los especialistas en el área de la podología.

El sistema está formado por sensores piezoresistivos de presión que miden las presiones plantares de cada pie. PIEMEG consta de un sistema de visualización, a través del cual se muestra información sobre el tipo de pisada y los valores en porcentajes de presión que reciben los pies.

Para el diseño del dispositivo se aprovechan las ventajas del uso de hardware y software libre, el correcto ciclo de vida de desarrollo de PIEMEG, está basado en la metodología del modelo en V, garantizando un proceso adecuado en el diseño y la implementación del sistema.

Para finalizar, la funcionalidad del sistema es evaluada en el apartado final de este documento a través de pruebas realizadas al prototipo, buscando que la calidad y efectividad de PIEMEG sea la mejor posible.

ABSTRACT

The present project consists in the development of PIEMEG, which is an electronic system of problems in footprints through Machine Learning (ML) algorithms. The purpose of this prototype is the detection of three different types of footprints, it seeks to become a technological support system for specialists in the area of podiatry.

The system consists of piezoresistive pressure sensors that measure the plantar pressures of each foot. PIEMEG consists of a visualization system, through which information is shown on the type of footprint and the values in percentages of pressure received by the feet.

For the design of the device, the advantages of the use of hardware and free software are exploited, the correct life cycle of PIEMEG development is based on the V model methodology, guaranteeing an adequate process in the design and implementation of the system.

To finish, the functionality of the system is evaluated in the final section of this document through tests performed on the prototype, looking for the quality and effectiveness of PIEMEG to be the best possible.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1 ANTECEDENTES.....	15
1.1 Introducción	15
1.2 Problema	15
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.4 Alcance	18
1.5 Justificación	19
2 Capítulo II.....	21
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Baropodometría.....	21
2.1.1 Descripción del Pie.....	21
2.1.2 Anatomía del Pie.....	22
2.1.2.1 Estructura ósea del Pie Humano.....	22
2.1.2.1.1 Tarso.....	23
2.1.2.1.2 Metatarso.....	24
2.1.2.1.3 Falanges.....	24
2.1.2.2 Músculos del pie.....	25
2.1.2.3 Articulaciones del pie.....	25
2.1.3 Partes del pie humano.....	26
2.1.4 Bóveda plantar.....	27

2.1.5	Tipos de pisada.....	28
2.1.6	Presiones plantares.....	29
2.1.6.1	Presiones plantares en estática.....	29
2.1.6.2	Factores que influyen en las presiones plantares.....	30
2.1.7	Patologías del pie.....	31
2.1.7.1	Pie plano.....	32
2.1.7.2	Pie plano normal.....	33
2.1.7.3	Pie normal.....	33
2.1.7.4	Pie normal cavo.....	34
2.1.7.5	Pie cavo:.....	35
2.1.8	Antropometría del pie.....	35
2.1.8.1	Perfil Antropométrico Ecuatoriano.....	35
2.1.8.2	Perfil Antropométrico en niños.....	38
2.1.9	Podometría.....	39
2.1.9.1	Podómetros cualitativos.....	40
2.1.9.1.1	Podoscopio.....	40
2.1.9.1.2	Pedígrafo.....	41
2.1.9.2	Podómetros cuantitativos.....	41
2.1.9.2.1	Plataformas de pedografía Emed®.....	42
2.1.9.2.2	Sistema F-Scan Tekscan™.....	42
2.2	Adquisición de datos.....	43
2.2.1	Sistemas de adquisición de datos.....	44
2.2.2	Equipo de adquisición de datos basado en PC.....	44
2.3	Aprendizaje automático.....	45

2.3.1	Sistemas de clasificación.	45
2.3.1.1	Aprendizaje supervisado.	45
2.3.1.2	Aprendizaje no supervisado.	49
2.3.1.3	Aprendizaje reforzado.	49
2.4	Minería de datos.	49
2.5	Sistemas embebidos.	50
2.5.1	Software y hardware libre.	50
2.5.2	Sensores.	50
2.5.3	Comunicación inalámbrica.	52
2.6	Visualización de datos.	54
2.6.1	Software de visualización de datos.	55
3	Capítulo III.	58
	DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE PROBLEMAS EN PISADA (PIEMEG).	58
3.1	Situación actual.	58
3.2	Metodología.	60
3.3	Modelo en V.	60
3.4	Definición de especificaciones o requerimientos (FASE 1).	61
3.4.1	Requerimientos funcionales.	62
3.4.2	Requerimientos no funcionales.	63
3.5	Diseño global (FASE 2).	64
3.5.1	Descripción general del funcionamiento del sistema PIEMEG.	64
3.5.2	Arquitectura.	65
3.5.2.1	Diagrama de flujo de proceso del sistema.	67

3.6	Diseño en detalle (FASE 3)	69
3.6.1	Diseño de hardware.....	69
3.6.1.1	Bloque de sensores.....	69
3.6.1.1.1	Requerimientos de sensores de fuerza o presión	70
3.6.1.1.2	Tipos de sensores de fuerza de compresión	71
3.6.1.1.3	Selección del sensor.	75
3.6.1.1.4	Criterio para la ubicación y el número de sensores FSR 402.....	76
3.6.1.1.5	Patrón de ubicación de sensores FSR 402 en el sistema PIEMEG.	77
3.6.1.1.6	Diagrama de conexión.....	78
3.6.1.2	Bloque de acondicionamiento de señal.....	79
3.6.1.2.1	Requerimientos del bloque de acondicionamiento de señal.....	79
3.6.1.2.2	Configuraciones de circuitos acondicionadores de señal	80
3.6.1.2.3	Circuito seleccionado para el acondicionamiento de la señal.	84
3.6.1.2.4	Diagrama de conexión.....	85
3.6.1.3	Bloque de toma de datos	88
3.6.1.3.1	Requerimientos del bloque de toma de datos	88
3.6.1.3.2	Elección de placa del bloque de toma de datos	88
3.6.1.3.3	Diagrama de conexión.....	91
3.6.1.4	Bloque de comunicación.....	92
3.6.1.4.1	Requerimientos del bloque de comunicación.....	92
3.6.1.4.2	Módulos de comunicación inalámbrica.....	92
3.6.1.4.3	Selección del módulo de comunicación inalámbrica para PIEMEG.....	97
3.6.1.4.4	Diagrama de conexión.....	98
3.6.1.5	Bloque de procesamiento.....	100

3.6.1.5.1	Requerimientos del bloque de procesamiento	100
3.6.1.5.2	Elección de placa del bloque de procesamiento	101
3.6.1.5.3	Diagrama de conexión	103
3.6.1.6	Bloque de alimentación.....	104
3.6.1.6.1	Requerimientos del bloque de alimentación.....	104
3.6.1.6.2	Criterio para el diseño de la fuente de alimentación de PIEMEG	104
3.6.1.6.3	Diseño de fuente de alimentación.....	107
3.6.1.6.4	Diagrama de conexión	109
3.6.2	Diseño de Software	111
3.6.2.1	Bloque de toma de datos	111
3.6.2.2	Bloque de procesamiento.....	112
3.6.2.2.1	Selección.....	113
3.6.2.2.2	Preprocesamiento	114
3.6.2.2.3	Transformación.....	116
3.6.2.2.4	Minería de datos	116
3.6.2.2.5	Interpretación/Evaluación.....	118
3.6.2.3	Bloque de comunicación.....	118
3.6.2.4	Bloque de visualización	119
3.6.2.4.1	Requerimientos del bloque de visualización	120
3.6.2.4.2	Selección de plataforma de visualización.....	120
3.6.2.4.3	Diagrama en bloques del proceso del sistema de visualización	121
3.6.2.4.4	Diagrama de flujo del sistema de visualización	122
3.7	Implementación (FASE 4)	124
3.7.1	Implementación de hardware.....	124

3.7.1.1	Construcción de plataforma de PIEMEG	124
3.7.1.2	Bloque de alimentación.....	125
3.7.1.3	Bloque de sensores.....	126
3.7.1.4	Bloque de acondicionamiento de señal.....	127
3.7.1.5	Bloque de toma de datos	128
3.7.1.6	Bloque de comunicación.....	128
3.7.1.7	Bloque de procesamiento.....	130
3.7.2	Implementación de software	131
3.7.2.1	Bloque de toma de datos	131
3.7.2.2	Bloque de procesamiento.....	132
3.7.2.2.1	Selección.....	132
3.7.2.2.2	Preprocesamiento	134
3.7.2.2.3	Transformación.....	138
3.7.2.2.4	Minería de datos	140
3.7.2.3	Bloque de comunicación.....	144
3.7.2.4	Bloque de visualización	145
3.8	Test unitarios (FASE 5)	146
3.8.1.1	Test bloque de alimentación	146
3.8.1.2	Test bloque de sensores	147
3.8.1.3	Test bloque de acondicionamiento de señal.....	148
3.8.1.4	Test bloque de toma de datos.....	150
3.8.1.5	Test bloque de procesamiento.....	151
3.8.1.6	Test bloque de comunicación.....	152
3.8.1.7	Test bloque de visualización.....	153

3.9	Integración (FASE 5).....	154
4	Capítulo IV.....	156
	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	156
4.1	Pruebas de hardware	156
4.2	Prueba del sistema con los usuarios.....	157
4.3	Comparación de PIEMEG con Método de Hernández Corvo y NEOFEET	164
4.4	Rendimiento del sistema.....	170
4.5	Discusión de resultados.....	173
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	174
5.1	CONCLUSIONES	174
5.2	RECOMENDACIONES.....	176
6	BIBLIOGRAFÍA	177
7	Glosario de Términos y Acrónimos.....	185
8	ANEXOS	187
	ANEXO 1. PROGRAMACIÓN DE PIEMEG	187
	ANEXO 2. ENCUESTA DE REQUERIMIENTOS Y TABULACIÓN.....	194
	ANEXO 3. FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO REALIZADO.....	200
	ANEXO 4. VALORACIÓN DE PISADA MÉTODO HERNÁNDEZ CORVO	202
	ANEXO 5. BASE DE DATOS DE ENTRENAMIENTO	208
	ANEXO 6. MANUAL DE USUARIO	210

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tendones, músculos, huesos del pie y tobillo	22
Figura 2 Estructura ósea del pie humano.....	23
Figura 3 Huesos del pie vistas laterales y superior	24
Figura 4 Articulaciones del pie: a) sección horizontal, b) vista plantar.....	26
Figura 5 Antepié, Mediopié y retropié.....	27
Figura 6 Bóveda del pie	28
Figura 7 Tipos de pisada.....	29
Figura 8 Pie plano	32
Figura 9 Pie plano normal.....	33
Figura 10 Pie normal.....	34
Figura 11 Pie normal cavo	34
Figura 12 Pie cavo	35
Figura 13 Media del tamaño de calzado en el Ecuador	36
Figura 14 Resultado Pie Cavo.....	37
Figura 15 Resultado Pie Plano.....	38
Figura 16 Resultado Pie Normal.....	38
Figura 17 Podoscopio modelo clásico	40
Figura 18 Pedígrafo.....	41
Figura 19 Sistema EMED	42
Figura 20 Sistema F-Scan	43
Figura 21 Diagrama Sistema de adquisición de datos	44
Figura 22 Ejemplo de una red neuronal conectada.....	46
Figura 23 Ejemplo de árbol de decisión	48

Figura 24 Interfaz de inicio Processing	55
Figura 25 Pantalla de inicio Visual Studio	56
Figura 26 Entorno de trabajo Eclipse.....	57
Figura 27 Etapas del modelo en V	61
Figura 28 Arquitectura Sistema PIEMEG	65
Figura 29 Diagrama de flujo, proceso general PIEMEG	68
Figura 30 Construcción Sensor de Fuerza Resistivo	71
Figura 31 Sensor FSR 402	72
Figura 32 FlexiForce A201	73
Figura 33 Galga SGD-1.5/120-LY11	74
Figura 34 Distribución de sensores en el PIEMEG	78
Figura 35 Diagrama esquemático bloque de toma de datos	78
Figura 36 Estimación de cableado interno de sensores FSR 402	79
Figura 37 Configuración divisor de voltaje y AO	80
Figura 38 Buffer Ajustable	82
Figura 39 Circuito convertidor corriente – voltaje	82
Figura 40 Conductancia vs. Fuerza (0-1kg).....	83
Figura 41 Circuito con oscilador Schmitt Trigger	84
Figura 42 Diagrama esquemático pie izquierdo, acondicionamiento de señal	86
Figura 43 Diagrama esquemático pie derecho, acondicionamiento de señal	87
Figura 44 Diagrama de pines de Arduino Mega	90
Figura 45 Diagrama esquemático bloque de toma de datos	91
Figura 46 Generación y detección PID	94
Figura 47 Pines del Módulo NRF24L01	94

Figura 48 Topología máster esclavo hc-05	96
Figura 49 Distribución pines módulo hc-05	96
Figura 50 Diagrama esquemático, sistema de transmisión - Bloque de Comunicación.....	99
Figura 51 Diagrama esquemático, sistema de recepción - Bloque de Comunicación	100
Figura 52 Diagrama de pines de Arduino Nano	102
Figura 53 Diagrama esquemático bloque de procesamiento	103
Figura 54 Diagrama esquemático fuente de alimentación PIEMEG	110
Figura 55 Diagrama de flujo algoritmo toma de datos	111
Figura 56 Proceso KDD.....	113
Figura 57 Diagrama de flujo, toma de datos de presión	114
Figura 58 Diagrama de flujo, algoritmo de aprendizaje automático	117
Figura 59 Flujograma, sistema de transmisión	118
Figura 60 Diagrama de flujo, sistema de recepción.....	119
Figura 61 Diagrama en bloques Sistema de Visualización.....	122
Figura 62 Diagrama de flujo Sistema de Visualización.....	123
Figura 63 Diseño de estructura externa PIEMEG.....	125
Figura 64 Fuente de alimentación de PIEMEG	125
Figura 65 Perforaciones para inserción de sensores	126
Figura 66 Distribución de sensores en la parte superior de plataforma	126
Figura 67 Placa de acondicionamiento de señal, pie derecho.....	127
Figura 68 Placa de acondicionamiento de señal, pie izquierdo	127
Figura 69 Inserción de placa Arduino Mega de Toma de Datos	128
Figura 70 Sistema de transmisión.....	129
Figura 71 Sistema de recepción	129

Figura 72 Bloque de procesamiento	130
Figura 73 Algoritmo toma de valores sensores FSR	131
Figura 74 Toma de datos a niños de 4-5 años.....	133
Figura 75 Toma de datos a niños de 11-12 años.....	133
Figura 76 Base de datos inicial	134
Figura 77 Trazos método Hernández-Corvo.....	135
Figura 78 BBD inicial con etiqueta	137
Figura 79 Toma de huella plantar niños 4-5 años.....	137
Figura 80 Toma de huella plantar niños 11-12 años.....	138
Figura 81 Proceso de implementación de k-NN	142
Figura 82 Creación e inicio de canal de transmisión	144
Figura 83 Creación e inicio del canal de recepción	144
Figura 84 Interfaz gráfica del sistema PIEMEG.....	145
Figura 85 Prueba de medición voltaje negativo.....	146
Figura 86 Prueba de medición voltaje positivo.....	147
Figura 87 Medición y calibración sensores FSR 402	147
Figura 88 Test configuración divisor de voltaje	148
Figura 89 Test Configuración convertidor Corriente-Voltaje	149
Figura 90 Gráfica de respuestas de sensores FSR	150
Figura 91 Recopilación de información de sensores FSR 402 en bloque de toma de datos.....	150
Figura 92 Prueba funcionamiento algoritmo k-NN	152
Figura 93 Prueba funcionamiento envío y recepción de información	153
Figura 94 Prueba funcionamiento interfaz de PIEMEG	153
Figura 95 Logotipo del sistema.....	154

Figura 96 Integración de PIEMEG, vista interna.....	154
Figura 97 Integración de PIEMEG, vista externa.....	155
Figura 98 Prueba PIEMEG usuario pie normal	158
Figura 99 Visualización de resultados pie normal	159
Figura 100 Prueba pie normal.....	160
Figura 101 Prueba pie plano	161
Figura 102 Visualización resultados pie plano	162
Figura 103 Prueba PIEMEG Administrador y usuario	163
Figura 104 Prueba pie cavo.....	163
Figura 105 Visualización de resultados pie cavo.....	164
Figura 106 Sistema NeoFeet.....	165
Figura 107 Prueba sistema NeoFeet	166
Figura 108 Resultados gráficos prueba NeoFeet	167
Figura 109 Impresión huella plantar Método Hernández Corvo	168
Figura 110 Estadísticas de matrices de confusión para clasificación de muestras	172
Figura 111 Encuesta estudiantes Unidad Educativa " Atahualpa "	200
Figura 112 Construcción del sistema PIEMEG	201
Figura 113 Huella plantar pie normal	202
Figura 114 Huella plantar pie plano.....	203
Figura 115 Huella plantar pie cavo.....	204
Figura 116 Huella plantar pie normal niños 4-5 años.....	205
Figura 117 Huella plantar pie plano niños 4-5 años	206
Figura 118 Huella plantar pie cavo niños 4-5 años.....	207

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de sensores por los principios de transducción.....	51
Tabla 2 Clasificación de sensores por el tipo de variables	51
Tabla 3 Tabla comparativa tecnologías inalámbricas	53
Tabla 4 Lista de Stakeholders	62
Tabla 5 Especificaciones técnicas del sensor FSR 402	72
Tabla 6 Especificaciones técnicas del sensor FlexiForce A201.	73
Tabla 7 Especificaciones técnicas de la galga SGD-1.5/120-LY11	74
Tabla 8 Análisis comparativo de los sensores de fuerza o presión.....	75
Tabla 9 Zonas de mayor presión en tipos de pisadas.....	76
Tabla 10 Comparativa de elementos programables	89
Tabla 11 Especificaciones técnicas Arduino Mega	90
Tabla 12 Descripción de los pines del Módulo de RF 2.4GHz [nRF24L01]	95
Tabla 13 Especificaciones técnicas NRF24L01	95
Tabla 14 Especificaciones técnicas del módulo HC-05.....	97
Tabla 15 Comparativa entre módulos de comunicación inalámbrica.....	97
Tabla 16 Descripción de elementos programables bloque de Procesamiento	101
Tabla 17 Especificaciones técnicas Arduino Mega	102
Tabla 18 Sumatoria de corrientes del sistema.....	106
Tabla 19 Estructura BDD inicial.....	115
Tabla 20 Estructura BDD inicial más Clase (Tipos de Pisadas).....	115
Tabla 21 Tabla comparativa plataformas de visualización.....	121
Tabla 22 Valoración de la huella plantar	136
Tabla 23 Designación de etiqueta para cada tipo de pisada.....	136

Tabla 24 Resultados de algoritmos de filtrado de ruido	139
Tabla 25 Eficiencias de algoritmos de ML con diferente semilla	141
Tabla 26 Promedio de eficiencia algoritmos de ML.....	141
Tabla 27 Pruebas iniciales de hardware.....	156
Tabla 28 Resultados NeoFeet	167
Tabla 29 Comparativa entre Hernández Corvo, NeoFeet y PIEMEG	169
Tabla 30 Comparativa PIEMEG y HC	171
Tabla 31 Matriz confusión 10 usuarios nuevos	173

Capítulo 1

ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Esta sección presenta la argumentación necesaria para el desarrollo del trabajo de titulación. Se inicia describiendo el problema que esta investigación debe solucionar. Se define objetivos generales y específicos del proyecto. De la misma forma se presenta el alcance y la justificación donde se exponen las razones por las que este trabajo es necesario.

1.2 Problema

Una de las características más importantes que posee el ser humano es la marcha bipodal, pues le permite movilizarse de un sitio a otro. El peso corporal es soportado de forma equitativa por los miembros inferiores (Hurtado Padilla, 2006). La parte del cuerpo humano encargada de cumplir la función de soporte y propulsión en la marcha humana, es el pie, una adecuada biomecánica del mismo garantiza una buena postura y una distribución simétrica de las presiones plantares (Baumfeld et al., 2017).

La aparición de distintas patologías en el pie, son el resultado de la relación existente entre la marcha humana y el uso de diferentes tipos de calzado, por lo que el pie es forzado a adaptarse a las propiedades de cada calzado (Bernal Jiménez & Domínguez Maldonado, 2016). Además, gran parte de las lesiones de pie, tobillo, rodilla, cadera y columna están directamente relacionadas con la manera de pisar, las áreas que abarcan el diagnóstico y el tratamiento de dichas patologías son la ortopedia y traumatología. Dentro de este campo, el estudio de la distribución de puntos de presión o presiones plantares en los pies es importante porque se estudia cualquier deformación dentro de la estructura biomecánica del cuerpo (Navarro et al., 2010).

La valoración de dichas patologías del pie puede ser efectuado gracias a la baropodometría, la cual es la encargada de estudiar las distribuciones plantares, por medio de una plataforma de registro electrónico.(Hurtado Padilla, 2006) uno de estos dispositivos es el podoscopio de cristal, con el cual es posible observar los apoyos plantares y la silueta del pie. La confiabilidad de dicho sistema se ve comprometida debido a la presencia de ciertos factores que pueden alterar el diagnóstico, tales como: la variación de la intensidad lumínica, la humedad o sudoración del pie. (Bernal Jiménez & Domínguez Maldonado, 2016).

Debido a ello, surge la necesidad de usar sistemas mucho más confiables, actualmente se utilizan sensores de presión para la medición de la presión plantar. Los principales fabricantes de este tipo de sistemas son FootScan (Bélgica), Novel (Alemania), Tactilus (Estados Unidos) Tekscan (Estados Unidos) y Zebris (Alemania) (J. Li et al., 2016). Sin embargo, este tipo de sistemas son muy costosos debido a su alta tecnología, de tal manera resulta importante crear un sistema que utilice sensores de presión pero que pueda aprovechar las ventajas que ofrece el hardware y software libre, permitiendo que el sistema sea más económico.

Existe una gran diferencia entre los pies de un niño y un adulto, el pie de un niño no es una versión en miniatura del pie de un adulto, más bien son partes del cuerpo delicadas que están en evolución y necesitan de ciertos cuidados (Reyes-Cadena, 2018). El desarrollo físico de un ser humano empieza desde su estado embrionario hasta su adolescencia, por ejemplo, al hablar de una de las patologías típicas que se encuentran en niños y adolescentes como el pie plano, es totalmente normal que se presente en estas etapas. El pie plano es considerado una patología, la cual necesita de un tratamiento obligatorio, esta es la mentalidad de ciertos padres y clínicos. Sin embargo esta actitud podría ser más bien cultural, ya que por mucho tiempo se ha considerado al arco plantar como signo de salud, bienestar (Montes-Alguacil & others, 2016).

Es común observar a padres de familia que visitan un sin número de especialistas buscando solución para el pie plano de su niño/a, y cuando un clínico determina que no es necesario ningún tratamiento en especial, los padres se dirigen a otro especialista hasta encontrar alguno que si acceda a realizar un tratamiento, es por ello común observar a niños de edad temprana usar zapatos especiales, para mejorar cualquiera patología que posea (Montes-Alguacil & others, 2016). Al hacer esto como resultado se puede obtener una deformación aún mayor, ya que el pie no se desarrolla de una manera natural, sino más bien se forma de acuerdo con el tipo de calzado que use.

Es sumamente importante crear conciencia en los padres de familia, para que comprendan que en ciertos casos la presencia de ciertas patologías como el pie plano, no es sinónimo de una enfermedad grave que necesite un tratamiento como tal.

En el Ecuador se encuentran muy pocas investigaciones relacionadas con el estudio del pie existen ciertos estudios en la provincia del Azuay, contabilizando un total de cuatro trabajos de titulación aproximadamente, sin embargo, en lo que respecta a la provincia de Imbabura, no existen registros de un estudio de presiones plantares, por lo que de igual manera es necesario realizar un estudio en esta área empezando por los niños.

Dicho esto, es muy importante la creación de un sistema que a más de proveer un medio de diagnóstico que use sensores de mayor precisión y de aprovechar las ventajas del software y hardware libre permita tener una valoración de patologías en niños, y así poder llevar un estudio clínico más detallado. Es necesario aclarar que este sistema no tiene el objetivo de suplir el criterio de un especialista sino más bien que se convierta en un soporte para este.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General.

Desarrollar un sistema electrónico de detección de pisada basado en algoritmos de decisión supervisados, con el fin de determinar tres tipos de pisadas.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Determinar bases teóricas correspondientes al sistema a través de revisión bibliográfica enfocado en temas de baropodometría y los diferentes algoritmos de decisión supervisados existentes.
- Definir requerimientos (software, hardware) para el desarrollo del sistema electrónico determinando la correcta posición, sensores a utilizar y diseño.
- Realizar la adquisición de datos necesarios para el entrenamiento del algoritmo de clasificación.
- Elegir el algoritmo de decisión que mejor se acople a los requerimientos del sistema mediante una matriz de confusión.
- Comprobar el funcionamiento del sistema a través de pruebas tanto de software como hardware.

1.4 Alcance

En la realización de este proyecto de titulación se abordará conceptos sobre la baropodometría, podología, con lo cual generará los medios necesarios para realizar un sistema electrónico que permitirá determinar puntos de presión en los pies, identificando tres tipos de pisadas. El objetivo del sistema propuesto es determinar los puntos de presión del pie en niños, al obtener los datos en donde se encuentra una mayor concentración de presión es posible determinar qué tipo de pisada tiene el paciente. Para la implementación del sistema se optará por el sistema Arduino ya que, además de ser un potente sistema embebido, los fabricantes brindan amplias posibilidades de diseño.

Adicionalmente la riqueza de proyectos de código abierto disponibles en la web permite a desarrolladores extender posibilidades de crear nuevos sistemas generando rápidamente un prototipo para la realización de pruebas. El sistema estará constituido por sensores de presión, ubicados en puntos estratégicos del pie, mediante un análisis de postura. Para la calibración y correcta lectura de los sensores se optará por el uso de dispositivos electrónicos pasivos, para evitar saltos desmesurados en los datos a obtener. Con la ayuda de un software de visualización será posible la observación y verificación de los resultados.

Mediante las señales obtenidas, estas serán evaluadas a través de algoritmos de decisión supervisados, con lo cual el sistema electrónico será capaz de detectar problemas de la pisada de manera autónoma. Para la elección del algoritmo de decisión supervisada, se realizarán una serie de pruebas y finalmente mediante una matriz de confusión se determinará el algoritmo ideal con el cual se trabajará. No es posible establecer el margen de error que se espera obtener del algoritmo implementado debido a que es la primera vez que se ejecutará en este campo de acción, sin embargo, se espera que la confiabilidad o certeza de la funcionalidad del algoritmo sea la mayor posible.

1.5 Justificación

El desconocimiento o desinterés por parte de la ciudadanía acerca de los problemas que puede acarrear una mala pisada, ha generado que, en la mayoría de los casos, las personas no asocien sus dolencias de rodilla, espalda, cabeza con su forma de pisar, lo que les conlleva a gastar muchos recursos en diagnósticos que no tienen ninguna relación directa con su afección.

Gracias al constante avance de la tecnología en salud, comunicación y electrónica, es preciso mencionar la evolución que ha generado el estudio de datos, pues con ello es posible combinar estas tres áreas y establecer sistemas de detección de eventos mucho más precisos, en este caso el diagnóstico de tres diferentes tipos de pisadas.

En la actualidad existen una gran gama de sistemas que ayudan a la detección de patologías en las pisadas de las personas, sin embargo, estos son de un coste elevado, por lo que, para la mayoría de la ciudadanía del país, son procedimientos que no se pueden costear. De esta forma el presente sistema busca generar un dispositivo capaz de afrontar el diagnóstico de estas deformidades cuyo valor este dentro de las posibilidades de cada ciudadano, a su vez puede ser implementado en hospitales públicos, y así dar un mayor alcance a las personas que lo necesiten.

El desarrollo de este sistema contribuye a lo establecido en el objetivo 11 del Plan Nacional del Buen vivir 2013-2017 en el cual señala que el país debe gestionar sus recursos estratégicos en el marco de una inserción internacional, que permita que el ciclo tecnológico actual basado en la automatización, la robótica y la microelectrónica, contribuya al incremento generalizado del bienestar para sus habitantes.

2 Capítulo II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este apartado se establecerán conceptos relacionados con el estudio del pie, desde conceptos generales, como su estructura, anatomía, fisiología, tipos de pisadas, consecuencias de una mala pisada, sistemas de detección. Además, temas relacionados con el aprendizaje automático, estableciendo los diferentes algoritmos que existen en la actualidad.

2.1 Baropodometría

La Baropodometría es el estudio de la distribución de las presiones plantares mediante el uso de una plataforma de registro electrónico. Es conocido también como podómetro, plataforma de presiones o fotopodobarometría (Hurtado Padilla, 2006). Para comprender más a fondo el campo de estudio de la baropodometría a continuación se detallan conceptos básicos de la estructura y funcionamiento del pie humano.

2.1.1 Descripción del Pie.

El pie es la extremidad más distal del miembro inferior, es la base de sustentación del aparato locomotor. Debido a su biomecánica, tiene la capacidad de convertirse en una estructura rígida o flexible, dependiendo de las características del terreno y la actividad que realice (Viladot Voegeli, 2003).

Los pies resultan ser elementos fundamentales en el desarrollo de la mayoría de las actividades humanas, tales como la simple acción de caminar, correr, saltar, bailar, nadar, entre otras. En la figura 1, se muestra como el pie se encuentra constituido, su constitución interna consta de 26 huesos, 33 articulaciones, 20 músculos, vasos sanguíneos, nervios y más de 100 tendones.

Todos estos componentes permiten realizar las siguientes funciones: flexión, extensión, aducción, abducción, pronación y supinación (Pérez Gutiérrez, Barrera Pérez, Cruz Mazariegos, Martínez Sanabria, & Zuleta Olvera, 2012).

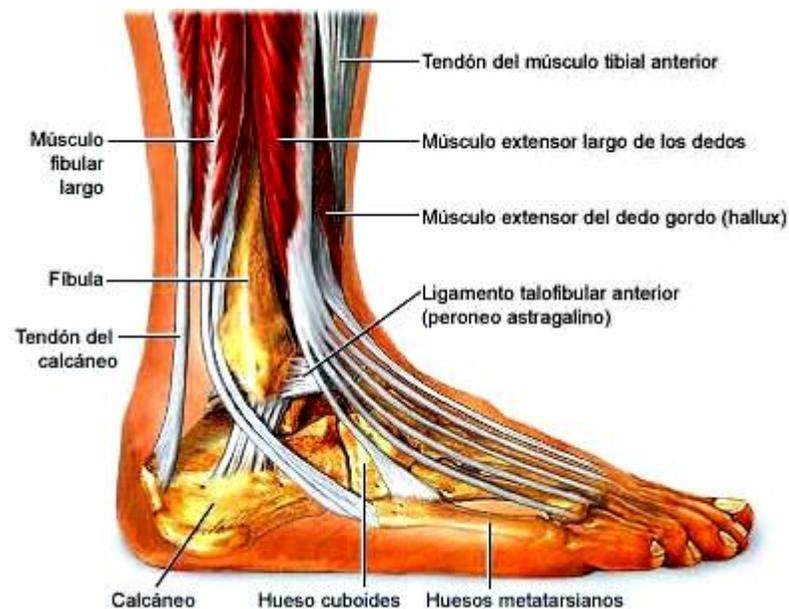


Figura 1 Tendones, músculos, huesos del pie y tobillo

Fuente: (Clínica Martín Gómez, 2017)

2.1.2 Anatomía del Pie.

En este apartado se dará a conocer conceptos en base a la anatomía del pie, es decir se realizará un estudio de la estructura del pie humano, comenzando por el estudio de sus huesos, músculos y articulaciones.

2.1.2.1 Estructura ósea del Pie Humano.

Los huesos del pie se encuentran distribuidos en tres regiones: tarso, metatarso y las falanges (Lloret Riera, 2012), esta distribución se muestra en la figura 2. A su vez el tarso se encuentra dividido por (a) tarso posterior conformado por el astrágalo y calcáneo. (b) tarso anterior formado por los escafoides, cuboides y tres cuñas.

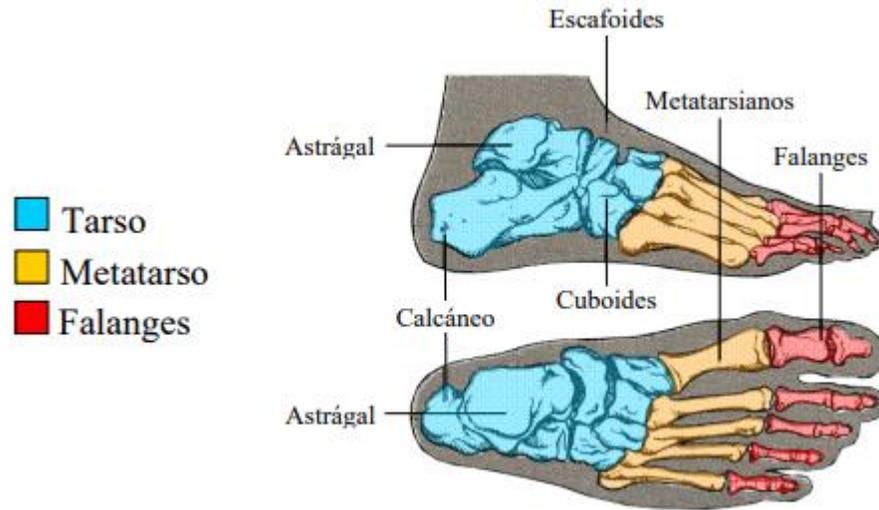


Figura 2 Estructura ósea del pie humano

Fuente: (Stengele, 2008).

2.1.2.1.1 Tarso

Conformado por siete huesos que forman el talón y el dorso del empeine, en éstos se incluye escafoides, cuneiformes, cuboides, astrágalo y calcáneo (Stengele, 2008). El tarso se muestra en la figura 2. Este puede ser dividido en dos: El tarso posterior que contiene al calcáneo, el cual forma el talón y el astrágalo, el cual está en contacto con los escafoides y el calcáneo.

La otra subdivisión es el tarso anterior, este se encuentra conformado por el Escafoides, el cual es mostrado en la figura 3, específicamente el número 391, cuboides (392) y los tres cuneiformes que son el medial, intermedio y lateral (393). Conforman una serie de huesos de forma cuboide, con seis caras las cuales se articulan unas con otras, estos huesos forman la parte alta de la bóveda plantar.

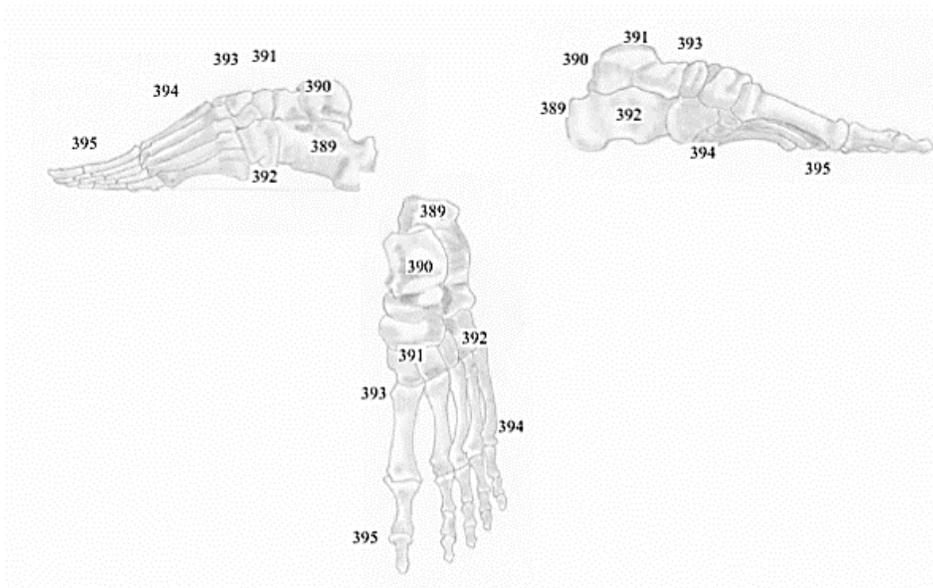


Figura 3 Huesos del pie vistas laterales y superior

Fuente: (Ayuso Gallardo & Ayuso Gallardo, 2008)

2.1.2.1.2 *Metatarso.*

Conjunto de cinco huesos largos los cuales se extienden entre el tarso y las falanges formando el pie medio, ver figura 2. Son enumerados comenzando por el dedo gordo hasta el meñique. En estos huesos se fijan los ligamentos de los dedos y del pie (Stengele, 2008).

2.1.2.1.3 *Falanges.*

Son los huesos que forman los cinco dedos del pie, se los puede observar en la figura 2. Cada dedo tiene tres falanges, exceptuando el dedo gordo que solo tiene dos (Stengele, 2008).

2.1.2.2 Músculos del pie.

Los huesos constituyen el armazón del pie, mientras que los músculos están ligados a los huesos por medio de los tendones, de esta forma garantizan el movimiento. Los extremos de los músculos se conectan a los tendones que unen a los huesos. De acuerdo a (RunFitners, 2018) los músculos del pie atendiendo a su origen se clasifican en intrínsecos y extrínsecos. Los músculos extrínsecos son aquellos que se originan en los huesos de la pierna, mientras que los extrínsecos son aquellos que tienen origen y terminación en el mismo pie.

2.1.2.3 Articulaciones del pie.

No es posible hablar del pie de forma aislada, ya que al referirse a desplazamientos y a los diferentes tipos de movimientos, se está hablando de aquello que condiciona el equilibrio necesario para no perder la posición erguida (“Anatomía funcional del pie - Punto Fape,” n.d.). Del mismo modo no es posible afirmar que solo los pies sustentan al cuerpo de manera exclusiva, es por ello necesario mencionar que el tobillo es el que complementa esta función, garantizando así que los pies puedan funcionar de manera correcta.

Dentro de la articulación del tobillo y pie se tiene la articulación tibio-astragalina la cual es el punto de articulación de la tibia, peroné y el astrágalo. Es una articulación troclear donde suceden las acciones de flexión plantar o dorsal.

Dentro del pie existen articulaciones metatarsofalángicas que producen una mínima flexión(dorsal), extensión (plantar) y abducción, aducción y rotación. Las articulaciones interfalángicas solo flexionan y extienden. A continuación, en la figura 4 se muestra las articulaciones propias del pie humano.

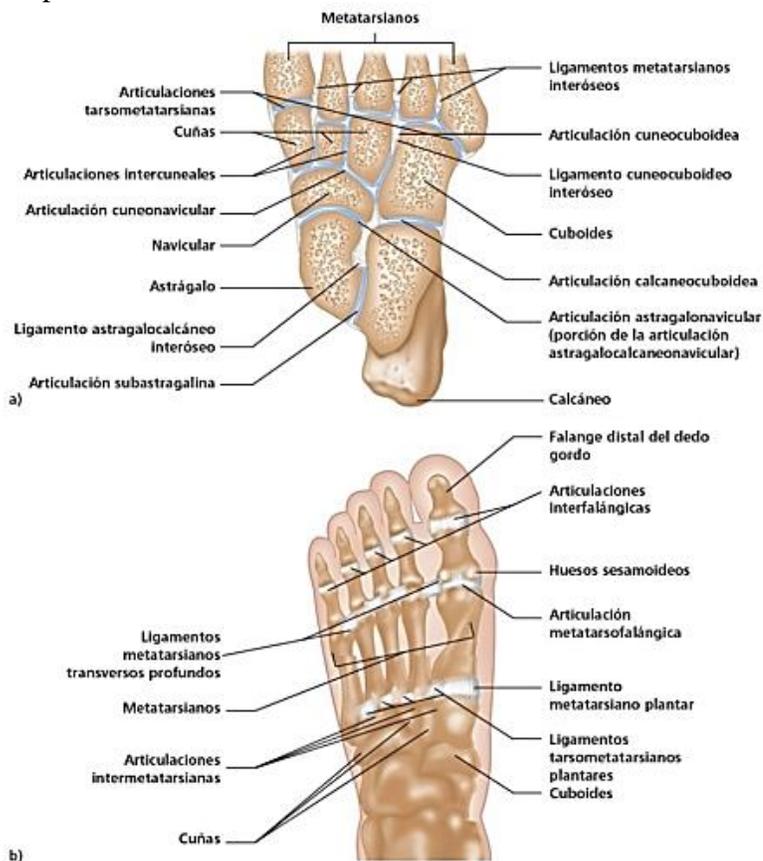


Figura 4 Articulaciones del pie: a) sección horizontal, b) vista plantar

Fuente: (Staugaard-Jones, 2014)

2.1.3 Partes del pie humano.

Camarena & Villegas (n.d) afirma que:

El pie se encuentra dividido en tres unidades anatómo-funcionales (p.216) estas son, el retropié, mediopié y antepié. El retropié se encuentra constituido por el astrágalo, que se articula con el calcáneo, y forma la articulación subastragalina.

La zona del mediopié está conformada por el escafoides, que se articula con la cabeza del astrágalo, el cuboides que se articula con el escafoides y las bases de los metatarsianos (Camarena & Villegas, n.d.). Finalmente, el antepié está integrado por los cinco metatarsianos y sus respectivas falanges: proximales, medias y distales con las que constituyen los diferentes rayos del antepié. En la figura 5, se muestra la división del pie en antepié, mediopié y retropié.

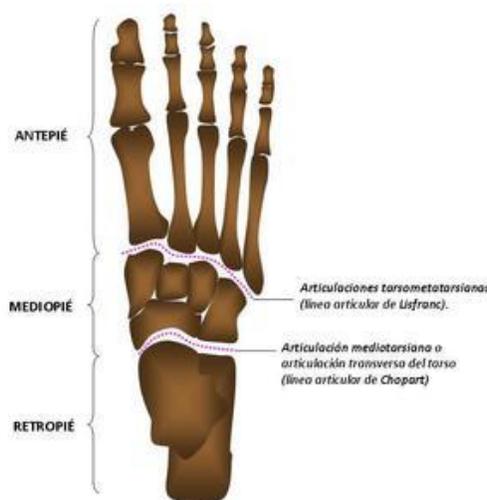


Figura 5 Antepié, Mediopié y retropié

Fuente: (Complejo Hospitalario de Navarra B (Servicio de Radiología) - Pamplona/ES)

2.1.4 Bóveda plantar.

Resulta ser que debido a la disposición que poseen los huesos del pie, se genera una forma de bóveda en la zona del Mediopié, esta bóveda se muestra en la figura 6, la cual le provee de una gran resistencia para la carga de peso y el esfuerzo. Es importante destacar que para lograr esto la bóveda se apoya en tres puntos los cuales se conocen como trípode podálico (Camarena & Villegas, n.d.,216).

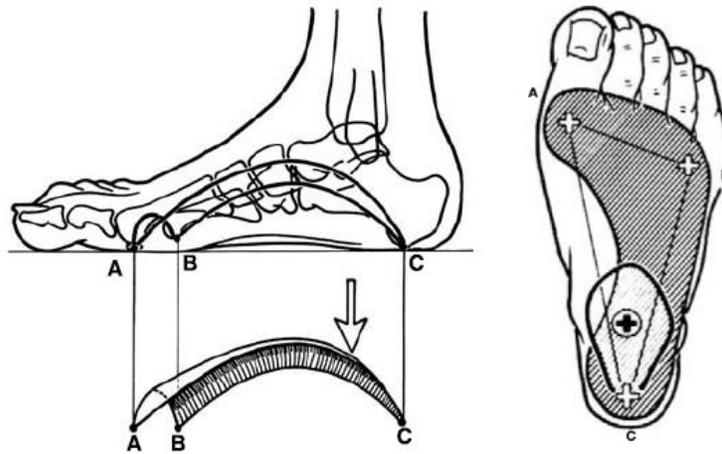


Figura 6 Bóveda del pie

Fuente: (dibujo: I.A. Kapandji, Cuadernos de Fisiología articular, volumen 3, fair use)

2.1.5 Tipos de pisada.

En cuanto a los tipos o clasificaciones, existen diferencias entre los investigadores, sin embargo, todos coinciden en tres tipos básicos de pisada, las cuales son la pisada normal o neutra, pronadora o plana y supinadora conocida también como cava. La pisada neutra se caracteriza en que tanto los tobillos como pies no tienden a girar ni hacia el interior y exterior cuando se corre, de esta manera tanto la pierna como pie y tobillo se alinean para definir el apoyo sobre el piso, esto se muestra en la figura 9 (Pérez Gutiérrez et al., 2012).

Asimismo, en la figura 7 se muestra la pisada pronadora también conocida como plana, en este tipo de pisada el punto localizado entre el dedo gordo y segundo dedo del pie, así como el extremo izquierdo del mediopié y la parte media del talón, constituyen el lugar donde se localiza una mayor presión (Pérez Gutiérrez et al., 2012).

Por otra parte, la pisada supinadora es lo contrario a la pronadora (ver figura 7) pues los puntos que reciben una mayor presión son el primer metatarsiano del dedo gordo del pie, extremo derecho del mediopié, y parte media del retropié (Pérez Gutiérrez et al., 2012).

