



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA
CONTROLAR LA PÉRDIDA DE CONTACTO CON EL SUELO EN LA MARCHA
ATLÉTICA**

Freddy Orlando Ruano Conde

Asesorado por el Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar

Guatemala, julio de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA
CONTROLAR LA PÉRDIDA DE CONTACTO CON EL SUELO EN LA MARCHA
ATLÉTICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FREDDY ORLANDO RUANO CONDE
ASESORADO POR EL ING. CARLOS EDUARDO GUZMÁN SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, JULIO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magali Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADORA	Inga. María Magdalena Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA CONTROLAR LA PÉRDIDA DE CONTACTO CON EL SUELO EN LA MARCHA ATLÉTICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 18 de agosto de 2016.

Freddy Orlando Ruano Conde

Guatemala, 22 de mayo de 2017

Señor
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

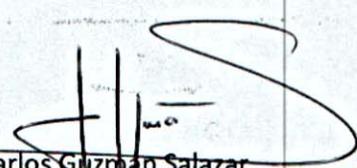
Estimado Coordinador:

Hago de su conocimiento que he terminado la revisión del trabajo de graduación del estudiante **FREDDY ORLANDO RUANO CONDE**, titulado **Diseño e Implementación de un Sistema Electrónico para Controlar la Pérdida de Contacto con el Suelo en la Marcha Atlética**.

Habiendo cumplido con los objetivos que se propusieron para el mismo, por lo que, el estudiante Ruano Conde puede seguir con el proceso que la Universidad tiene para completar el proceso de graduación.

Así mismo, indico que tanto el estudiante Ruano Conde, como el suscrito en calidad de ASESOR nombrado por la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, somos los únicos responsables del contenido del trabajo de graduación.

Atentamente,


Carlos Guzman Salazar

ASESOR

CARLOS GUZMAN SALAZAR
Ingeniero Electricista
Col. No. 2762

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 26. 2017
Guatemala, 24 de MAYO 2017.

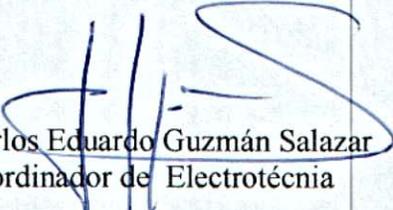
Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
ELECTRÓNICO PARA CONTROLAR LA PÉRDIDA DE
CONTACTO CON EL SUELO EN LA MARCHA ATLÉTICA,**
del estudiante Freddy Orlando Ruano Conde, que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador de Electrotécnica

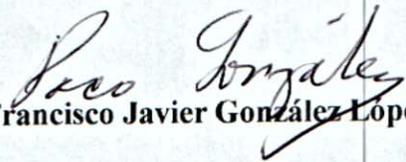


S/O



REF. EIME 25. 2017.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **FREDDY ORLANDO RUANO CONDE**, titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA CONTROLAR LA PÉRDIDA DE CONTACTO CON EL SUELO EN LA MARCHA ATLÉTICA**, , procede a la autorización del mismo.


Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 5 DE JUNIO 2,017.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