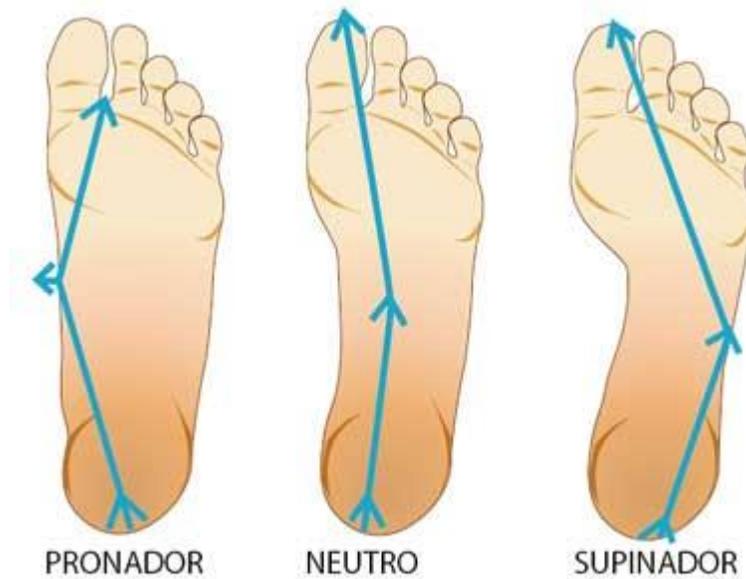


Figura 7 Tipos de pisada

Fuente: (Cohen, 2013)

2.1.6 Presiones plantares.

Es de gran utilidad realizar la medición de la presión plantar para la detección de enfermedades del pie, como la metatarsalgia o neuropatía diabética, en la evaluación de la deformación del pie, en la medicina deportiva, la evaluación funcional del pie prequirúrgica y posquirúrgica, seguimiento de tratamientos protésicos y la evaluación de plantillas, entre otros (Andrés Díaz, Torres, Ignacio Ramírez, Fernanda García, & Álvarez, 2007).

2.1.6.1 Presiones plantares en estática.

Cuando una persona se encuentra en apoyo bipodal el peso del cuerpo se transmite a lo largo de ambas extremidades inferiores repartiéndose el peso corporal en un 50% para cada pie. El astrágalo, al ser el primer hueso del pie es el encargado de distribuir esta fuerza hacia sus puntos de apoyo.

El pie en estática forma dos triángulos, el primero, conocido como posterior o de apoyo, va desde el calcáneo hasta la cabeza de los metatarsianos; el otro llamado anterior o de propulsión, está formado por los metatarsianos y los dedos (Andrés Díaz, Torres, Ignacio Ramírez, Fernanda García, & Álvarez, 2007).

Al realizar un análisis de la biomecánica del pie estático e intentar determinar cuál es la proporción del peso corporal que es soportada tanto por el talón, como del antepié se han planteado algunas teorías. Según Morton esta proporción es la misma, es decir un 50% hacia cada lugar, sin embargo, Viladot, Padovani, Arcan, entre otros establecen que existe una carga mayor en el talón (Andrés Díaz et al., 2007).

De cierta manera resulta complicado establecer la distribución real del peso en estas áreas, ya que este puede variar significativamente en cada persona debido al balanceo corporal, este movimiento hace que el peso que soportan estas zonas varíe constantemente, además esta distribución depende de la posición del pie (Andrés Díaz et al., 2007).

En resumen, la mayoría de los estudios coinciden en que el área del talón recibe una presión superior comparada con el resto del pie y que por otra parte la presión resulta ser muy baja en la banda externa del mediopié (Andrés Díaz et al., 2007).

2.1.6.2 Factores que influyen en las presiones plantares.

Existen factores que influyen sobre la distribución de las presiones plantares, como son el peso, la edad y el sexo. En base al criterio de varios autores, la correlación que existe entre el peso y las presiones plantares es casi nula, sin embargo, se acepta la relación entre estos factores.

Por ejemplo, ciertos criterios afirman que tanto al andar como al correr cuanto menor es el peso corporal, menores son las presiones en todo el pie, excepto en los dedos (Andrés Díaz et al., 2007).

En general, se podría decir que los sujetos pesados tienden a usar menos la zona medial del antepié, en personas con sobrepeso ya sea que se encuentren con o sin calzado, existe una alteración de la distribución de presiones plantares, al observarse un incremento en la zona lateral del pie, principalmente en la fase media de su contacto, con menores registros en la cabeza del primer metatarsiano (Andrés Díaz et al., 2007).

En cuanto a la edad las presiones plantares en niños son menores que en adultos. Debido a su menor peso, además existe una mayor presión sobre la cabeza del primer metatarsiano debido al valgo de rodilla presente frecuentemente, lo que conduce a una mayor pronación del pie (Andrés Díaz et al., 2007).

En personas que se encuentren entre los 60 a 70 años, su pie es más horizontal en el contacto de talón, debido a un menor rango de movimiento en las articulaciones de las extremidades inferiores, lo que condiciona una disminución de la fuerza de reacción vertical y de los picos de presión durante el apoyo (Andrés Díaz et al., 2007).

Finalmente, el sexo de una persona no determina la distribución de las presiones plantares, sino más bien el uso de diferente calzado y las características antropométricas, como un menor peso en las mujeres (Andrés Díaz et al., 2007).

2.1.7 Patologías del pie.

El estudio de trastornos fisiológicos y anatómicos tanto de órganos, tejidos, o cualquier otro sistema del cuerpo humano, es considerado una patología. El vínculo que existe entre la marcha humana y los distintos tipos de calzados, ha forzado al pie a soportar presiones sistemáticas, a sostener unas tracciones laterales específicas y a limitar las posibilidades de flexión y extensión.

Todo esto es lo que generan las distintas patologías que puede sufrir el pie (Bernal Jiménez & Domínguez Maldonado, 2016). Los principales cuadros patológicos son mostrados a continuación:

2.1.7.1 Pie plano

Es aquel en el cual la superficie de la huella plantar aumenta, es decir existe ausencia de la bóveda plantar. La forma de pisar de este pie es hacia el interior de forma pronadora. En la figura 8 se muestra los puntos de presión que un pie plano posee y su huella plantar.



Figura 8 Pie plano

Fuente: (Puratich, 2011)

En el caso de niños o recién nacidos, es normal el pie plano, debido a que el arco de la bóveda plantar comienza a desarrollarse a partir de los 4 a 5 años. Es común encontrar que niños se quejan de dolor en las pantorrillas, calambres nocturnos, una marcha tardía, cansancio precoz, deformación en su calzado. En la adolescencia estas dolencias se mantienen, pero si existe un buen desarrollo muscular, llegan a hacerse asintomáticos (Guerra Pozo & Montes Salgado, 2014).

2.1.7.2 Pie plano normal

En este tipo de pie se observa parte del arco plantar, es decir se presenta en la impresión plantar un arco mínimo en la zona de la bóveda plantar presentándose de igual manera área mayoritaria de pisada, se muestra esto en la figura 9. En este caso igual la pisada sigue siendo hacia dentro, es decir la pisada interna o pronadora (Carreño Abad & Cabrera Sáenz, 2014).



Figura 9 Pie plano normal

Fuente: (Puratich, 2011)

2.1.7.3 Pie normal

El pie normal se presenta de la forma más natural es decir se realiza una pisada de adentro hacia afuera es decir primero los metatarsos y después la zona del calcáneo, ver figura 10, en este caso el desgaste del zapato es uniforme (Carreño Abad & Cabrera Sáenz, 2014).

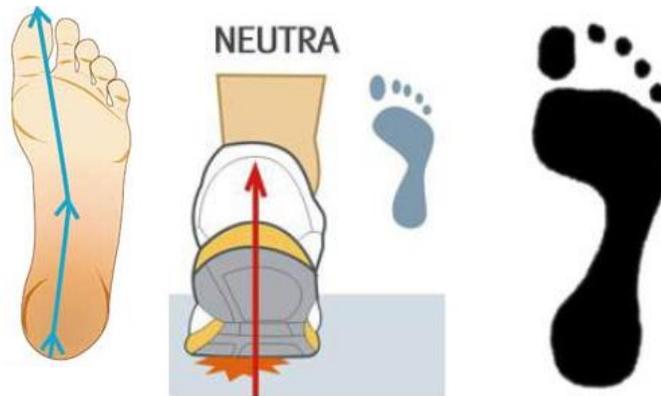


Figura 10 Pie normal

Fuente: (Puratich, 2011)

2.1.7.4 Pie normal cavo

En la figura 11 se muestra este tipo de pie, su cualidad principal es que el arco plantar empieza a disminuir su medida horizontalmente, es decir se presenta desgaste en la parte exterior del zapato haciendo que se pise más hacia esta zona, logrando disminuir la zona de contacto en la parte central del pie (Carreño Abad & Cabrera Sáenz, 2014).



Figura 11 Pie normal cavo

Fuente: (Puratich, 2011)

2.1.7.5 Pie cavo:

Es aquel que presenta una elevación atípica o exagerada de la bóveda plantar, los dedos quedan agarrotados hacia adentro, dando origen a que se presente desgaste en el zapato en la parte exterior hacia afuera, esto se muestra en la figura 12 (Carreño Abad & Cabrera Sáenz, 2014).



Figura 12 Pie cavo

Fuente: (Puratich, 2011)

2.1.8 Antropometría del pie.

La antropometría consiste en obtener datos (medidas), que en este caso son los pies, y que por naturaleza tienen características diferentes en cuanto a medidas se refiere el un pie del otro (Carreño Abad & Cabrera Sáenz, 2014).

2.1.8.1 Perfil Antropométrico Ecuatoriano.

Es importante destacar que dentro del país se han desarrollado pocas investigaciones relacionadas con la antropometría del pie, sin embargo, en el 2013 se desarrolló un estudio en esta área realizado de manera conjunta entre el Ministerio Coordinador de Producción, la Caltu, expertos brasileños y la organización Plasticaucho Industrial, dicho análisis tuvo una duración de alrededor de dos años y una inversión de 350 mil dólares (Acosta Arroyo, 2013).

Para dicho estudio la población analizada fue de alrededor de 741 personas entre hombres y mujeres de diez ciudades del país, la edad de los censados estaba entre los 18 y 59 años. Los resultados obtenidos (Figura 13) fueron los siguientes, en primer lugar, con el muestreo de la

población con un total de 287 hombres y 484 mujeres de los cuales, la media de edad fue 29 años en el caso de los hombres y 27 en mujeres.

Un dato importante fue determinar el peso de las personas censadas, debido a que la superficie plantar y el análisis del arco dependen del peso que soportan los pies, dicho esto se determinó que el 13% de la población tiene sobrepeso y el 40% de individuos tiene peso normal (Carreño Abad & Cabrera Sáenz, 2014). A su vez, el 77% de las mujeres calza entre 34 a 37 y el 56% de los hombres calza de 38 a 40.



Figura 13 Media del tamaño de calzado en el Ecuador

Fuente: (Acosta Arroyo, 2013)

- **Pie cavo**

La investigación proporcionó de igual manera información importante sobre los tipos de pisadas más comunes existentes, por ejemplo, en cuanto al número de personas que poseen pie cavo, se puede decir que en la costa el 1,5% de mujeres sufre de esta patología, por otra parte, en la región sierra el porcentaje de esta anomalía para el grupo femenino es del 1,4%. A su vez en el caso de los hombres en la costa el porcentaje es de 1.5% contra el 0,3% en la sierra. (Acosta Arroyo, 2013). Estos resultados son mostrados de igual forma en la figura 14.



Figura 14 Resultado Pie Cavo

Fuente: (Acosta Arroyo, 2013)

- **Pie plano**

En la figura 15 se muestra que, en el caso del pie plano, se presenta una proporción del 51% en el grupo femenino de la costa, y de un 42% en las mujeres de la sierra. Por otra parte, el 61% de hombres en la costa sufre de pie plano, mientras que en la sierra es del 43% (Acosta Arroyo, 2013).

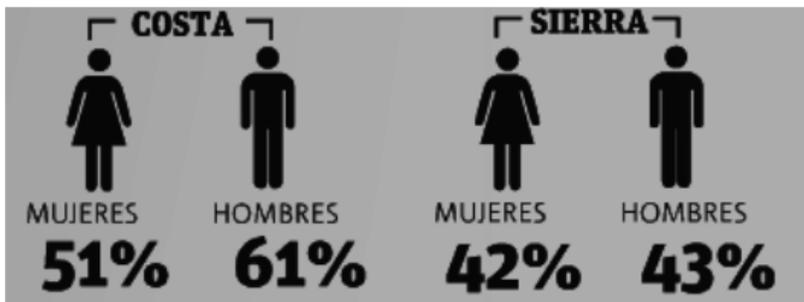


Figura 15 Resultado Pie Plano

Fuente: (Acosta Arroyo, 2013)

- **Pie normal**

En cuanto a los resultados de un pie normal, la figura 16 muestra que en la costa el 46% de mujeres y el 46% de hombres posee un pie normal, por otra parte, en la Sierra el porcentaje fue del 56% para mujeres y un 55% para hombres.



Figura 16 Resultado Pie Normal

Fuente: (Acosta Arroyo, 2013)

2.1.8.2 Perfil Antropométrico en niños.

En cuanto se refiere al estudio antropométrico de niños en el país, se realizó una investigación en la Universidad de Cuenca en el año 2015, desarrollada por la Lic. Liria Zambrano, en la cual se evalúan diferentes tipos de pisadas.

Dicho análisis se lo realizó con el objetivo de establecer la prevalencia de ciertas alteraciones en la huella plantar y sus efectos colaterales en niños. Los exámenes fueron realizados a 90 pequeños que asisten a tres centros infantiles del buen vivir en la ciudad de Cuenca, que se encuentran entre los tres y cuatro años. Como resultado el predominio de las alteraciones en la huella plantar fue evidente al establecer un porcentaje del 71% del total de la población evaluada (Zambrano Zambrano, 2015).

Las alteraciones con mayor incidencia fueron el pie plano bilateral con un alto porcentaje el cual fue del 56,7%, el talo valgo con el 20% y antepié aducto derecho con el 12,2%. Por otra parte, los efectos colaterales asociados a estas afecciones fueron el desgaste de calzado en los puntos de apoyo 55,6%, alteraciones angulares en un 27,8%, alteraciones posturales de los dedos del pie 20% y dolor en zonas determinadas del pie con un 17,8% (Zambrano Zambrano, 2015).

2.1.9 Podometría

Esta técnica es utilizada para medir las presiones que se aplican sobre la planta del pie o sobre una región específica de la misma. En el campo clínico es utilizada para el diseño y construcción de ortesis y plantillas, en la evaluación de un paciente posterior a un proceso quirúrgico, o para evaluar la respuesta de un paciente a un determinado tratamiento (Herrera, En, Quiñones, Letechipia, & Lidia Núñez, 2003). El instrumento utilizado en esta técnica es el podómetro, y dentro de su clasificación se tiene:

- Cualitativos
- Cuantitativos

2.1.9.1 Podómetros cualitativos.

Basan su uso en la habilidad y experiencia del médico que los utiliza, de esta manera el resultado en los procesos de evaluación, diagnóstico o tratamiento de un paciente depende de cada médico y no de un indicador numérico que cuantifique los resultados (Herrera et al., 2003). Dentro de los podómetros cualitativos más utilizados tenemos:

2.1.9.1.1 Podoscopio.

También conocido como podómetro es un versátil y sencillo aparato clínico de diagnóstico que permite visualizar y estudiar las huellas plantares y los distintos ejes de los pies. De esta manera permite llevar un estudio del pie, tanto normal como patológico (GORGUES, 2008). La Figura 17 muestra el modelo de un podoscopio clásico.



Figura 17 Podoscopio modelo clásico
Fuente: (MOBICLINIC ®, 2018)

2.1.9.1.2 Pedígrafo.

La Figura 18 muestra el modelo de un pedígrafo el cual es una pequeña y fina caja de goma llena de tinta en la que se introduce un folio y al pisar el paciente, su huella queda plasmada en el papel. Se puede usar tanto en estática como en dinámica, pero en ningún caso permite analizar porcentajes de carga, estado del baricentro ni obtener un molde del pie real, impidiendo así conocer la altura exacta de los arcos plantares (Pereira, 2016).



Figura 18 Pedígrafo
Fuente: (Cruz Roja Española, 2018)

2.1.9.2 Podómetros cuantitativos.

Llamados también podómetros electrónicos presentan resultados numéricos repetibles, además aprovechan las ventajas de la electrónica moderna para obtener y almacenar la información para su posterior análisis (Herrera et al., 2003). Los instrumentos más representativos de este tipo se comercializan a través de las marcas EMED y Tekscan.

2.1.9.2.1 Plataformas de pedografía Emed®.

Es un sistema electrónico de muy alta precisión capaz de registrar y evaluar la distribución de presión debajo del pie en condiciones estáticas y dinámicas, en la Figura 19 se muestra el sistema (novel.de, 2018).



Figura 19 Sistema EMED
Fuente: (novel.de, 2018)

2.1.9.2.2 Sistema F-Scan Tekscan™.

Es un sistema (Figura 20) que proporciona información en dinámica de la presión, fuerza y sincronización para la función del pie y el análisis de la marcha. Esta información se usa en aplicaciones del mundo real, como diseñar y probar ortesis, cargas en pies diabéticos, evaluar el calzado y técnicas de atletas de élite (Tekscan, 2018a).



Figura 20 Sistema F-Scan

Fuente: (Tekscan, 2018a)

2.2 Adquisición de datos

Todos los sistemas de procesamiento industrial, fábricas, maquinaria, instalaciones de ensayo y vehículos consisten en componentes informáticos de hardware y software cuyo comportamiento sigue las leyes de la física. Dichos sistemas contienen miles de fenómenos eléctricos y mecánicos que cambian continuamente. El correcto funcionamiento de este tipo de sistemas depende de ciertos eventos en el tiempo y de los parámetros de las variables medidas (Measurement Computing Corporation, 2012).

La mayoría de las variables que pueden ser voltaje, peso, presión, etc. Deben ser medidas con un dispositivo que convierta los fenómenos en una forma de señal que el humano pueda interpretar, como una pantalla visual, un transductor de sonido, entre otros. Los dispositivos encargados de realizar la transformación de fenómenos físicos a señales eléctricas (viceversa) se denominan sensores o transductores. La creciente necesidad de registrar y preservar estos fenómenos y analizarlos en un momento posterior obligó a los ingenieros a desarrollar registradores de datos y sistemas de adquisición (Measurement Computing Corporation, 2012).

2.2.1 Sistemas de adquisición de datos.

Estos sistemas han evolucionado a lo largo del tiempo pasando de registradores electromecánicos a sistemas completamente electrónicos capaces de medir cientos de variables simultáneamente (Measurement Computing Corporation, 2012). A continuación, en la Figura 21 se muestra un diagrama que representa a los componentes dentro de un sistema de adquisición de datos.

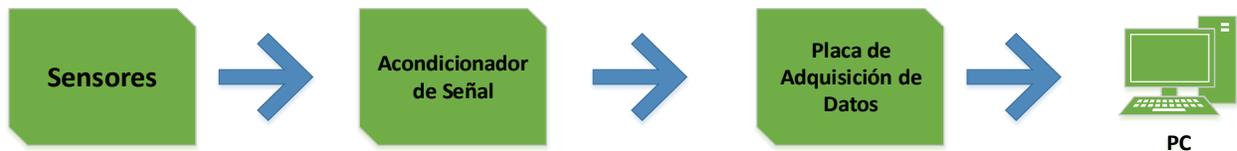


Figura 21 Diagrama Sistema de adquisición de datos
Fuente: Autoría

2.2.2 Equipo de adquisición de datos basado en PC.

El uso en la actualidad de tarjetas de adquisición para el procesamiento de datos ha permitido que la aplicación de diferentes tipos de sistemas de investigación pequeños sea configurada en este tipo de dispositivos. Sin embargo, un problema que acarrearán las tarjetas de adquisición es la presencia de ruido interno, que puede ser electromagnético y electrostático, lo cual a menudo interfiere con la variable medida (Measurement Computing Corporation, 2012).

El aislamiento y blindaje han ayudado a resolver este problema, pero muchos fabricantes también brindan el acondicionamiento de señal. Todos los sistemas de adquisición de datos basados en PC registrarán datos extremadamente precisos, repetibles, confiables y sin errores siempre que estén conectados y operados de acuerdo con las prácticas recomendadas por el fabricante (Measurement Computing Corporation, 2012). Dichas prácticas incluyen:

- Selección de sensores correctos para la aplicación
- Conductor o cable adecuado
- Capturar señales en la magnitud, rango y frecuencias adecuados
- El entorno también debe considerarse, especialmente para temperaturas extremas, golpes y vibraciones.

2.3 Aprendizaje automático

Machine Learning (Aprendizaje automático) es la habilidad que poseen las máquinas para aprender, es decir es el desarrollo de algoritmos que le permiten al sistema tomar decisiones, es considerado como un subcampo de la inteligencia artificial (Somvanshi & Chavan, 2016). El campo de aplicación del aprendizaje automático es muy amplio, se lo puede encontrar en el filtrado de correo no deseado, reconocimiento óptico de caracteres y visión artificial.

2.3.1 Sistemas de clasificación.

La clasificación es una tarea de reconocimiento de patrones en la cual se busca etiquetar a una entidad de cualquier tipo en base a ciertas propiedades que la caracterizan. Dentro del aprendizaje automático se distinguen tres categorías, como se muestra a continuación:

2.3.1.1 Aprendizaje supervisado.

En este tipo de aprendizaje, datos de entrenamiento son dados al algoritmo, los cuales son analizados y estudiados por el sistema. Este produce una función inferida que se puede usar para mapear nuevos ejemplos (Somvanshi & Chavan, 2016). El aprendizaje supervisado incluye dos categorías de algoritmos, por una parte, los de regresión: para valores de respuesta continua y clasificación, para valores de respuesta categóricos, en los que los datos se pueden separar en “clases” específicas. Entre los algoritmos de clasificación comunes se incluyen:

- **Máquinas de vectores de soporte (SVM)**

Es una técnica de aprendizaje supervisado, en la cual define los límites de decisión para las diferentes clases mediante planos de decisión. Desde el punto de vista informático, las SVM no trabajan bien con conjuntos de datos extremadamente grandes. Debido a que los cálculos no se adaptan de la mejor manera con la cantidad de ejemplos de capacitación, por lo tanto, se vuelven muy costosos (Marsland, n.d.).

- **Redes neuronales**

Esta técnica de aprendizaje automático consiste en unidades de procesamiento que intercambian datos o información. Su principal objetivo es la de reconocer patrones, incluyendo imágenes, manuscritos y secuencias de tiempo (Benítez, Escudero, & Kanaan, 2013). Un ejemplo de una red neuronal se muestra en la Figura 22.

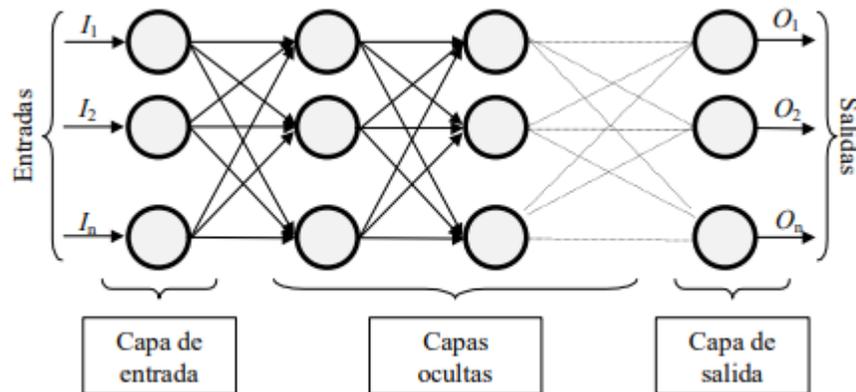


Figura 22 Ejemplo de una red neuronal conectada

Fuente: (Benítez et al., 2013)

- **Clasificador Naïve Bayes**

Este tipo de clasificador de aprendizaje automático resuelve el problema de decisión utilizando una distribución probabilística (Mapayi & Tapamo, 2018). Este tipo de algoritmo clasifica nuevos ejemplos $x = (x_1, \dots, x_m)$ asignándole la clase k que maximiza la probabilidad condicional de la clase, dada la secuencia observada de atributos del ejemplo, ver la Ec. 1 (Benítez et al., 2013).

Es decir:

$$\begin{aligned} \operatorname{argmax} P(k|x_1, \dots, x_m) = \\ \operatorname{argmax} \frac{P(k|x_1, \dots, x_m)P(k)}{P(k|x_1, \dots, x_m)} \approx \operatorname{argmax} P(k) \end{aligned} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde $P(k)$ y $P(x_i|k)$ se estiman a partir del conjunto de entrenamiento, utilizando las frecuencias relativas (estimación máxima verosimilitud).

- **Árboles de decisión**

El árbol de decisión es una técnica de aprendizaje supervisado, en la cual se puede representar reglas de clasificación inherentes a los datos, con una estructura de árbol n -ario que particiona los datos de manera recursiva (Benítez et al., 2013). Cada rama del árbol viene a ser una regla que toma una decisión entre una conjunción de valores de un atributo básico o realiza una predicción de la clase.

En la Figura 23 se muestra cómo trabaja un árbol de decisión simple, en ella se puede observar que dicho árbol es usado en una base de datos estudiantil. Fácilmente se puede clasificar las diferentes categorías de estudiantes.

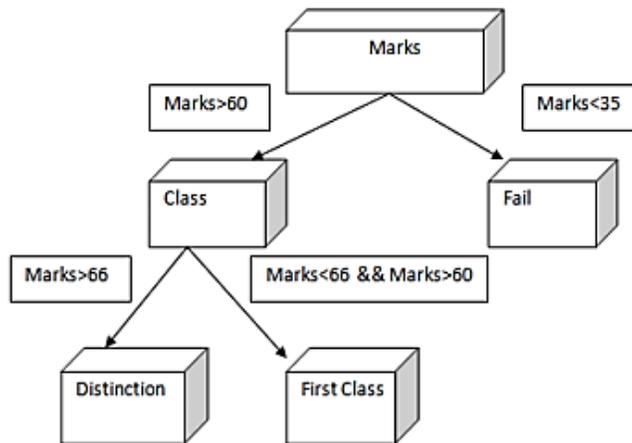


Figura 23 Ejemplo de árbol de decisión

Fuente: (Somvanshi & Chavan, 2016)

- **Vecinos más cercanos (k-NN)**

La técnica del clasificador k-NN, usa la clase de la instancia de entrenamiento más cercana mediante medidas de distancia para determinar la clase de una instancia de prueba (Mapayi & Tapamo, 2018). La definición de la medida de distancia apropiada para el problema a tratar debería tener en cuenta la importancia relativa de cada atributo y ser computacionalmente eficiente. Este algoritmo guarda todos los ejemplos durante el proceso de entrenamiento en memoria y la clasificación de nuevos datos se basa en las clases de los k ejemplos más cercanos (Benítez et al., 2013).

Para la obtención de los k vecinos más cercanos, se calcula la distancia entre el ejemplo a clasificar $x = (x_1, \dots, x_m)$ y todos los ejemplos guardados $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{im})$. La distancia euclidiana utilizada viene dada por la Ec. 2:

$$de(x, x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - x_{ij})^2} \quad Ec. 2$$

2.3.1.2 Aprendizaje no supervisado.

En el aprendizaje no supervisado no se proporcionan respuestas correctas, es el algoritmo el cual busca la manera de identificar similitudes entre las entradas, con el objetivo de que dichos datos de entrada puedan categorizarse juntas (Marsland, n.d.).

2.3.1.3 Aprendizaje reforzado.

Posee características entre el aprendizaje supervisado y no supervisado. El algoritmo recibe información cuando la respuesta es incorrecta, sin embargo, no se le explica como corregirla. Debe explorar y probar diferentes posibilidades hasta que pueda obtener la respuesta correcta (Marsland, n.d.).

2.4 Minería de datos

La minería de datos es un proceso de identificación de información relevante extraída de grandes volúmenes de datos, con el objetivo de descubrir patrones y tendencias estructurando la información obtenida de un modo comprensible para un posterior análisis (Mata, 2017).

La minería de datos nació de la idea de aprovechar la gran cantidad de datos que se almacenaban en áreas como el comercio, la banca o la salud, y la potencia de los nuevos ordenadores para realizar operaciones de análisis sobre esos datos. El data mining permite encontrar información oculta en los datos que no siempre resulta aparente, ya que, debido al gigantesco volumen de datos exigentes, gran parte de ese volumen nunca será analizado (Ballesteros, Iñiguez, & Velasco, 2018).

2.5 Sistemas embebidos

Por lo general al hablar de un sistema embebido, es conveniente mencionar sus componentes principales, como lo son software, hardware, sensores electrónicos y la comunicación utilizada para que los sistemas trabajen de forma eficiente. De esta manera el siguiente apartado tiene como objetivo explicar dichos componentes.

Un sistema embebido, es un circuito electrónico capaz de realizar operaciones de computación en tiempo real, cuyo objetivo es cumplir ciertas tareas específicas, como medir la temperatura, entre otros (Salas Arriarán, 2015).

2.5.1 Software y hardware libre.

La definición de Software libre significa que los usuarios tienen la libertad de ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el software. Es decir, el software libre es una cuestión de libertad, no de precio (“gnu.org,” n.d.).

El hardware abierto es un artefacto físico, ya sea eléctrico o mecánico, cuya información de diseño está disponible y es utilizable por el público, es decir cualquier persona puede modificar, distribuir y usar este dispositivo (Rubow, 2008).

2.5.2 Sensores

Un sensor se define como un dispositivo de entrada que provee una salida manipulable de una variable física medida (Germán Corona Ramírez, Abarca Jiménez, & Mares Carreño, 2014). La clasificación de los sensores puede ser muy diversa, pero las más comunes son por el tipo de variable a medir o por el principio de transducción utilizado. La clasificación por el principio de transducción no ofrece una idea clara sobre qué tipo de variable física puede medir este.

Por otra parte, la clasificación por el tipo de variable medida, suele ser la más común; sin embargo, tiene la desventaja de provocar cierta confusión, ya que un sensor puede ser utilizado para la medición de distintas variables físicas; por ejemplo, un sensor ultrasónico resulta muy útil si se desea medir proximidad, el nivel de un líquido, la presencia de un objeto, la velocidad de un fluido, etc. No obstante, su principio de funcionamiento es el mismo en todos los casos, y solo depende del tipo de configuración en que se coloque y como se interprete la señal de salida de este (Germán Corona Ramírez et al., 2014).

Dentro de la clasificación por el principio de transducción se puede establecer ciertos diferentes tipos, que son mostrados en la Tabla 1; mientras que las diferentes variables que pueden ser medidas por un sensor se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1 Clasificación de sensores por los principios de transducción

Clasificación por el principio de transducción
Piezoresistivo
Capacitivo
Piezoeléctrico
Ultrasónico
Magnético
Termoeléctrico
Fotoeléctrico
Químico

Fuente: (Germán Corona Ramírez et al., 2014)

Tabla 2 Clasificación de sensores por el tipo de variables

Clasificación por el tipo de variable
De posición, velocidad y aceleración
De nivel y proximidad
De humedad y temperatura
De flujo y presión
De color, luz y visión
De gas y PH
Biométricos
De corriente

Fuente: (Germán Corona Ramírez et al., 2014)

2.5.3 Comunicación inalámbrica.

En el desarrollo de sistemas embebidos la comunicación juega un papel muy importante. Básicamente lo normal sería que el sistema pueda comunicarse mediante el uso de interfaces estándar de cable o inalámbricas. Por su parte el desarrollo de la comunicación sin cables (inalámbrica) ha crecido rápidamente debido a su flexibilidad y movilidad. Los principales beneficios de las comunicaciones inalámbricas son, claro está la reducción de la restricción del uso del cable, bajo costo, la formación de red dinámica y su fácil implementación (Lee, Su, & Shen, 2007).

Dentro de la comunicación inalámbrica de corto alcance, destacan principalmente cuatro protocolos, detallados a continuación:

- **Bluetooth**

También conocido como IEEE 802.15.1, está basado en un sistema de radio inalámbrico destinado para dispositivos no tan costosos y de corto alcance, con el objetivo de reemplazar periféricos de ordenadores, esta gama de aplicaciones se las conoce como WPAN (Wireless Personal Area Network) (Lee et al., 2007).

- **Ultra wide band (UWB)**

El estándar IEEE 802.15.3 surgió de la necesidad de establecer redes WPAN que fueran capaces de enviar datos de manera rápida y eficiente. Uno de los datos importantes de UWB (Ultra wide band) es que su ancho de banda es superior a 110 Mbps (Lee et al., 2007).

- **ZigBee**

ZigBee o también conocido como IEEE 802.15.4, es un protocolo de redes inalámbricas diseñada para redes WPAN, es decir puede admitir dispositivos simples, los cuales tengan un consumo de potencia mínima y que operen dentro de un espacio operativo personal de 10m. Esta tecnología provee redes de malla autoorganizadas, multisaltos y fiables con una larga vida útil de la batería (Lee et al., 2007).

- **Wi – Fi**

Conocido como Fidelidad inalámbrica (Wi-Fi), abarca los estándares IEEE 802.11a/b/g, diseñados para redes inalámbricas de área local (WLAN). Esta tecnología permite que los usuarios puedan conectarse a Internet a velocidades de banda ancha cuando se conecten a un punto de acceso AP o en modo ad-hoc (Lee et al., 2007). A continuación, en la Tabla 3 se muestra una comparativa de los cuatro protocolos mencionados anteriormente:

Tabla 3 Tabla comparativa tecnologías inalámbricas

Estándar	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi
Especificación IEEE	802.15.1	802.15.3a	802.15.4	802.11a/b/g
Banda de frecuencia	2.4 Ghz	3.1-10.6 Ghz	868/915 Mhz; 2.4 Ghz	2.4 Ghz; 5 Ghz
Velocidad de señal Max	1 Mb/s	110 Mb/s	250 Kb/s	54 Mb/s
Rango nominal	10 m	10 m	10- 100 m	100 m
Potencia nominal TX	0-10 dBm	-41.3 dBm/Mhz	- (-25) 0 dBm	- 15 20 dBm
Número de canales de RF	79	(1-15)	1/10; 16	14 (2.4 Ghz)
AB del canal	1 Mhz	500 MHz 7.5 GHz	0.3/0.6 MHz; 2 MHz	22 MHz
Tipo de modulación	GFSK	BPSK, QPSK	BPSK (+ ASK), O-QPSK	BPSK, QPSK COFDM, CCK, M-QAM

Fuente: (Lee et al., 2007)

2.6 Visualización de datos

La visualización de datos es la representación gráfica de la información que tiene dos propósitos. La primera la interpretación y construcción de significado a partir de los datos y la segunda, la comunicación (GUÍA METODOLÓGICA PARA PLANES OPEN DATA SECTORIALES MARZO 2016 Visualización de datos Definición, tecnologías y herramientas, n.d.).

Desde el punto de vista de los datos, concretamente datos estructurados y su explotación visual, se puede establecer la siguiente clasificación según complejidad y elaboración de información.

- **Elementos básicos de representación de datos**

Un elemento básico de representación puede ser un gráfico, un mapa, tablas de datos, un grafo, etc. Algunos tipos de visualizaciones básicas son, Gráficas: barras, líneas, columnas, puntos, “tree maps”, etc. Tablas: con anidación, dinámicas, de transiciones, etc.; y Mapas: burbujas, mapa de calor, de agregación.

- **Cuadros de mando**

Es una composición compleja de visualizaciones individuales que guardan coherencia y una relación temática entre ellas.

- **Infografía**

Conocida como una composición elaborada de visualizaciones que construye, a partir de diferentes elementos, un significado complejo para el usuario. Una infografía posee un componente de elaboración manual y de diseño en su construcción muy elevado.

2.6.1 Software de visualización de datos.

Dentro de las diversas plataformas que existen para la visualización de datos, a continuación, se analizarán tres Entornos Integrados de Desarrollo (IDE), los cuales son, Processing, Visual Studio y Eclipse.

- **Processing**

Es un entorno y lenguaje de programación iniciado en 2001. Se trata de una versión simplificada de Java, pero también es un IDE, su interfaz gráfica se muestra en la figura 24, una de las grandes virtudes de este software es su simplicidad (Mosaic tecnologías y comunicación multimedia, 2016).

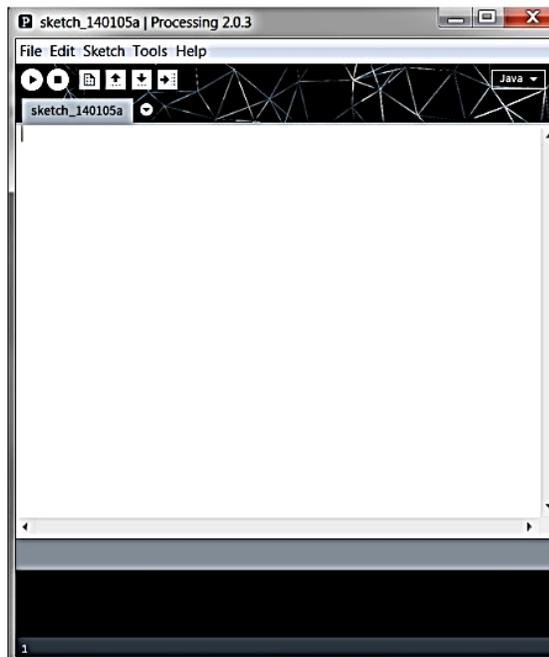


Figura 24 Interfaz de inicio Processing

Fuente: (DIYMakers, 2014)

- **Visual Studio.**

Es un ambiente gráfico de desarrollo de aplicaciones para el sistema operativo Windows. Estas aplicaciones están basadas en objetos y son manejadas por eventos. Esta plataforma se deriva del lenguaje Basic, el cual es un lenguaje de programación estructurado. Sin embargo, Visual Basic emplea un modelo de programación manejada por eventos (Fundamentos de Programación en Visual Basic, n.d.). El entorno de trabajo de Visual Basic se lo muestra en la figura 25.

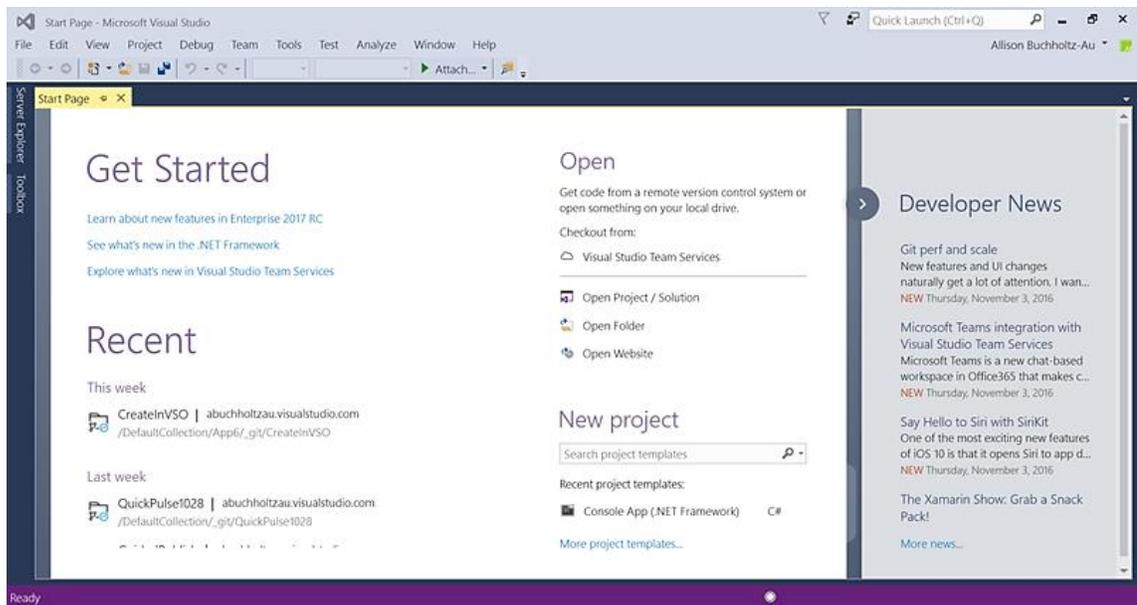


Figura 25 Pantalla de inicio Visual Studio

Fuente: (VBTUTOR.NET, 2018)

- **Eclipse.**

Es una plataforma de desarrollo de código abierto basada en Java al igual que Processing. Eclipse tiene un conjunto de complementos, incluidas las herramientas de desarrollo Java (JDT). El entorno de trabajo de Eclipse se lo muestra en la figura 26.

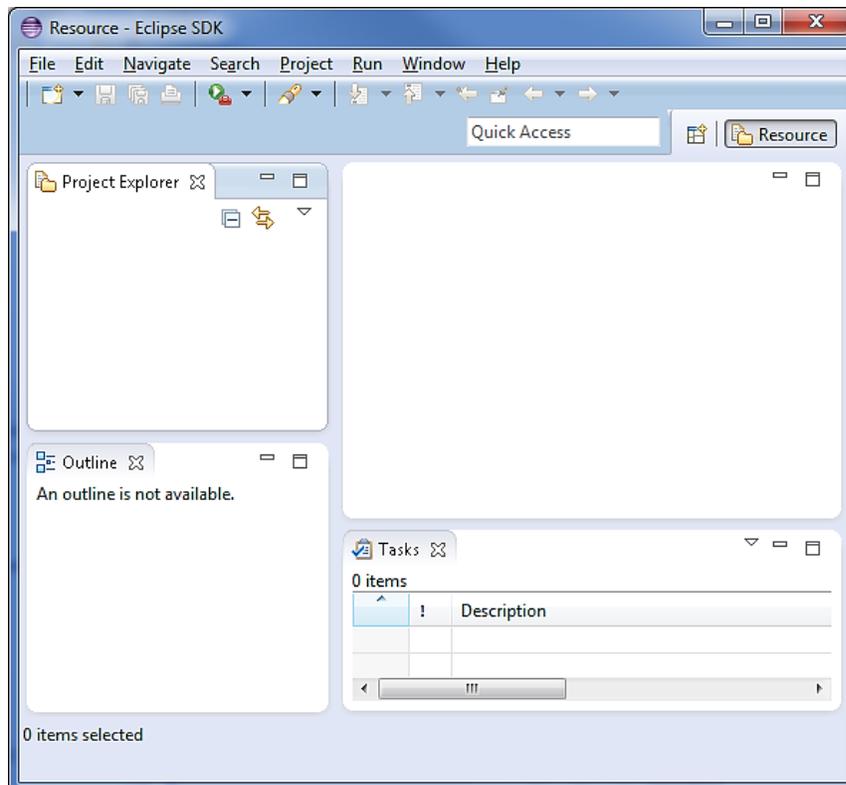


Figura 26 Entorno de trabajo Eclipse

Fuente: (eclipse, 2019)

3 Capítulo III

DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE PROBLEMAS EN PISADA (PIEMEG)

Este capítulo tiene como finalidad tratar temas relacionados con el proceso del diseño del sistema electrónico de detección de problemas en pisada, a partir de este momento denominado PIEMEG detallándose requerimientos, descripción y arquitectura que se representará por medio de un diagrama de bloques del prototipo, una vez definidos estos parámetros se procederá al desarrollo de este.

El diseño de un sistema debe seguir una serie de procesos, una metodología, de esta manera se garantiza que el usuario se sienta satisfecho con el prototipo final. Por ello el modelo que se utilizará para el desarrollo de este proyecto es el modelo en V ya que provee una guía metodológica acorde con las necesidades de este proyecto. Es conveniente destacar que, dentro del uso de este modelo, es de gran ayuda contar con el uso de la técnica del Benchmarking al momento de elegir los sensores a utilizarse dentro del sistema.

3.1 Situación actual

El estudio del funcionamiento de las extremidades inferiores, concretamente de los pies, ha incrementado en los últimos años, debido a la gran importancia que representan estos miembros. Los pies soportan el peso corporal de una persona convirtiéndose en la base de sustentación al momento de la movilización bipodal.

Sin embargo, en base a una entrevista desarrollada a la Lic. Daniela Zurita, docente de la carrera de Terapia Física de Universidad Técnica del Norte, son pocos los centros dedicados al diagnóstico de patologías en los pies en el Ecuador, aún más reducido es el número en la ciudad de Ibarra, motivo por el cual en la Universidad Técnica del Norte no existe ningún estudio relacionado con la antropometría del pie tanto para adultos como niños. Este comportamiento muestra la falta de información a la ciudadanía sobre cuan importantes son los pies en la actividad humana. Como ya es de conocimiento las afecciones en los pies pueden traer lesiones en diversas áreas del cuerpo humano como dolor en rodillas, columna y con un diagnóstico temprano, es posible que la persona afectada lleve un mejor estilo de vida.

Es necesario realizar el análisis de pisadas en niños, pues en Ecuador, es normal observar que niños de edad temprana (1-2 años) usan zapatos ortopédicos, esto no es recomendable. El completo desarrollo del pie inicia entre los 4 y 5 años, solo a partir de estas edades es recomendable el uso de un calzado especial para contrarrestar cualquier patología. (Montes-Alguacil & others, 2016). Tomando en cuenta esta información es importante realizar el sistema de detección de pisadas en niños en edades tempranas a partir de los cuatro años, con lo cual se puede llevar un monitoreo o estudio de la evolución de la pisada del paciente.

Es así como el enfoque de PIEMEG está orientado hacia niños que se encuentren entre las edades de 4 a 5 (talla 26) y de 11 a 12 años (talla 35), con el objetivo de establecer un estudio de la evolución de la pisada desde una edad temprana. Este sistema permitirá la identificación de tres tipos de pisadas en la población ya explicada con lo cual pretende convertirse en un apoyo al especialista en la toma de decisiones sobre cierta patología.

3.2 Metodología

Una metodología es un conjunto de técnicas y métodos que permite abordar, de una forma correcta cada una de las actividades del ciclo de vida de un proyecto de desarrollo. Las metodologías están basadas en una combinación de los modelos de proceso de desarrollo genéricos como el modelo en V.

3.3 Modelo en V

El modelo en V introduce una forma comprensiva de pruebas, cada fase de integración inicia con sus respectivos tests, esto provee una sólida integración del software y el sistema (Sharon, 2009), dichas fases son mostradas en la figura 27 y a continuación se detallan las funciones de cada una de ellas:

- **Definición de Especificaciones (Fase 1).** - Se deben definir y documentar los diferentes requisitos del sistema a desarrollar por parte de los stakeholders.
- **Diseño global (Fase 2).** - También llamado diseño de alto nivel. Su objetivo es obtener un diseño y visión general del sistema.
- **Diseño en detalle (Fase 3).** – Consiste en detallar cada bloque de la fase anterior.
- **Implementación (Fase 4).** - Es la fase en la que se materializa el diseño en detalle.
- **Test unitario (Fase 5).** - En esta fase se verifica cada módulo de hardware (HW) y software (SW) de forma unitaria, comprobando su funcionamiento adecuado.
- **Integración (Fase 6).** – En esta fase se integran los distintos módulos que forman el sistema. Se comprueba el cumplimiento de los requisitos establecidos.

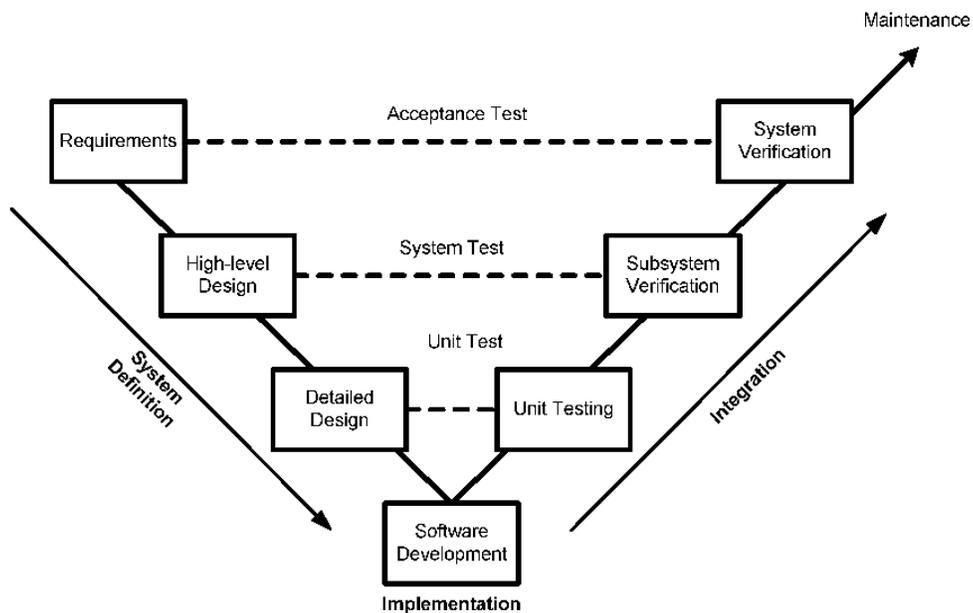


Figura 27 Etapas del modelo en V

Fuente: (Sharon, 2009)

3.4 Definición de especificaciones o requerimientos (FASE 1)

Como primera fase del desarrollo de PIEMEG, se encuentra la etapa de definición de requerimientos, para lo cual se procede a realizar la definición de estos por parte de los usuarios. Las especificaciones o requerimientos del sistema son obtenidos a través de encuestas realizadas a los stakeholders, las cuales se las puede observar en el anexo 2.

Los stakeholders son las personas o entidades que participan directa o indirectamente en el desarrollo del prototipo, en este caso los usuarios de PIEMEG. A continuación, en la Tabla 4 se muestran los stakeholders que participan en el diseño del sistema.

Tabla 4 Lista de Stakeholders

Lista Stakeholders
1. Usuarios del sistema (Niños entre 4 a 5 años y de 11 a 12 años)
2. Edison Fuentes (Desarrollador del Proyecto)

Fuente: Autoría

Para el desarrollo del sistema, se establece las especificaciones de requerimientos. Los cuales al ser obtenidos deben tener las siguientes características: completos, inequívocos, correctos, trazables, modificables y verificables. Para obtener una buena especificación de requerimientos, se debe plantear los requisitos funcionales y no funcionales del sistema.

- **Requerimientos funcionales.** – Son declaraciones de los servicios que proveerá el sistema, de manera que este reaccione en situaciones particulares, es decir cómo va a funcionar el sistema.
- **Requerimientos no funcionales.** – Son restricciones de los servicios o funciones ofrecidos por el sistema. Incluyen restricciones de tiempo, sobre el proceso de desarrollo, estándares, rendimientos, interfaz, operación, recursos, seguridad, entre otros.

3.4.1 Requerimientos funcionales.

Para el desarrollo de PIEMEG en base a las encuestas realizadas a los stakeholders, las cuales se encuentran en el anexo 2, se obtienen los siguientes requerimientos funcionales.

- ❖ El sistema debe poseer sensores flexibles e imperceptibles al usuario, garantizando la comodidad en la prueba.
- ❖ Los sensores deben ser localizados de tal manera que cubran las tres áreas del pie, es decir: antepié, mediopie y retropié.

- ❖ El sistema debe estar constituido por un bloque de acondicionamiento de señal, para que los valores sean reconocidos por la tarjeta de adquisición de datos.
- ❖ El administrador debe poseer un ordenador, desde el cual se puede controlar el sistema y observar la detección de pisadas.
- ❖ El sistema debe poseer un dispositivo que active y desactive el sistema electrónico en la plataforma.
- ❖ Para el inicio de la prueba, el administrador debe pulsar un botón de Inicio en la interfaz gráfica del sistema, de esta manera se inicia la comunicación serial entre la tarjeta de adquisición de datos y el ordenador.
- ❖ La prueba debe iniciarse una vez que el paciente se encuentre totalmente erguido, y para evitar lecturas atípicas, el test debe realizarse luego de 5 segundos de que el paciente se haya colocado en la plataforma.
- ❖ Voltaje de alimentación a 110 voltios, 60 Hz.

3.4.2 Requerimientos no funcionales.

De la misma forma, gracias al aporte de las encuestas se obtuvieron los siguientes requerimientos no funcionales que debe poseer el PIEMEG:

- ❖ La plataforma debe tener el tamaño suficiente para albergar a todos los dispositivos que conforman el sistema.
- ❖ Se debe visualizar las áreas de mayor presión en la pisada mediante un mapa de calor.
- ❖ El sistema debe poseer en su plataforma un logotipo identificativo.
- ❖ El material con que se elabore la plataforma debe ser de baja conductividad eléctrica y bajo costo económico.

3.5 Diseño global (FASE 2)

En esta fase se procede a mostrar un diseño en bloques y descripción general de PIEMEG, en el diseño del sistema ya que se trata de dos prototipos, se explicará el proceso de diseño y construcción del sistema para edades de 11 a 12 años, teniendo en cuenta que el proceso para el sistema destinado a edades de 4 a 5 años es el mismo, excepto el tamaño de las plantillas. Una vez finalizada esta etapa se procede al diseño de cada uno de los bloques del sistema, los cuales son presentados y explicados en esta sección.

3.5.1 Descripción general del funcionamiento del sistema PIEMEG

El presente prototipo pretende detectar problemas en la pisada mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático, dicho sistema está enfocado a niños de 4 a 5 años que calcen 26, y niños de 11 a 12 años que calcen 35 aproximadamente.

El funcionamiento de PIEMEG, dispone de un botón para encender o apagar el sistema electrónico. Para iniciar un test el administrador del sistema debe ejecutar la aplicación de PIEMEG en el ordenador. A continuación, a través de un botón en la interfaz gráfica se ingresan los datos del paciente, como nombres, apellidos, edad y peso. Luego el paciente debe pararse en la plataforma de tal manera que sus pies se alineen a las guías colocadas sobre el sistema. Para obtener los resultados de la pisada, el administrador debe pulsar un botón llamado “CONECTAR”, la recepción de esta información se realiza por un lapso de 10 segundos, pasado este lapso de tiempo el paciente puede bajar de la plataforma.

Los resultados que se pueden observar son el tipo de pisada, el valor en porcentajes de presiones en cada zona del pie, de igual forma es posible apreciar el nivel de presión ejercida sobre cada sensor de PIEMEG, por ejemplo, si la presión en un sensor es muy baja, esta zona del pie tendrá un color verde. Para un valor medio de presión, la zona se tornará de un color naranja, mientras que, si la presión es superior, el sensor de esta zona tomara un color rojo.

Finalmente, se pueden guardar estos datos, por medio de un botón llamado “GUARDAR”, la información obtenida es almacenada automáticamente en el ordenador para posteriores análisis.

3.5.2 Arquitectura

Mediante el diagrama en bloques que se muestra en la figura 28 se representa el proceso de funcionamiento del sistema PIEMEG, el cual se encuentra dividido en bloques o zonas.

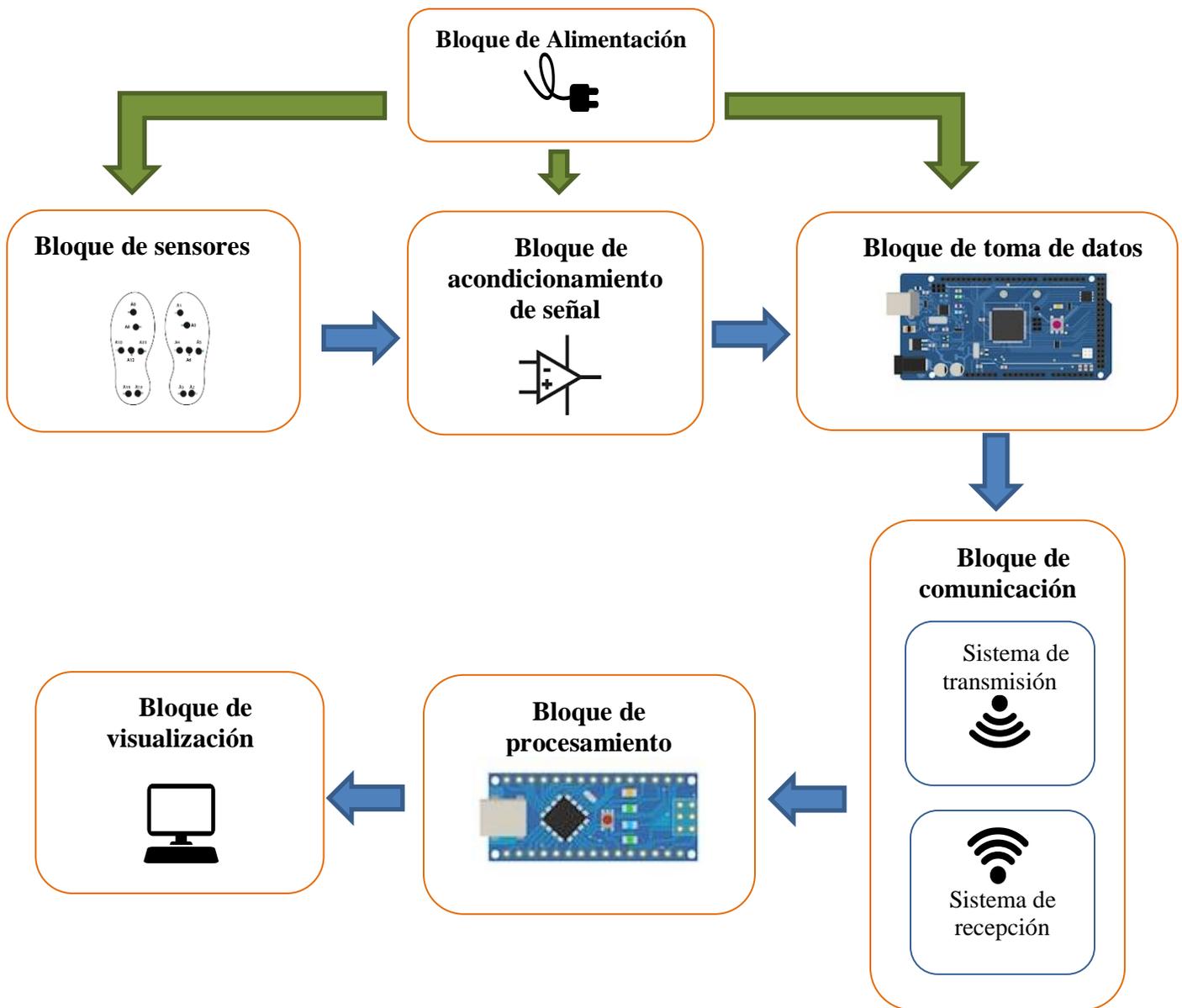


Figura 28 Arquitectura Sistema PIEMEG

Fuente: Autoría

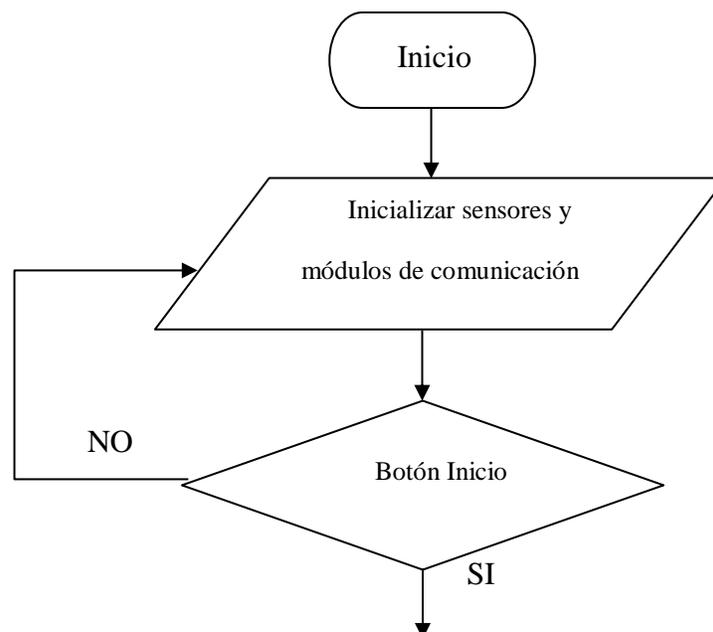
Cada bloque cumple con una función en específico, para comprender su función, a continuación, se describe a cada uno de ellos:

- **Bloque de alimentación.** - Se definirá la forma en que se alimentará al sistema electrónico, este será el encargado de indicar el consumo energético de los componentes del sistema.
- **Bloque de sensores.** - Esta sección está constituida por sensores, los cuales recibirán la información de las presiones plantares del paciente y la transformarán en una magnitud eléctrica. En esta etapa se debe realizar un análisis de la posición correcta de cada sensor, ubicándolos de manera que ocupen las tres zonas del pie.
- **Bloque de acondicionamiento de señal.** - Al momento de tomar los datos analógicos de los sensores es necesario acondicionar la señal, de tal manera que la respuesta de los sensores sea lo más lineal posible, garantizando la obtención de información útil para su posterior procesamiento.
- **Bloque de toma de datos.** – Esta etapa es la encargada de recibir la información por parte del bloque de acondicionamiento de señal y transformarla en datos digitales, por medio del uso de un convertidor análogo digital.
- **Bloque de comunicación.** – La información obtenida en el bloque anterior debe ser enviada al bloque de Procesamiento, para la cual será necesario el bloque de comunicación, en este apartado se analizarán los diferentes módulos que puedan realizar esta comunicación.

- **Bloque de procesamiento.** - En esta sección se encontrará funcionando un microcontrolador o una placa programable, la cual será encargada de procesar e interpretar la información obtenida a través del bloque de Toma de Datos, posteriormente dicha información será enviada a una interfaz gráfica, en donde el administrador visualizará e interpretará los datos.
- **Bloque de visualización.** - Finalmente, en la zona de visualización de datos, el administrador podrá observar los resultados del test. En esta sección se escogerá la plataforma de visualización óptima.

3.5.2.1 Diagrama de flujo de proceso del sistema

Para determinar los tipos de pisadas en los pacientes se debe extraer los datos de las presiones plantares de ambos pies. Los datos obtenidos son enviados al bloque de procesamiento de forma inalámbrica, en el cual se realizará la predicción del tipo de pisada mediante un algoritmo de Machine Learning (ML). Finalmente, los resultados serán visualizados por medio de una interfaz gráfica. La figura 29 muestra el diagrama de flujo del proceso general del sistema.



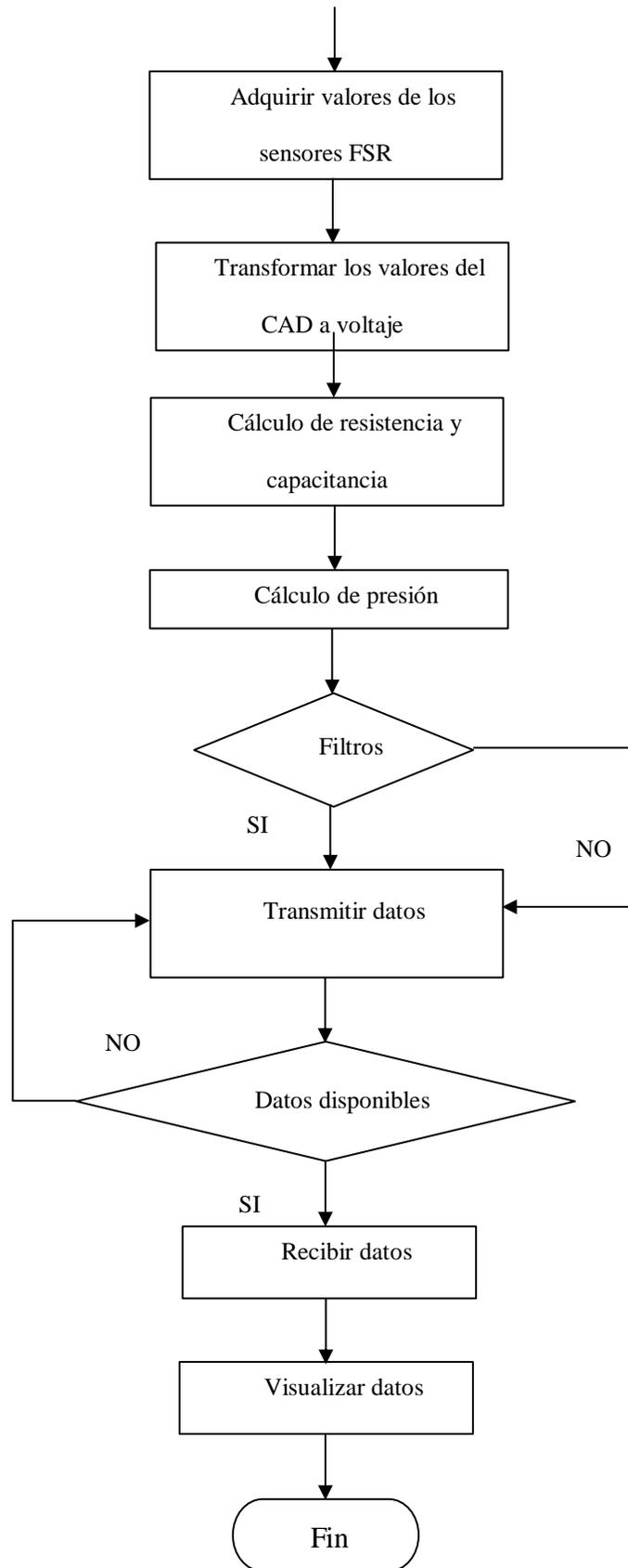


Figura 29 Diagrama de flujo, proceso general PIEMEG

Fuente: Autoría

3.6 Diseño en detalle (FASE 3)

En esta sección se realiza el diseño de cada uno de los bloques de PIEMEG, para ello en cada etapa se inicia por definir las especificaciones necesarias obtenidas a través de los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema mencionados en el apartado 3.4.1 y 3.4.2, se considera oportuno dividir esta etapa de diseño en dos fases, la primera dedicada al diseño de hardware y la siguiente destinada al diseño de software. Es importante además destacar que el diseño e implementación de los dos prototipos de PIEMEG son los mismos, la única diferencia es el tamaño del pie, por lo cual se mostrará el diseño y construcción de solo uno de los sistemas.

3.6.1 Diseño de hardware

Como se mencionó anteriormente, se ve conveniente realizar el diseño en dos fases, el trabajo en esta sección está destinado al diseño de hardware, Es importante destacar que los bloques en los que se realiza un diseño de hardware son: Bloque de Sensores, adquisición de datos, toma de datos, procesamiento, y comunicación.

3.6.1.1 Bloque de sensores

En este bloque en primer lugar se determinan los sensores idóneos para el desarrollo de PIEMEG y posteriormente se determinarán las zonas o áreas del pie en las cuales se ubicarán dichos componentes. Para la elección del tipo de sensor se procederá a realizar un benchmarking, con lo cual el dispositivo con las mejores características que se ajusten al sistema propuesto será escogido, para ello es necesario conocer el tipo de variable a medir, en este caso la presión.

- **Presión**

De acuerdo con (Pérez Montiel, 2015) la presión indica la relación entre la magnitud de una fuerza aplicada y el área sobre la cual actúa. Su expresión matemática se muestra en la Ec. 3.

$$P = \frac{F}{A} [Pa] \quad Ec. 3$$

donde: P = presión en N/m^2 = pascal

F = magnitud de la fuerza perpendicular a la superficie en newtons (N)

A = área o superficie sobre la que actúa la fuerza en metros cuadrados (m^2)

Una vez definida la magnitud de presión es necesario enfatizar que el tipo de presión estudiada en este documento está directamente relacionado con la fuerza de compresión. El esfuerzo o fuerza de compresión es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo. Es decir, aquella fuerza que aprieta estruja o presiona un objeto.

3.6.1.1.1 Requerimientos de sensores de fuerza o presión

Al ser el principal objetivo de este dispositivo el medir las presiones plantares, es necesario escoger un tipo de sensor que mida este tipo de fuerza compresora. Para ello se definen las especificaciones de los sensores en base a los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema:

- ❖ Deben ser flexibles.
- ❖ Imperceptibles por el usuario.
- ❖ Tamaño reducido.
- ❖ Alimentación de 4.5 V a 5 V
- ❖ Rango de lectura de 0 a 1kg como mínimo.

Una vez definidos los requerimientos de los sensores a usar, se procede a realizar un estudio de los diferentes tipos de sensores de fuerza o presión que existen en el actual mercado.

3.6.1.1.2 Tipos de sensores de fuerza de compresión

- **Sensor de fuerza resistivo:**

Este dispositivo se encuentra compuesto por una película de polímero (PTF) que presenta una disminución de la resistencia cuando aumenta la fuerza aplicada a la superficie activa. Su sensibilidad a la fuerza esta optimizada para uso en el control por toque humano de dispositivos electrónicos. (Carrión, Ochoa, & Valverde, n.d.). En la figura 30 es posible apreciar cómo se encuentra construido este tipo de sensores.

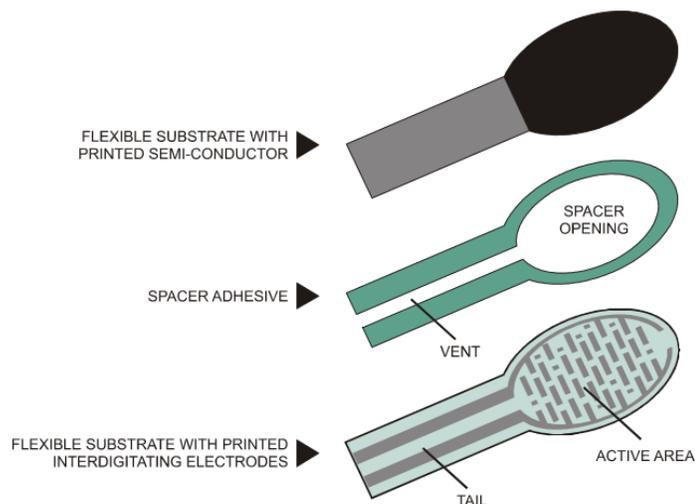


Figura 30 Construcción Sensor de Fuerza Resistivo

Fuente: (Interlink Electronics, 2013)

Existen diferentes tipos de sensores de fuerza resistivos, en esta ocasión se procede a estudiar en concreto dos sensores de este tipo, el FSR 402, de la empresa Interlink Electronics.y el sensor FlexiForce A201 de Tekscan.

- **Sensor FSR 402.**

En la figura 31 se muestra este tipo de sensor el cual está compuesto de una película de polímero. Posee dos terminales para soldadura, su tamaño es pequeño y además es flexible, tiene un precio de 15\$ dólares. La Tabla 5 muestra más características técnicas de este sensor.



Figura 31 Sensor FSR 402

Fuente: (amazon.es, 2018)

Tabla 5 Especificaciones técnicas del sensor FSR 402

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Área activa	0.5" [12.7] diámetro
Rango de Sensibilidad de Fuerza	< 100 g a > 10kg
Rango de Sensibilidad de Presión	< 1.5 psi a > 150 psi (< 0.1 kg/cm ² a > 10 kg/cm ²)
Resistencia sin actuación	> 1MΩ
Vida útil	> 10 millones de actuaciones
Rango de temperatura	-30°C a +70°C
Corriente máxima	1 mA/cm ² de la fuerza aplicada
Sensibilidad al ruido/ vibración	No significativamente afectado

Fuente: adaptado de (Interlink Electronics, 2013)

- **Flexi Force A201**

Al igual que el sensor FSR 402, el Flexi Force A201 pertenece al mismo grupo de sensores piezoresistivos, es un dispositivo de gran calidad, su rango de lecturas puede variar de 4.4N hasta 445N. Posee un tiempo de respuesta muy rápido. En su forma es similar al FSR 402, como se muestra en la figura 32. Las desventajas de este sensor a pesar de su precisión y grandes características son su precio que rodea los 40\$ y su disponibilidad, ya que en Ecuador no es posible encontrarlo.

Su compra se puede realizar por la plataforma de mercado libre en Bogotá. Las características más importantes de este sensor están detalladas en la Tabla 6.



Figura 32 FlexiForce A201

Fuente: (mercadolibre, 2018)

Tabla 6 Especificaciones técnicas del sensor FlexiForce A201.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Área activa	9.53 mm (0.375 in.) diámetro
Tiempo de respuesta	< 5μseg
Temperatura de operación	-40°C -60°C
Histéresis	< 4.5% de la escala total
Linealidad	< ± 3% de la escala total
Anchura	14 mm (0.55 in.)
Espesor	0.203 mm (0.008 in.)
Longitud	191 mm (7.5 in.)

Fuente: adaptado de (Tekscan, 2018b)

- **Galgas extensiométricas**

Se trata de sensores que miden la deformación, presión o carga basándose en el efecto piezoresistivo, que es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a ciertos esfuerzos y se deforman en los ejes mecánicos (Iglesias Castro, 2016).

Dentro de los diferentes tipos de galgas existentes, en el mercado ecuatoriano es posible acceder a galgas desarrolladas por la empresa Omega, concretamente el modelo SGD-1.5/120-LY11.

- **Galga SGD-1.5/120-LY11**

Es de material muy flexible, pero desde un punto de vista mecánico es bastante sólida. Posee un bajo radio de curvatura, dos zapatas soldadas, como lo muestra la figura 33. Su precio es de alrededor de 16\$, pero la ventaja es que se puede comprar directamente en Ibarra. En la Tabla 7 se detallan sus características más importantes.

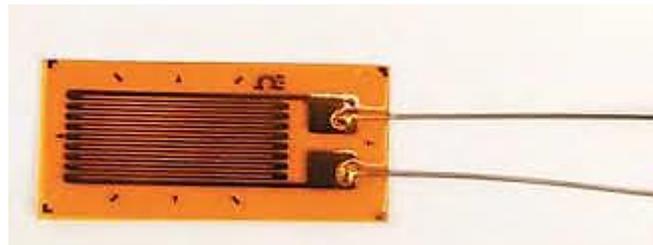


Figura 33 Galga SGD-1.5/120-LY11
Fuente: (OMEGA, 2018)

Tabla 7 Especificaciones técnicas de la galga SGD-1.5/120-LY11

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Resistencia nominal	120Ω
Máximo voltaje (V _{rms})	2.5 V
Temperatura referencial	23°C

Fuente: Adaptado de (OMEGA, 2018)

3.6.1.1.3 Selección del sensor.

Para efectuar la selección del sensor adecuado, se procede a la realización de una Tabla comparativa que contenga los requerimientos de los sensores descritos anteriormente, basándose en las especificaciones técnicas y en el precio de los dispositivos, el cual se obtuvo de las diferentes páginas web de tiendas electrónicas y de portales de venta tales como: Mercado Libre y OLX, los precios no incluyen los costos de envío. Esta comparativa es mostrada en la Tabla 8.

Tabla 8 Análisis comparativo de los sensores de fuerza o presión.

SENSOR	FSR 402	FlexiForce A201	Galga SGD-1.5/120-LY11
PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN		
Deben ser flexibles.	Si	Si	No
Imperceptible por el usuario.	Si	Si	No
Tamaño reducido.	Si	Si	Si
Alimentación de 4.5 V a 5 V	Si	Si	Si
Rango de lectura de 0 a 1kg como mínimo.	Si	Si	Si
Precio	14\$	40\$	16\$
Disponibilidad	Quito	Bogotá	Ibarra

Fuente: Autoría

A pesar de que el sensor FlexiForce A201 cumple con la mayoría de los requerimientos y ofrece una precisión bastante alta, sus limitantes son su precio y la disponibilidad. Los sensores FSR 402 y la galga pueden ser adquiridos en el país sin ningún inconveniente, sin embargo, la galga al poseer sus zapatas soldadas representa una incomodidad al momento de colocarla en el sistema. Es por lo que se escoge el sensor FSR 402, ya que cumple con las mejores prestaciones para el desarrollo de este sistema.

3.6.1.1.4 Criterio para la ubicación y el número de sensores FSR 402.

En base al fundamento teórico presentado en el capítulo II, específicamente respecto en la Figura 7. Es posible realizar la Tabla 9 la cual muestra las zonas de mayor presión en los pies.

Tabla 9 Zonas de mayor presión en tipos de pisadas

Tipo de Pisada	Zonas de mayor presión
Normal	-Primer metatarsiano del dedo gordo -Zona media del mediopié -Talón
Supinadora o cava	-Primer metatarsiano del dedo gordo -Zona lateral derecha del mediopié -Región media del talón
Pronadora o plana	-Unión entre dedo gordo y segundo dedo del pie -Extremo izquierdo del mediopié -Zona media del talón

Fuente: Adaptado de (Cohen, 2013)

Luego de realizar este análisis es posible determinar las zonas más importantes para la detección de los puntos de presión. Estas zonas son:

- Primer metatarsiano
- Unión entre dedo gordo y segundo dedo del pie.
- Zona media del mediopié.
- Parte izquierda del mediopié.
- Región derecha del mediopié.
- Zona media del talón o retropié.

La mejor práctica es colocar un sensor en cada una de estas zonas, además se ve conveniente añadir un sensor más en la zona del talón, debido a que en base a la teoría de presiones plantares en estática, en el capítulo II, esta zona del pie recibe la mayor presión en la pisada.

De esta manera, se requiere un total de siete sensores FSR 402, para cada pie, es decir catorce para el sistema PIEMEG.

3.6.1.1.5 Patrón de ubicación de sensores FSR 402 en el sistema PIEMEG.

Los catorce sensores estarán ubicados sobre la parte superior de la plataforma que alberga los bloques de PIEMEG, la figura 34 muestra esta distribución a través de las tres áreas del pie, que son antepié, mediopie y retropié; la nomenclatura de cada sensor tiene el siguiente formato, S1 que corresponde a Sensor1, y así hasta llegar al Sensor14. Esta distribución se explica detalladamente a continuación:

- **Pie izquierdo:** En la zona del antepié, se encuentran ubicados los sensores S1 y S2. En la zona del mediopie, se tiene a los sensores S3, S4 y S5. Mientras que, en la zona del retropié, están ubicados los sensores S6 y S7.
- **Pie derecho:** Zona de antepié, se tiene los sensores S8 y S9, en la zona del mediopie, están ubicados los sensores S10, S11 y S12. Y los sensores S13, S14 están posicionados en la zona del retropié.

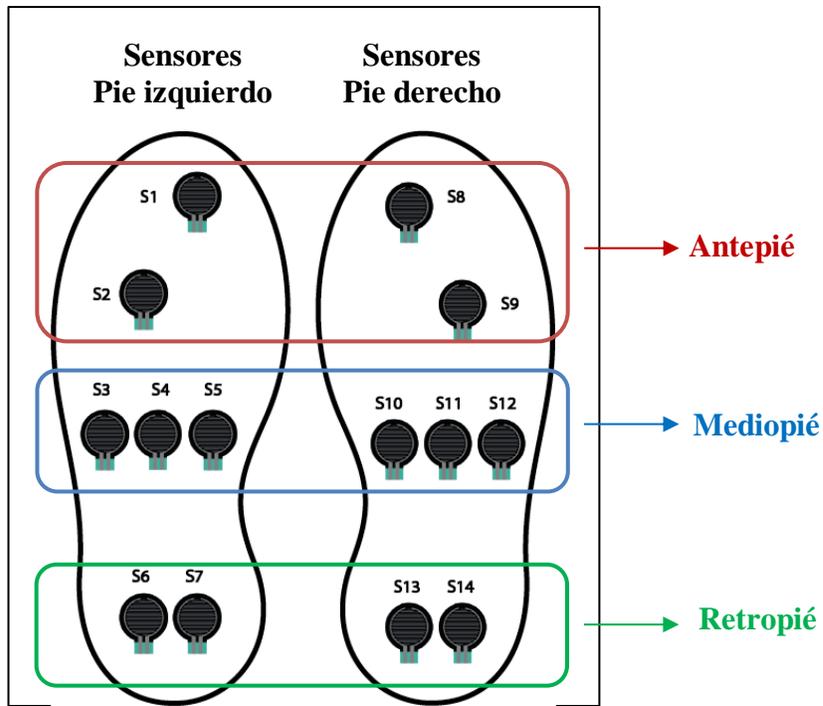


Figura 34 Distribución de sensores en el PIEMEG
Fuente: Autoría

3.6.1.1.6 Diagrama de conexión

Se muestra en la Figura 35 el diagrama de conexión de los catorce sensores cabe recalcar que para esto no se realiza una placa electrónica, todas las conexiones de los FSR son realizadas por medio de alambre conductor.

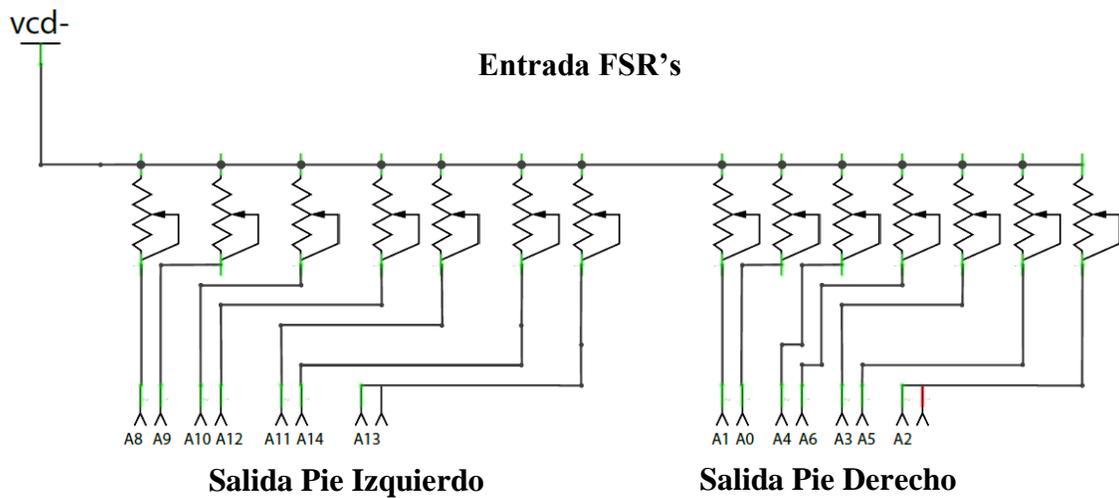


Figura 35 Diagrama esquemático bloque de toma de datos
Fuente: Autoría

Las salidas de los sensores tanto para el pie izquierdo como derecho van conectadas con el bloque de acondicionamiento de señal, cuyo diagrama se mostrará más adelante. La Figura 36 muestra una aproximación de la conexión interna de los sensores, la construcción de este bloque se llevará a cabo en la etapa de implementación (FASE 4).

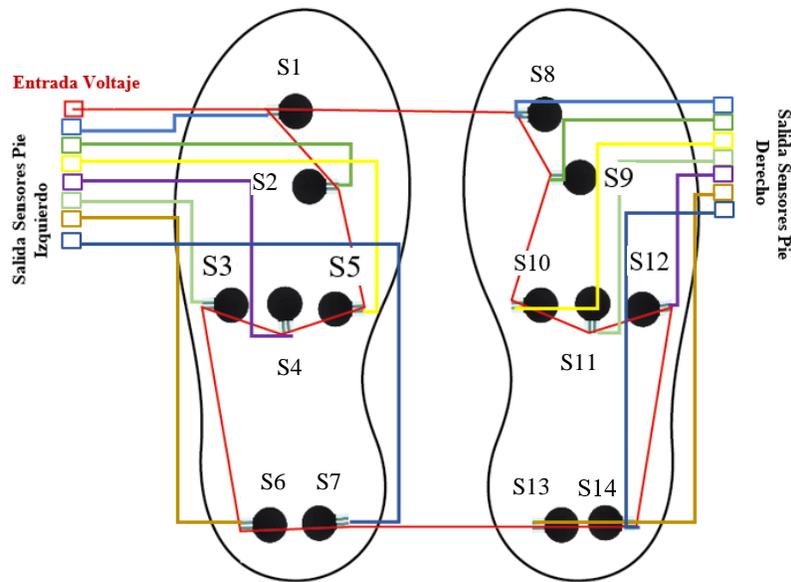


Figura 36 Estimación de cableado interno de sensores FSR 402
Fuente: Autoría

3.6.1.2 Bloque de acondicionamiento de señal.

Una correcta lectura de sensores es posible gracias a la linealidad que posean dichos dispositivos, con ello se garantiza que los valores tomados son correctos, errores de lectura pueden ocurrir debido a la presencia de ruido o interferencias.

3.6.1.2.1 Requerimientos del bloque de acondicionamiento de señal.

Los sensores piezoresistivos presentan una variación muy grande en su resistencia, para garantizar una mejor respuesta de este tipo de sensores, es conveniente añadir ciertas configuraciones que ayuden a este propósito. A continuación, se muestran los requerimientos de este bloque.

- ❖ Suministro de una fuente de alimentación y/o un circuito para generar voltaje a partir de la variación de la resistencia.
- ❖ Linealización total o parcial del dispositivo.

3.6.1.2.2 Configuraciones de circuitos acondicionadores de señal

Interlink Electronics, quien es el fabricante del sensor FSR 402, recomienda ciertas configuraciones, con las cuales la respuesta y lectura de este sensor por medio de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) es mucho más lineal:

- **Divisor de voltaje.**

A diferencia de lo que sucede con otros tipos de sensores de la familia de los dispositivos resistivos, como el RTD o una galga extensiométrica, la respuesta del FSR, genera una variación de resistencia bastante grande, por lo cual una alternativa válida para obtener una señal de voltaje de este sensor es simplemente añadir un divisor de voltaje como en el que se observa en la figura 37.

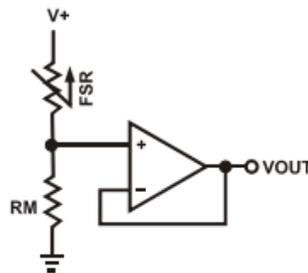


Figura 37 Configuración divisor de voltaje y AO

Fuente: (Interlink Electronics, 2013)

La salida de voltaje está definida por la ecuación 4:

$$V_o = \frac{V_{cc}}{1 + \frac{R_{FSR}}{R_M}} \quad \text{Ec. 4}$$

Esta configuración proporciona una relación de coeficiente positivo, esto es que el voltaje de salida aumenta con el incremento de la fuerza o presión, y disminuye si esta baja. La resistencia R_M se elige para la sensibilidad del dispositivo y limita la corriente del dispositivo, como se vio anteriormente su corriente máxima es de 1mA. Se sugiere el uso de amplificadores operacionales con alimentación única tales como el LM324 o LM358.

- **Buffers ajustables.**

Configuración similar a la de divisor de voltajes, aísla la salida de la alta impedancia del FSR. Adicionalmente este esquema permite ajustar el offset y la ganancia de salida. El circuito se lo muestra en la figura 38. La relación de las resistencias R_2 y R_1 determina la ganancia de salida. El offset resulta de la resistencia del FSR a fuerza cero y puede ser recortada mediante el potenciómetro R_3 .

Para mejores resultados, R_3 debería ser alrededor de una vigésima parte de R_1 o R_2 . Si se adiciona un potenciómetro en lugar de la resistencia fija R_2 , se puede obtener una ganancia ajustable. Ahora para obtener un amplio rango de ganancias a la salida, se puede intentar reemplazar las resistencias fijas R_1 y R_2 por potenciómetros.

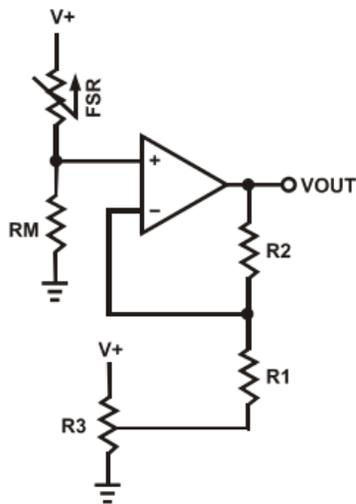


Figura 38 Buffer Ajustable

Fuente: (Interlink Electronics, 2013)

- **Convertidor de corriente a voltaje.**

En el circuito de la figura 39, el sensor FSR es la entrada a un convertidor de corriente a voltaje. La salida del amplificador operacional (AO) esta descrita por la ecuación 5.

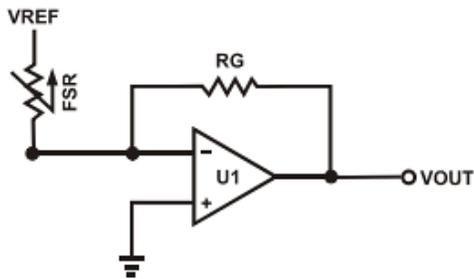


Figura 39 Circuito convertidor corriente – voltaje

Fuente: (Interlink Electronics, 2013)

$$V_{out} = \frac{-RG}{RFSR} \cdot VREF \quad Ec. 5$$

Con un voltaje positivo, el voltaje de salida variará entre 0 y -VREF. Con un voltaje de referencia negativo la salida oscilará entre 0 y VREF. Para este tipo de configuración se necesita de doble polarización para el AMP-OP. Vout es inversamente proporcional a RFSR. La respuesta del sensor FSR 402, con este tipo de configuración existe un comportamiento casi lineal del sensor, entre la fuerza aplicada y la conductancia (1/R), esto se muestra en la figura 40.

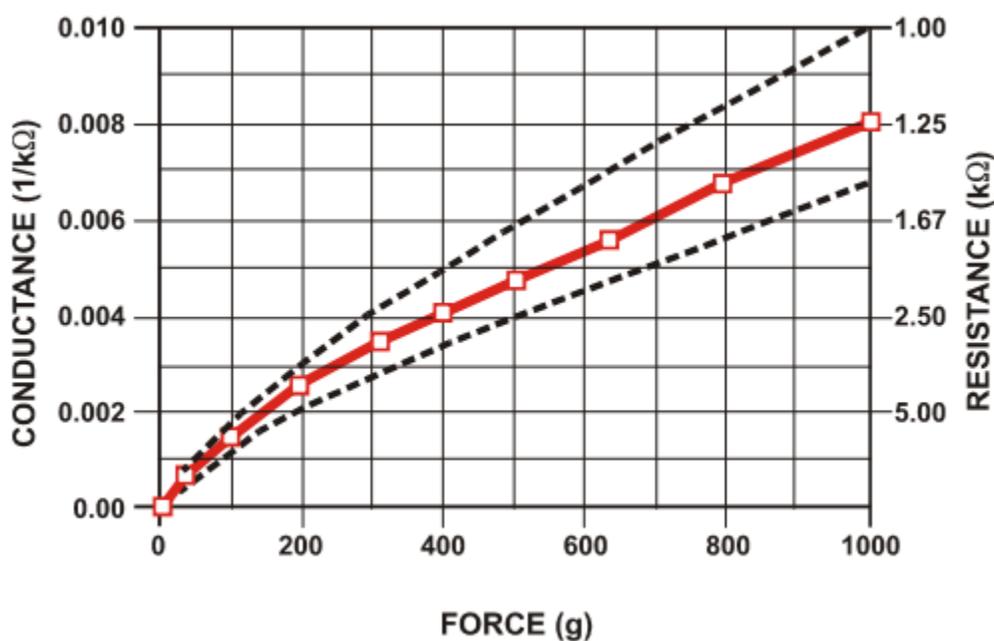


Figura 40 Conductancia vs. Fuerza (0-1kg)

Fuente: (Interlink Electronics, 2013)

- **Oscilador Schmitt Trigger.**

En este esquema, el dispositivo FSR es usado por un oscilador a través de un Schmitt Trigger. En este circuito el cual es mostrado en la figura 41, la fuerza se transforma en frecuencia gracias a la variación de la resistencia del FSR. Sin fuerza aplicada el FSR se comporta como un circuito abierto.

Dependiendo de la última etapa del trigger, la salida se mantiene constante, ya sea alta o baja. Cuando se aplica una fuerza al FSR, la oscilación inicia, incrementando la misma con el aumento de la fuerza. La resistencia de $2M\Omega$ a la entrada del trigger asegura que las oscilaciones se detengan cuando FSRs con resistencia pasiva diferente a infinito sean utilizadas.

La resistencia de $47k\Omega$ y el condensador de $0.47\mu F$ controlan la característica fuerza vs frecuencia. Los cambios en la sensibilidad de este circuito se pueden hacer mediante el ajuste de estos valores. El condensador de $0.1\mu F$ controla el rango de frecuencia del oscilador. Mediante la implementación de este circuito con CMOS o TTL, un proceso digital puede ser controlado contando, flancos positivos o negativos, de la salida del oscilador.

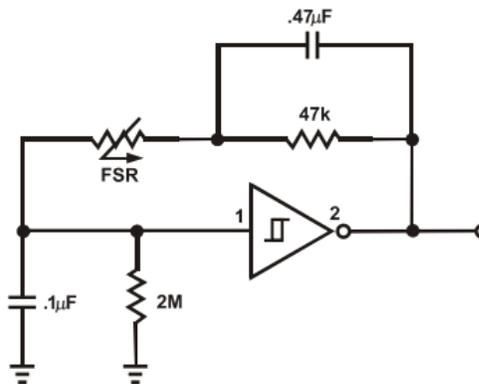


Figura 41 Circuito con oscilador Schmitt Trigger

Fuente: (Interlink Electronics, 2013)

3.6.1.2.3 Circuito seleccionado para el acondicionamiento de la señal.

Analizando las configuraciones indicadas en el apartado anterior se tiene las siguientes posibilidades para el acondicionamiento:

- Divisor de voltaje con AMP-OP
- Convertidor corriente a voltaje

Se debe considerar que los dos primeros esquemas presentados (Fig.37 y 38), no aseguran una linealización, por lo cual las dos últimas configuraciones (Fig.39 y 41), son las que cumplirían este requerimiento. Entre estos el oscilador requeriría de un sistema de conteo de pulso y una característica fuerza – frecuencia para trabajar.

Por otra parte, el esquema de conversor de corriente a voltaje ofrece una salida de voltaje con la cual la respuesta del sensor es casi lineal, por lo que esta configuración es la escogida para el acondicionamiento de la señal del sistema PIEMEG.

3.6.1.2.4 Diagrama de conexión

El diseño del bloque de acondicionamiento de señal, se lo realizó dividiéndolo en dos partes, un diagrama dedicado al pie izquierdo, y otro al pie derecho; la figura 42 muestra el diagrama esquemático del circuito de acondicionamiento del pie izquierdo, se utilizan dos circuitos integrados LM324N en la configuración de convertidor de corriente a voltaje, cada uno de estos chips contienen ocho amplificadores operacionales (AO), sobrando un amplificador. Los AO LM324N deben ser alimentados con voltajes positivos y negativos para su correcto funcionamiento.

BLOQUE DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL
PIE IZQUIERDO

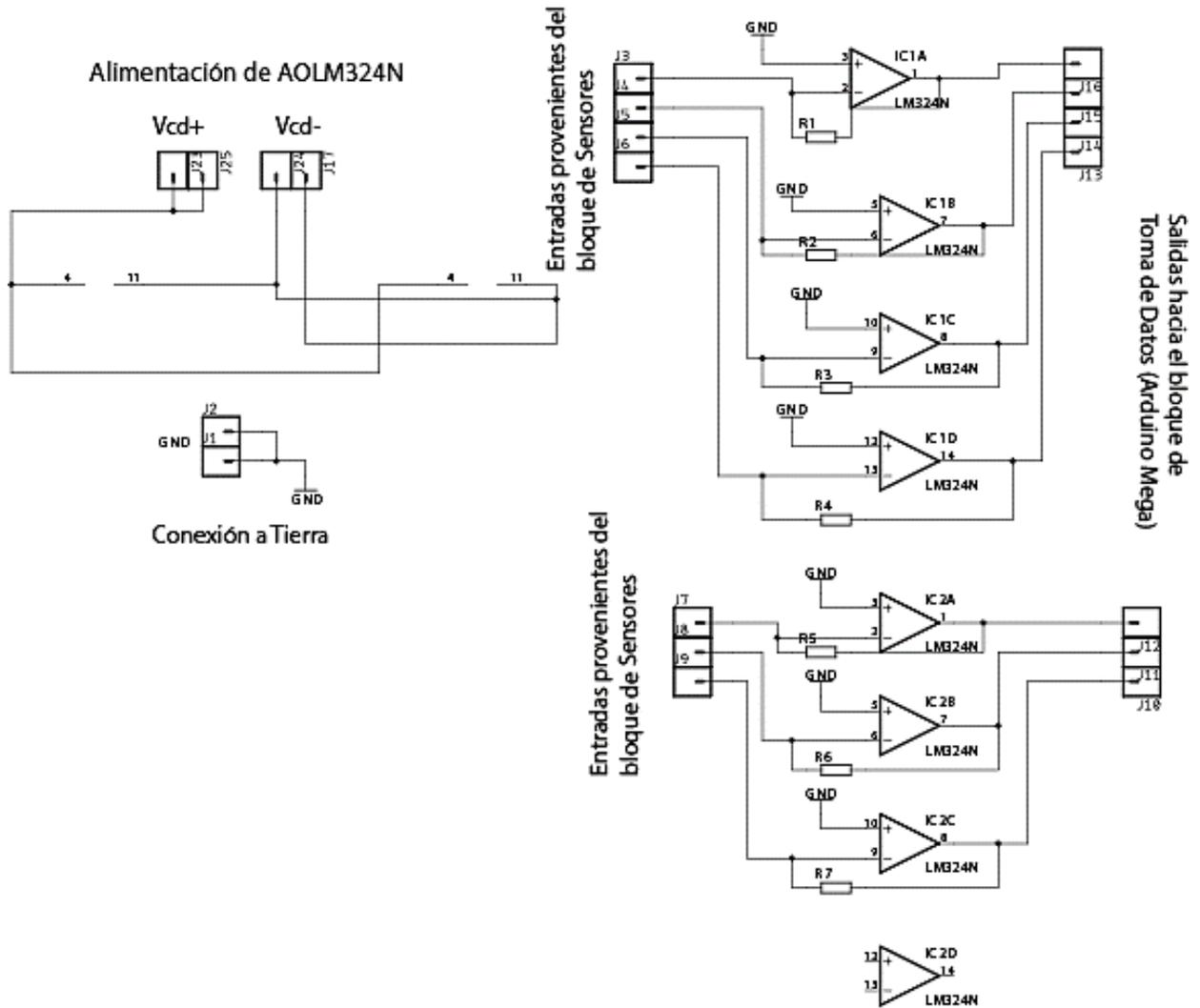


Figura 42 Diagrama esquemático pie izquierdo, acondicionamiento de señal

Fuente: Autoría

Para el diagrama del pie derecho, se toma en cuenta de igual forma la doble alimentación de los amplificadores operacionales, su diagrama se muestra en la figura 43.

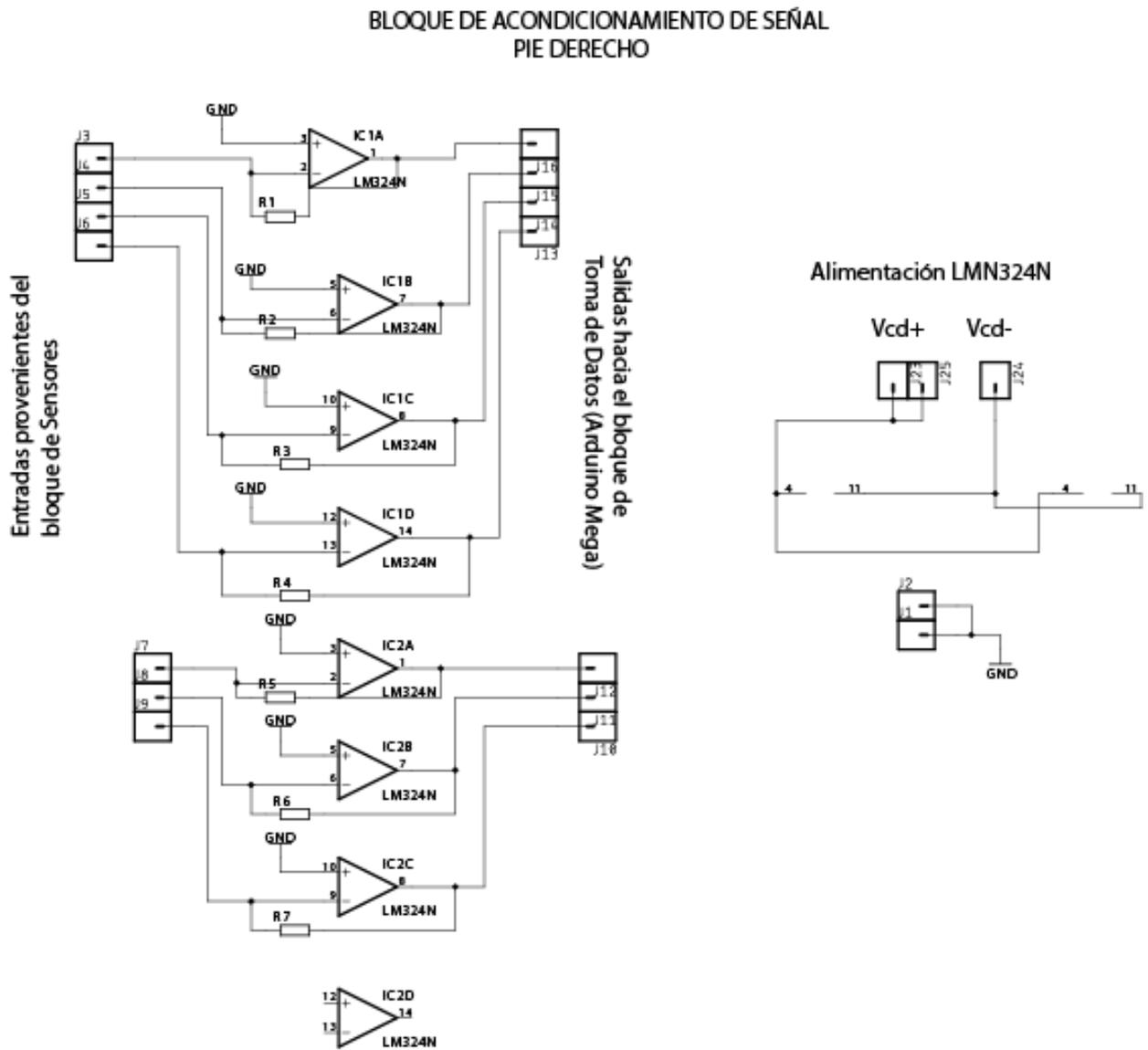


Figura 43 Diagrama esquemático pie derecho, acondicionamiento de señal

Fuente: Autoría

3.6.1.3 Bloque de toma de datos

Esta etapa es la encargada de recibir la información eléctrica obtenida a través de los circuitos de acondicionamiento de señal y transformarla a una señal digital por medio de Conversores análogos digitales (CAD). A continuación, se realiza el diseño del hardware, que contempla la elección de la placa de adquisición de datos.

3.6.1.3.1 Requerimientos del bloque de toma de datos

La placa que constituirá todo el bloque de toma de datos debe cumplir con ciertos requerimientos, para realizar una toma de datos correcta, el requerimiento principal de esta placa debe ser que pueda leer todos los datos de los catorce sensores FSR 402. A continuación, se muestran todos los requerimientos de esta etapa.

- ❖ Placa con voltaje de operación entre 5 a 12 V.
- ❖ Tarjeta de adquisición de datos debe poseer al menos 14 pines análogos.
- ❖ Lenguaje de programación basado en C.
- ❖ Software de programación libre.

3.6.1.3.2 Elección de placa del bloque de toma de datos

La selección de la tarjeta de adquisición de datos que conformará este bloque se lo realiza mediante el análisis exhaustivo de los requerimientos del proyecto, la placa elegida debe tener las características adecuadas para acoplarse de la mejor manera al tipo de proyecto que se tiene. En la Tabla 10 se muestra una comparación entre las diferentes placas Arduino existentes en el mercado.

Tabla 10 Comparativa de elementos programables

Requerimientos	Arduino Uno	Arduino Mega 2560	Arduino Nano	Arduino DUE
Voltaje de operación entre 5 V y 12 V	Si	Si	Si	Si
Poseer al menos 14 pines análogos.	No	Si	No	No
Lenguaje de programación basado en C	Si	Si	Si	Si
Software de programación libre	Si	Si	Si	Si

Fuente: Autoría

Según la Tabla 10, se puede apreciar que Arduino Mega 2560 cumple con los requerimientos planteados en este bloque, por tanto, se optó por elegir esta placa, principalmente debido a que posee 16 entradas analógicas, con lo cual es suficiente para la lectura de los 14 sensores FSR 402, presentes en el PIEMEG. A continuación, se muestran algunos detalles de cómo se encuentra constituida y las principales características de la placa Arduino Mega 2560.

- **Arduino Mega**

En la Figura 44 se muestra la imagen de una placa Arduino Mega, con su respectiva distribución de cada pin, y a continuación se encuentra la Tabla 11, que contiene sus características principales según la hoja de especificaciones técnicas.

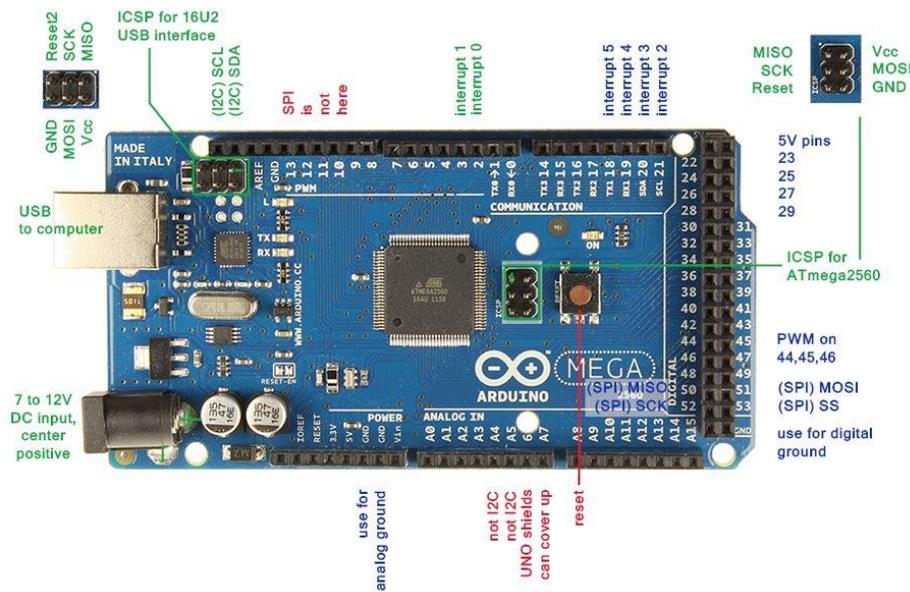


Figura 44 Diagrama de pines de Arduino Mega

Fuente: (García, 2013)

Tabla 11 Especificaciones técnicas Arduino Mega

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje operativo	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Pines digitales I/O	54 (de los cuales 14 proveen salidas PWM)
Entradas Analógicas	16
Corriente DC por pin I/O	40 mA
Corriente DC para pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB de los cuales 8KB son usados por el bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

Fuente: Adaptado de (ARDUINO, 2018a)

3.6.1.3.3 Diagrama de conexión

El diagrama mostrado en la Figura 45, corresponde al diseño del esquemático del bloque de toma de datos. Las salidas del bloque de acondicionamiento son conectadas a las entradas analógicas del Arduino Mega, las del pie izquierdo se conectan en las entradas desde la A0 hasta A6, mientras que las salidas del pie derecho a las entradas A8 hasta A14. La alimentación del Arduino es gracias a la fuente de alimentación a través del pin Vi. El bloque de comunicación (Sistema de Transmisión) se conecta con la tarjeta de adquisición mediante un módulo de comunicación inalámbrica.

BLOQUE DE TOMA DE DATOS

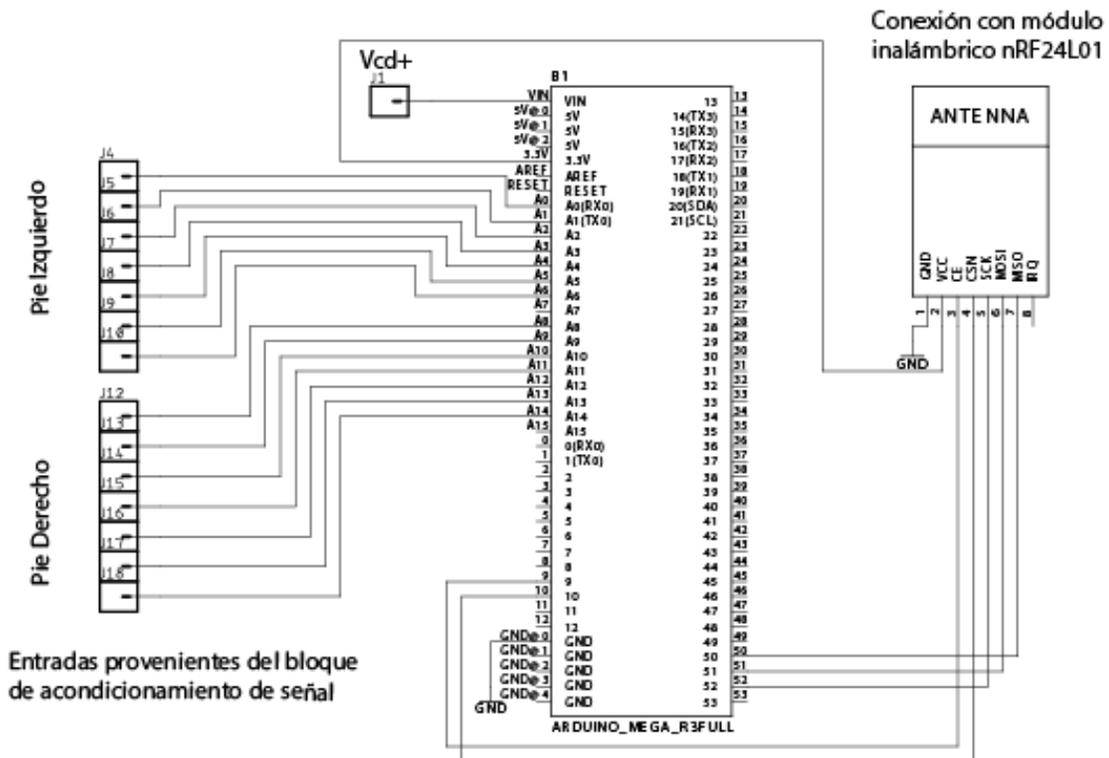


Figura 45 Diagrama esquemático bloque de toma de datos

Fuente: Autoría

3.6.1.4 Bloque de comunicación

Este bloque se encarga de la transferencia de información desde el bloque de toma de datos de PIEMEG hacia la etapa de procesamiento. Para realizar este envío se requiere del uso de módulos de transmisión y recepción inalámbricos que garanticen la entrega fiable de los datos de un extremo a otro.

3.6.1.4.1 Requerimientos del bloque de comunicación

Tanto el módulo de transmisión como de recepción deben cumplir con ciertos requerimientos, los cuales garanticen el correcto traslado de la información evitando pérdida de datos. Esos requerimientos son mostrados a continuación.

- ❖ Voltaje de operación 3 a 5V.
- ❖ Consumo bajo de corriente.
- ❖ Rango de cobertura mínimo a 1 m.
- ❖ Compatibilidad con Arduino Mega.
- ❖ Tamaño reducido.
- ❖ Fiabilidad.

Una vez definidos los requerimientos del bloque, se procede a realizar un estudio de los diferentes tipos de módulos de comunicación inalámbrica que existen en el actual mercado.

3.6.1.4.2 Módulos de comunicación inalámbrica

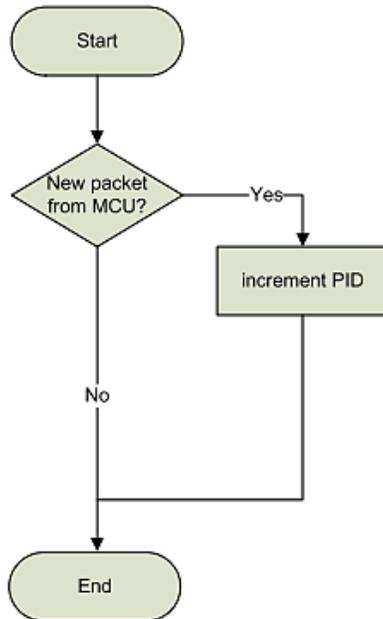
- **Transceptor NRF24L01**

El NRF trabaja en una banda de frecuencia entre 2.4GHz y 2.5 GHz, el módulo trae integrado un transceptor RF (transmisor receptor). La velocidad de transmisión es configurable entre 250 Kbps, 1 Mbps y 2 Mbps, permitiendo comunicación simultánea con seis dispositivos a larga distancia.

El voltaje de alimentación varía entre 1.9 y 3.6 V en DC, sin embargo, los pines de datos son resistentes a 5V DC. La corriente de consumo eléctrico cuando el dispositivo está en Stand By es bajo mientras que el consumo en envío y recepción de datos es de 15mA.

El funcionamiento del transceptor se muestra en la Figura 46 tanto para la transmisión como recepción de los datos. Se usa el Packet Identity y CRC, cada paquete contiene un campo PID de dos bits. Para transmitir cada paquete el PID se incrementa. En el receptor, el PID es usado para detectar los dos datos y si estos son iguales al anterior se realiza una corrección de errores comparando los dos datos y si estos son iguales se conserva el dato más actual y el otro es borrado. El PID es indispensable ya que al trabajar con microcontroladores el espacio almacenado es muy escaso y hay que optimizar este recurso.

PTX side functionality



PRX side functionality

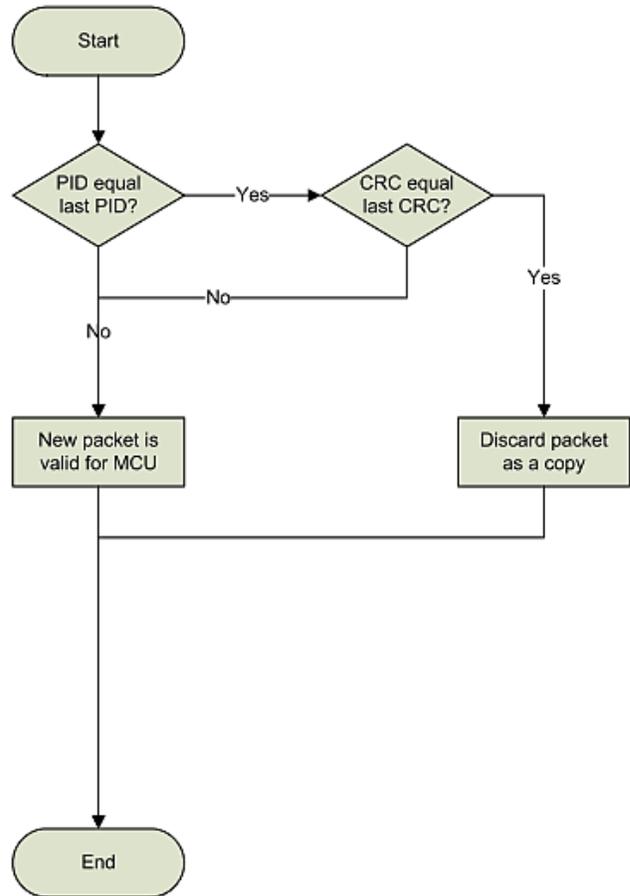


Figura 46 Generación y detección PID

Fuente: (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2008)

A continuación, se muestra en la Figura 47 la distribución de los pines del módulo y la Tabla 12 muestra la descripción de cada pin.

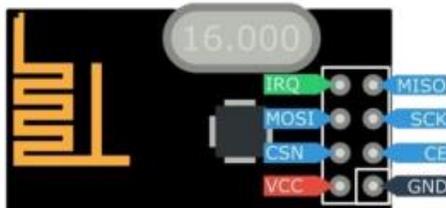


Figura 47 Pines del Módulo NRF24L01

Fuente: (Nomada-, 2016)

Tabla 12 Descripción de los pines del Módulo de RF 2.4GHz [nRF24L01]

PIN	DESCRIPCIÓN
GND	Tierra
VCC	Alimentación (3.3V)
CE	Chip Enable (habilita Tx o Rx)
CSN	Chip Select interfaz SPI
SCK	Reloj de la interfaz SPI
MOSI	Flujo de datos del Maestro
MISO	Flujo de datos de Esclavo
IRQ	Pin de Interrupción (bajo activo)

Fuente: (Nomada-, 2016)

Las características técnicas del transceptor se listan en la Tabla 13, en la cual se encuentran desde el voltaje operativo, velocidad de transmisión hasta la fiabilidad en una topología de red estable.

Tabla 13 Especificaciones técnicas NRF24L01

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Voltaje de alimentación	de 1.9 a 3.6 V
Interfaz digital	SPI velocidad 0-8 Mbps
Banda ISM	2.4 GHz
Velocidad de datos	Máx. 2Mbps
Corriente operativa (TX)	11.3 mA
Corriente operativa (RX)	12.3Ma
Potencia máxima de salida	0dBm
Sincronización	±% variación de frecuencia en el rango de temperatura
Sensibilidad	-85 dBm
Temperatura	-40 a +85 °C
Fiabilidad	Alta

Fuente: Adaptado de (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2008)

- **Bluetooth HC-05**

Es un módulo que usa bluetooth SPP (Protocolo de puerto serie), su uso no es complejo y está diseñado para simular una conexión serial inalámbrica transparente. Una de las aplicaciones más interesantes que presenta el módulo HC-05 es la conectividad entre dispositivos, llegando a interconectar un total de siete módulos con la configuración de esclavo, un esclavo puede conectarse únicamente a un máster, mientras que un máster puede tener asociados a él, hasta siete esclavos. La Figura 48 muestra la conexión máster esclavo del módulo bluetooth.

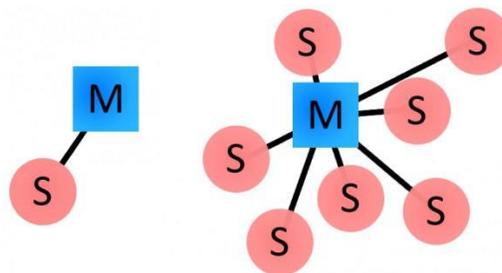


Figura 48 Topología máster esclavo hc-05

Fuente: (JECRESPOM, 2016)

Las características técnicas de este módulo se listan en la Tabla 14, y en la Figura 49 se muestra la distribución de cada uno de los pines del módulo bluetooth hc-05.



Figura 49 Distribución pines módulo hc-05

Fuente: (JECRESPOM, 2016)

Tabla 14 Especificaciones técnicas del módulo HC-05

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Voltaje de alimentación	de 1.8 a 3.6 V DC
Velocidad en Baudios por defecto	9600
Frecuencia	2.4 GHz
Potencia de transmisión	+4dBm
Velocidad máxima de transmisión	3Mbps
Sincronización	±1% variación de frecuencia en el rango de temperatura
Sensibilidad	-80dBm
Temperatura	-40 a +85 °C
Fiabilidad	Alta

Fuente: Adaptado de (ITead Studio, 2010)

3.6.1.4.3 Selección del módulo de comunicación inalámbrica para PIEMEG

Para efectuar la selección del módulo adecuado, se procede a la realización de una tabla comparativa mostrada en la Tabla 15, que contenga los requerimientos de los módulos descritos anteriormente, basándose en las especificaciones técnicas y en el precio de los dispositivos, el cual se obtuvo de las diferentes páginas web de tiendas electrónicas y de portales de venta tales como: Mercado Libre y OLX, los precios no incluyen los costos de envío.

Tabla 15 Comparativa entre módulos de comunicación inalámbrica

Módulo	NRF 24L01	Bluetooth HC-05
PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN	
Voltaje de operación 3 a 5V.	Si	Si
Consumo bajo de corriente.	Si	Si
Rango de cobertura mínimo a 1 m.	Si	Si
Compatibilidad con Arduino Mega	Si	Si

Tamaño reducido.	Si	Si
Fiabilidad	Alta	Alta
Precio	6\$	3\$
Disponibilidad	Ibarra	Quito

Fuente: Autoría

El módulo de transmisión de PIEMEG es uno de los factores claves para que este se desarrolle de una forma correcta, la fiabilidad de la entrega de la información debe ser alta. En base al análisis comparativo de la Tabla 15, el módulo seleccionado es el NRF 24L01, debido a que cumple con todos los requerimientos del sistema, el módulo HC-05 de igual manera cumple con todas las especificaciones pero no es el adecuado para el PIEMEG, debido a su mayor costo en comparación al NRF 22L01 y además el uso de este tipo de modulo condiciona a que el ordenador del administrador de PIEMEG debe poseer un adaptador bluetooth lo que generaría más gastos de fabricación.

3.6.1.4.4 Diagrama de conexión

Para que el sistema PIEMEG se comunique con el ordenador es necesario que exista la comunicación inalámbrica entre la plataforma donde estarán albergados los sensores, acondicionamiento y procesamiento, con un módulo receptor que estará conectado al ordenador del administrador, por ello la Figura 50 muestra la conexión del módulo Nrf24l01, que actuará como transmisor de los datos provenientes de la lectura de los sensores FSR402, el cual estará conectado a la tarjeta de adquisición de datos.

NODO TRANSMISOR

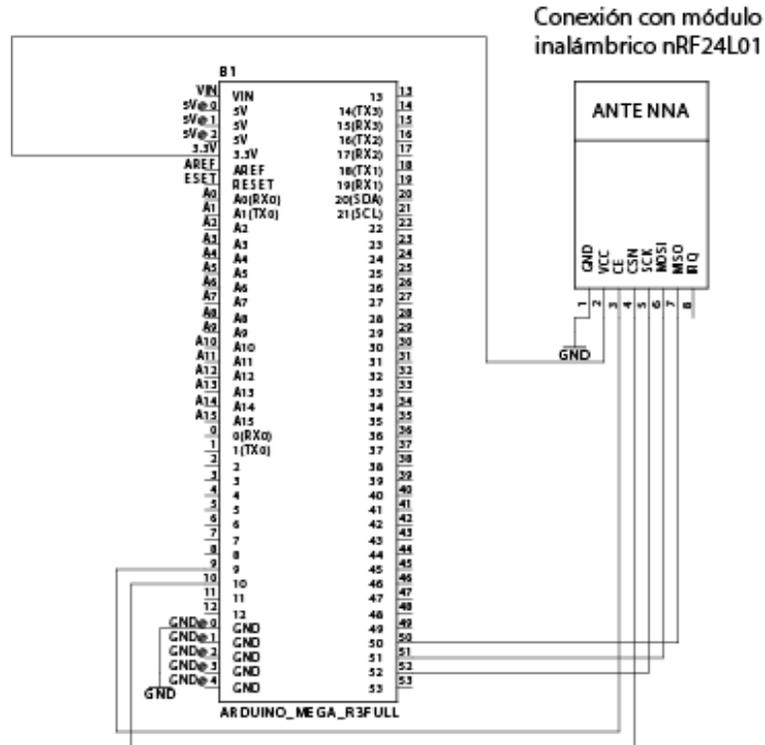


Figura 50 Diagrama esquemático, sistema de transmisión - Bloque de Comunicación

Fuente: Autoría

Para el módulo receptor, el cual se lo muestra en la Figura 51, se emplea el uso de un Arduino nano, de esta manera el nodo recibirá los datos procesados del bloque de toma de datos de PIEMEG.

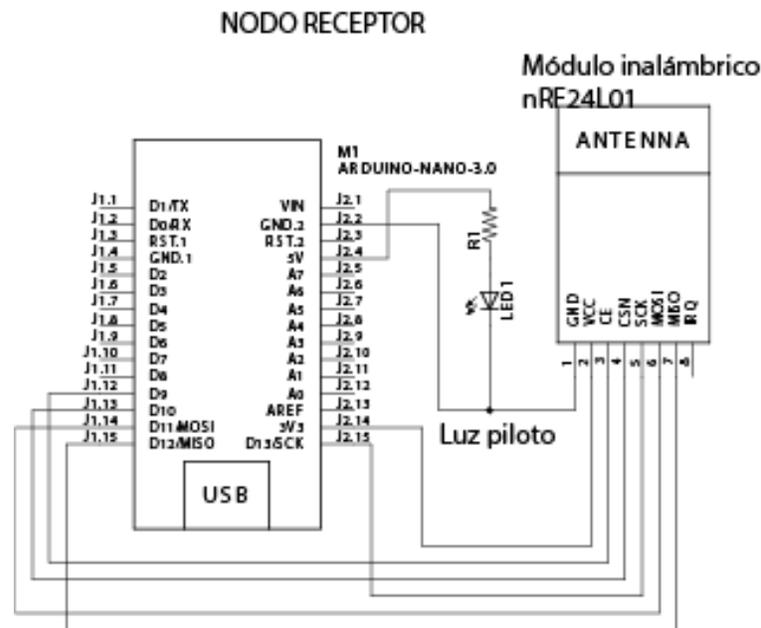


Figura 51 Diagrama esquemático, sistema de recepción - Bloque de Comunicación

Fuente: Autoría

3.6.1.5 Bloque de procesamiento

Es el bloque más importante de todo el sistema, su función es la de trabajar con los procesos que realizan los demás bloques, evaluando datos y llevando a cabo diferentes acciones a partir de estos. A continuación, se realiza el diseño del hardware, que contempla la elección de la placa de este bloque.

3.6.1.5.1 Requerimientos del bloque de procesamiento

La placa de esta etapa debe ser capaz de procesar una gran cantidad de información, pues este bloque es el encargado de implementar el algoritmo de ML para la predicción del tipo de pisada. A continuación, se muestran todos los requerimientos de este bloque.

- ❖ Placa con voltaje de operación entre 5 a 12 V.
- ❖ Placa de tamaño reducido.
- ❖ Memoria mayor a 10 KB.

- ❖ Lenguaje de programación basado en C.
- ❖ Software de programación libre.
- ❖ Compatibilidad con placa del bloque de toma de datos

3.6.1.5.2 Elección de placa del bloque de procesamiento

La selección de la tarjeta de adquisición de datos que conformará el bloque principal de control se lo realiza mediante el análisis exhaustivo de los requerimientos del proyecto, la placa elegida deber tener las características adecuadas para acoplarse de la mejor manera al tipo de proyecto que se tiene. En la Tabla 16 se muestra una comparación entre las diferentes placas Arduino existentes en el mercado.

Tabla 16 Descripción de elementos programables bloque de Procesamiento

Requerimientos	Arduino Uno	Arduino Mega 2560	Arduino Nano	Arduino DUE
Voltaje de operación entre 5 V y 12 V	Si	Si	Si	Si
Placa de tamaño reducido	No	No	Si	No
Memoria mayor 10 KB	Si	Si	Si	Si
Lenguaje de programación basado en C	Si	Si	Si	Si
Software de programación libre	Si	Si	Si	Si
Compatibilidad con placa del bloque de toma de datos	Si	Si	Si	Si

Fuente: Autoría

Según la Tabla 16, se puede apreciar que Arduino Nano cumple con los requerimientos planteados en este bloque, por tanto, se optó por elegir esta placa, con el correcto tratamiento de la información, se puede implementar ML en este tipo de placas. A continuación, se muestran algunos detalles de cómo se encuentra constituida y las principales características de la placa Arduino Nano.

- **Arduino Nano**

En la Figura 52 se muestra la imagen de una placa Arduino Nano, con su respectiva distribución de cada pin, y a continuación se encuentra la Tabla 17, que contiene sus características principales según la hoja de especificaciones técnicas.

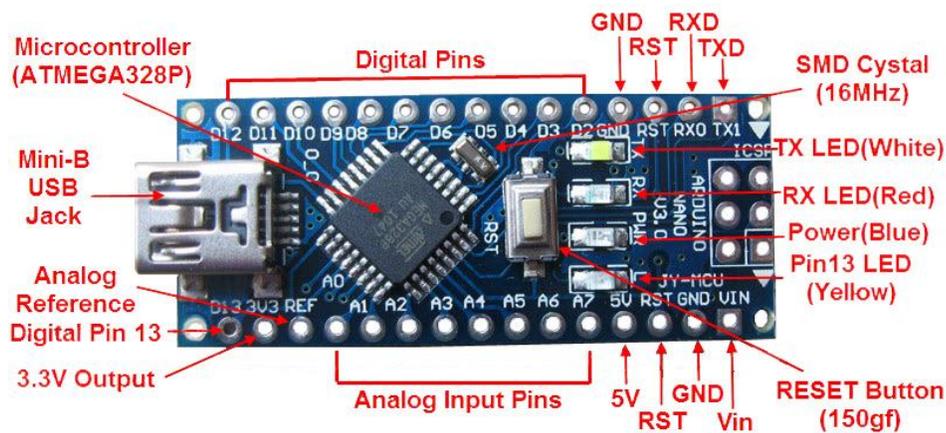


Figura 52 Diagrama de pines de Arduino Nano

Fuente: (patagoniatec, 2014)

Tabla 17 Especificaciones técnicas Arduino Mega

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Microcontrolador	ATmega328
Voltaje operativo	5V
Pines digitales I/O	22 (de los cuales 6 proveen salidas PWM)
Entradas Analógicas	8
Corriente DC por pin I/O	40 mA

Memoria Flash	32 KB de los cuales 2KB son usados por el bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

Fuente: Adaptado de (ARDUINO, 2018b)

3.6.1.5.3 Diagrama de conexión

La placa Arduino Nano se conecta con el módulo de recepción, perteneciente al bloque de comunicación, este microcontrolador recibe la información enviada desde el bloque de toma de datos y es la encargada de procesar dichos datos y obtener un tipo de pisada. La alimentación del tanto del bloque de comunicación como de procesamiento se lo hace a través del puerto USB del ordenador. El diagrama esquemático de esta etapa se muestra en la Figura 53.

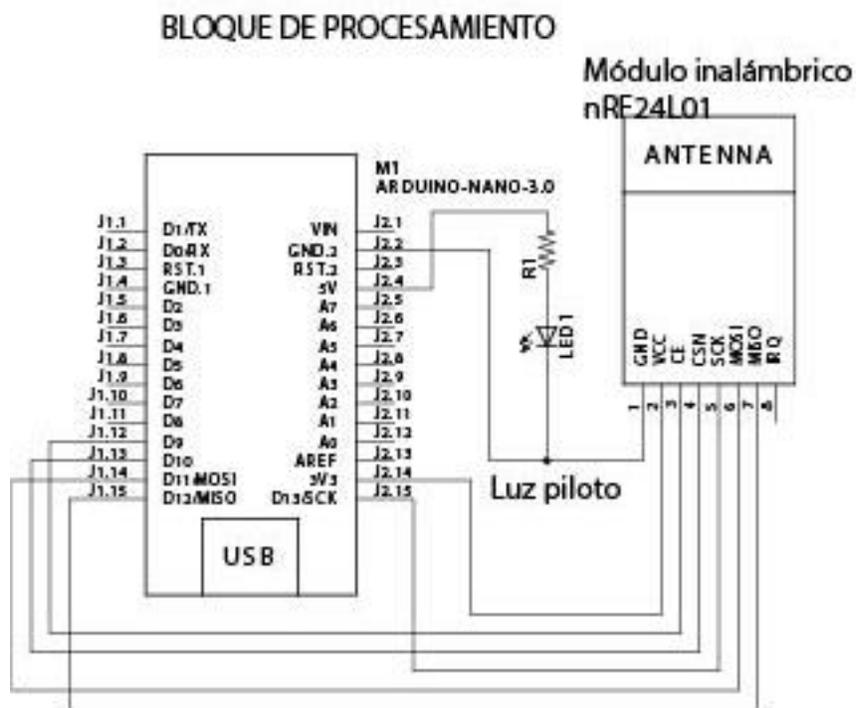


Figura 53 Diagrama esquemático bloque de procesamiento

Fuente: Autoría

3.6.1.6 Bloque de alimentación

Este bloque está destinado a alimentar a cada uno de los bloques de PIEMEG, exceptuando los bloques de Comunicación (módulo receptor), Procesamiento y Visualización. Una vez determinados los elementos de las demás zonas es posible establecer los requerimientos que debe cumplir el bloque de potencia o alimentación para que el sistema funcione.

3.6.1.6.1 Requerimientos del bloque de alimentación

Las especificaciones que debe cumplir esta etapa son de suma importancia para el correcto desarrollo del sistema, pues se convierte en la base de funcionamiento de este. Estos requerimientos son listados a continuación:

- ❖ Encendido y apagado de PIEMEG.
- ❖ Voltaje negativo de -6.5 Vcd para alimentación de bloques de sensores y acondicionamiento de la señal.
- ❖ Voltaje positivo de 6.5 Vcd para alimentación de bloques de toma de datos (Arduino Mega), acondicionamiento de señal.
- ❖ Sistema de protección.
- ❖ Luz piloto de encendido.

3.6.1.6.2 Criterio para el diseño de la fuente de alimentación de PIEMEG

Una vez conocidos los requerimientos para que cada uno de los bloques funcionen, se procede a realizar una estimación del consumo eléctrico de PIEMEG. Los cálculos de voltaje y corriente necesarios para alimentar el sistema se detallan a continuación:

- **Cálculo de Voltaje**

Para determinar el voltaje de funcionamiento de PIEMEG, es necesario tomar en cuenta que para lograr que los amplificadores operacionales usados en el bloque de adquisición de datos trabajen es necesario utilizar voltajes positivos y negativos, el AO seleccionado es el LM324 el cual dentro de sus características que pueden ser observadas en su datasheet, ubicado en los anexos de este documento, presenta una caída de tensión en sus salidas de aproximadamente 1.5 Vcd, teniendo esto en cuenta el voltaje de alimentación deberá ser superior a 5 Vcd.

Con un valor de ± 6.5 Vcd se garantiza que, en cada una de las salidas del bloque de acondicionamiento de datos se obtenga un valor de 5 Vcd, los cuales alimentarán las entradas analógicas del bloque de procesamiento. Esto garantiza una correcta lectura del conversor análogo digital del Arduino Mega, cuya resolución es de 10 bits. Además, este voltaje está dentro de los rangos permitidos para la alimentación de cada uno de los dispositivos de PIEMEG.

- **Cálculo de corriente**

Para realizar este cálculo, es necesario basarse en las especificaciones técnicas de los componentes electrónicos que están presentes en el sistema, estos están presentes en los anexos como datasheets, se realizara un cálculo general de corriente de PIEMEG, para lo cual se debe sumar las corrientes del microcontrolador Arduino Mega, sensores FSR 402, NRF24L01, AOLM324.

La corriente total es igual a la suma de las corrientes que consume cada elemento electrónico, haciendo uso de la Ec. 6, se obtiene la corriente total del sistema, la Tabla 18 muestra en detalle cada uno de los voltajes y corrientes que consumen los elementos de PIEMEG.

Tabla 18 Sumatoria de corrientes del sistema

N°	Elemento	Corriente (c/u)	Voltaje (c/u)	Cantidad	Total (mA)	Total (Vcd)
1	Arduino Mega	Consumo por cada pin (entrada/salida)	5 a 12 Vcd	1	–	5 a 12 Vcd
2	Sensor FSR 402	1 mA	5 a 12 Vcd	14	14 mA	5 a 12 Vcd
3	AO LM324	700 uA	+/- 1,5Vcd a +/- 16Vcd	4	2.8 mA	+/- 1,5Vcd a +/- 16Vcd
4	NRF24L01	12.3 mA	1.9 a 3.6 Vcd	1	12.3 mA	1.9 a 3.6 Vcd
5	Entradas analógicas Arduino Mega	40 mA	5 Vcd	14	560 mA	5 Vcd
6	Diodo LED	5 mA	5 Vcd	2	10 mA	5 Vcd
					Total, Corriente: 599 mA o 0.589	
					Total, Voltaje: ±6.5 Vcd	

Fuente: Autoría

$$IT = \sum_{i=1}^n I_{ei} \quad \text{Ec. 6}$$

$$IT = I_{e1} + I_{e2} + I_{e3} + I_{e4} + I_{e5}$$

$$IT = (14 + 2.8 + 12.3 + 560 + 10) \text{ mA}$$

$$IT = 599 \text{ mA}$$

En base a los resultados obtenidos se plantea implementar una fuente de alimentación dual regulable de ± 12 Vcd a 1A.

3.6.1.6.3 Diseño de fuente de alimentación

La fuente diseñada se muestra en la Figura 54 en el apartado de diagrama de conexión, está constituida por la etapa de transformación, en la cual posee un transformador de toma intermedia de 12 Vca a 1A, de esta manera el transformador cumple con la condición de poseer una corriente superior a la calculada en el apartado 3.6.7.2, en este bloque el voltaje de 110 Vca de entrada doméstica es reducido a aproximadamente a 12 Vca en los dos extremos del devanado secundario del transformador, teniendo un total de 24 Vca, en estos extremos.

Luego en la etapa de rectificación se utiliza un puente rectificador a 1A, en la salida de este ya se cuenta con voltaje continuo, pero con presencia de rizado por lo que es necesaria la etapa de filtrado, por ello se colocan dos condensadores electrolíticos (C1, C2), cuyo cálculo se lo muestra más adelante.

Con la etapa de filtrado se obtiene un voltaje mucho más continuo, a continuación, en la etapa de regulación, para que los voltajes de salida se encuentren dentro de los rangos establecidos y la fuente funcione correctamente, la circuitería que rodea a los reguladores LM317 y LM337 son basadas en recomendaciones del fabricante.

Los cálculos de los condensadores de filtrado se obtienen mediante la Ec. 7, cabe recalcar que esta expresión calcula un valor de condensador para que el rizado sea de un 10% de V_o (Voltaje de salida) conocida como regla del 10%.

$$C = \frac{5 \cdot I}{f \cdot V_{max}} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

C: Capacidad del condensador del filtro en faradios

I: Corriente que suministrará la fuente

f: Frecuencia de la red

V_{max}: tensión pico de salida del puente rectificador.

En base a la Ec. 7, se debe calcular el V_{max} de salida del puente. Hay que tener en cuenta la caída de tensión en los diodos. Según (Carlos Díaz, 2014) la expresión mostrada en la ecuación 8, se utiliza para calcular la tensión máxima o pico en el devanado secundario del transformador.

$$V_{max} = V_i * 1.4142 \text{ [Vca]} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

V_i: Voltaje eficaz

Solución:

Datos: V_i= 12 [Vca]

$$V_{max} = 12 * 1.4142$$

$$V_{max} = 16.97 \text{ [Vca]}$$

A este dato se debe restar la caída de tensión después de la rectificación, este valor es de aproximadamente 2 voltios, debido a que dos diodos conducen en cada ciclo. El resultado de V_{max} es:

$$V_{max} = 16.97 - 2$$

$$V_{max} = 14.97 \text{ [Vcd]}$$

A continuación, se realiza el cálculo del valor de los condensadores C1 y C2, tomando en cuenta la ecuación 7.

Datos:

V_{max}: 14.97 Vcd

f: 60 Hz

I: 599 mA (corriente de consumo de la fuente)

$$C = \frac{5 * (0.599)}{60 * 14.97}$$

$$C = 0,003334F \cong 3334 \text{ uF}$$

Los condensadores para que la fuente de alimentación de PIEMEG pueda trabajar correctamente deben ser superiores al valor calculado de 3334 uF, tomando en cuenta los valores comerciales en el mercado se decide utilizar condensadores de 4700 uF.

3.6.1.6.4 Diagrama de conexión

Las etapas de la fuente fueron explicadas en el apartado anterior, es importante destacar que el diseño cuenta con un fusible como sistema de protección, para evitar fallas en los dispositivos electrónicos por medio de sobrecargas, el encendido de la fuente es por medio de un interruptor, en el cual viene integrada una luz piloto. El diagrama de la fuente de alimentación de PIEMEG es mostrada en la Figura 54.

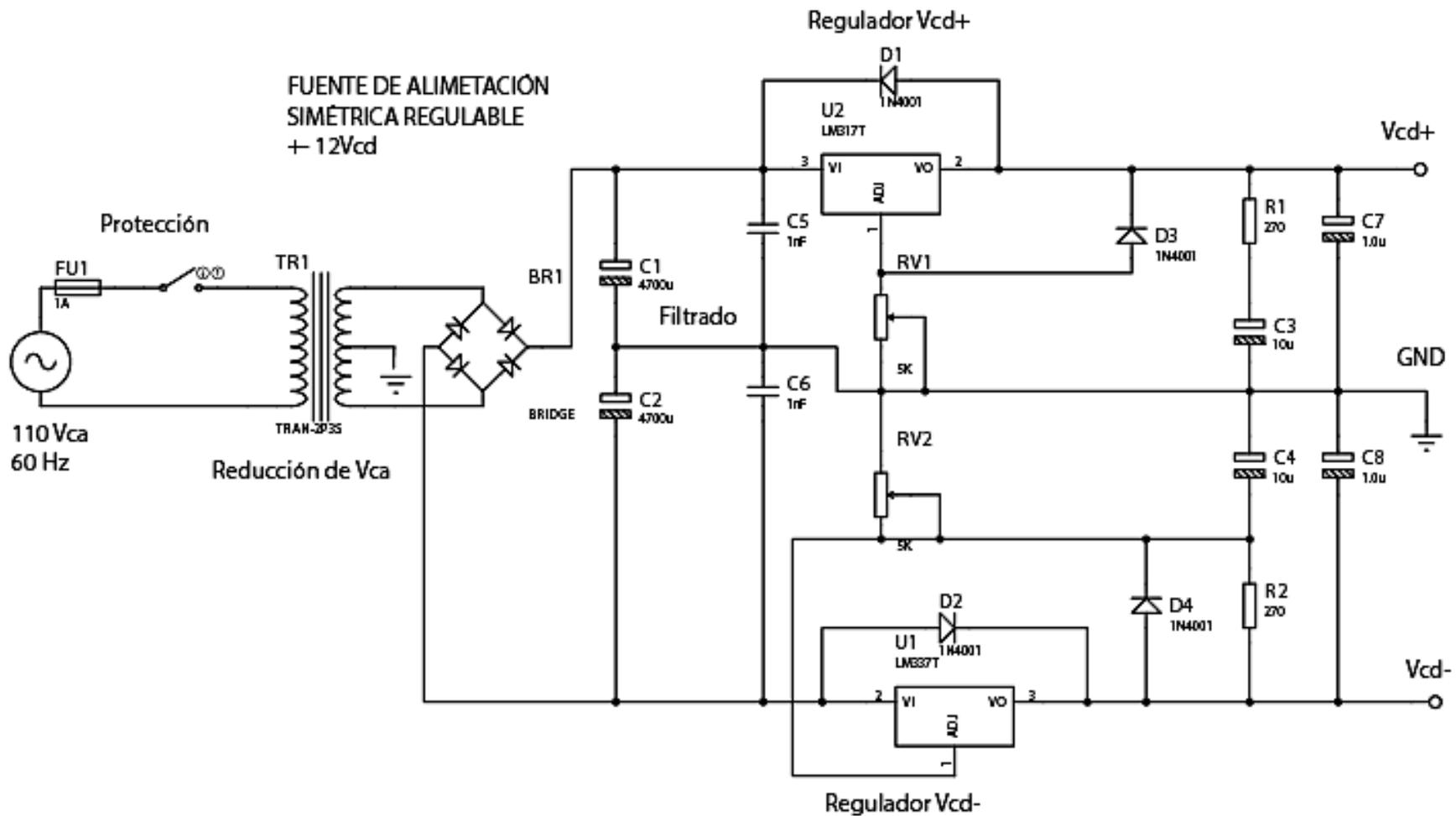


Figura 54 Diagrama esquemático fuente de alimentación PIEMEG

Fuente: Autoría

3.6.2 Diseño de Software

Para esta sección, se debe tener en cuenta que los bloques en lo que se realiza un diseño de software son: Bloque de toma de datos, procesamiento, comunicación y visualización de datos.

3.6.2.1 Bloque de toma de datos

La recolección de datos provenientes del bloque de acondicionamiento de señal es necesaria la creación de un algoritmo en la placa de la toma de datos, se leen las lecturas analógicas de los sensores a través de los pines analógicos que posee Arduino Mega 2560 y se envía esta información al bloque de procesamiento de forma inalámbrica. El diagrama de flujo de este proceso se muestra en la Figura 55.

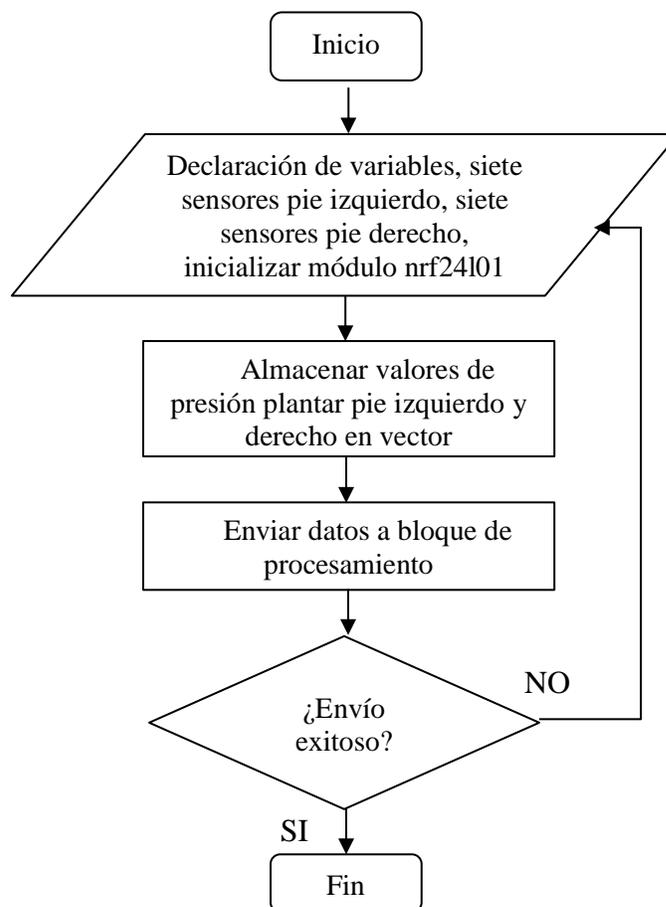


Figura 55 Diagrama de flujo algoritmo toma de datos

Fuente: Autoría

3.6.2.2 Bloque de procesamiento

Esta etapa es la encargada de tratar y procesar la información obtenida del bloque de toma de datos, y luego arrojar una predicción sobre los tres tipos de pisadas ya estudiados. Para realizar la función de la toma de decisión, el bloque de procesamiento debe implementar un algoritmo de aprendizaje autónomo. Según (Maimon & Rokach, 2005) dentro del desarrollo de proyectos en base al aprendizaje automático se utiliza mucho el proceso de descubrimiento de conocimiento en bases de datos, en inglés knowledge discovery in databases (KDD) process. El cuál permite identificar patrones válidos, útiles y comprensibles a partir de un conjunto de datos grandes y complejos.

Por ello, KDD es aplicado en esta etapa del diseño para garantizar un correcto desempeño de PIEMEG. La Figura 56 muestra el proceso general de KDD. En base a (Dunham, 2006) la entrada de este proceso es la información, y la salida es la información útil deseada por los usuarios. Los pasos que conforman este proceso son los siguientes:

- **Selección (Selection):** La información necesitada para el proceso de minería de datos puede ser obtenida de diferentes y heterogéneas fuentes de información. Este primer paso obtiene la información de diferentes bases de datos, archivos.
- **Preprocesamiento (Preprocessing):** Los datos que utilizará el proceso pueden tener datos incorrectos o faltantes. Los datos erróneos se pueden corregir o eliminar, mientras que los datos faltantes se deben suministrar o predecir (a menudo se utilizan herramientas de minería de datos).

- **Transformación (Transformation):** Los datos de diferentes fuentes se deben convertir a un formato común para su procesamiento. Algunos datos pueden codificarse o transformarse en formatos más utilizables. La reducción de datos se puede utilizar para reducir el número de datos posibles que se consideran.
- **Minería de datos (Data mining):** Este paso aplica algoritmos a los datos transformados para generar los resultados deseados.
- **Interpretación/evaluación (Interpretation):** La forma en que se presentan los resultados de la minería de datos a los usuarios es extremadamente importante porque la utilidad de los resultados depende de ello. En este último paso se utilizan varias estrategias de visualización e interfaces gráficas de usuario (GUI).

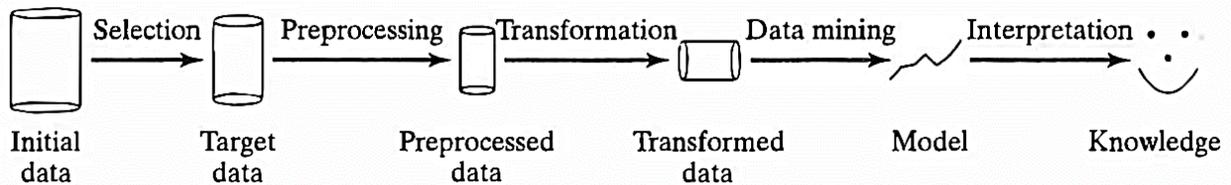


Figura 56 Proceso KDD

Fuente:(Dunham, 2006)

3.6.2.2.1 Selección

Para obtener la base de datos (BDD) inicial, se recopila información de las lecturas obtenidas en el bloque de toma de datos, dicha BDD tiene un formato (.csv) del inglés comma-separated values. Se diseña un algoritmo capaz de obtener y almacenar dicha información, estos datos son procesados con el objetivo de obtener el valor de la presión de compresión que recibe cada sensor FSR 402, los cuales se encuentran distribuidos en los dos pies, siete sensores para el

pie izquierdo y siete para el derecho, a continuación, el diagrama de flujo de la Figura 57 muestra el funcionamiento de esta parte del algoritmo.

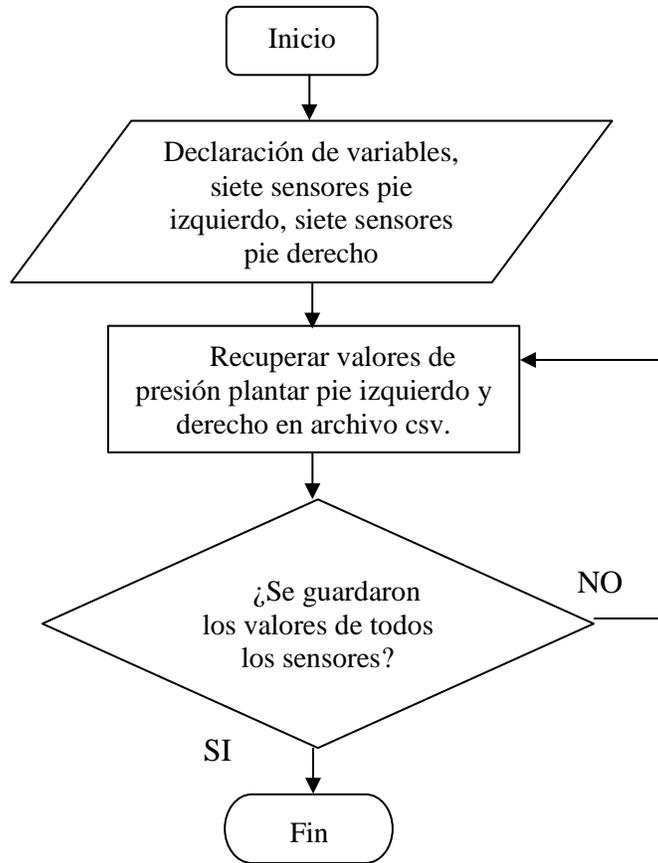


Figura 57 Diagrama de flujo, toma de datos de presión

Fuente: Autoría

3.6.2.2.2 Preprocesamiento

En la etapa anterior se obtiene la BDD inicial, con los datos de los catorce sensores FSR 402. La estructura de esta BDD se muestra en la Tablan19. En esta fase de preprocesamiento es necesario añadir otro campo a la BDD, pues hacen falta los datos correspondientes a los tres tipos de pisada (normal, plana y cava).

Tabla 19 Estructura BDD inicial

Pie izquierdo							Pie derecho						
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: Autoría

donde:

S1, ..., S14: Sensores 1, 2, 3..., 14.

X: Lectura de sensores.

El método de Hernández-Corvo permite la tipificación y clasificación de la huella plantar. La técnica más frecuente para registrar la huella plantar es por entintado de las plantas de los pies, esto permite obtener una apreciación clara de las zonas de mayor y menor presión durante el apoyo bipodal (León Pérez, Calero Morales, & Chávez Cevallos, 2016). Se debe aplicar el método de Hernández-Corvo para obtener una clasificación de los tres tipos de pisadas y añadir esa información a la base de datos inicial, la estructura de esta nueva BDD se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20 Estructura BDD inicial más Clase (Tipos de Pisadas)

Pie izquierdo							Pie derecho							Clase
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1
y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	2
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	3

Fuente: Autoría

Donde:

S1, ..., S14: Sensores 1, 2, 3, ..., 14.

X: Lectura de sensores para pisada normal.

Y: Lectura de sensores para pisada cava.

Z: Lectura de sensores para pisada plana.

1: Pie normal

2: Pie plano

3: Pie cavo

3.6.2.2.3 Transformación

Para el desarrollo del siguiente paso de KDD, se hace uso del lenguaje de programación R dedicado a la computación estadística y gráficos, a través de su entorno de desarrollo integrado (IDE) RStudio. En esta etapa de transformación, se pretende procesar adecuadamente la información de la base de datos obtenida en el paso de preprocesamiento, con el objetivo de que el algoritmo de aprendizaje autónomo pueda extraer el máximo conocimiento. El procesamiento que se lleva a cabo en este paso consiste en la detección de datos útiles dentro de la BDD inicial, para lo cual se evalúan ciertos algoritmos como AENN, BBNR, CNN, DROP1, DROP2 que permiten una reducción de la información, dejando solo aquella información realmente útil.

3.6.2.2.4 Minería de datos

En este momento se cuenta con la BDD de datos reducida, por lo cual en el paso de minería de datos se implementa el algoritmo de decisión supervisada para obtener los resultados deseados, es decir la predicción de los tres tipos de pisadas. La elección del algoritmo de aprendizaje autónomo más recomendable, se la realiza a través de RStudio, el cual permite de igual manera implementar este tipo de algoritmos.

Para determinar el algoritmo más idóneo, se realiza una matriz de confusión en base a las predicciones de cada uno, el que posea la mayor eficiencia, será implementado en la placa del bloque de procesamiento. El proceso que realizará la placa para determinar los tipos de pisada se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 58.

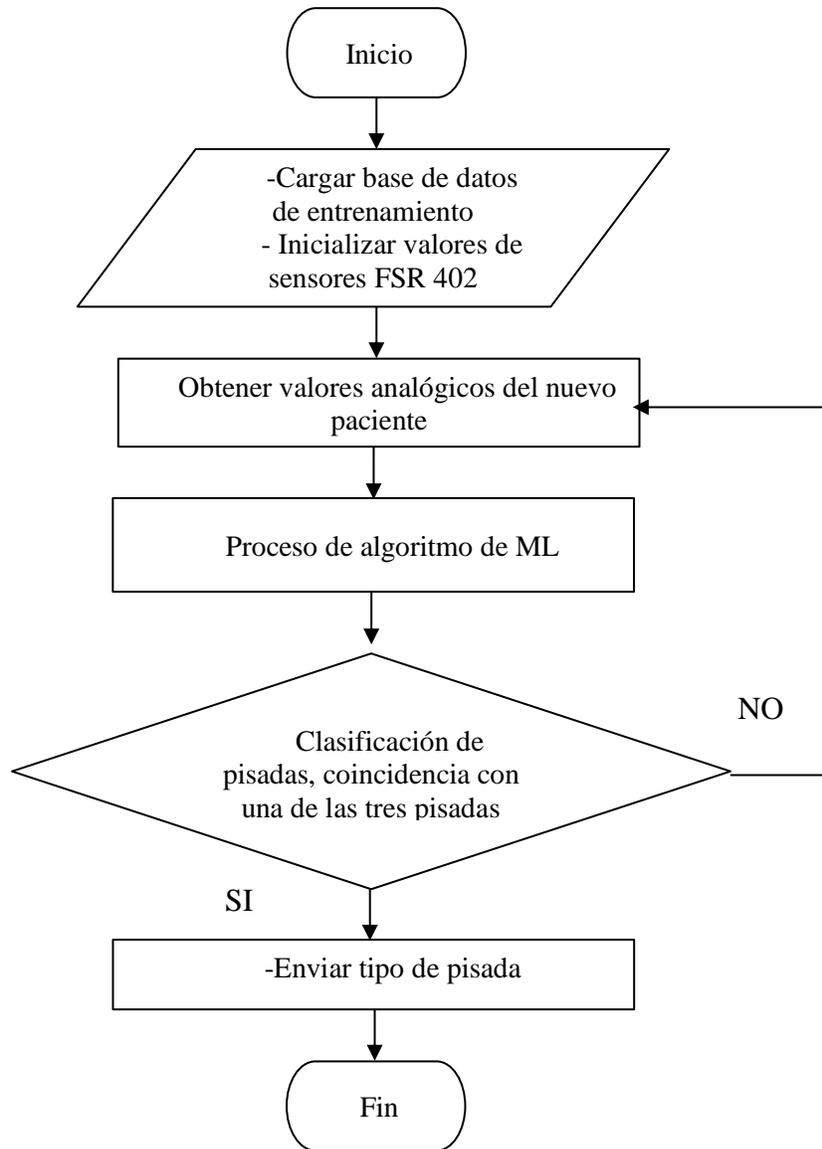


Figura 58 Diagrama de flujo, algoritmo de aprendizaje automático

Fuente: Autoría

3.6.2.2.5 Interpretación/Evaluación

Esta etapa es la encargada de mostrar los resultados deseados de una forma que el administrador o usuario de PIEMEG pueda comprender, el desarrollo e implementación de la última fase de KDD se lo realiza en el bloque de Visualización.

3.6.2.3 Bloque de comunicación

Para el envío y recepción de información, se colocan dos módulos NRF24L01, uno conectado directamente al bloque de toma de datos (Arduino Mega) como transmisor y el otro en el bloque de procesamiento (Arduino Nano), este a su vez es conectado al ordenador, para la visualización del tipo de pisada. El funcionamiento de los sistemas de transmisión y recepción se puede apreciar en el diagrama de flujo de la Figura 59 y 60 respectivamente.

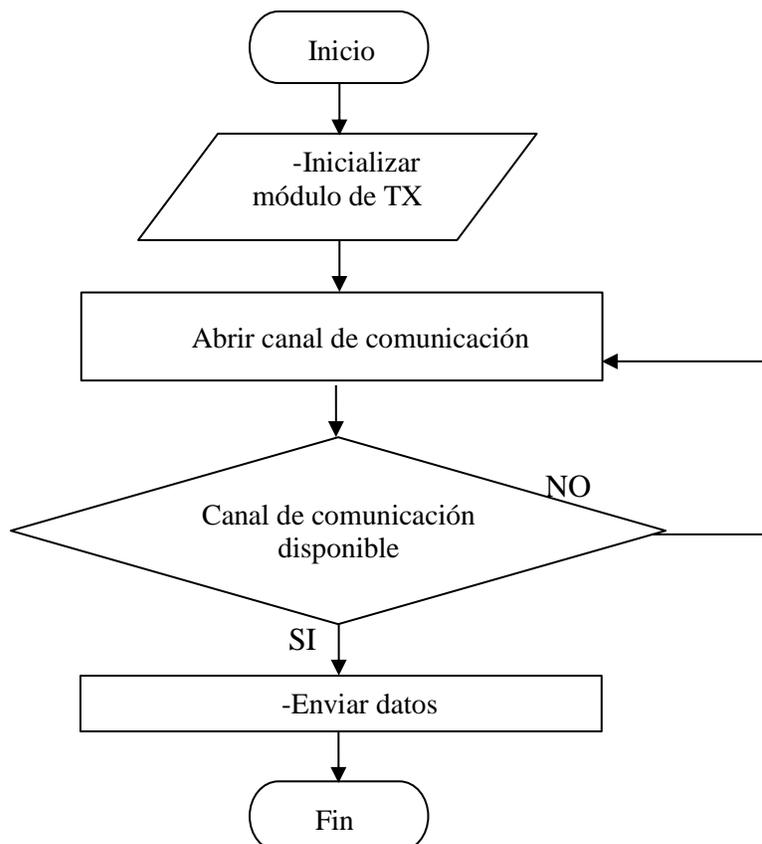


Figura 59 Flujograma, sistema de transmisión

Fuente: Autoría

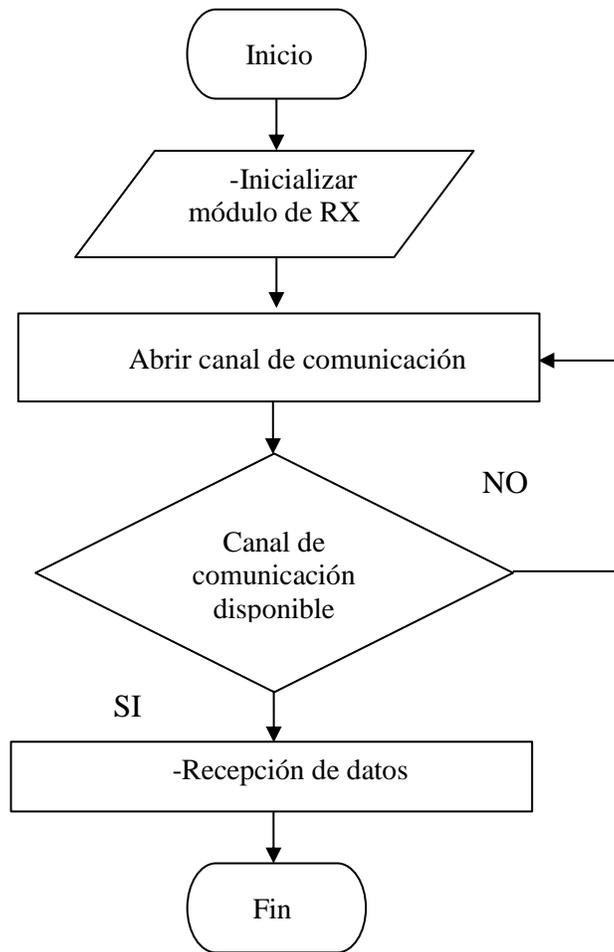


Figura 60 Diagrama de flujo, sistema de recepción

Fuente: Autoría

3.6.2.4 Bloque de visualización

Es el encargado de mostrar los resultados obtenidos cuando un paciente se realice una prueba en el PIEMEG, la interfaz gráfica del sistema debe permitir que tanto administrador como usuario puedan observar de forma clara los resultados para ello este bloque debe cumplir los siguientes requerimientos.

3.6.2.4.1 Requerimientos del bloque de visualización

En base a los bloques de toma de datos y procesamiento, como requerimiento principal de esta etapa, es que el software de visualización debe ser compatible con las placas de estos dos bloques. Los requerimientos de este bloque son los siguientes:

- ❖ Software con lenguaje basado en java.
- ❖ Software que tenga compatibilidad con Arduino.
- ❖ Software que permita crear interfaces interactivas.
- ❖ Software de Código abierto.
- ❖ La interfaz debe permitir guardar los análisis.
- ❖ La interfaz debe poseer un sistema de encendido y apagado.
- ❖ Visualización de los puntos de mayor presión.

3.6.2.4.2 Selección de plataforma de visualización

En el capítulo II se describieron tres diferentes plataformas de visualización como son Processing, Visual Studio y Eclipse, cada una de estas poseen características que las convierten en potentes herramientas de visualización y cumplen con los requerimientos que necesita este bloque; La elección del software de visualización se realiza a través de una tabla comparativa entre las tres herramientas, esta se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21 Tabla comparativa plataformas de visualización

Requerimientos	Visual Studio	Processing	Eclipse
Software con lenguaje basado en java	No	Si	Si
Software que tenga compatibilidad con Arduino	Si	Si	Si
Software que permita crear interfaces interactivas	Si	Si	Si
Software de Código abierto	Si	Si	Si
La interfaz debe permitir guardar los análisis	Si	Si	Si
La interfaz debe poseer un sistema de encendido y apagado	Si	Si	Si
Visualización de los puntos de mayor presión	Si	Si	Si

Fuente: Autoría

Se decide trabajar con Processing ya que posee múltiples beneficios y características frente a las otras dos plataformas estudiadas. Es un software de visualización gratuito e ideal para representación de datos artísticamente, es decir permite la creación de plataformas graficas interactivas a través de la lectura de sensores. Trabaja con dos métodos en su entorno de desarrollo, el método inicial es, `setup()`, el cual se ejecuta cuando la aplicación comienza. El segundo es, `draw()`, se invoca una y otra vez desde el inicio de la aplicación hasta que se cierre el programa.

3.6.2.4.3 Diagrama en bloques del proceso del sistema de visualización

La interfaz de visualización se desarrolla en Processing, el proceso para implementar esta plataforma se los describe a continuación y es mostrado en la Figura 61.

- **Ingresar datos informativos del paciente:** El administrador de PIEMEG puede ingresar los datos informativos (nombres, apellidos, edad, peso) del paciente, para su posterior almacenamiento con los datos del tipo de pisada.
- **Lectura de datos:** Por medio de comunicación serial los datos obtenidos en el bloque de procesamiento se envían al sistema de visualización.
- **Graficar zonas de mayor presión y obtener tipo de pisada:** El procesamiento y análisis de cada uno de los valores obtenidos por los sensores, es realizado en el bloque de procesamiento, por lo cual, a este sistema llegan los datos ya discriminados.
Se obtiene el tipo de pisada, los porcentajes de mayor presión en las tres zonas de los pies y se puede visualizar el nivel de presión en cada uno de los sensores de PIEMEG a través de colores que varían entre verde, naranja y rojo según la presión aplicada.
- **Guardar análisis:** Una vez finalizado el análisis es posible guardar la información, para un posterior análisis.

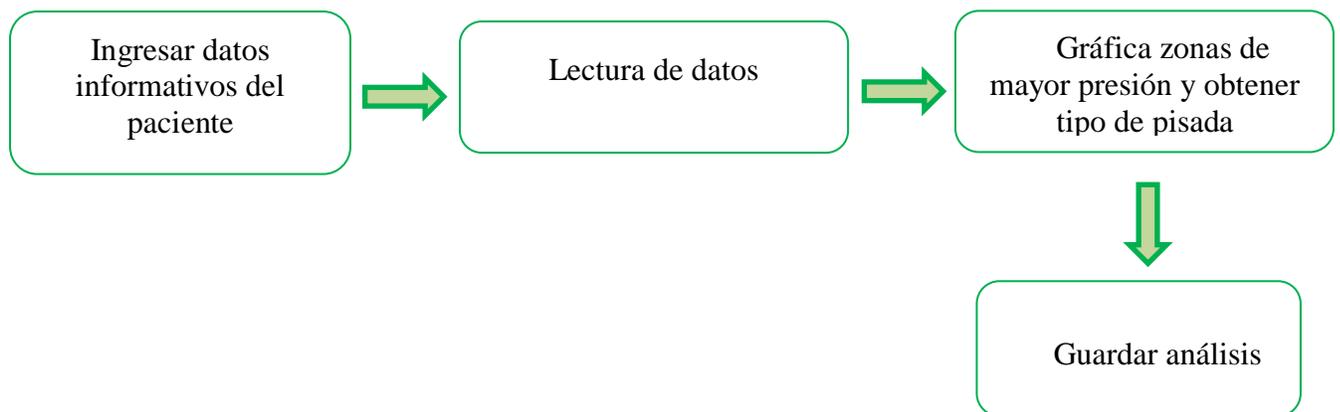


Figura 61 Diagrama en bloques Sistema de Visualización

Fuente: Autoría

El diagrama de flujo que se presenta en la Figura 62, muestra el funcionamiento del sistema de visualización, desde un punto de vista más lógico.

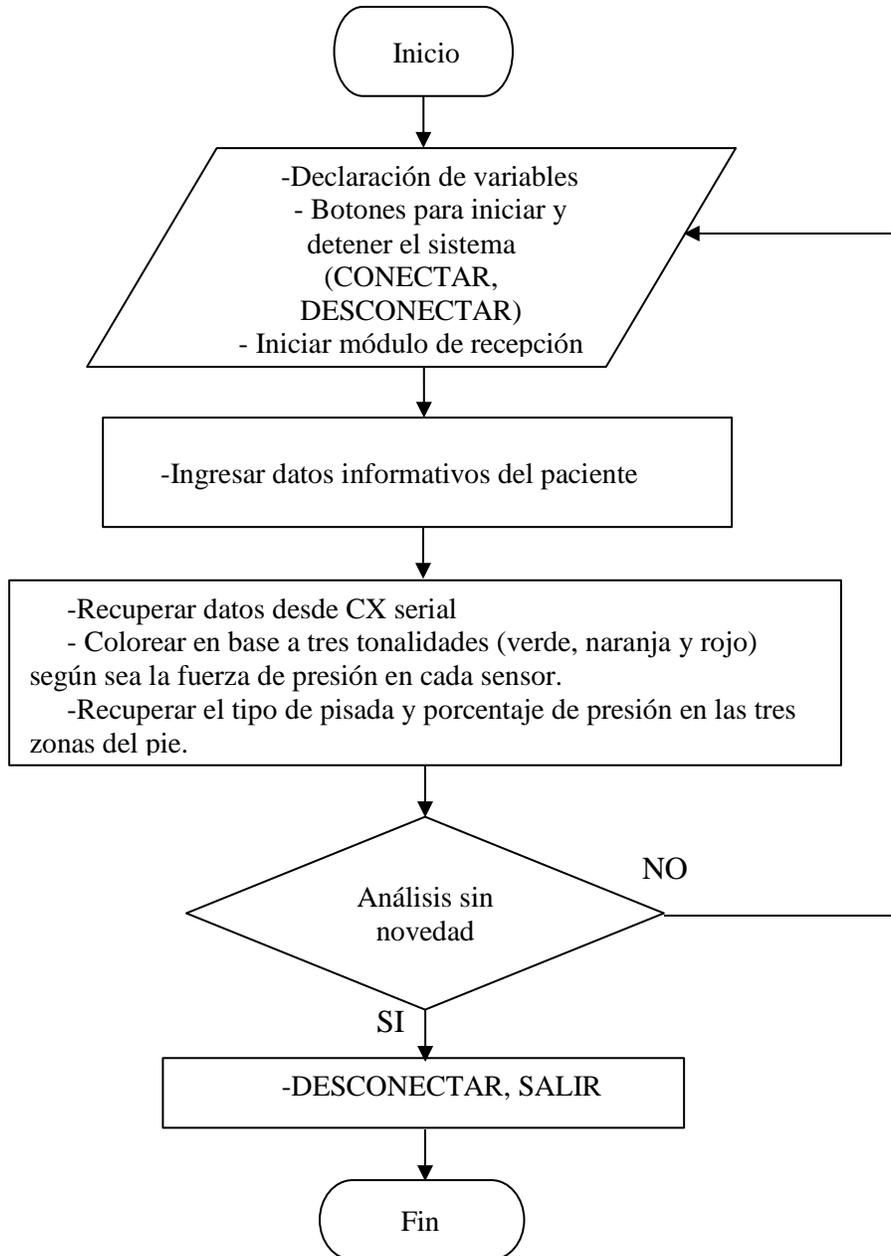


Figura 62 Diagrama de flujo Sistema de Visualización

Fuente: Autoría

3.7 Implementación (FASE 4)

En este apartado se muestra la puesta en marcha de cada uno de los bloques del sistema una vez finalizada la etapa de diseño de cada bloque, al igual que en dicha fase es conveniente dividir esta sección en dos etapas, la primera dedicada a la construcción del Hardware y la otra destinada a la programación del Software.

3.7.1 Implementación de hardware

Para albergar los bloques del sistema, es necesaria la construcción de una caja, este proceso es mostrado a continuación.

3.7.1.1 Construcción de plataforma de PIEMEG

El material escogido para la plataforma es madera ya que gracias a sus características es un buen aislante térmico y eléctrico, es resistente, cuenta con un alto nivel de duración y tiene un bajo costo. Para la construcción de la caja es conveniente analizar el espacio necesario para que todos los elementos electrónicos quepan adecuadamente dentro de la caja, para ello se plantea fabricar una caja de las siguientes dimensiones:

- Largo: 40 cm
- Ancho: 40 cm
- Altura: 5 cm

La Figura 63 muestra la forma de la plataforma, cuyo diseño es cuadrado, esta tiene una tapa en la parte inferior, los elementos de PIEMEG se ubicarán dentro de la caja a excepción de los sensores FSR 402.

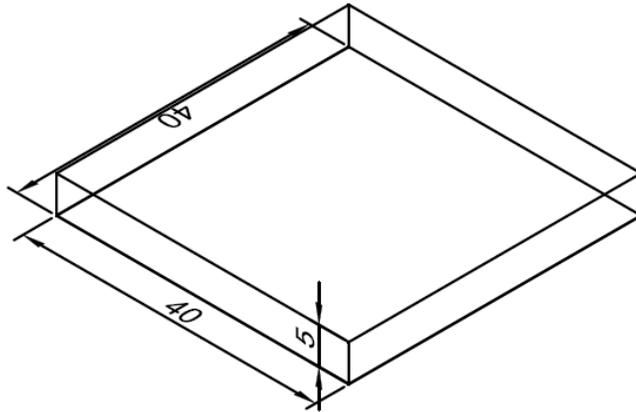


Figura 63 Diseño de estructura externa PIEMEG

Fuente: Autoría

3.7.1.2 Bloque de alimentación

El proceso de construcción de la fuente de alimentación y de todas las placas de los diferentes módulos del sistema, se encuentran en el Anexo 3. A continuación, la Figura 64 muestra el circuito final de la fuente, teniendo en cuenta que se debió colocar un disipador de calor, para evitar el aumento excesivo de temperatura en los reguladores LM317 Y LM337.

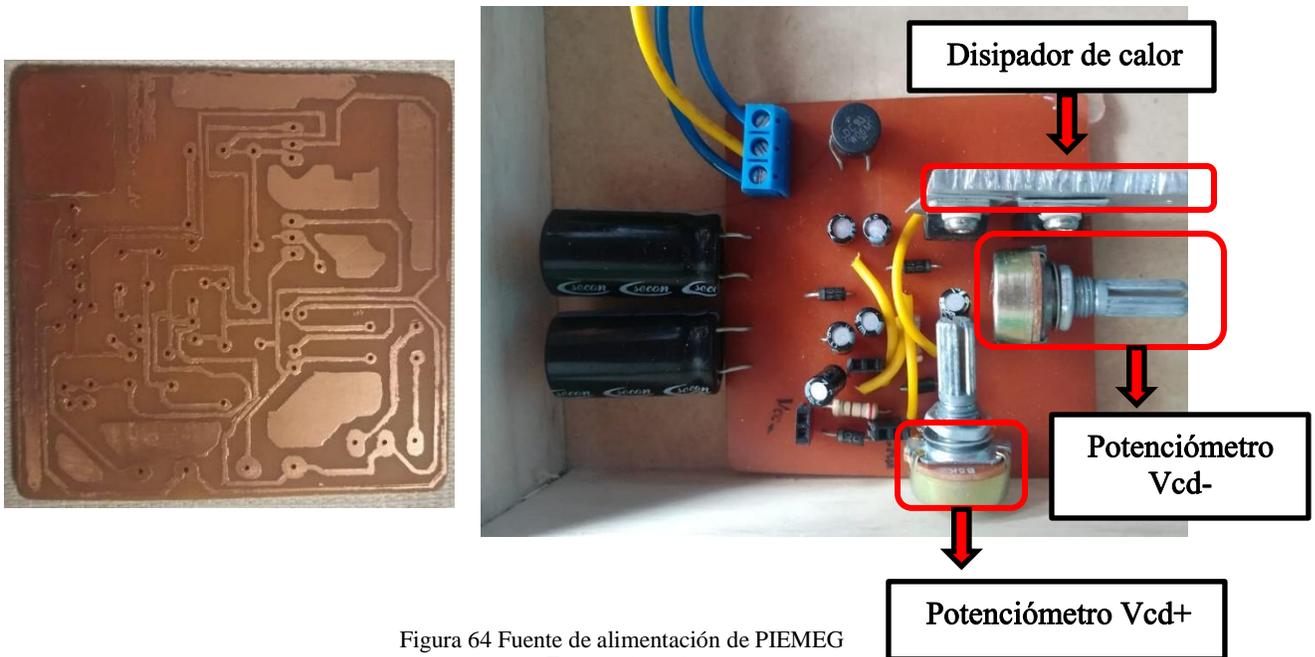


Figura 64 Fuente de alimentación de PIEMEG

Fuente: Autoría

3.7.1.3 Bloque de sensores

En el apartado de diseño se determinó el uso de catorce sensores FSR 402, distribuido en puntos estratégicos del pie, a continuación, se muestra la fase de construcción de la conexión que poseen los sensores a través de la plataforma. La Figura 65 muestra las perforaciones realizadas en la parte superior de la plataforma o caja para que los terminales de los sensores puedan ser conectados internamente.

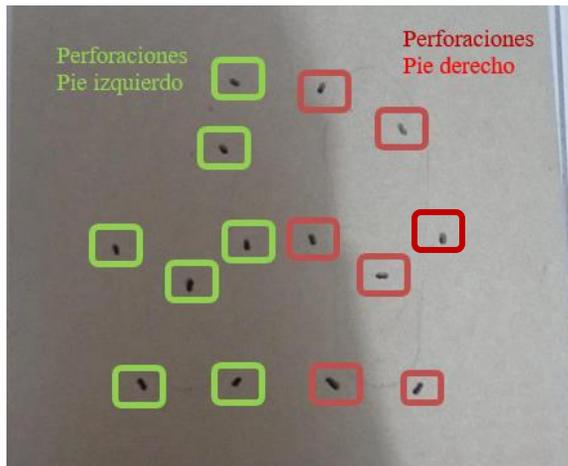


Figura 65 Perforaciones para inserción de sensores

Fuente: Autoría

A continuación, se muestra en la Figura 66 la inserción de los catorce sensores en la parte superior de la plataforma.

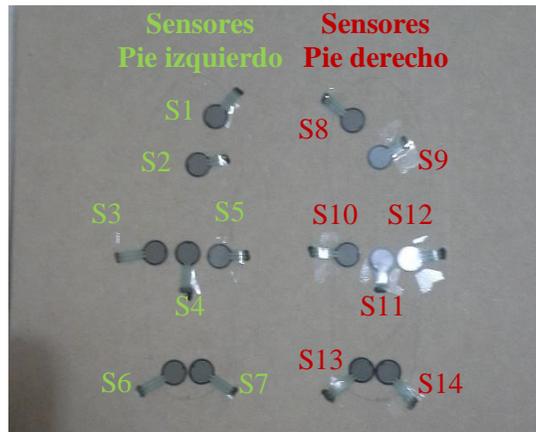


Figura 66 Distribución de sensores en la parte superior de plataforma

Fuente: Autoría

3.7.1.4 Bloque de acondicionamiento de señal

El diseño de la placa de acondicionamiento de la señal está dividido en dos partes, la primera encargada del acondicionamiento del pie izquierdo y la otra del derecho, cada placa tiene la responsabilidad de tratar los siete sensores que contienen cada pie, haciendo uso de la configuración convertidor de voltaje a corriente, seleccionado en el apartado de diseño en detalle de este bloque. Las Figuras 67 y 68 muestran las placas tanto del pie derecho como izquierdo.

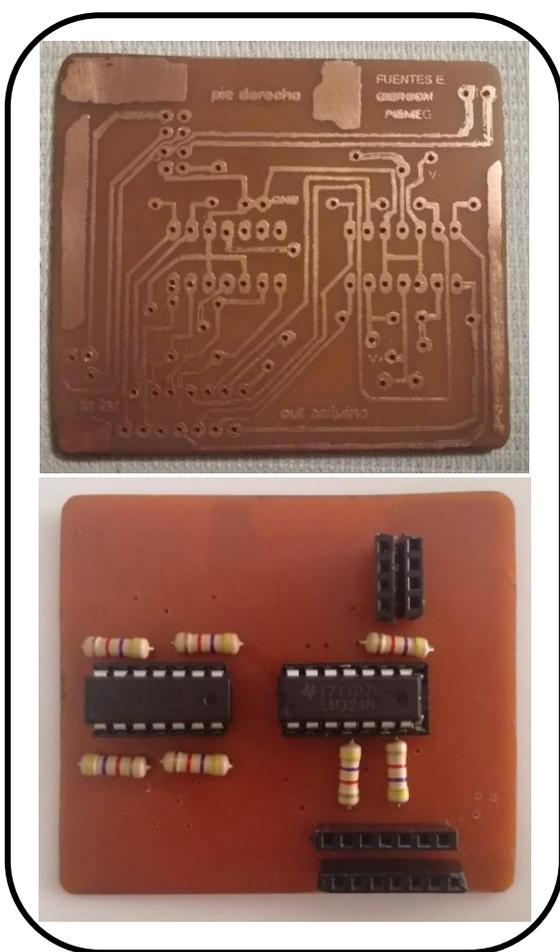


Figura 67 Placa de acondicionamiento de señal, pie derecho

Fuente: Autoría

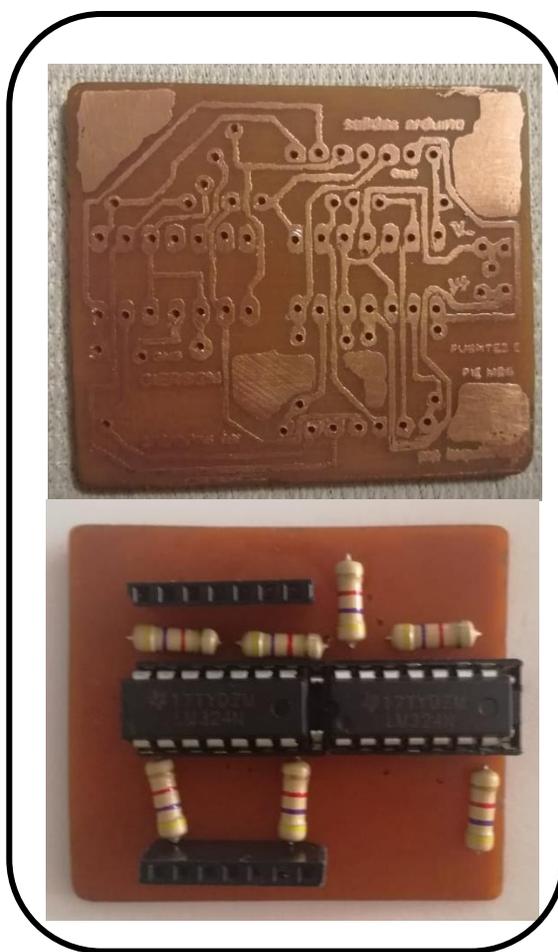


Figura 68 Placa de acondicionamiento de señal, pie izquierdo

Fuente: Autoría

3.7.1.5 Bloque de toma de datos

La implementación de hardware de este bloque se limita a colocar la tarjeta de adquisición de datos en la plataforma de PIEMEG. La Figura 69 muestra la posición de la placa de programación en la caja.

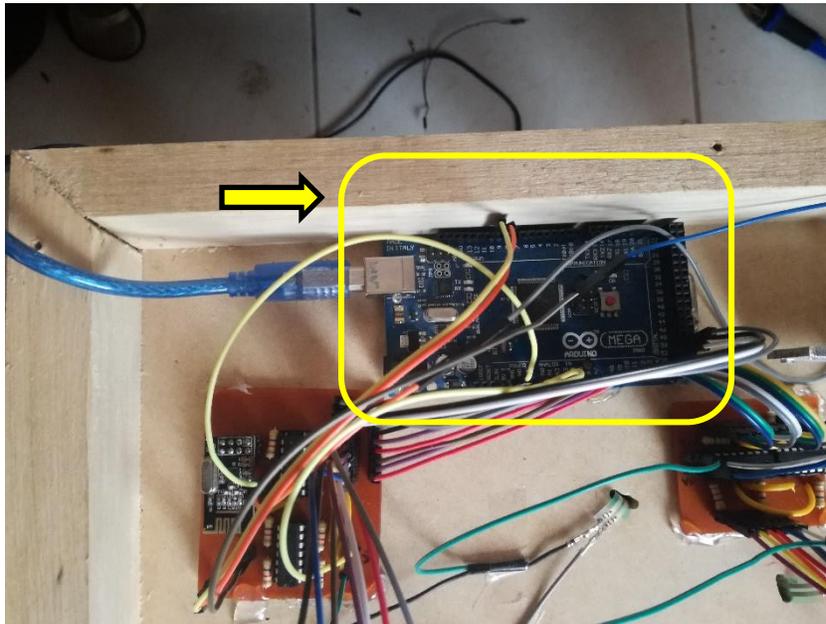


Figura 69 Inserción de placa Arduino Mega de Toma de Datos

Fuentes: Autoría

3.7.1.6 Bloque de comunicación

La placa encargada del sistema de transmisión consta del módulo de comunicación inalámbrica el cual es conectado a la placa Arduino Mega. La Figura 70 muestra la placa del sistema de transmisión.

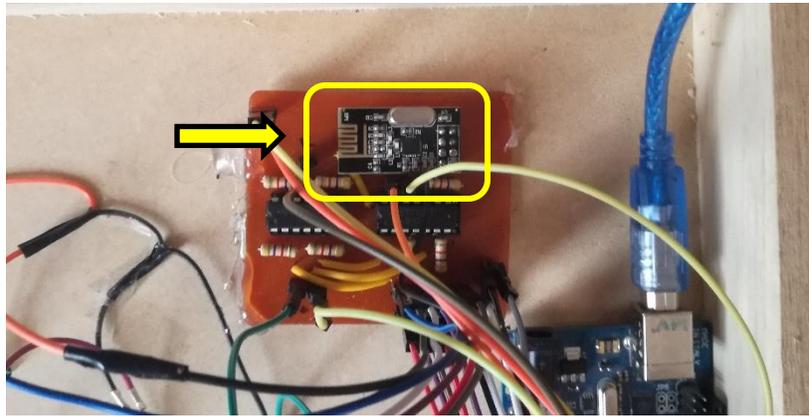


Figura 70 Sistema de transmisión

Fuente: Autoría

De igual manera, la placa del sistema de recepción consta de un módulo NRF24L01, el cual se conecta a un Arduino nano, la implementación de esta placa se la muestra en la Figura 71.

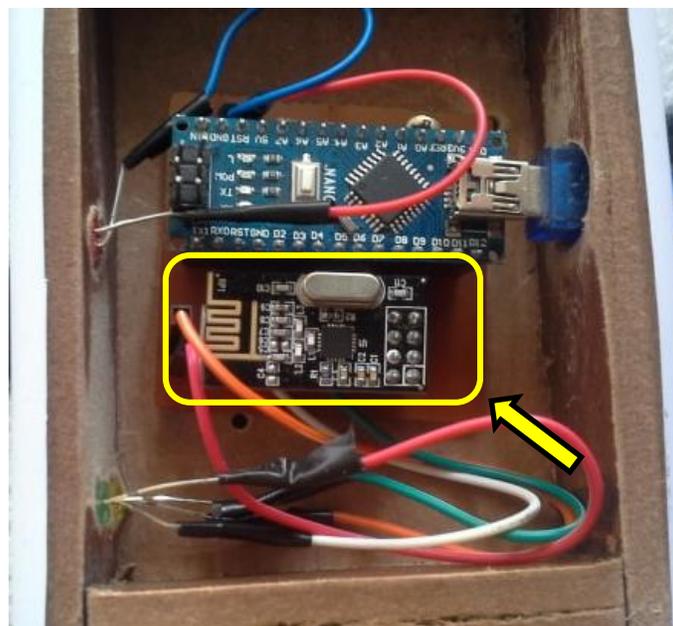


Figura 71 Sistema de recepción

Fuente: Autoría

3.7.1.7 Bloque de procesamiento

Esta primera fase de hardware está constituida por una placa la cual se muestra en la Figura 72. Está formada por un Arduino Nano, un diodo emisor de luz (LED) rojo que verifica que el sistema este encendido y dos LEDs uno amarillo que indica el inicio del test y el otro de color verde, el cual se enciende intermitentemente durante la realización del test. La parte fundamental de este bloque es la implementación del software, que se mostrará más adelante.



Figura 72 Bloque de procesamiento

Fuente: Autoría

3.7.2 Implementación de software

Como se explicó en la sección de diseño, los bloques de toma de datos, procesamiento, comunicación y visualización son aquellos en los cuales se debe realizar una configuración a través de algoritmos.

3.7.2.1 Bloque de toma de datos

En esta etapa se desarrolla el algoritmo que recoge los datos de presión de los catorce sensores y que deben ser enviados al bloque de procesamiento. La Figura 73 muestra parte del código mientras que en el Anexo 1 se puede encontrar el algoritmo en su totalidad.

```
int datos[14]; // vector para almacenar datos
int fsr1,fsr2, fsr3, fsr4, fsr5, fsr6, fsr7,fsr8,fsr9,fsr10.

void loop(void)
{

    fsr1=analogRead(0); //tomar valores de entradas analogicas
    datos[0] = fsr1; //guardar datos en vector datos[]

    fsr2=analogRead(1);
    datos[1] = fsr2;

    Serial.print(datos[0]); //imprimir por cx serial los datos almacenados
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos[1]);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos[2]);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos[3]);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos[4]);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datos[5]);
```

Figura 73 Algoritmo toma de valores sensores FSR

Fuente: Autoría

3.7.2.2 Bloque de procesamiento

En esta etapa se muestra el desarrollo de los cinco pasos que conforman el proceso KDD, una vez obtenidos los datos provenientes del bloque de toma de datos.

3.7.2.2.1 Selección

Este proceso se lo realiza mediante la programación de un algoritmo en el microcontrolador Arduino nano. Este código tiene la función de almacenar los datos obtenidos en el bloque de toma de datos y almacenarlos en una BDD con formato .csv.

Para la creación de la BDD inicial, se toman mediciones de las presiones plantares usando el PIEMEG a niños de la Unidad Educativa “Atahualpa” de la ciudad de Ibarra-Ecuador. Las mediciones son realizadas al curso inicial 1 perteneciente al ambiente N°1 de la Unidad Educativa el cual posee un total de 20 estudiantes, y de igual manera al séptimo curso de educación básica del ambiente N°3, este paralelo cuenta con un total de 20 estudiantes. Por lo tanto, se realizan 40 mediciones en busca de encontrar patrones de los tres tipos de pisadas. Cada medición tiene una duración de 10 segundos en los cuales el sistema almacena 10 datos por cada niño.

Las 20 primeras mediciones son realizadas a niños de 11-12 años y las 20 restantes a niños entre las edades de 4-5 años, para determinar el total de datos que posee la BDD inicial, se realiza el siguiente proceso.

Por cada niño se recopilan 10 medidas, el número total de niños a los cuales se les toma las mediciones de sus presiones plantares son 40, teniendo un total de 400 instancias. Ahora bien, este valor es multiplicado por 14, que representa el número total de sensores usados en el PIEMEG, dando como resultado el tamaño de la BDD inicial con un valor de 5600 datos. La Figura 74, muestra el proceso de toma de datos a niños de 4 a 5 años, mientras que la Figura 76 muestra el mismo proceso a niños entre 11 a 12 años.



Figura 74 Toma de datos a niños de 4-5 años

Fuente: Autoría



Figura 75 Toma de datos a niños de 11-12 años

Fuente: Autoría

La Figura 76 muestra un extracto de esta BDD.

Pie izquierdo							Pie derecho						
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
944	943	891	891	0	936	936	972	969	0	891	184	991	959
945	943	552	552	0	937	937	971	968	0	552	353	991	958
948	946	726	726	0	940	940	725	972	0	726	0	992	959
945	943	892	892	0	937	937	970	967	0	892	295	991	958

Figura 76 Base de datos inicial

Fuente: Autoría

3.7.2.2.2 Preprocesamiento

Con la BDD inicial, se procede a añadir el campo de tipo de pisada (Clase) a la misma. Para ello como se mencionó en la sección de diseño se procede a hacer uso del método de tipificación y clasificación de huellas plantares de Hernández-Corvo. De la misma forma en que se realizaron 40 mediciones de las presiones plantares de los niños en la fase anterior, ahora se realizan 40 tipificaciones de los pies, los materiales usados para realizar la impresión de las huellas plantares de los niños son:

- Cartulina negra
- Talco para pies

El proceso de impresión de huella plantar consiste en que cada niño debe cubrir la totalidad de sus pies con el talco y a continuación pisar sobre la cartulina negra. Una vez obtenida la huella plantar, se procede a implementar el método de Hernández-Corvo para clasificar la pisada del niño.

Para determinar el tipo de pisada mediante este método se deben realizar ciertos trazos sobre la impresión de la huella plantar. A continuación, se muestran estos trazos y el orden a seguir en ese trazado. Se debe tomar en cuenta que todos los trazos se realizan mediante líneas perpendiculares entre sí, es decir, formando un ángulo de 90°. La Figura 77, muestra un ejemplo de cómo es el resultado final después de realizar los trazos correspondientes.

- Trazo inicial (TI)
- Línea inferior (2)
- Línea superior (2')
- Línea 3, MF, define valor de X
- Línea MF2
- Línea MF3
- Línea 6 perpendicular a 4, intercepta a 3
- Línea 7 perpendicular a 5, intercepta a 4, define Ai (arco interno)
- Línea 8 perpendicular a 5, intercepta a 4, tangente con la impresión, define región Y
- Línea 9 perpendicular a 2, intercepta a 5, tangente con la impresión; define T (ancho del talón)

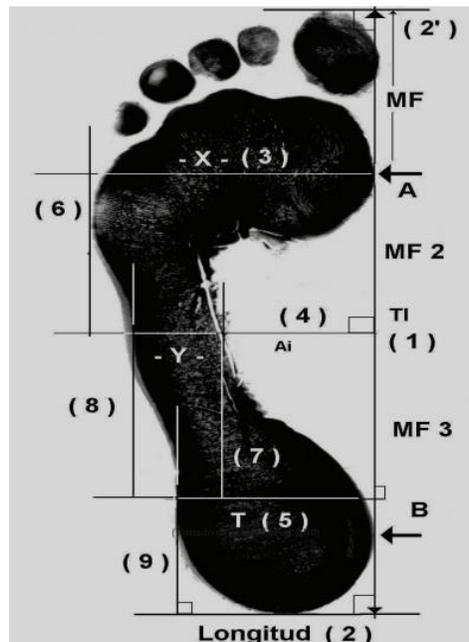


Figura 77 Trazos método Hernández-Corvo

Fuente: (Hernández Corvo, 2019)

Una vez realizados los trazos correspondientes es necesario aplicar la Ec. 9 que permite calcular la valoración porcentual de la huella, luego se compara el resultado con la Tabla 22 que muestra la valoración de las huellas plantares.

$$HC(\%) = \frac{(X-Y)}{X} * 100 \quad \text{Ec. 9}$$

Tabla 22 Valoración de la huella plantar

CLASIFICACIÓN	
0-34%	PLANO
40-54%	NORMAL
60-74%	CAVO

Fuente: (Hernández Corvo, 2019)

Para finalizar, dependiendo del resultado de las tipificaciones se añade el campo de Clase a la BDD inicial, se colocan etiquetas para cada tipo de pisada, esta designación se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23 Designación de etiqueta para cada tipo de pisada

Tipo de pisada	Clase
Normal	1
Plano	2
Cavo	3

Fuente: Autoría

La nueva BDD se encuentra completa, al contar con los 14 atributos de los sensores FSR 402 y el campo de Clase en el cual se identifica a los tres tipos de pisadas, ahora el número total de datos de la BDD aumenta a 6 000, producto de la multiplicación del campo añadido de la clase, el cual contiene 400 datos, por 5600 que era el número de datos en la BDD de la fase anterior. La Figura 78 muestra de igual forma un extracto de esta nueva versión. La totalidad de la BDD inicial se encuentra en el Anexo 5.

Pie izquierdo							Pie derecho							Clase
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	
944	943	891	891	0	936	936	972	969	0	891	184	991	959	1
944	942	772	772	772	936	936	971	968	772	772	531	991	959	2
944	942	772	0	0	936	936	971	968	0	0	531	991	959	3

Figura 78 BBD inicial con etiqueta

Fuente: Autoría

La Figura 79 y 80 muestran el proceso de la toma de huellas plantares a los niños de la Unidad Educativa, las tipificaciones de las huellas plantares de los tres tipos de pisadas, se encuentran en el Anexo 4.



Figura 79 Toma de huella plantar niños 4-5 años

Fuente: Autoría



Figura 80 Toma de huella plantar niños 11-12 años

Fuente: Autoría

3.7.2.2.3 Transformación

En esta fase es necesario realizar una reducción de la BDD inicial de 6000 datos, para ello se hace uso del IDE de R, conocido como RStudio. Para ello es necesaria la ayuda del paquete de filtros de ruido, este paquete permite la implementación de algoritmos capaces de reducir el número de instancias en una BDD. Se procede a realizar esta reducción con cada uno de los siguientes algoritmos:

- CNN
- AENN
- BBNR
- DROP1
- DROP2
- DROP3

Los criterios de selección para determinar que BDD reducida es la óptima son, el porcentaje de instancias removidas por el algoritmo y el tiempo de procesamiento en que el algoritmo se demora para obtener la nueva BDD, la Tabla 24 muestra los valores obtenidos con cada algoritmo.

La BDD es dividida en dos partes, la primera con un 75% de los datos, que se convierte en la Tabla de entrenamiento del sistema y el restante 25% dedicada a pruebas. Para obtener la BDD reducida se trabaja con la Tabla de entrenamiento que posee un total de 4500 datos. La totalidad de la BDD de entrenamiento se encuentra en el Anexo 5.

Tabla 24 Resultados de algoritmos de filtrado de ruido

Algoritmo de filtrado	Número de instancias removidas	Porcentaje de reducción	Tiempo de procesamiento
CNN	284	94.67%	43.03 ms
AENN	3	1%	47.98 ms
BBNR	8	2.6%	28.70 ms
DROP1	270	90%	1192 ms
DROP2	266	88.67%	1741 ms
DROP3	258	86%	1821 ms

Fuente: Autoría

En base a los resultados obtenidos en la Tabla 24, el algoritmo que obtuvo una mejor reducción de la BDD inicial es CNN al eliminar un total de 284 instancias. El nuevo tamaño de la base de entrenamiento pasa de 300 instancias que equivalen a 4500 datos (400 multiplicado por 15) a un tamaño de 16 instancias, lo cual equivale a 240 datos.

3.7.2.2.4 Minería de datos

La siguiente fase de KDD tiene como objetivo implementar minería de datos, esta consiste en aplicar diferentes algoritmos para encontrar las predicciones de los tres tipos de pisadas. Este proceso se divide en dos etapas, en la primera se hace un estudio de diferentes algoritmos de aprendizaje autónomo como k-NN, SVM, Bayesiano y árbol de decisión a través de RStudio, con lo cual es posible determinar que algoritmo provee una mejor eficiencia en la predicción de los tipos de pisadas. Una vez seleccionado el algoritmo se procede a implementarlo en el microcontrolador del bloque de procesamiento (Arduino nano).

Para realizar la simulación de cada algoritmo de ML, se usa la BDD de pruebas extraída en la fase anterior, la cual posee el 25% de la BDD inicial, es decir 100 instancias, con un total de 1500 datos.

- **Análisis de algoritmos de ML con RStudio:**

Para determinar el algoritmo idóneo que será implementado en el PIEMEG, se realizan cinco simulaciones con cada algoritmo variando el valor de la semilla, esta es una variable que genera un valor pseudoaleatorio dentro de la BDD, cada simulación arroja una matriz de confusión con los resultados obtenidos. Después de ello se realiza un promedio de las cinco simulaciones y el algoritmo que posea el mejor promedio será el idóneo para la implementación en el sistema.

La Tabla 25 muestra la eficiencia que se obtuvo con cada algoritmo variando el valor de la semilla:

Tabla 25 Eficiencias de algoritmos de ML con diferente semilla

Algoritmos de aprendizaje automático							
Semilla	k-NN	k-NN	SVM	SVM	SVM	Bayesiano	Árbol de decisión
	K=5	K=3	radial	polinomial	sigmoide		
345	96%	97%	83%	56%	97%	79%	33%
1022	97%	98%	83%	56%	97%	79%	33%
750	96%	98%	83%	56%	97%	79%	33%
1024	97%	97%	83%	56%	97%	79%	33%
999	97%	96%	83%	56%	97%	79%	33%

Fuente: Autoría

La Tabla 26 muestra el promedio final de la eficiencia de cada algoritmo:

Tabla 26 Promedio de eficiencia algoritmos de ML

Algoritmos de aprendizaje automático							
Promedio	k-NN	k-NN	SVM	SVM	SVM	Bayesiano	Árbol de
	K=5	K=3	radial	polinomial	sigmoide		decisión
	96.6%	97.2%	83%	56%	97%	79%	33%

Fuente: Autoría

En base a los promedios obtenidos en la Tabla26, el algoritmo de aprendizaje autónomo que presenta una mayor eficiencia es el de k vecinos más cercanos (k-NN) con k igual a tres con un valor del 97.2%. Este algoritmo debe ser implementado en el bloque de procesamiento.

- **Implementación de k-NN en arduino nano**

El proceso para la ejecución de este algoritmo se muestra mediante un diagrama en bloques presentado en la Figura 81.

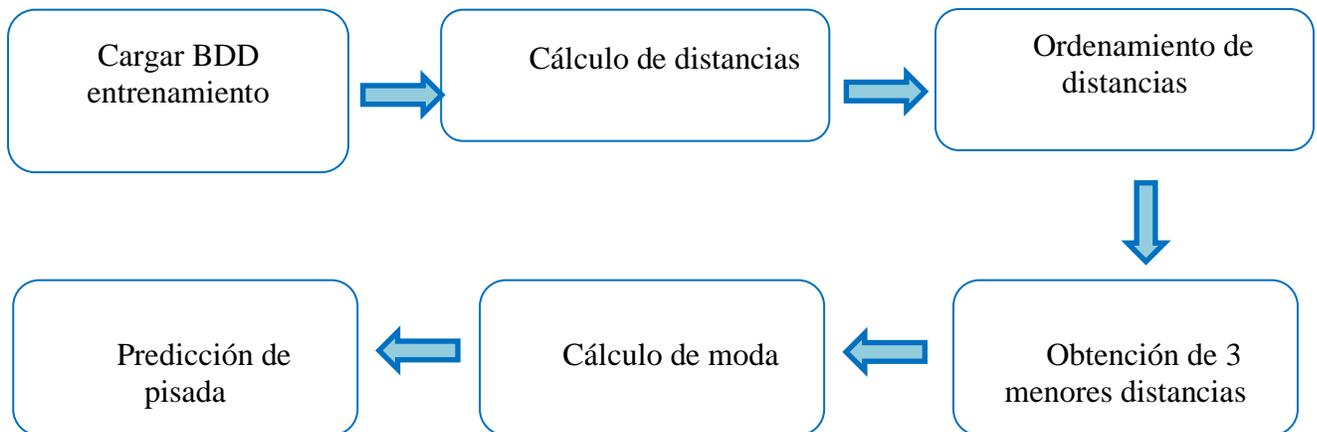


Figura 81 Proceso de implementación de k-NN

Fuente: Autoría

- **Cargar BDD de entrenamiento**

Como primera fase de la implementación se debe cargar la base de datos de entrenamiento obtenida en la fase de transformación del proceso KDD realizado anteriormente. Esta BDD posee 16 instancias de 15 variables dando un total de 240 datos. Para cargar esta BDD en Arduino es necesario crear un bloc de notas y añadirle la extensión .h al nombre del archivo. En el desarrollo del sistema el nombre otorgado al archivo que contiene la BDD de entrenamiento es “entrenamiento.h”.

- **Cálculo de distancias**

La siguiente fase consiste en calcular las distancias euclidianas de todos los puntos de la BDD de entrenamiento hacia el nuevo dato, el cual es obtenido cada vez que un paciente realice un test en el sistema.

- **Ordenamiento de distancias**

Una vez obtenidas las distancias euclidianas al nuevo punto o dato, es necesario ordenar dichos valores con el objetivo de encontrar los tres vecinos más cercanos, es decir las tres menores distancias al nuevo dato.

- **Obtención de tres menores distancias**

El siguiente proceso requiere extraer el valor de las tres menores distancias al nuevo punto, para posteriormente determinar a qué clase de pisada pertenece el nuevo dato.

- **Cálculo de moda**

Para determinar el tipo de pisada se recurre al cálculo de la moda que en estadística representa el valor que más repite dentro de una secuencia.

- **Predicción de pisada**

La predicción del tipo de pisada es gracias al resultado de la moda en la fase anterior, el algoritmo envía el valor de la moda, este puede variar entre 1 a 3, y en base a este resultado se establece a que clase pertenece el nuevo dato. La valoración del tipo de pisadas se muestra en la Tabla23.

La documentación del algoritmo de k-NN implementando en el bloque de procesamiento se muestra en el Anexo 1.

3.7.2.3 Bloque de comunicación

La implementación de los algoritmos que permitan el envío y recepción de la información, son realizados como ya se mencionó con los módulos nrf24l01, cuya librería está disponible en el IDE de Arduino, cada código está programado en el sistema de procesamiento (Arduino Mega) y en el sistema de recepción (Arduino Nano), para que exista la comunicación ambos módulos deben estar configurados en el mismo canal de radiofrecuencia. Las Figuras 82 y 83, muestran la configuración del canal de transmisión y de recepción respectivamente.

```
RF24 radio (9,10);
const uint64_t canal = 0xE8E8F0F0E1LL; //canal de comunicacion
void setup(void) {
  radio.begin(); //se inicia la cx por radiofrecuencia
  radio.openWritingPipe(canal); //se abre el canal de comunicacion
  radio.openWritingPipe(canal);} //empieza a enviar por el canal
```

Figura 82 Creación e inicio de canal de transmisión

Fuente: Autoría

```
RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);
const uint64_t canal = 0xE8E8F0F0E1LL; //canal de comunicacion

void setup()
{
  //inicia NRF24L01 RX
  radio.begin(); //se inicia la cx por radiofrecuencia
  radio.openReadingPipe(1, canal); //se abre el canal de comunicacion
  radio.startListening(canal); //empieza escuchar por el canal
```

Figura 83 Creación e inicio del canal de recepción

Fuente: Autoría

El código completo se muestra en el Anexo 1, las pruebas del envío y recepción de datos, se lo realiza en el apartado de tests unitarios.

3.7.2.4 Bloque de visualización

El sistema de visualización fue desarrollado en processing, en base al diseño en detalle de este bloque, la interfaz debe cumplir con ciertos requerimientos para lo cual el bloque de procesamiento es el encargado de enviar la información tanto de las lecturas de presión de los sensores, así como el tipo de pisada. Con esta información, el sistema de recepción la guarda y la reenvía por comunicación serial al sketch de processing, la Figura 84, muestra el diseño de la interfaz gráfica de PIEMEG, en la cual resaltan la colocación de botones para iniciar y detener la visualización.

Otro botón tiene como función la de ingresar los datos informativos del paciente, el botón de guardar permite almacenar la información del análisis en el ordenador del administrador del sistema. En la parte derecha se colocaron guías de los pies en las cuales se muestran por tonalidad de colores la fuerza de presión de cada uno de los sensores. En la parte izquierda se muestra el tipo de pisada, y los valores en porcentaje de la presión ejercida en las tres zonas del pie.



Figura 84 Interfaz gráfica del sistema PIEMEG

Fuente: Autoría

3.8 Test unitarios (FASE 5)

En esta etapa del modelo en V, se procede a realizar test a cada uno de los bloques, con el objetivo de verificar su correcto funcionamiento.

3.8.1.1 Test bloque de alimentación

Para verificar el adecuado desempeño de la fuente de alimentación, se procede a usar el multímetro para medir la salida de voltajes, tanto positivos como negativos. La medición del voltaje de salida negativo se muestra en la Figura 85, se coloca el valor de -6.5 Vcd, para compensar la caída de tensión en los AO LM324N.

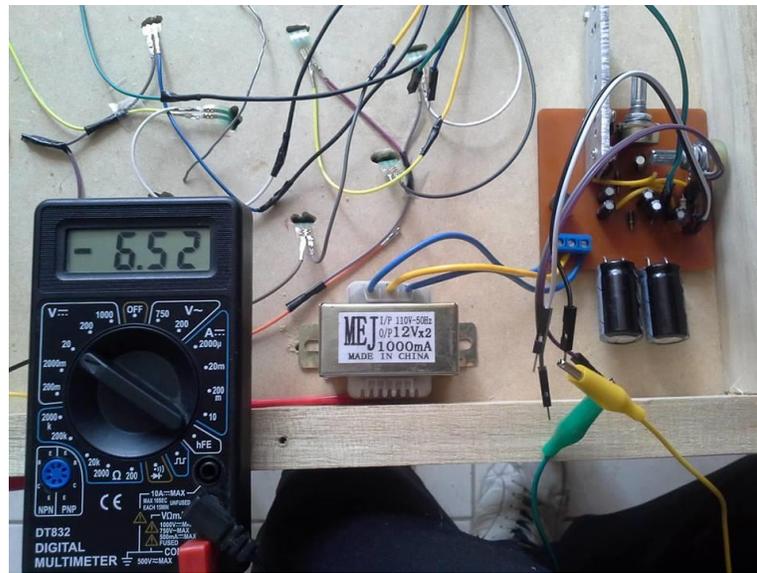


Figura 85 Prueba de medición voltaje negativo

Fuente: Autoría

La prueba de medición del voltaje de salida positiva se muestra en la Figura 86, de igual manera se coloca un valor de voltaje de 6.5 Vcd. La respuesta de la fuente de alimentación es la correcta.

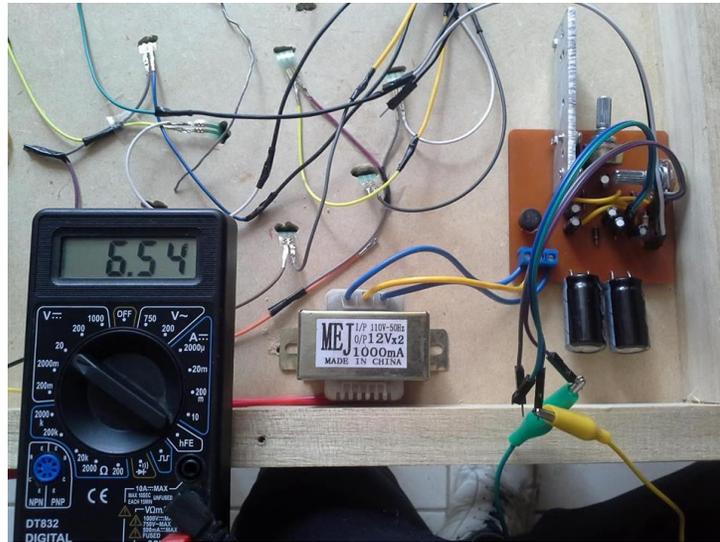


Figura 86 Prueba de medición voltaje positivo

Fuente: Autoría

3.8.1.2 *Test bloque de sensores*

Para la prueba de funcionamiento de este bloque, se debe comprobar la conexión interna de los sensores y garantizar el buen estado de cada uno de ellos. La Figura 87, muestra la prueba de funcionamiento de los sensores, por medio de la medición de voltaje el cual aumenta, entre más fuerza de presión se aplique al área del sensor.

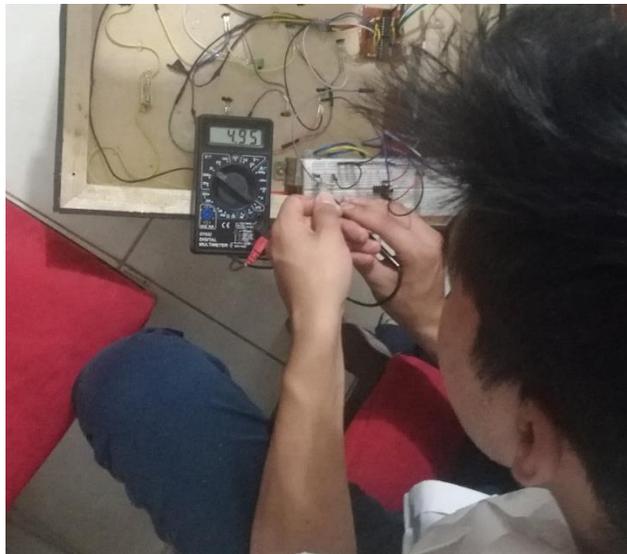


Figura 87 Medición y calibración sensores FSR 402

Fuente: Autoría

3.8.1.3 Test bloque de acondicionamiento de señal

El funcionamiento de este bloque radica, en la linealidad de la señal de salida que se obtiene de los sensores FSR 402, para realizar esta prueba, se procede a comparar las señales de salida obtenidas por medio de la configuración convertidor de corriente a voltaje usado en el PIEMEG, contra la de divisor de voltaje, que es la conexión básica de cualquier sensor piezoresistivo. Los datos obtenidos son graficados por medio de la herramienta Serial Plotter del IDE de Arduino.

- **Configuración divisor de voltaje**

En esta configuración, se conecta al sensor FSR en serie con una resistencia lo que genera una caída de tensión, cuyo valor puede ser leído por el sensor, esta configuración es mostrada en la página 67 de este documento, la conexión y prueba de este circuito se muestra en la Figura 88.

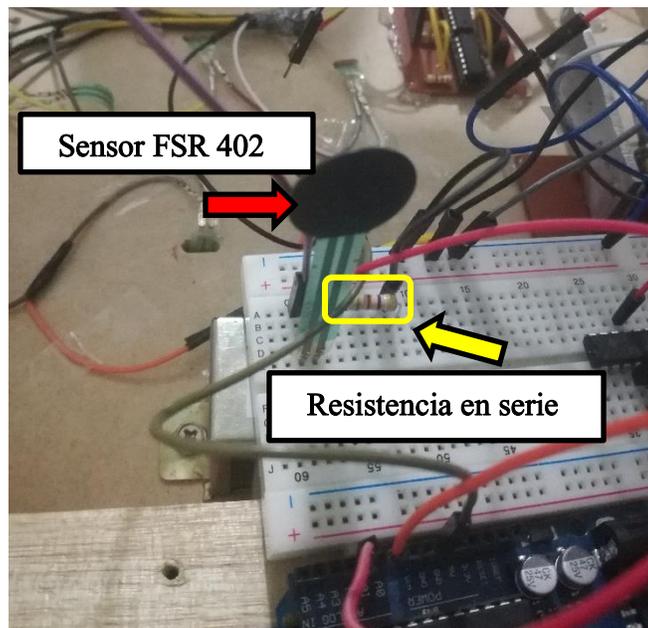


Figura 88 Test configuración divisor de voltaje

Fuente: Autoría

- **Configuración convertidor de corriente a voltaje.**

Este tipo de configuración, cuyo diagrama de conexión se muestra en la Figura 41, provee una mejor respuesta del sensor FSR, es decir un comportamiento más lineal, la Figura 89 muestra el montaje de esta configuración para realizar la prueba.

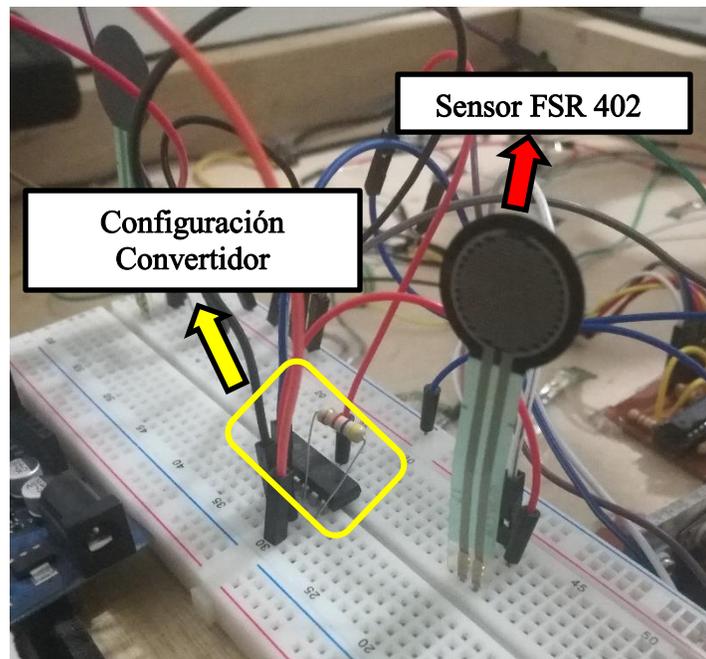


Figura 89 Test Configuración convertidor Corriente-Voltaje

Fuente: Autoría

- **Resultados obtenidos**

La Figura 90, muestra las respuestas de cada una de las configuraciones, la señal azul indica el comportamiento del sensor con la configuración de divisor de tensión, es claro que presenta una inestabilidad durante el tiempo de la prueba, por otra parte, la señal naranja muestra una mejor respuesta del sensor, una señal continua y estable, gracias a la configuración de convertidor de corriente-voltaje.

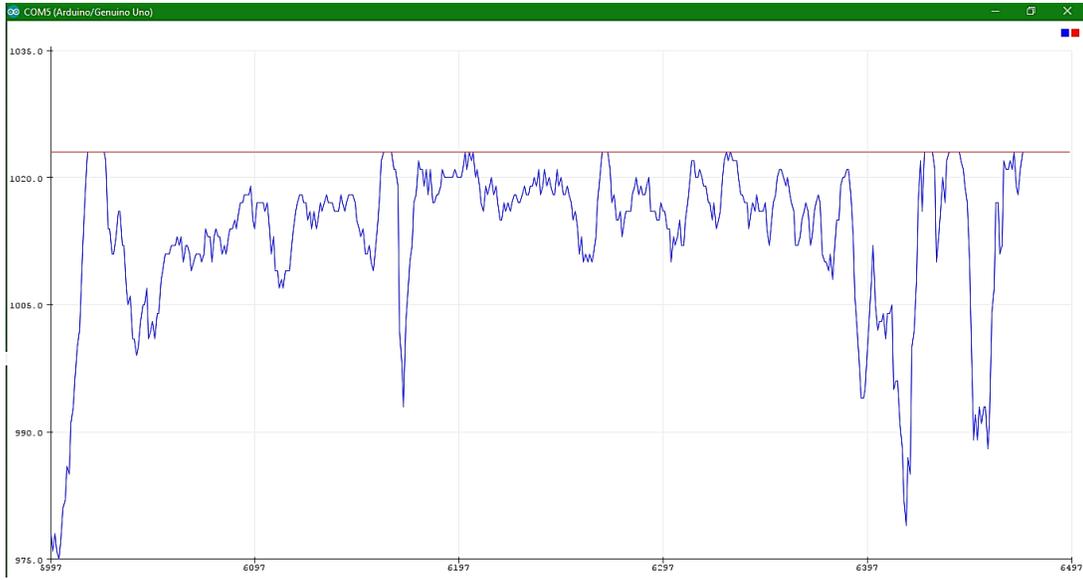


Figura 90 Gráfica de respuestas de sensores FSR
Fuente: Autoría

3.8.1.4 Test bloque de toma de datos

Para realizar el test de este bloque se realiza una simulación para obtener los valores de los sensores provenientes del bloque de acondicionamiento de la señal, estos datos son impresos por comunicación serial en el Arduino mega, garantizando que todos los valores de las entradas analógicas están siendo capturados. La Figura 91 muestra la obtención de esta información.

```

lectura de datos por 10s
DATA,TIME,13029,1023,1023,1023,1023,0,1023,0,1023,1023,1023,0,0,1023,1023
lectura de datos por 10s
DATA,TIME,16841,1023,895,1023,1023,0,1023,238,464,1023,1023,0,0,1023,1023
lectura de datos por 10s
DATA,TIME,19052,1023,1023,1023,1023,0,1023,424,1023,1023,1023,0,0,1023,1023
lectura de datos por 10s
DATA,TIME,21265,1023,1023,1023,1023,0,1023,552,1023,1023,1023,0,0,1023,1023
lectura de datos por 10s
DATA,TIME,23478,1023,1023,1023,1023,0,1023,574,1023,1023,1023,0,0,1023,1023
Han transcurrido 10 seg
Fin de test

```

Figura 91 Recopilación de información de sensores FSR 402 en bloque de toma de datos
Fuente: Autoría

3.8.1.5 Test bloque de procesamiento

La prueba de funcionamiento del bloque de procesamiento, se la realiza comprobando la interpretación de los datos por parte del algoritmo de k-NN, como se muestra en la Figura 92, el algoritmo se comporta de una manera adecuada, al determinar el tipo de pisada de etiqueta 2, que corresponde a una pisada plana.

```
=====
===          Algoritmo KNN PIEMEG          ===
=====
DISTANCIAS A NUEVO DATO
=====
1203.84
1405.42
1299.78
1673.22
1640.03
664.46
340.15
662.29
301.89
1507.90
1168.74
1736.22
1690.29
1714.71
1823.61
2003.37
=====
DISTANCIAS ORDENADAS DE MENOR A MAYOR
=====
301.89
340.00
662.00
664.00
1168.74
1203.00
1299.00
1405.00
1507.00
1640.00
```

```

=====
k=3 distancias mas cortas
=====
301.89
340.00
662.00
-----
PIE DERECHO
Sensor1: 968
Sensor2: 775
Sensor3: 957
Sensor4: 103
Sensor5: 835
Sensor6: 991
Sensor7: 835
-----
PIE IZQUIERDO
Sensor8: 945
Sensor9: 943
Sensor10: 835
Sensor11: 835
Sensor12: 835
Sensor13: 937
Sensor14: 937
=====
Tipo Pisada: Plana
=====

```

Figura 92 Prueba funcionamiento algoritmo k-NN
Fuente: Autoría

3.8.1.6 Test bloque de comunicación

Para verificar el funcionamiento del bloque de comunicación, tanto del sistema de transmisión como de recepción, se procede a realizar un envío de información que consiste en los datos analógicos de presión de los sensores FSR 402, la Figura 93 muestra la impresión de los catorce valores correspondientes a la lectura analógica de cada sensor, que se almacenan en la BDD inicial.

PIE DERECHO							PIE IZQUIERDO						
sensor1	sensor2	sensor3	sensor4	sensor5	sensor6	sensor7	sensor8	sensor9	sensor10	sensor11	sensor12	sensor13	sensor14
969	972	959	184	0	991	891	944	943	891	0	891	936	936
968	971	959	531	0	991	772	944	942	772	0	772	936	936
968	970	959	538	0	991	628	944	942	628	0	628	936	936
968	971	958	531	0	991	489	944	942	489	0	489	935	936
984	986	961	0	0	1000	726	961	957	726	0	726	951	950
810	568	962	0	0	1002	567	962	959	567	0	567	951	951
968	971	958	353	0	991	552	945	943	552	0	552	937	937
972	725	959	0	0	992	726	948	946	726	0	726	940	940
967	970	958	295	0	991	892	945	943	892	0	892	937	937
967	970	958	169	0	991	956	944	943	956	0	956	936	937

Figura 93 Prueba funcionamiento envío y recepción de información
Fuente: Autoría

3.8.1.7 Test bloque de visualización

Para finalizar la fase de tests unitarios, la prueba de funcionamiento del bloque de visualización, consiste en la verificación de cada componente de la interfaz, es por ello que se realiza una prueba de envío de datos correspondientes a una pisada plana, con lo cual la Figura 94 muestra el tipo de pisada detectada, los valores de presión en cada zona del pie, se observa que se presentan valores de presión que llegan al 100%, con lo cual, en la parte derecha de la interfaz los catorce sensores toman un color rojo, lo que indica una presencia elevada de presión en esos sensores.



Figura 94 Prueba funcionamiento interfaz de PIEMEG
Fuente: Autoría

3.9 Integración (FASE 5)

Fase dedicada a la unión de cada uno de los bloques del sistema, la imagen 96 muestra la integración de todos los componentes internamente, mientras que la Figura 97, presenta cómo se visualizan los dos prototipos desde el exterior. Además, la Figura 95 mostrada a continuación, representa el diseño del logotipo del sistema.



Figura 95 Logotipo del sistema
Fuente: Autoría

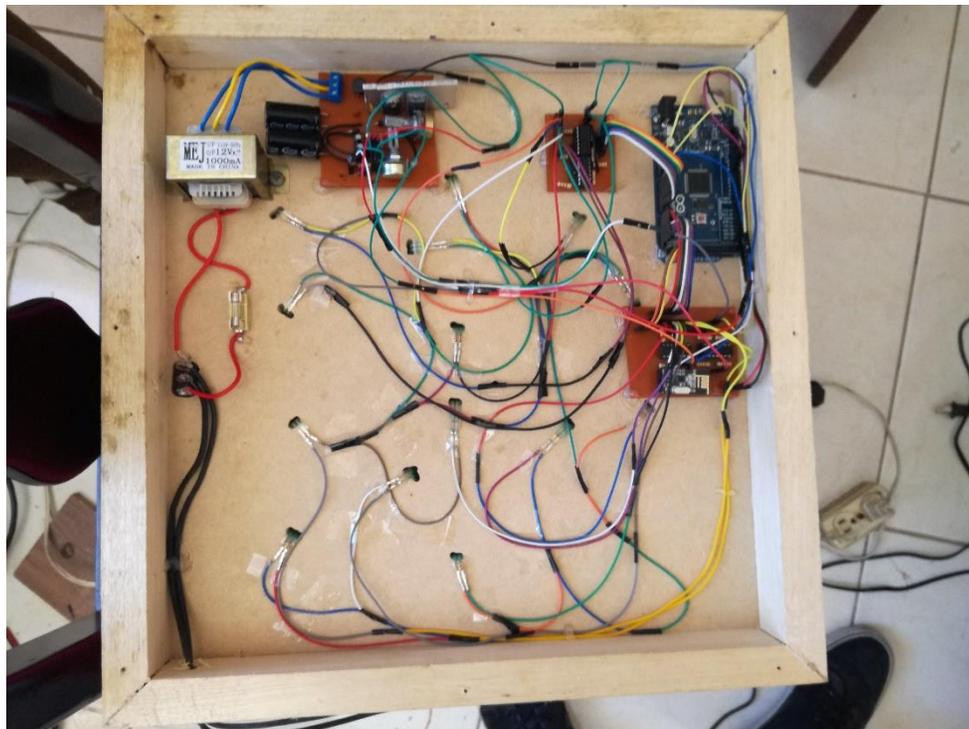


Figura 96 Integración de PIEMEG, vista interna
Fuente: Autoría



Figura 97 Integración de PIEMEG, vista externa
Fuente: Autoría

4 Capítulo IV

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se realizan las pruebas finales del sistema PIEMEG, verificando si los requerimientos planteados en el capítulo tres se cumplieron. El capítulo finaliza con las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de titulación.

Se realizan dos tipos de pruebas, la primera enfocada al funcionamiento de hardware del sistema y la segunda se enfoca en realizar pruebas de detección de tipos de pisadas a niños de 11-12 y de 4-5 años.

4.1 Pruebas de hardware

Los parámetros tomados para la realización de esta prueba se encuentran listados en la Tabla 27, comprenden parámetros que verifican si el sistema se encuentra trabajando de una manera correcta.

Tabla 27 Pruebas iniciales de hardware

Parámetro	Pruebas de Hardware		Observación
	Cumplimiento		
	SI	NO	
Funciona el switch de encendido y apagado de PIEMEG	X		Funciona correctamente
Valores de la fuente de alimentación correctos	X		Funciona correctamente, no presenta sobre calentamiento

Las salidas del bloque de acondicionamiento funcionan	X	Funciona correctamente
Funcionan cada uno de los sensores FSR 402	X	Funciona correctamente
El sistema de recepción capta datos correctos	X	Existe un retraso de 4 segundos.

Fuente: Autoría

Los resultados de esta prueba verifican que el sistema en cuanto a hardware se refiere se encuentra funcionando correctamente, cabe destacar que se debe tener en cuenta las conexiones de los sensores, debido a que estas no se encuentran soldadas, existe la posibilidad que se desconecten, para lo cual es necesario abrir la plataforma y verificar que sensor se desconectó.

4.2 Prueba del sistema con los usuarios

El objetivo de esta prueba es verificar el funcionamiento completo de PIEMEG, visualizando que tanto hardware como software trabajen conjuntamente y muestren el tipo de pisada correspondiente. En este apartado se analizan los tres tipos de pisadas estudiadas.

- **Análisis de una pisada normal**

El inicio del test comienza con el paciente colocándose erguido sobre la plataforma de PIEMEG, a continuación, el administrador del sistema acciona el interruptor de encendido del prototipo e inicia el ejecutable del sistema.

Al aparecer la interfaz gráfica se pulsa el botón de CONECTAR con lo cual se habilita la comunicación, si el paciente se encuentra pisando de una forma correcta el sistema se activará. El sistema se activa una vez que el led amarillo se encienda. Cuando el sistema está receptando la información de las presiones plantares el led verde se enciende de forma intermitente igual por un periodo de 10 segundos, tiempo que dura la prueba, la Figura 98 muestra cómo se le realiza el test al usuario.



Figura 98 Prueba PIEMEG usuario pie normal
Fuente: Autoría

Luego se desconecta el sistema y se procede a visualizar los resultados obtenidos, la Figura 99 muestra una imagen de la interfaz gráfica, con los resultados de la prueba. Los datos muestran la presencia de una pisada normal, los sensores de la zona media presentan una presión mayor, excepto los ubicados en la zona más interna del pie, lo que confirma que se trata de un pie normal.



Figura 99 Visualización de resultados pie normal
Fuente: Autoría

La Figura 100, muestra la respuesta en el monitor serial de Arduino indicando de igual forma el tipo de pisada del niño.

```
-----  
PIE DERECHO  
Sensor1: 945  
Sensor2: 943  
Sensor3: 957  
Sensor4: 957  
Sensor5: 0  
Sensor6: 937  
Sensor7: 937  
-----  
PIE IZQUIERDO  
Sensor8: 968  
Sensor9: 965  
Sensor10: 0  
Sensor11: 957  
Sensor12: 385  
Sensor13: 992  
Sensor14: 957  
=====  
Tipo Pisada: Normal  
=====
```

Figura 100 Prueba pie normal
Fuente: Autoría

En la Figura 100 a demás es notorio que, en la lectura de los datos de los sensores, los valores de los sensores 5 y 10 se encuentran en cero, estos sensores son los ubicados en la parte interna del medio pie, y como se trata de una pisada normal, estos valores no deben marcar ningún valor.

- **Análisis de una pisada plana**

Para esta prueba se toma a un niño que posee dicha afección, el proceso de toma de datos es el mismo al anterior, por lo que se mostrará únicamente los resultados de este análisis. La Figura 101, muestra los datos arrojados en esta prueba, lo que confirma la presencia de una pisada plana, al observar que todos los valores de los sensores marcan un valor elevado, además el algoritmo de k-NN lo confirma.

```
-----  
PIE DERECHO  
Sensor1: 944  
Sensor2: 942  
Sensor3: 772  
Sensor4: 772  
Sensor5: 772  
Sensor6: 936  
Sensor7: 936  
-----  
PIE IZQUIERDO  
Sensor8: 971  
Sensor9: 968  
Sensor10: 772  
Sensor11: 772  
Sensor12: 531  
Sensor13: 991  
Sensor14: 959  
=====
```

Tipo Pisada: Plana

```
=====
```

Figura 101 Prueba pie plano
Fuente: Autoría

La interfaz de la Figura 102 comprueba los datos y en ella se observa como todos los sensores son activados y puestos de un color rojo debido a la fuerza de presión del pie plano. Los valores de presión en el talón y mediopié es del 100%.



Figura 102 Visualización resultados pie plano
Fuente: Autoría

- **Análisis de una pisada cava**

Para este tipo de pisada, se debe tener en cuenta que la zona de mayor presión es la parte externa del mediopié, por otra parte, la zona media e interna del mediopié es la que menos presión recibe debido a la ausencia del arco plantar. La Figura 103 muestra el momento en el cual el administrador de PIEMEG realiza la prueba al usuario.



Figura 103 Prueba PIEMEG Administrador y usuario
Fuente: Autoría

La Figura 104 muestra los resultados de los valores de los sensores y algoritmo de k-NN, dichos resultados muestran la lectura en todos los sensores exceptuando los sensores 4,5,10 y 11 que corresponden a la zona media e interna del mediopié.

```

-----
PIE DERECHO
Sensor1: 945
Sensor2: 943
Sensor3: 957
Sensor4: 0
Sensor5: 0
Sensor6: 937
Sensor7: 937
-----
PIE IZQUIERDO
Sensor8: 969
Sensor9: 966
Sensor10: 0
Sensor11: 0
Sensor12: 197
Sensor13: 990
Sensor14: 956
-----
Tipo Pisada: Cava
-----

```

Figura 104 Prueba pie cavo
Fuente: Autoría

La interfaz gráfica de la Figura 105 muestra las zonas de presión con su porcentaje y se observa que los sensores del mediopié excepto el externo, permanecen sin recibir presión.



Figura 105 Visualización de resultados pie cavo
Fuente: Autoría

4.3 Comparación de PIEMEG con Método de Hernández Corvo y NEOFEET

En el capítulo tres en la etapa de diseño del proceso KDD en la fase de preprocesamiento, fue utilizado el método de Hernández Corvo con el objetivo de tipificar las huellas plantares de los niños de la Unidad Educativa “Atahualpa”, como se explicó en aquel apartado, este método permite la identificación de los tipos de pisadas, basado en la impresión de la huella plantar de la persona, convirtiéndose en un método manual de identificación de pisadas.

Gracias al avance tecnológico existen diversos sistemas que usan diferentes tecnologías para realizar la misma función que Hernández Corvo, sin embargo, proveen características diferentes que representan información más detallada para el especialista.

Uno de estos nuevos sistemas es Neofeet el cual pertenece a una franquicia del mismo nombre que ofrece una variedad de productos y plantillas prefabricadas, las cuales proveen soporte, equilibrio y descanso. Proporcionan una solución a los problemas de fascitis plantar, metatarsalgias, dolores en pies, talones, rodillas, arcos débiles, pies planos, pie cavo, espolón calcáneo, callosidades, juanetes, dedos en garra (diafoot, 2019). Posee un sistema compuesto por un Planto Scanner y el software NeoFeet, el dispositivo permite analizar la pisada, presión plantar, tipo de pie y arco, el sistema se muestra en la Figura 106.

Este sistema basa su principio de funcionamiento en un Scanner, el cual captura la imagen de los pies y permite obtener una valoración de tipos de pisadas. Por lo tanto, esta sección del proyecto busca realizar una comparación de PIEMEG con el sistema tradicional de detección de pisada de Hernández Corvo y NEOFEET el cual usa un tipo diferente de tecnología a PIEMEG, con el objetivo de verificar que PIEMEG realiza una correcta valoración del tipo de pisada.



Figura 106 Sistema NeoFeet
Fuente: (diafoot, 2019)

- **Prueba con NeoFeet**

La prueba de comparación se realiza de la siguiente manera; se toma al paciente quién en base a PIEMEG, obtuvo como resultado un tipo de pisada cava, a éste se le realiza la prueba en el sistema NeoFeet, en el local Diafoot, ubicado en el Centro Integral Médico AXXIS, en la ciudad de Quito-Ecuador. El proceso para realizar una valoración del pie con este sistema es el siguiente:

- El paciente debe quitarse su calzado, incluyendo medias.
- El administrador del NeoFeet limpia los pies del paciente con un paño húmedo.
- Se realiza el escaneo del pie derecho.
- Se realiza el escaneo del pie izquierdo.
- Los resultados son obtenidos en el computador del administrador.

La Figura 107 muestra el momento en el cual el sistema escanea el pie derecho de la paciente, por otra parte, en la Figura 108 se presentan los resultados obtenidos luego del análisis de los datos de la paciente.

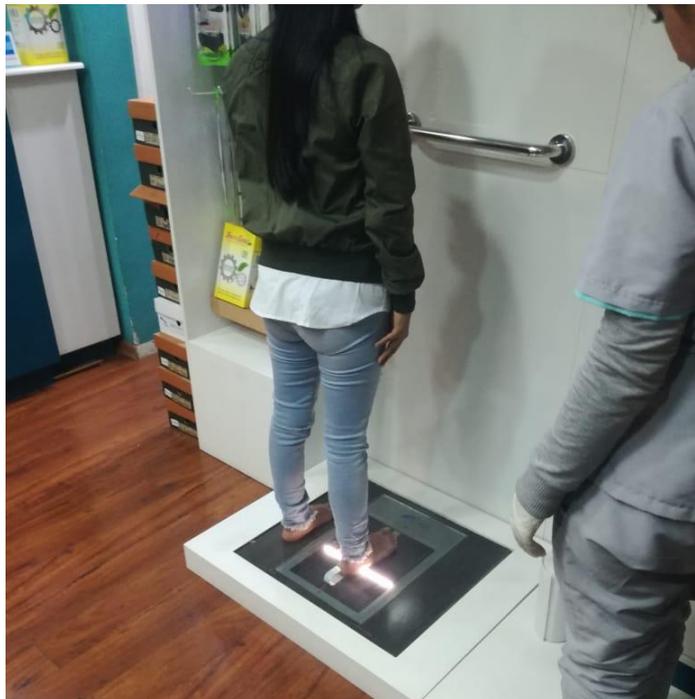


Figura 107 Prueba sistema NeoFeet
Fuente: Autoría

Pie Derecho
Pie Izquierdo

 Figura 108 Resultados gráficos prueba NeoFeet
 Fuente: Autoría

Tabla 28 Resultados NeoFeet

	Pie Derecho	Pie Izquierdo
Largo	21.4	21.08
Ancho	8	7.84
Metatarsos	14.27	14.45
Presión	50.32%	53.13%
Recomendación	D34M	

Fuente: Adaptado de (diafoot, 2019)

Los resultados que presenta NeoFeet, son el largo y ancho de cada pie, metatarsos. De igual forma determina la presión general ejercida sobre cada pie, teniendo una presión mayor en el pie izquierdo de la paciente con un 53.13%, estos datos se muestran en la Tabla28. En base a los resultados de la Tabla 28 y la Figura 108, la valoración del tipo de pisada es realizada por medio del especialista, quien, en este caso, afirmó que la paciente presenta una pisada cava.

Este resultado coincide con el establecido por PIEMEG, en donde el tipo de pisada es mostrado en la interfaz gráfica del sistema automáticamente. Los resultados de la prueba con PIEMEG son mostrados en la Figura 105. De esta manera se confirma una correcta valoración de los tipos de pisadas con el sistema PIEMEG.

- **Prueba con Método de Hernández Corvo**

Para realizar la prueba con el método de Hernández Corvo se procede a realizar el mismo proceso realizado en el apartado 3.7.2.2.2. Con lo cual se obtiene la impresión de la huella plantar de la paciente. La Figura 109 presenta la huella plantar estudiada. Los resultados obtenidos en base a la Ec. 9 son los siguientes:

Datos:

X=7.2 (ancho del antepié) Y= 2.5 (ancho del arco plantar)

Cálculo:

$$HC(\%) = \frac{(7.2 - 2.5)}{7.2} * 100 = 65.27\%$$

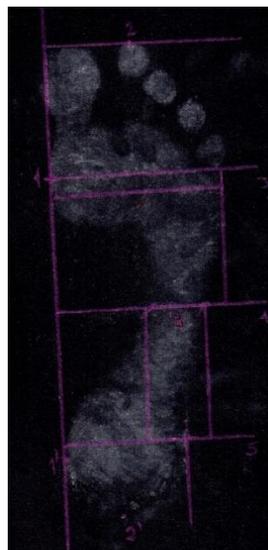


Figura 109 Impresión huella plantar Método Hernández Corvo
Fuente: Autoría

Por lo tanto, de acuerdo con la Ec. 9 que pertenece al método Hernández Corvo (HC), se determina un tipo de pisada cava, al obtener un valor de 65.27%, que, en base a la Tabla22, corresponde a este tipo de pisada. Este resultado coincide de igual manera con el establecido por PIEMEG.

La Tabla 29 muestra una comparativa entre estos tres métodos de identificación de tipos de pisadas.

Tabla 29 Comparativa entre Hernández Corvo, NeoFeet y PIEMEG

SISTEMA	Parámetros		
	Tecnología	Metodología de predicción de pisadas	Almacenamiento de resultados
Hernández Corvo	Entintado de pies, con papel y tinta o talco	Los resultados se establecen por las medidas de X, Y. El resultado se compara con la Tabla22.	Se obtiene la huella plantar en una hoja de papel.
NeoFeet	Scanner	Se muestra en una interfaz gráfica, largo y ancho de los pies, el nivel de presión de cada pie, mapas de calor que indican las zonas de mayor presión en ambos pies. Además, recomienda un tipo de plantilla dependiendo del tipo de pisada detectado.	Los resultados son guardados en un archivo PDF, el cual es enviado al paciente.
PIEMEG	Sensores de presión y aprendizaje automático	En una interfaz gráfica se muestra el tipo de pisada detectado, las zonas de mayor presión en las tres zonas de cada pie, el porcentaje de estas presiones.	Los resultados se guardan en una imagen para ser enviado al paciente y en un archivo de Excel para que el especialista pueda llevar un registro de este.

Fuente: Autoría

En base a la Tabla 28, PIEMEG ofrece un tipo de tecnología que en la actualidad ha sido investigada frecuentemente garantizando una confiabilidad en la detección de los tipos de pisadas, al poseer un algoritmo de aprendizaje automático, esto, sumado al uso de sensores de presión los cuales cuentan con un sistema de acondicionamiento, aumenta la confiabilidad de los datos obtenidos. Con ello PIEMEG se considera un sistema que ofrece una confiabilidad del 97.2% en sus resultados, tal como se verifica en la Tabla 26.

4.4 Rendimiento del sistema

Una vez realizada la comparación del sistema con el método de Hernández Corvo y NeoFeet, es posible determinar el rendimiento general de PIEMEG, para ello se realiza un análisis de matriz de confusión. El rendimiento del algoritmo de aprendizaje autónomo implementado en el sistema fue calculado en el apartado 3.7.2.2.4, la Tabla 26 muestra este valor. Este análisis fue netamente de software, con valores obtenidos de la base de datos de prueba.

Dicho esto, en esta sección el análisis al sistema PIEMEG, es a través de pruebas a usuarios cuyos datos son totalmente nuevos para el sistema, para ello se toma a 10 niños de la Unidad Educativa “Atahualpa”, cuyos datos no constan en la base de datos del sistema. La Tabla 30 muestra la comparativa entre los resultados obtenidos con PIEMEG y la tipificación de la huella plantar con Hernández Corvo, en rojo se muestran las fallas que tuvo el sistema.

Tabla 30 Comparativa PIEMEG y HC

Nº	Nombre y Apellido del usuario	Tipo pisada	
		Hernández Corvo	PIEMEG
1	Anahí Cortez	Cavo	Cavo
2	Britany de la Cruz	Normal	Normal
3	Carlos Espinoza	Normal	Normal
4	Carmen Bermeo	Cavo	Cavo
5	Francis Escuntar	Plano	Normal
6	Jeremy Simbaña	Cavo	Cavo
7	Jordan Noquez	Cavo	Cavo
8	Santiago Montaluisa	Normal	Normal
9	Emily Andrade	Plano	Plano
10	Yoselyn López	Plano	Plano

Fuente: Autoría

Con los resultados de la Tabla 30 es posible crear la matriz de confusión, y a su vez determinar el rendimiento de PIEMEG. La matriz de confusión es un método común de evaluación del rendimiento en la clasificación de reconocimiento de patrones, que caracteriza la relación entre el tipo de clases reales y las clases de reconocimiento (L. Li, Wu, & Ye, 2015). Para problemas de clasificación múltiple (L. Li et al., 2015) realiza un estudio con una matriz de tres categorías, esta se muestra en la Figura 110.

class True class	Prediction			
		A	B	C
A		AA	AB	AC
B		BA	BB	BC
C		CA	CB	CC

Figura 110 Estadísticas de matrices de confusión para clasificación de muestras

Fuente: (L. Li et al., 2015)

Donde A, B y C representan tres clases, AA, BB y CC son el número correcto de predicciones, los datos restantes de muestras representan las predicciones de error. AA representa el número de predicciones correctas para la clase A. AB es el número de muestras incorrectas para la clase A, es decir, la predicción es B cuando el valor tendría que ser A. Los elementos restantes tienen el mismo significado. La ecuación 10 permite calcular la tasa de precisión total (PT):

$$PT = \frac{(AA+BB+CC)}{(AA+AB+AC+BA+BB+BC+CA+CB+CC)} \quad Ec. 10$$

En la matriz de confusión mostrada en la Tabla 31, las columnas representan el número de predicciones para cada tipo de pisada realizada por el sistema, y cada fila los valores reales por cada tipo de pisada. Esta matriz permite realizar un conteo de los aciertos y errores de cada tipo de pisada evaluada.

Tabla 31 Matriz confusión 10 usuarios nuevos

n=10 (usuarios nuevos)		Clasificador		
		Normal	Plano	Cavo
Valor real	Normal	3		
	Plano	1	2	
	Cavo			4

Fuente: Autoría

Para calcular el rendimiento del sistema, es decir el porcentaje del total de aciertos de PIEMEG en la predicción de los tres tipos de pisadas, se hace uso de la Ec.10, dicho valor tiene que ser multiplicado por 100, para ser expresado en términos de porcentaje.

$$PT = \frac{(3+2+4)}{(3+2+4+1)} = 0.9 * 100$$

$$PT = 90\%$$

En base a los resultados obtenidos se puede apreciar que el sistema cuenta con una exactitud del 90%, esto significa que las predicciones realizadas por PIEMEG, son confiables en un alto porcentaje. El valor de la exactitud o fiabilidad puede aumentar o disminuir dependiendo del número de pruebas que se realice.

4.5 Discusión de resultados

La funcionalidad del sistema se pudo verificar mediante las pruebas desarrolladas en este capítulo y así como las pruebas unitarias de cada bloque en el capítulo tres. Los tres tipos de pisadas fueron detectadas correctamente y se observó cuáles son los sensores que se activan dependiendo del tipo de pisada.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Mediante la revisión bibliográfica realizada a lo largo de este proyecto, se pudo determinar los puntos de presión más importantes para los tres tipos de pisadas, analizadas en este proyecto. Con esta información fue posible realizar una correcta ubicación de los sensores, los cuales se encargan de tomar los valores de las presiones plantares.
- La metodología modelo en V usada en el desarrollo del proyecto fue de gran ayuda para el correcto diseño e implementación del prototipo, de igual manera fue posible obtener los requerimientos por parte de los usuarios, con lo cual fue posible determinar los elementos adecuados dentro del sistema, con el objetivo de satisfacer las necesidades de los usuarios.
- El uso de herramientas de uso libre, tanto en hardware como en software facilita la creación de este tipo de prototipos, y además al no representar un costo elevado, se convierten en una buena alternativa, para la creación de cualquier sistema tecnológico.
- En la etapa de toma de datos para la creación y posterior entrenamiento de la base de datos del sistema, se pudo identificar no todos los datos generados por los sensores son útiles para implementar un algoritmo de machine learning, por lo que es importante realizar un proceso de reducción de información útil, conocido como minería de datos.
- Es posible determinar la eficiencia de los diferentes algoritmos de ML, que ofrece R, variando el número de la semilla de forma aleatoria. En este proyecto el valor de la semilla vario cinco veces, con lo cual la respuesta de cada algoritmo fue diferente.

Terminado este proceso, se calcula un promedio general, obteniendo la eficiencia de cada algoritmo.

- La eficiencia del algoritmo de aprendizaje automático k-NN al trabajar con una base de datos de entrenamiento de 240 datos es del 97.2% con un 2.8% de error trabajando con un número de k vecinos igual a 3 (3-NN).
- El rendimiento general del sistema es del 90% teniendo un 10% de error al realizar pruebas con 10 nuevos usuarios.
- El sistema de visualización tiene un retraso de 4 segundos, en representar la información a través de su interfaz, debido al procesamiento que se realiza en el bloque de procesamiento.
- Se desarrolló un sistema electrónico en el cual se encuentra implementado un algoritmo de aprendizaje autónomo, acoplado a una plataforma, este sistema permite determinar tres diferentes tipos de pisadas, basándose en las zonas de mayor presión plantar.

5.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable usar bibliografías fiables, de igual manera recurrir a la investigación de artículos científicos, con lo cual el fundamento teórico será mucho más confiable.
- Se recomienda el uso de una metodología adecuada, si es posible que sea netamente de desarrollo de sistemas embebidos, el correcto desarrollo de cualquiera prototipo dependerá de la elección de una correcta metodología.
- Antes de implementar cualquier prototipo es necesario realizar pruebas de simulación, para garantizar su funcionamiento, esto ayuda al ahorro de recursos.
- Para que PIEMEG pueda detectar los problemas en pisada a personas de cualquier edad o talla, es recomendable aumentar el número de sensores FSR 402, cubriendo toda el área de la caja del prototipo, con esto el área efectiva de detección aumenta.
- Para futuras investigaciones en el área de ML, es recomendable utilizar el algoritmo de SVM sigmoideal, debido a que en la presente investigación obtuvo una eficiencia del 97% (ver Tabla 26).
- Para aumentar el rendimiento del sistema se recomienda incrementar los datos de la BDD, con lo cual el algoritmo de ML podrá incrementar su campo de clasificación.
- Existen diferentes tipos de pisadas, en esta investigación el sistema detecta tres de ellas, sin embargo, es posible entrenar al algoritmo de ML, para que PIEMEG pueda detectar más tipos, por lo tanto, se recomienda para futuros trabajos aumentar los tipos de pisadas detectables.
- Se recomienda leer el manual de usuario adjuntado en este documento, para evitar complicaciones durante el uso del sistema.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Arroyo, E. (2013). Estudian el Pie Ecuatoriano. Retrieved June 12, 2018, from https://issuu.com/metro_ecuador/docs/20130802_ec_guayaquil
- amazon.es. (2018). 0,5 pulgadas de Dia FSR 402 Sensor de Presión Resistiva Resistencia de Detección de Fuerza 0-10kg para Arduino: Amazon.es: Coche y moto. Retrieved February 4, 2019, from <https://www.amazon.es/pulgadas-Presión-Resistiva-Resistencia-Detección/dp/B074QNZDPX>
- Anatomía funcional del pie - Punto Fape. (n.d.). Retrieved November 19, 2018, from <https://www.puntofape.com/anatomia-funcional-del-pie-12560/>
- Andrés Díaz, C., Torres, A., Ignacio Ramírez, J., Fernanda García, L., & Álvarez, N. (2007). Descripción De un sistema para la medición De las presiones plantares por medio Del procesamiento De imágenes Fase i. *Revista EIA Número*, 6, 1794–1237. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n6/n6a05.pdf>
- ARDUINO. (2018a). Arduino Mega 2560 Rev3. Retrieved February 5, 2019, from <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>
- ARDUINO. (2018b). Arduino Nano. Retrieved February 5, 2019, from <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>
- Ballesteros, H. F. V., Iñiguez, E. G., & Velasco, S. R. M. (2018). Minería de Datos. *RECIMUNDO*, 2(1 (Esp)), 339–349.
- Baumfeld, D., Baumfeld, T., Da Rocha, R. L., Macedo, B., Raduan, F., Zambelli, R., ... Nery, C. (2017). Reliability of Baropodometry on the Evaluation of Plantar Load Distribution: A Transversal Study. *BioMed Research International*, 2017, 1–4. <https://doi.org/10.1155/2017/5925137>

- Benítez, R., Escudero, G., & Kanaan, S. (2013). *Inteligencia artificial avanzada*. Barcelona, SPAIN: Editorial UOC. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=3217957>
- Bernal Jiménez, P., & Domínguez Maldonado, G. (2016). Presiones plantares de las patologías más frecuentes en el pie. *European Journal of Podiatry / Revista Europea de Podología*, 2(2), 57. <https://doi.org/10.17979/ejpod.2016.2.2.1496>
- Carlos Díaz. (2014). *Orientación para el diseño de fuentes de alimentación*. Retrieved from <http://www.electron.es.vg/?0.-Introducción?1.-Transformadorde>
- Carreño Abad, J. C., & Cabrera Sáenz, P. T. (2014). Diseño e implementación de un sistema de análisis de las presiones plantares en estática basado en procesamiento de imágenes. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8804>
- Carrión, L., Ochoa, D., & Valverde, J. A. (n.d.). *NOTA DE APLICACIÓN ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR DE FUERZA RESISTIVO (FSR) CON LabVIEW*. Retrieved from http://www.datalights.com.ec/site2/images/stories/robotica/nap/nap_fsr.pdf
- Clínica Martín Gómez. (2017). Lesiones de tobillo - Clínica Martín Gómez Traumatólogos. Retrieved November 29, 2018, from <https://clinicamartingomez.es/lesiones-de-tobillo/>
- Cruz Roja Española. (2018). Órtesis plantares o plantillas... ¿A medida? Retrieved February 7, 2019, from <https://www.hospitalveugenia.com/comunicacion/consejos-de-salud/ortesis-plantares-plantillas-medida/>
- diafoot. (2019). Foot - System | Diafoot. Retrieved February 17, 2019, from <https://diafootclub.com/foot-system/>
- DIYMakers. (2014). ARDUINO + PROCESSING: PRIMEROS PASOS – DIYMakers. Retrieved February 4, 2019, from <http://diymakers.es/arduino-processing-primeros-pasos/>

- Dunham, M. H. (2006). *Data mining: Introductory and advanced topics*. Pearson Education India.
- eclipse. (2019). Getting Started with Eclipse | The Eclipse Foundation. Retrieved February 4, 2019, from https://www.eclipse.org/getting_started/
- Fundamentos de Programación en Visual Basic*. (n.d.). Retrieved from <https://www.cs.us.es/cursos/ai-2005/VB/VB.pdf>
- García, A. (2013). Arduino Mega: Características, Capacidades y donde conseguirlo en Panamá | Panama Hitek. Retrieved January 1, 2019, from <http://panamahitek.com/arduino-mega-caracteristicas-capacidades-y-donde-conseguirlo-en-panama/>
- Germán Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. S., & Mares Carreño, J. (2014). *Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino*. Distrito Federal, UNKNOWN: Grupo Editorial Patria. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=4569609>
- gnu.org. (n.d.). Retrieved from <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>
- GORGUES, J. (2008). Podoscopio clásico. *Offarm*, 27(8), 126–129. Retrieved from <http://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-podoscopio-clasico-13126083> ER
- GUÍA METODOLÓGICA PARA PLANES OPEN DATA SECTORIALES MARZO 2016*
- Visualización de datos Definición, tecnologías y herramientas*. (n.d.). Retrieved from https://datos.gob.es/sites/default/files/doc/file/informe_herramientas_visualizacion.pdf
- Hernández Corvo, R. (2019). Morfología funcional deportiva : sistema locomotor / Roberto Hernández Corvo. *SERBIULA (Sistema Librum 2.0)*.
- Herrera, R., En, M., Quiñones, C. I., Letechipia, C. J., & Lidia Núñez, I. (2003). *Diseño y construcción de un podómetro* (Vol. XXIV). Retrieved from

<http://www.medigraphic.com/pdfs/inge/ib-2003/ib032g.pdf>

Hurtado Padilla, A. (2006). Use of baropodometry. *Ortho-Tips*, 2(4), 255–261.

Iglesias Castro, I. (2016). *Detección de pisada usando galgas extensométricas*. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12328/fichero/Detección+de+pisada+usando+galgas+extensométricas.pdf>

Interlink Electronics. (2013). full-text.

ITead Studio. (2010). *HC-05 Bluetooth module HC-05-Bluetooth to Serial Port Module*.

Retrieved from <https://electronilab.co/wp-content/uploads/2014/02/HC-0-Bluetooth-Electronilab-datasheet.pdf>

JECRESPOM. (2016). HC-05 | Aprendiendo Arduino. Retrieved January 1, 2019, from <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/hc-05/>

Lee, J.-S., Su, Y.-W., & Shen, C.-C. (2007). A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 46–51). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4460126>

León Pérez, S., Calero Morales, S., & Chávez Cevallos, E. (2016). Morfología funcional y biomecánica deportiva. Retrieved from <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11683>

Li, J., Wang, M., Wang, X., Xie, Z., Huang, W., He, X., & Wu, X. (2016). Design and Implementation of a Plantar Pressure Distribution Measuring System. In *2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)* (pp. 316–319). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2016.100>

Li, L., Wu, Y., & Ye, M. (2015). *Experimental Comparisons of Multi-class Classifiers. Informatica* (Vol. 39). Retrieved from

<http://www.informatica.si/index.php/informatica/article/viewFile/753/608>

Maimon, O., & Rokach, L. (2005). Introduction to Knowledge Discovery in Databases. In *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook* (pp. 1–17). New York: Springer-Verlag.

https://doi.org/10.1007/0-387-25465-X_1

Mapayi, T., & Tapamo, J.-R. (2018). Performance comparison of supervised learning methods for retinal vessel tortuosity characterisation. In *2018 Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS)* (pp. 1–7). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/ICTAS.2018.8368744>

Marsland, S. (n.d.). *Machine Learning : an algorithmic perspective*.

Mata, R. (2017). Minería de datos: qué es, cómo es el proceso y a qué áreas se puede aplicar -

ICEMD. Retrieved December 6, 2018, from [https://www.icemd.com/digital-](https://www.icemd.com/digital-knowledge/articulos/mineria-datos-proceso-areas-se-puede-aplica/)

[knowledge/articulos/mineria-datos-proceso-areas-se-puede-aplica/](https://www.icemd.com/digital-knowledge/articulos/mineria-datos-proceso-areas-se-puede-aplica/)

Measurement Computing Corporation. (2012). *Data acquisition-handbook*. Retrieved from

[https://www.mccdaq.com/support/sig_cond_reg.aspx?t=/support/Data-Acquisition-](https://www.mccdaq.com/support/sig_cond_reg.aspx?t=/support/Data-Acquisition-Handbook.aspx)

[Handbook.aspx](https://www.mccdaq.com/support/sig_cond_reg.aspx?t=/support/Data-Acquisition-Handbook.aspx)

mercadolibre. (2018). Sensor De Fuerza Flexible - Flexiforce A201 - \$ 75.000 en Mercado Libre.

Retrieved February 4, 2019, from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-473995735-](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-473995735-sensor-de-fuerza-flexible-flexiforce-a201-_JM)

[sensor-de-fuerza-flexible-flexiforce-a201-_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-473995735-sensor-de-fuerza-flexible-flexiforce-a201-_JM)

MOBICLINIC ®. (2018). Podoscopio modelo clásico. Retrieved February 14, 2019, from

<http://www.mobiclinic.com/es/auxiliar-o-consulta/18120-podoscopio-modelo-clasico.html>

Montes-Alguacil, J., & others. (2016). Evaluación del pie plano infantil flexible.

Mosaic tecnologías y comunicación multimedia. (2016). UOC. Retrieved from

<https://mosaic.uoc.edu/2017/05/24/analisis-de-distintos-ides-para-programar/>

- Navarro, L. A., García, D. O., Villavicencio, E. A., Torres, M. A., Nakamura, O. K., Huamaní, R., & Yabar, L. F. (2010). Opto-electronic system for detection of flat foot by using estimation techniques: Study and approach of design. In *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* (pp. 5768–5771). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2010.5627842>
- Nomada-, N. W. (2016). *Módulo de RF 2.4GHz [nRF24L01] Módulo de RF 2.4GHz [nRF24L01] Especificaciones Técnicas del Módulo de RF 2.4GHz Diseñado por*. Retrieved from <http://nomada-e.com/videotutoriales.html>
- NORDIC SEMICONDUCTOR. (2008). *nRF24L01+*. Retrieved from www.nordicsemi.no
- novel.de. (2018). emed. Retrieved February 7, 2019, from <http://www.novel.de/novelcontent/emed>
- OMEGA. (2018). Technical Learning - OMEGA Engineering®. Retrieved February 4, 2019, from <https://www.omega.com/technical-learning/>
- patagoniatec. (2014). Arduino Nano | Blog de PatagoniaTec Electronica. Retrieved February 5, 2019, from <https://saber.patagoniatec.com/2014/12/arduino-nano-328-arduino-atmega-clon-compatible-arduino-argentina-ptec/>
- Pereira, M. (2016). Órtesis plantares o plantillas... ¿A medida? Retrieved November 21, 2018, from <https://www.hospitalveugenia.com/comunicacion/consejos-de-salud/ortesis-plantares-plantillas-medida/>
- Pérez Gutiérrez, A. Y., Barrera Pérez, P., Cruz Mazariegos, M. A., Martínez Sanabria, N. A., & Zuleta Olvera, G. A. (2012). Estudios y métodos para conocer el tipo de pisada y como afecta la elección adecuada de tenis en atletas amateur de 20 a 30 años en el deportivo Carmen Serdán de la delegacion GAM. Retrieved from

<https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/10826?show=full>

Pérez Montiel, H. (2015). *Física general*. Distrito Federal, UNKNOWN: Grupo Editorial Patria.

Retrieved from

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=4569671>

Puratich, L. (2011). Podología: Pie Normal, Pie Plano, Pie Cavo. Retrieved November 29, 2018,

from <https://productosyserviciosparatuspiesycuerpo.blogspot.com/2011/05/podologia-pie-normal-pie-plano-pie-cavo.html>

Reyes-Cadena, A. (2018). Calzado en la edad pediátrica. *Acta Pediátrica de México*, 39(2), 202–207.

Rubow, E. (2008). *Open source hardware*.

RunFitners. (2018). MÚSCULOS DEL PIE: Ejercicios y cuidados [VIDEOS] | Runfitners.

Retrieved November 19, 2018, from <https://runfitners.com/los-musculos-del-pie-y-su-funcionamiento-en-los-corredores/>

Salas Arriarán, S. (2015). *Todo sobre sistemas embebidos: arquitectura, programación y diseño*

de aplicaciones prácticas con el PIC18F. Lima, UNKNOWN: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Retrieved from

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=4850235>

Sharon, I. (2009). *DECISION FRAMEWORK FOR SELECTING A SUITABLE SOFTWARE*

DEVELOPMENT PROCESS. Retrieved from

<https://pdfs.semanticscholar.org/a5d8/22138c67344a2ff31a67c2dee98054073db7.pdf>

Somvanshi, M., & Chavan, P. (2016). A review of machine learning techniques using decision

tree and support vector machine. In *2016 International Conference on Computing*

Communication Control and automation (ICCUBEA) (pp. 1–7). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/ICCUBEA.2016.7860040>

Staugaard-Jones, J. A. (2014). *Anatomía del ejercicio y el movimiento*. Barcelona, SPAIN:

Editorial Paidotribo México. Retrieved from

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=4909961>

Stengele, F. H. (2008). Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna

humana. Retrieved from

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_s_f/

Tekscan. (2018a). F-Scan System | Tekscan. Retrieved February 7, 2019, from

<https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/f-scan-system>

Tekscan. (2018b). FlexiForce A201 Datasheet | Tekscan. Retrieved February 5, 2019, from

<https://www.tekscan.com/resources/product/flexiforce-a201-datasheet>

VBTUTOR.NET. (2018). Visual Basic 2017 Tutorial. Retrieved February 4, 2019, from

<https://www.vbtutor.net/vb2017/vb2017tutor.html>

Viladot Voegeli, A. (2003). Anatomía funcional y biomecánica del tobillo y el pie. *Revista*

Española de Reumatología, 30(9), 469–477. Retrieved from [http://www.elsevier.es/es-](http://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-reumatologia-29-articulo-anatomia-funcional-biomecanica-del-tobillo-13055077)

[revista-revista-espanola-reumatologia-29-articulo-anatomia-funcional-biomecanica-del-tobillo-13055077](http://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-reumatologia-29-articulo-anatomia-funcional-biomecanica-del-tobillo-13055077) ER

7 Glosario de Términos y Acrónimos

AMP-OP: Amplificador operacional.

ANTEPIÉ: Parte delantera del pie.

BDD: Su traducción al español hace referencia a Base de Datos.

CLASE: Tipo de datos de una base de datos.

CONDUCTANCIA: Facilidad que ofrece un material al paso de corriente eléctrica alterna.

DATA MINING: Conjunto de técnicas y tecnologías que permiten explorar grandes bases de datos, con el objetivo de encontrar patrones repetitivos.

DATASHEETS: Documento que contiene características de un componente y es emitido por el fabricante.

FSR: Sensores de fuerza resistivos, del inglés Force Sensing Resistor.

GND: Del inglés Ground, se utiliza para denotar la terminal de Tierra en circuitos eléctricos o electrónicos.

k-NN: Es un algoritmo de aprendizaje automático, su traducción al español es método k vecinos más cercanos.

MEDIOPIÉ: Zona central o media del pie.

ML: Del inglés Machine Learning, traducido al español aprendizaje automático.

PIEMEG: Sistema de detección de problemas en pisada mediante algoritmos de decisión supervisados.

PROCESSING: Software libre que permite el diseño de interfaces gráficas.

RETROPIÉ: Área o zona posterior del pie.

SVM: Algoritmo de aprendizaje autónomo supervisado, en inglés significa Support Vector Machine o Máquinas de vectores de soporte, traducido al español.

TEST: Prueba de funcionamiento de un módulo o sistema.

Vin: Voltaje de entrada en un circuito eléctrico o electrónico.

Vca: Voltaje de corriente alterna.

Vcd: Voltaje de corriente directa.

Vmax: Voltaje pico o máximo de salida de un circuito.

Vout: Voltaje de salida en un circuito eléctrico o electrónico.

8 ANEXOS

ANEXO 1. PROGRAMACIÓN DE PIEMEG

Programación Toma y Transmisión de Datos

```
#include <nRF24L01.h> //librerias para la TX
#include <RF24.h>
#include <RF24_config.h>
#include <SPI.h>
int datos[14]; // vector para almacenar datos
int fsr1,fsr2, fsr3, fsr4, fsr5, fsr6, fsr7,fsr8,fsr9,fsr10,fsr11,fsr12,fsr13,fsr14; // declaración
variables
RF24 radio(9,10); // Creamos un objeto radio del tipo RF24$
const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL; // canal de cx
void setup(){
  Serial.begin(9600); //Velocidad de comunicación
  radio.begin(); // Inicia canal de cx
  radio.openWritingPipe(pipe);} // Abrir para escribir
void loop(void)
{
  fsr1=analogRead(0); //tomar valores de entradas analogicas
  datos[0] = fsr1; //guardar datos en vector datos[]

  fsr2=analogRead(1);
  datos[1] = fsr2;

  fsr3=analogRead(2);
  datos[2] = fsr3;
  fsr4=analogRead(3);
  datos[3] = fsr4;
  fsr5=analogRead(4);
  datos[4] = fsr5;
  fsr6=analogRead(5);
  datos[5] = fsr6;
  fsr7=analogRead(6);
  datos[6] = fsr7;
  fsr8=analogRead(8);
  datos[7] = fsr8;
  fsr9=analogRead(9);
  datos[8] = fsr9;
```

```

fsr10=analogRead(10);
datos[9] = fsr10;
fsr11=analogRead(11);
datos[10] = fsr11;

fsr12=analogRead(12);
datos[11] = fsr12;
fsr13=analogRead(13);
datos[12] = fsr13;
fsr14=analogRead(14);
datos[13] = fsr14;
bool ok= radio.write(datos, sizeof(datos));
if(ok )
{
Serial.print(datos[0]); //imprimir por cx serial los datos almacenados
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[1]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[2]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[3]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[4]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[5]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[6]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[7]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[8]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[9]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[10]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[11]);
Serial.print(",");
  Serial.print(datos[12]);

```

```

Serial.print(",");
Serial.println(datos[13]);
}
else
{
  Serial.println("no se ha podido enviar");
}
delay(200);
}
//FIN

```

Programación Recepción de Datos

```

#include <SPI.h> //Librerias para RX
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

//Declaremos los pines CE y el CSN
#define CE_PIN 9
#define CSN_PIN 10
const int ledPin = 3; //LEDS DE ALARMA VISUAL
const int ledPin1 = 5;
unsigned long tiempo1 = 0; //DECLARACION DE VARIABLES
unsigned long tiempo2 = 0;
unsigned long tiempoSegundos = 0;
unsigned long int milli_time;
const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL; //CANAL DE CX
//creamos el objeto radio (NRF24L01)
RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);
int datos[14]; //VECTOR PARA RECIBIR DATOS
void setup()
{
  radio.begin(); //SE INICIA MODULO NRF24L01
  Serial.begin(9600); //VELOCIDA SERIAL
  tiempo1 = millis();
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(ledPin1, OUTPUT);
}

```

```

Serial.println("Inicio de test");
Serial.println("CLEARDATA");
Serial.println("LABEL,Computer Time,Time (Milli
Sec.),sensor1,sensor2,sensor3,sensor4,sensor5,sensor6,sensor7,sensor8,sensor9,sensor10,sensor1
1,sensor12,sensor13,sensor14");
radio.openReadingPipe(1, pipe); //ABRIR CANAL DE RX
radio.startListening(); //ESCUCHA CANAL
}
void loop() {
tiempo2 = millis();
if ( radio.available(>0)
{
//Leemos los datos y los guardamos en la variable datos[]
radio.read(datos,sizeof(datos));

milli_time = millis();

if(datos[13]>=400 && datos[12]>=400 && datos[5]>=400 && datos[2]>=400 &&
datos[7]>=400 && datos[1]>=400){ // SI LA PISADA ES CORRECTA LEE DATOS POR 10
SEGUNDOS
Serial.println("lectura de datos por 10s");
digitalWrite(ledPin1, HIGH);
digitalWrite(ledPin, HIGH);
delay (1000);
digitalWrite(ledPin,LOW);
delay (1000);
Serial.print("DATA,TIME,");
Serial.print(milli_time);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[0]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[1]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[2]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[3]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[4]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[5]);

```

```

Serial.print(",");
Serial.print(datos[6]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[7]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[8]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[9]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[10]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[11]);
Serial.print(",");
Serial.print(datos[12]);
Serial.print(",");
Serial.println(datos[13]);
}
else
{
    Serial.println("No hay datos de radio disponibles");
}
delay(200);
}
//FIN

```

Programación Visualización de Datos

/DESCRIPCION DEL PROGRAMA:

*//Consta de una visualizacion de datos de los valores de los sensores ubicados en el PIEMEG
//los cuales se reciben a partir del arduino hacia la plataforma de processing*

```

import controlP5.*;
import processing.serial.*;
Serial puerto;// iniciarme la comunicación serial
ControlP5 cp5;
int dato,dato1,dato2,dato3,dato4,dato5,dato6,dato7,dato8,dato9,dato10,dato11,dato12,dato13;
PImage p2,der,izq;
PImage bg;
int lastSecond = 0;
PFont f;
void setup(){

```

```

size(1366,768);
f = createFont("Arial",16,true);
bg=loadImage("fondo.png"); //CARGAR IMAGEN DE FONDO
izq=loadImage("plantilla2.png");
der=loadImage("derecho.png");
cp5=new ControlP5(this);
cp5.addButton("CONECTAR")//añadiendo el botón conectar
.setPosition(480,200)
.setSize(90,60)
;
cp5.addButton("INGRESAR DATOS PACIENTE")//añadiendo el botón para ingresar datos
.setPosition(430,520)
.setSize(150,60)
;
printArray(Serial.list()); //imprime lista de puertos seriales disponibles
puerto = new Serial(this,Serial.list()[1], 9600); //abre el Puerto serial
void draw(){
background(bg);
image(izq,875,150,226,523);//imagen plantilla del pie
image(der,1101,150,226,523);
textFont(f);
fill(255);
text("TIPO DE PISADA:",75,200);
text("ZONAS DE PRESIÓN:",75,300);
text("Antepié:",75,350);
text("Mediopié:",75,400);
text("Talón:",75,450);
//PIE IZQUIERDO GRAFICO
if (dato7>=10 && dato7 <=500){
fill(0, 255, 0);
}
if(dato7>500 && dato7 <=900){
fill(243, 156, 18);
}
if(dato7>900 && dato7 <=1023){
fill(192, 57, 43);
}
ellipse(1000,200,50,50);
fill(255); //sensor1

if (dato8>=10 && dato8 <=500){
fill(0, 255, 0);
}
if(dato8>500 && dato8 <=900){
fill(243, 156, 18);
}
}

```

```

    if(dato8>900 && dato8 <=1023){
    fill(192, 57, 43);
    }
    ellipse(980,280,50,50);
    //PIE DERECHO GRAFICO
    if (dato1>=10 && dato1 <=500){
    fill(0, 255, 0);
    }
    if(dato1>500 && dato1 <=900){
    fill(243, 156, 18);
    }
    if(dato1>900 && dato1 <=1023){
    fill(192, 57, 43);
    }
    ellipse(1195,200,50,50);
    fill(255); //sensor8
    if (dato6>=10 && dato6 <=500){
    fill(0, 255, 0);
    }
    if(dato3>500 && dato3 <=900){
    fill(243, 156, 18);
    }
    if(dato3>900 && dato3 <=1023){
    fill(192, 57, 43);
    }
    ellipse(1276,460,50,50);
    fill(255); //sensor12
    if (dato5>=10 && dato5 <=500){
    fill(0, 255, 0);
    }
    //conectamos processing con arduino a través de la comunicación serial
    void CONECTAR(){
    puerto.write('E');
    }
    void DESCONECTAR(){
    puerto.clear();//limpiar el puerto
    puerto.stop();//detener la conexión
    }
    void SALIR(){
    exit(); //sale del programa
    }
    //FIN

```

ANEXO 2. ENCUESTA DE REQUERIMIENTOS Y TABULACIÓN

ENCUESTA DIRIGIDA A LOS ESTUDIANTES DE LA UNIDAD EDUCATIVA

ATAHUALPA AMBIENTE N°1

La encuesta está destinada a los representantes de los niños de la Unidad Educativa “Atahualpa”- Inicial- Ambiente N°1, con la finalidad de levantar información sobre los requerimientos de usuarios para la creación del sistema PIEMEG.

1. ¿Le gustaría que el sistema sea lo más intuitivo y de fácil entendimiento para su niño/a?
 - a) SI
 - b) NO

2. ¿Cree necesario un tipo de alerta en la cual el sistema le advierta si realizo una mala pisada? Si su respuesta es SI continúe con la pregunta 3, caso contrario vaya a la pregunta 4.
 - a) SI
 - b) NO

3. ¿Qué tipo de alerta le gustaría que el sistema posea?
 - a) VISUAL
 - b) SONORO
 - c) VIBRATORIO
 - d) Otros, especifique
porfavor.....
.....
.....

4. ¿Le gustaría que el sistema sea cómodo?
 - a) SI
 - b) NO

5. ¿Cree conveniente que el sistema guarde los datos de la pisada de su niño/a para posteriores análisis?
 - a) SI
 - b) NO

ENCUESTA DIRIGIDA A LOS ESTUDIANTES DE LA UNIDAD EDUCATIVA

ATAHUALPA AMBIENTE N°3

La encuesta está destinada a los estudiantes de la Unidad Educativa “Atahualpa” N°3, con la finalidad de levantar información sobre los requerimientos de usuarios para la creación del sistema PIEMEG.

1. ¿Le gustaría que el sistema sea lo más intuitivo y de fácil entendimiento?
 - c) SI
 - d) NO

2. ¿Cree necesario un tipo de alerta en la cual el sistema le advierta si realizo una mala pisada? Si su respuesta es SI continúe con la pregunta 3, caso contrario vaya a la pregunta 4.
 - c) SI
 - d) NO

3. ¿Qué tipo de alerta le gustaría que el sistema posea?
 - e) VISUAL
 - f) SONORO
 - g) VIBRATORIO
 - h) Otros, especifique
porfavor.....
.....
.....

4. ¿Le gustaría que el sistema sea cómodo?
 - c) SI
 - d) NO

5. ¿Cree conveniente que el sistema guarde la información para posteriores análisis?
 - c) SI
 - d) NO



**ENCUESTA DIRIGIDA A LOS PADRES DE FAMILIA DE LA UNIDAD EDUCATIVA ATAHUALPA
AMBIENTE N°1**

La encuesta está destinada a los representantes de los niños de la Unidad Educativa "Atahualpa"- Inicial- Ambiente N°1 y N°3, con la finalidad de levantar información sobre los requerimientos de usuarios para la creación del sistema PIEMEG.

1. ¿Le gustaría que el sistema sea lo más intuitivo y de fácil entendimiento para su niño/a?

- a) SI
- b) NO

2. ¿Cree necesario un tipo de alerta en la cual el sistema le advierta si realizó una mala pisada? Si su respuesta es SI continúe con la pregunta 3, caso contrario vaya a la pregunta 4.

- a) SI
- b) NO

3. ¿Qué tipo de alerta le gustaría que el sistema posea?

- a) VISUAL
- b) SONORO
- c) VIBRATORIO
- d) Otros, especifique porfavor.....

4. ¿Le gustaría que el sistema sea cómodo?

- a) SI
- b) NO

5. ¿Cree conveniente que el sistema guarde los datos de la pisada de su niño/a para posteriores análisis?

- a) SI
- b) NO



ENCUESTA DIRIGIDA A LOS ESTUDIANTES DE LA UNIDAD EDUCATIVA ATAHUALPA

AMBIENTE N°3

La encuesta está destinada a los estudiantes de la Unidad Educativa "Atahualpa" N°3, con la finalidad de levantar información sobre los requerimientos de usuarios para la creación del sistema PIEMEG.

1. ¿Le gustaría que el sistema sea lo más intuitivo y de fácil entendimiento?

- c) SI
- d) NO

2. ¿Cree necesario un tipo de alerta en la cual el sistema le advierta si realizó una mala pisada? Si su respuesta es SI continúe con la pregunta 3, caso contrario vaya a la pregunta 4.

- c) SI
- d) NO

3. ¿Qué tipo de alerta le gustaría que el sistema posea?

- e) VISUAL
- f) SONORO
- g) VIBRATORIO
- h) Otros, especifique

porfavor.....
.....

4. ¿Le gustaría que el sistema sea cómodo?

- c) SI
- d) NO

5. ¿Cree conveniente que el sistema guarde la información para posteriores análisis?

- c) SI
- d) NO

Tabulación de Información

1. **¿Le gustaría que el sistema sea lo más intuitivo y de fácil entendimiento para su niño/a?**

Respuesta	Total	
	Cantidad	%
a) SI	40	100%
b) NO	0	0%
TOTAL	40	100%

La mayoría de encuestados mostraron su aprobación para que el sistema sea de un fácil uso y entendimiento, con un 100% de aceptación.

2. **¿Cree necesario un tipo de alerta en la cual el sistema le advierta si realizo una mala pisada? Si su respuesta es SI continúe con la pregunta 3, caso contrario vaya a la pregunta 4.**

Respuesta	Total	
	Cantidad	%
a) SI	35	87.5%
b) NO	5	12.5%
TOTAL	40	100%

Un 87.5% de encuestados piensa que el sistema debe indicar oportunamente si el niño/a esta pisando correctamente, de esta manera se garantiza una correcta toma de datos.

3. **¿Qué tipo de alerta le gustaría que el sistema posea?**

Respuesta	Total	
	Cantidad	%
a) VISUAL	25	62.5%
b) SONORO	10	25%
c) VIBRATORIO	5	12.5%
TOTAL	40	100%

En base al mayor porcentaje aceptado en esta pregunta, que es del 62.5% se opta por diseñar un sistema de alarma visual que permita identificar, cuando el niño/a realiza una buena pisada. Con esta alarma se logra obtener una lectura de datos correctos, ya que solamente cuando el niño/a pisen correctamente, el sistema recibirá la información.

4. ¿Le gustaría que el sistema sea cómodo?

Respuesta	Total	
	Cantidad	%
a) SI	35	87.5%
b) NO	5	12.5%
TOTAL	40	100%

Todos los encuestados coinciden que el sistema sea lo más cómodo posible, por lo que el diseño de este debe garantizar la comodidad paciente. Para lograr esto es indispensable usar sensores que sean imperceptibles al ser humano.

5. ¿Cree conveniente que el sistema guarde los datos de la pisada del paciente para posteriores análisis?

Respuesta	Total	
	Cantidad	%
a) SI	30	75%
b) NO	10	25%
TOTAL	40	100%

Un 75% de encuestados, concuerdan en que el sistema debe guardar la información del tipo de pisada del paciente para un posterior análisis, por parte del especialista.

ANEXO 3. FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO REALIZADO

La Figura 111, muestra la investigación desarrollada a través de las encuestas a los usuarios del sistema.



Figura 111 Encuesta estudiantes Unidad Educativa " Atahualpa "

Fuente: Autoría

Implementación del Sistema

- Construcción de las placas de PIEMEG: La Figura 112, muestra el proceso de implementación de las placas electrónicas.

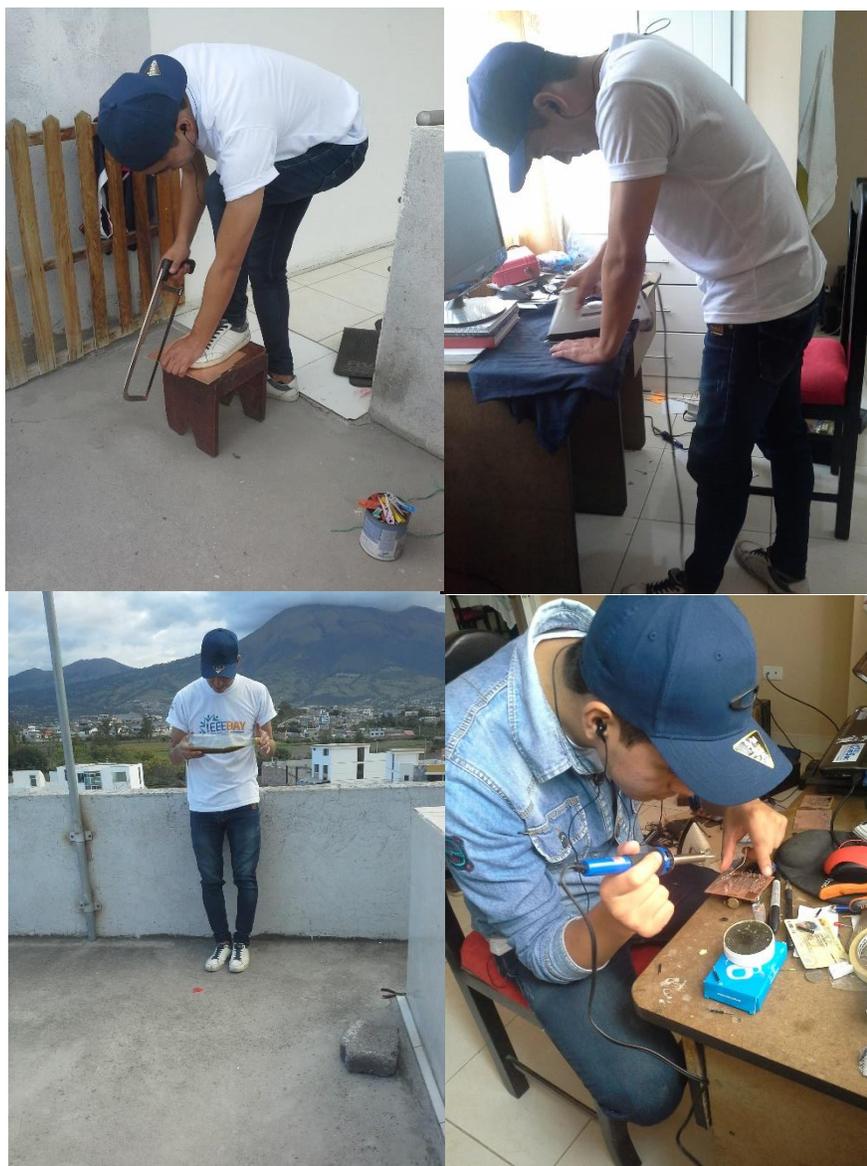


Figura 112 Construcción del sistema PIEMEG

Fuente: Autoría

- **Pie plano**

Datos:

X=6.8 Y= 5.7

Cálculo:

$$HC(\%) = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

$$HC(\%) = \frac{(6.8 - 5.7)}{6.8} * 100 = 16.17\%$$

Tipo pisada: PLANO

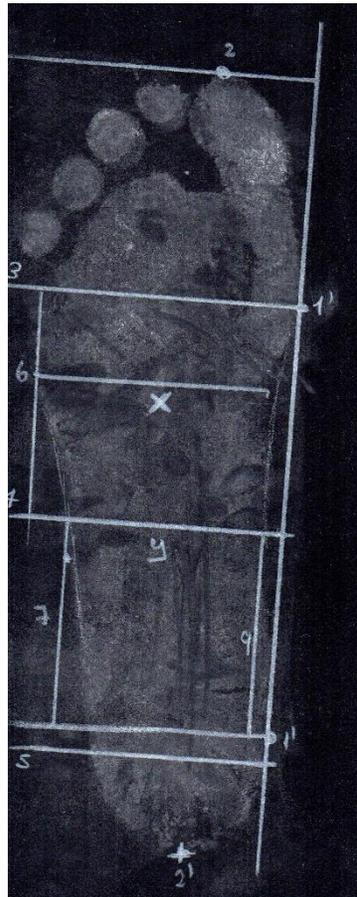


Figura 114 Huella plantar pie plano
Fuente: Autoría

- **Pie cavo**

Datos:

X=7.2 Y= 2.5

Cálculo:

$$HC(\%) = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

$$HC(\%) = \frac{(7.2 - 2.5)}{7.2} * 100 = 65.27\%$$

Tipo pisada: CAVO

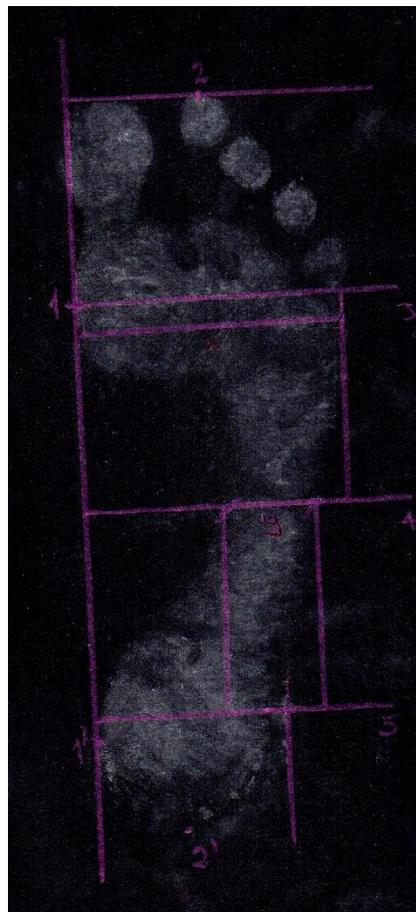


Figura 115 Huella plantar pie cavo
Fuente: Autoría

Niños 4-5 años

- **Pie normal**

Datos:

X=5.3 Y= 3.2

Cálculo:

$$HC(\%) = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

$$HC(\%) = \frac{(5.3 - 3.2)}{5.3} * 100 = 39.62\%$$

Tipo pisada: NORMAL

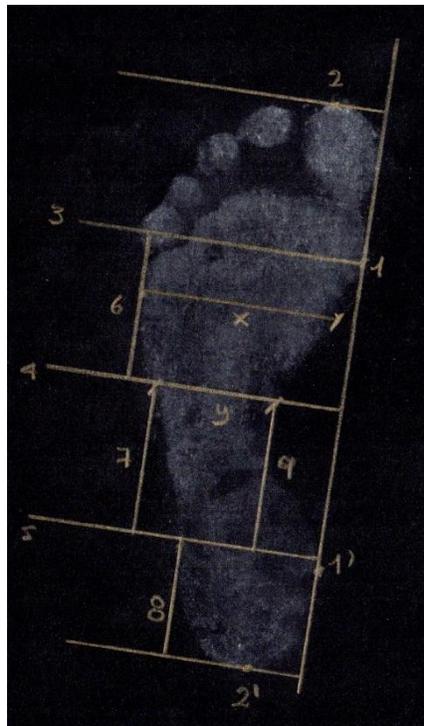


Figura 116 Huella plantar pie normal niños 4-5 años
Fuente: Autoría

- **Pie plano**

Datos:

X=5.8 Y= 5.2

Cálculo:

$$HC(\%) = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

$$HC(\%) = \frac{(5.8 - 5.2)}{5.8} * 100 = 10.34\%$$

Tipo pisada: PLANO



Figura 117 Huella plantar pie plano niños 4-5 años
Fuente: Autoría

- **Pie cavo**

Datos:

X=5 Y= 2.2

Cálculo:

$$HC(\%) = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

$$HC(\%) = \frac{(5 - 2.2)}{5} * 100 = 56\%$$

Tipo pisada: CAVO

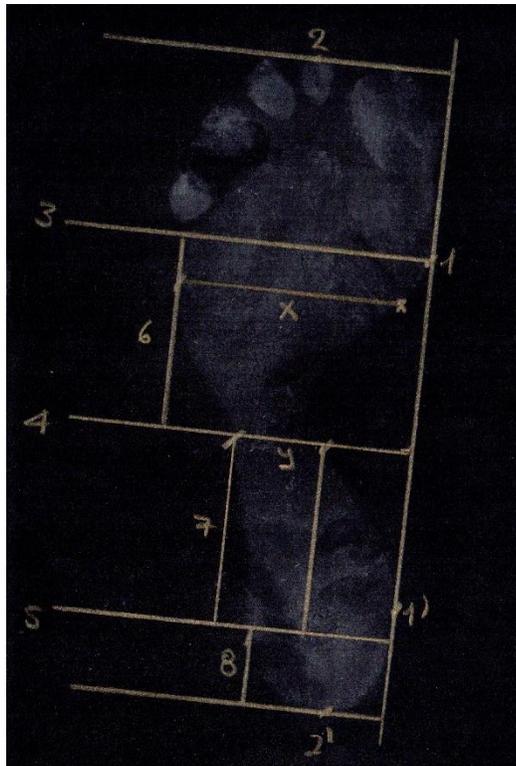


Figura 118 Huella plantar pie cavo niños 4-5 años
Fuente: Autoría

ANEXO 5. BASE DE DATOS DE ENTRENAMIENTO

Sensor izquierdo							Sensor derecho							TipoPisada
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	
962	959	567	567	0	951	951	568	810	0	567	0	1002	962	normal
948	946	726	726	0	940	940	725	972	0	726	0	992	959	normal
945	943	835	835	0	937	937	775	968	0	835	103	991	957	normal
954	945	488	488	0	936	936	539	970	0	488	0	992	957	normal
945	943	957	957	0	937	937	969	966	0	957	353	993	958	normal
945	943	957	957	0	937	937	968	965	0	957	385	992	957	normal
945	943	957	957	0	937	937	968	965	0	957	375	992	956	normal
937	935	874	874	0	928	928	960	957	0	874	592	986	948	normal
933	931	947	947	0	925	924	957	954	0	947	550	985	945	normal
946	944	957	957	0	938	938	786	968	0	957	0	992	956	normal
1023	1023	435	435	0	959	1023	1023	1023	0	435	1023	1023	1023	normal
1023	1023	1023	1023	0	1023	1023	1023	1023	0	1023	1023	1023	1023	normal
1023	1023	1023	1023	0	1023	1023	1023	1023	0	1023	1023	1023	1023	normal
628	1023	1023	1023	0	1023	1023	1023	1023	0	1023	1023	1023	1023	normal
1023	1023	1023	1023	0	1023	1023	1023	1023	0	1023	1023	1023	1023	normal
944	942	628	628	628	936	936	970	968	628	628	538	991	959	plano
945	943	892	892	892	937	937	970	967	892	892	295	991	958	plano
944	943	956	956	956	937	936	970	967	956	956	169	991	958	plano
945	943	835	835	835	937	937	775	968	835	835	103	991	957	plano
1023	1023	435	435	435	959	1023	1023	1023	435	435	1023	1023	1023	plano
873	1023	698	698	698	1023	1023	1023	1023	698	698	1023	1023	1023	plano
628	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	1023	plano

944	942	628	628	628	936	936	970	968	628	628	538	991	959	plano
962	959	567	567	567	951	951	568	810	567	567	0	1002	962	plano
945	943	552	552	552	937	937	971	968	552	552	353	991	958	plano
948	946	726	726	726	940	940	725	972	726	726	0	992	959	plano
944	943	956	956	956	937	936	970	967	956	956	169	991	958	plano
945	943	835	835	835	937	937	775	968	835	835	103	991	957	plano
954	945	488	488	488	936	936	539	970	488	488	0	992	957	plano
932	930	946	946	946	924	924	957	954	946	946	609	985	945	plano
944	942	628	0	0	936	936	970	968	0	0	538	991	959	cavo
961	957	726	0	0	950	951	986	984	0	0	0	1000	961	cavo
944	943	956	0	0	937	936	970	967	0	0	169	991	958	cavo
945	943	957	0	0	937	937	969	966	0	0	353	993	958	cavo
945	943	957	0	0	937	937	968	965	0	0	385	992	957	cavo
945	943	957	0	0	937	937	969	966	0	0	197	990	956	cavo
1023	1023	109	0	0	1023	1023	1023	1023	0	0	1023	1023	1023	cavo
1023	1023	435	0	0	959	1023	1023	1023	0	0	1023	1023	1023	cavo
1023	1023	1023	0	0	1023	1023	1023	1023	0	0	1023	1023	1023	cavo
1023	1023	1023	0	0	1023	1023	1023	1023	0	0	1023	1023	603	cavo
1023	1023	1023	0	0	1023	1023	1023	1023	0	0	1023	1023	474	cavo
1023	1023	1023	0	0	1023	1023	1023	1023	0	0	1023	1023	1023	cavo
944	942	489	0	0	936	935	971	968	0	0	531	991	958	cavo
945	943	552	0	0	937	937	971	968	0	0	353	991	958	cavo
940	939	759	0	0	933	932	964	961	0	0	653	988	952	cavo



Contenido

- ¿Qué es PIEMEG?
- Como hacer un test
- Instalación

Sistema de Detección de tipos de pisadas

Desarrollado por: Edison Fuentes

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CIERCOM-CITEL

PIEMEG

MANUAL DE USUARIO

Ibarra-Ecuador

¿Qué es PIEMEG?

PIEMEG es un sistema de detección de tipos de pisadas utilizando tecnologías de aprendizaje automático, aplicado en su primera versión a los niños de la ciudad de Ibarra-Ecuador.



El nombre de PIEMEG, viene de la unión entre la palabra PIE, el cual es su campo de estudio y MEG debido al microcontrolador con el cual trabaja, un Arduino Mega. PIEMEG está constituido por una gama de sensores imperceptibles al usuario lo cual le permite al usuario una mayor comodidad al realizarse el test. El sistema proporciona información importante sobre como pisamos. Pues al hacer un análisis con el PIEMEG, este es capaz de proporcionar tres tipos de pisada diferentes, como la normal, la plana y cava. Sumado a esto provee información sobre qué zona de los pies son presionadas con mayor fuerza, otorgando al paciente y especialista información importante sobre afección.

Como hacer un test

El uso de PIEMEG, puede estar a cargo de la persona que realizará el test, de preferencia un especialista en el área (podólogo). El PIEMEG consta de dos partes, el sistema de detección en sí y el sistema de recepción, ambos dispositivos son mostrados a continuación:



Las plataformas de color negro son los sistemas de detección, mientras que el dispositivo más pequeño es el receptor. Para iniciar un test, dependerá de la edad del paciente. El PIEMEG, en su primera versión está destinado a niños que se encuentren entre las edades de 11 a 12 años y a niños entre edades de 4 a 5 años. La plataforma con los pies azules (PIEMEG1) es el sistema para los niños de 11-12 años, mientras que la que contiene los pies verdes (PIEMEG2), está destinada a los de edades de 4-5 años. El sistema de recepción funciona para ambas plataformas. Como ejemplo se realizará una prueba usando el PIEMEG1.

1. Encienda la plataforma de color negro, activando el interruptor localizado en la parte baja del sistema, como lo muestra la ilustración 1.



Ilustración 1 Encendido del sistema

2. Conecte el dispositivo receptor al puerto "COM5" USB de su ordenador. El sistema automáticamente se encenderá a través de una luz roja, como muestra la ilustración 2.



Ilustración 2 Conexión de dispositivo receptor

- Para comprobar que se conectó adecuadamente el dispositivo al puerto USB llamado “COM5”, vaya a “Este equipo” en su ordenador, clic derecho y seleccione propiedades. Observe la ilustración 3.

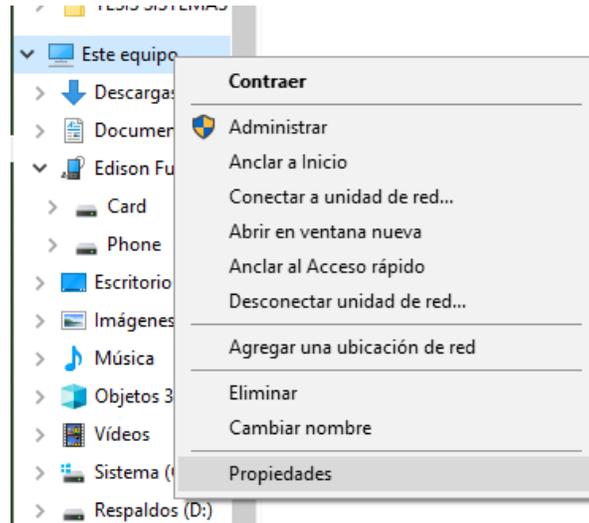


Ilustración 3 Propiedades del equipo

- Seleccione administrador de dispositivos, como se muestra en la ilustración 4.

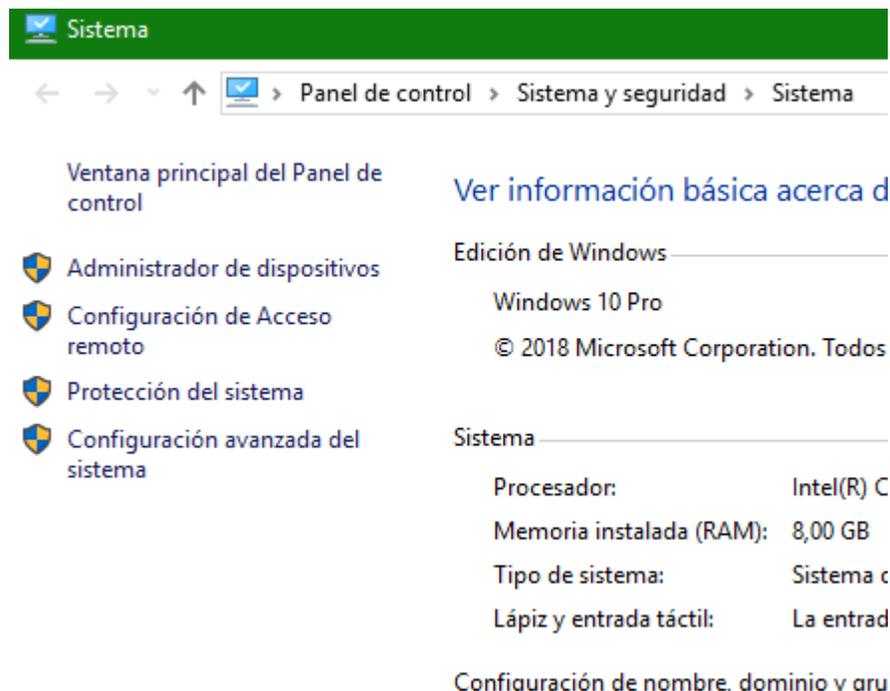


Ilustración 4 Administrador de dispositivos

- Despliegue la selección de puertos (COM y LPT) y verifique que se reconozca el puerto “(COM3)”.

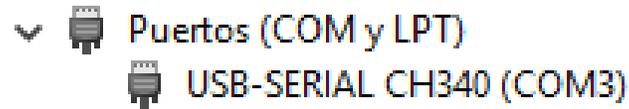


Ilustración 5 Puertos COM y LPT

3. Ahora inicie la aplicación de PIEMEG, haciendo doble clic en el icono de la aplicación, se abrirá una pantalla como la que se muestra en la ilustración 6.



Ilustración 6 Interfaz PIEMEG

4. Ingrese los datos del paciente pulsando el botón “INGRESAR_DATOS”, los datos a ingresar son: Nombres, Apellidos, Edad y Peso.
5. El paciente debe posicionarse encima de la plataforma negra de PIEMEG, sobre las guías de los pies azules.



Ilustración 7 Paciente sobre la plataforma PIEMEG

6. En la interfaz gráfica, pulse el botón “CONECTAR”, luego de ello si el paciente se encuentra bien posicionado, en el sistema receptor se encenderán dos luces una de color amarillo y la otra de color verde.



Ilustración 8 Sistema receptando información

7. El test da inicio y tiene una duración de 10 segundos, luego de ello es posible observar la interfaz gráfica en la cual se presentan los resultados, que se asemejan a los mostrados en la ilustración 9.



Ilustración 9 Resultados test PIEMEG

8. Guardar la información del test, es bastante sencillo. Pulse el botón “GUARDAR” y automáticamente se creará un archivo con extensión .csv. El archivo se encuentra en una carpeta llamada “Lecturas” tal como lo muestra la ilustración 10.

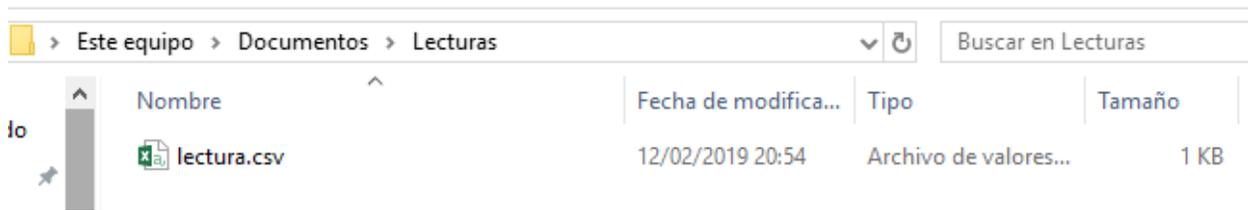


Ilustración 10 Archivo de resultados

- Para visualizar los datos del archivo “lectura.csv” haga doble clic en el archivo. Para que la información sea representada de una manera más clara. Realice clic en el menú de Datos en Excel y en la sección de Obtener y transformar datos, seleccione la opción Desde el texto/CSV como lo muestra la ilustración 11.

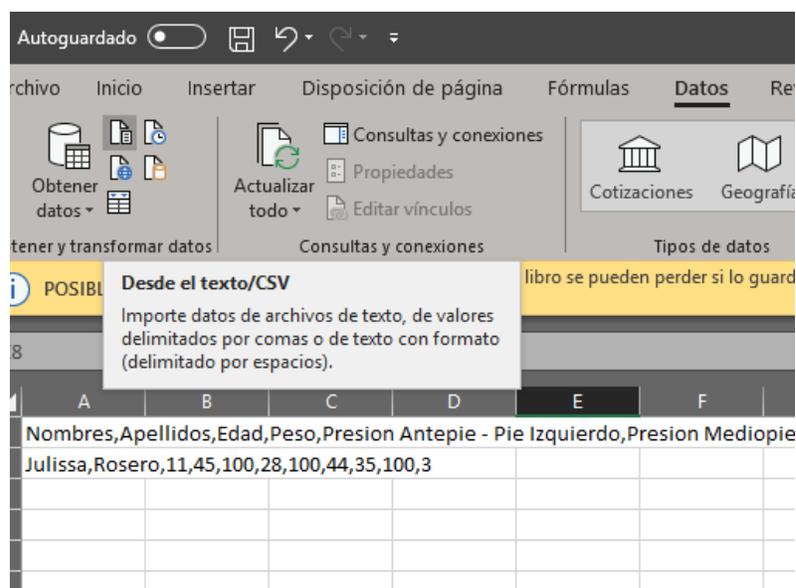


Ilustración 11 Abrir documento del análisis .csv

- Seleccione nuevamente el archivo “lectura.csv”. Aparece una nueva ventana en la cual debe hacer clic en Cargar y los datos del análisis se presentan de una forma más clara. El resultado final se presenta en la ilustración 12.

Nombre	Apellido	Edad	Peso	Presion Antepie - Pie Izq
Julissa	Rosero	11	45	100

Ilustración 12 Resultados guardados en archivo "lectura.csv"

11. De igual forma se guarda una imagen del análisis, en la misma carpeta con el nombre de "lectura" esto se muestra en la ilustración 13. Con un doble clic en el archivo, es posible apreciar la imagen de los resultados obtenidos. Esto se muestra en la ilustración 14.

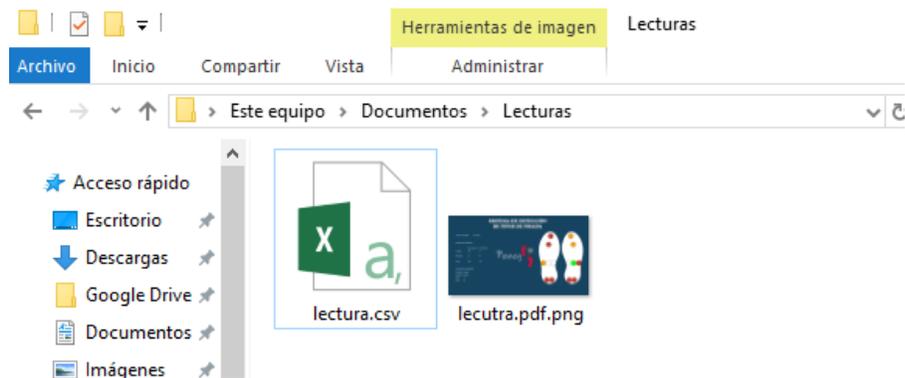


Ilustración 13 Ubicación imagen del análisis



Ilustración 14 Resultados obtenidos

12. Para salir de la aplicación, pulse el botón “SALIR”. Desconecte el dispositivo receptor y apague la plataforma negra de PIEMEG.

Instalación

PIEMEG puede ser instalado en versiones de sistemas operativos (SO) Windows de 32 y 64 bits, además el ordenador debe poseer la versión Java 8, el software del sistema posee estas dos versiones, mostradas en la ilustración 15.

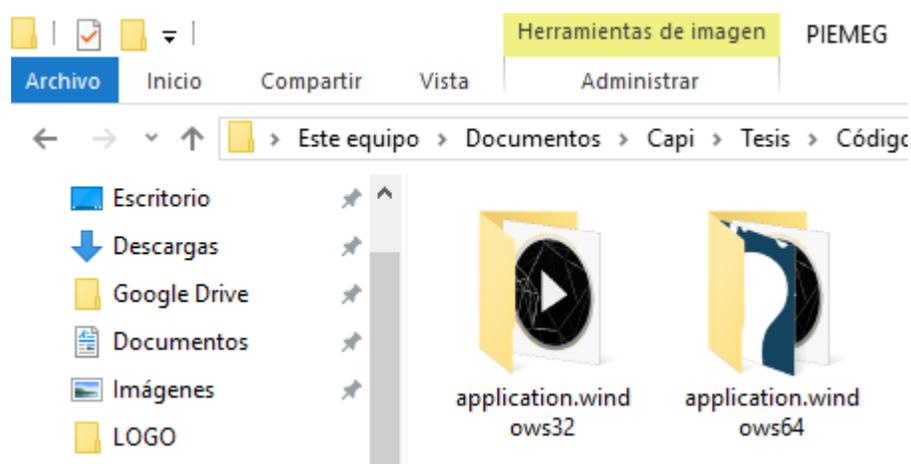


Ilustración 15 Versiones SO PIEMEG

Instalación sobre Sistema Operativo de 64 bits

Para instalar PIEMEG en su ordenador, cree una carpeta llamada “PIEMEG” en la dirección de su preferencia, en este caso la ruta es D:\Documents. Dentro de esta carpeta copie la carpeta “application.windows64”.

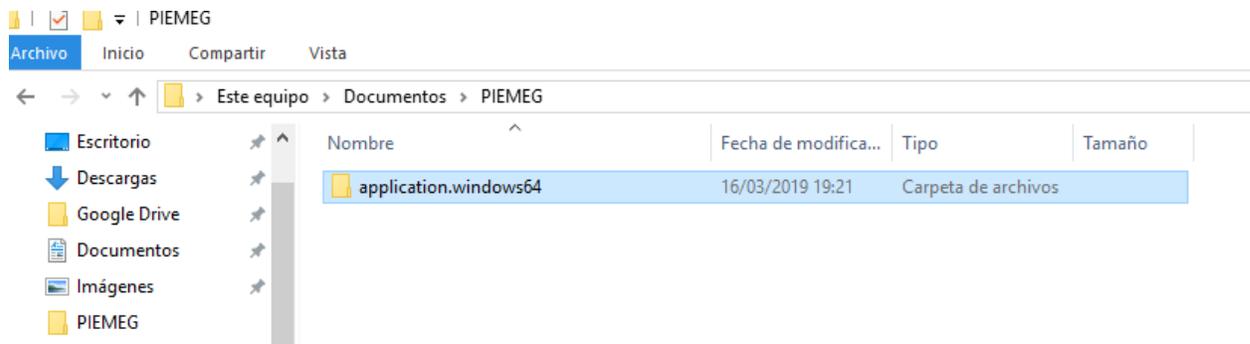


Ilustración 16 Instalación versión 64 bits

Doble clic en la carpeta “application.windows64”, Clic derecho en el archivo PIEMEG.exe, seleccione la opción “Enviar a” y elija “Escritorio (crear acceso directo)”.

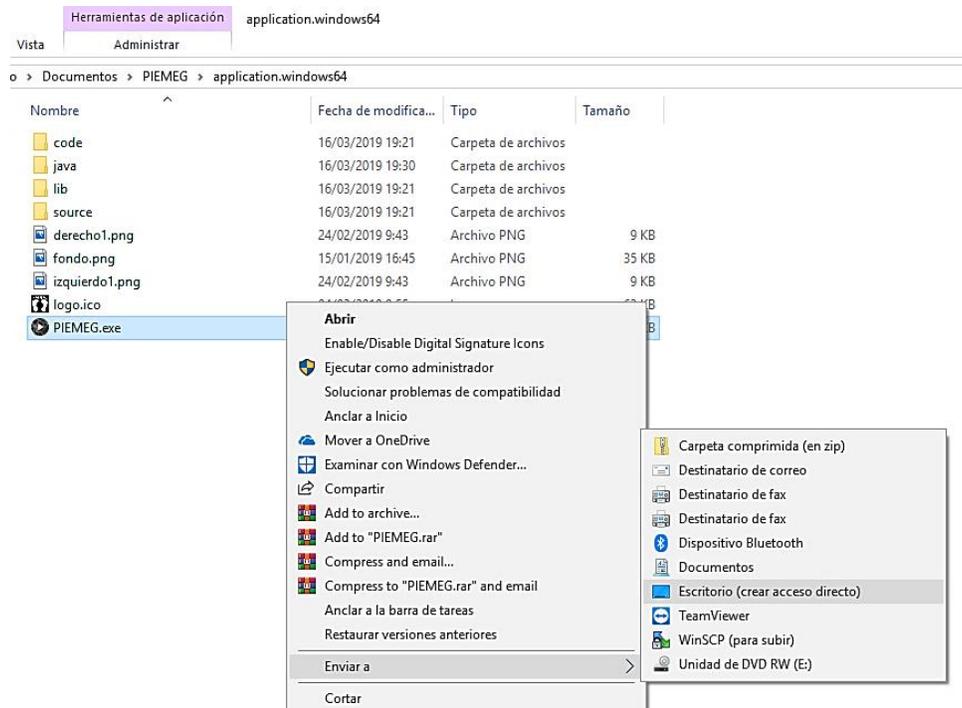


Ilustración 17 Creación de acceso directo PIEMEG

En el Escritorio seleccione la aplicación de PIEMEG, clic derecho y seleccione Propiedades.



Ilustración 18 Aplicación en Escritorio

En la ventana emergente, en la sección de Acceso directo, seleccione la opción de Cambiar icono.

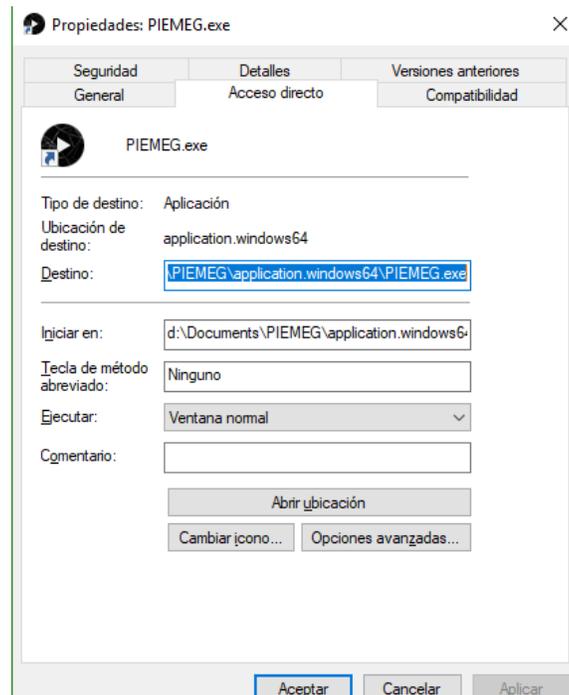


Ilustración 19 Cambiar icono

Clic en Examinar y seleccione el archivo “logo.ico” en la carpeta “application.windows64” y clic en Abrir.

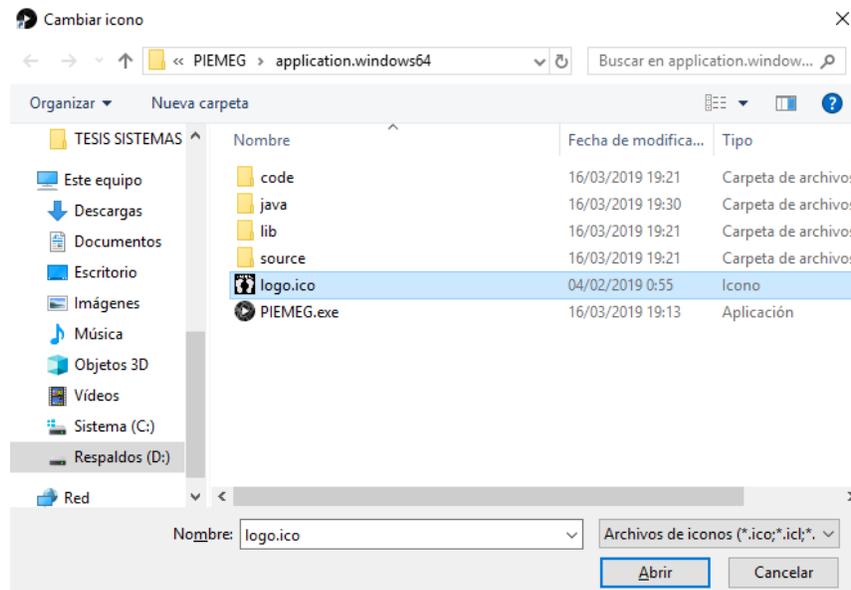


Ilustración 20 Selección de logo.ico

En la venta emergente seleccione Aplicar y luego Aceptar.

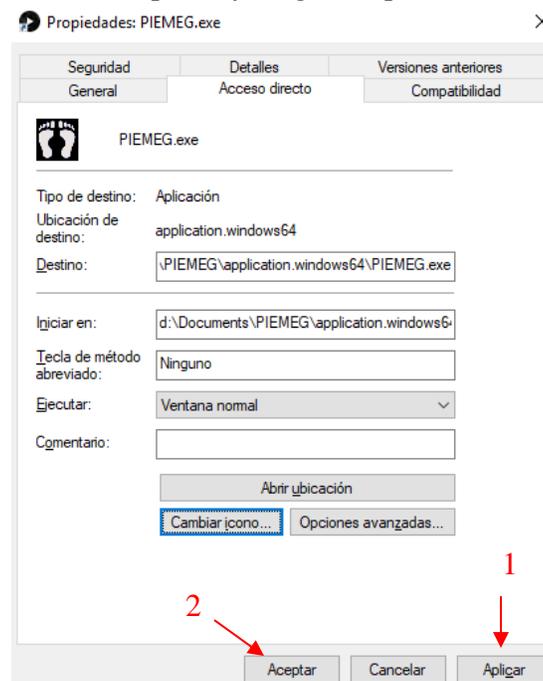


Ilustración 21 Aplicar cambios de icono

Para finalizar vaya al Escritorio y ejecute PIEMEG.exe.



Ilustración 22 Aplicación PIEMEG Escritorio