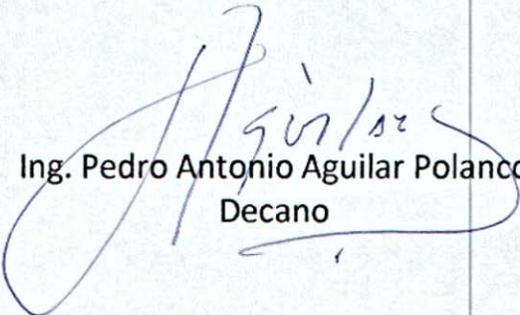


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 298.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA CONTROLAR LA PÉRDIDA DE CONTACTO CON EL SUELO EN LA MARCHA ATLÉTICA**, presentado por el estudiante universitario: **Freddy Orlando Ruano Conde**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, julio de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por brindarme la vida y ser mi guía en el sendero de cada acto que realizo hoy, mañana y siempre.
Mi madre	Margarita Conde, por ser un ejemplo de humildad, valentía y perseverancia. Y por demostrarme su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones.
Mi padre	Orlando Ruano, por tu apoyo, ejemplo e inspiración. Por haber forjado en mí persona una mentalidad competitiva, enfocada a dar lo mejor de mí en cualquier aspecto de la vida.
Mi tía y mis primos	Agustina Conde, Edy, Maco y Juan Carlos, por el cariño, orientación y apoyo constante que me han brindado desde el momento en que nací.
Los atletas de marcha de Guatemala	Noches de trabajo arduo e indudablemente ser los mejores amigos que pude tener en la carrera.
Mis amigos de proyectos de la universidad	Por su disciplina, entrega, labor y esfuerzo. Y por los grandes logros que han obtenido representando orgullosamente a nuestro país.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por abrirme sus puertas y con ello brindarme la oportunidad de alcanzar el cumplimiento de mis metas profesionales.

Roberto Rocha

Por toda la ayuda invaluable e incondicional que he recibido de tu parte y de toda tu familia. Por tu valiosa amistad y, principalmente, por tu admirable e inmensa calidad de ser humano.

**Departamento de
Matemática**

Por darme la oportunidad de laborar como auxiliar de cátedra y por todo el apoyo recibido de cada uno de mis compañeros y catedráticos.

Lic. William Polanco

Por sus valiosas enseñanzas transmitidas hacia mi persona, durante mi etapa como auxiliar de cátedra, que definitivamente ayudaron en mi crecimiento profesional y personal.

Ing. Carlos Guzmán

Por asesorarme, darme su apoyo y valioso tiempo en este trabajo de graduación.

Ramiro Javier García

Por tu sincera amistad, tu excelente carisma y por los buenos momentos compartidos desde que éramos niños.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA MARCHA ATLÉTICA	1
1.1. Historia de la marcha deportiva	1
1.1.1. Primeras marcas.....	3
1.1.2. Origen de la definición	5
1.1.3. Marcha atlética clásica y moderna.....	6
1.2. Definición oficial de marcha atlética	8
1.3. Análisis de las fases y períodos de la marcha atlética	10
1.4. Cinética de la marcha atlética.....	15
1.5. Efectividad de la marcha atlética	17
1.6. Faltas y violaciones técnicas al reglamento de competición....	18
1.6.1. Pérdida de contacto con el suelo.....	18
1.6.2. Flexión de rodilla.....	20
2. EL ARTE DE JUZGAR EN LA MARCHA ATLÉTICA	23
2.1. Principios básicos del juzgamiento en la marcha atlética	24
2.2. Número de jueces	28
2.3. Resumen de las responsabilidades de los jueces de marcha atlética	29

2.4.	Posición de juzgamiento	30
2.4.1.	A nivel general.....	30
2.4.2.	En carretera.....	31
2.5.	Jerarquía de los jueces de marcha	31
2.5.1.	El juez jefe.....	31
2.5.1.1.	Intervención en la descalificación	32
2.5.1.2.	Procedimientos poscompetición.....	33
2.5.1.3.	Resumen de las funciones del juez jefe	33
2.6.	El secretario	34
2.6.1.	Funciones principales.....	34
2.7.	Tipos de advertencias o amonestaciones	35
2.7.1.	Tarjeta amarilla.....	35
2.7.2.	Tarjeta roja	36
2.8.	Descalificación	36
2.9.	El tablero de anuncios.....	37
2.10.	Recopilación de datos y tablero de anuncios electrónicos	40
2.10.1.	Estructura del sistema	40
2.10.2.	Modo de operación.....	41
2.10.3.	Dispositivo o terminal de cada juez	41
2.11.	Punto de control	42
3.	EL PROBLEMA ACTUAL CON EL JUZGAMIENTO DE LA MARCHA ATLÉTICA Y LA SOLUCIÓN ELECTRÓNICA PROPUESTA.....	45
3.1.	Defectos en los criterios utilizados para juzgar la marcha atlética.....	48
3.1.1.	La vista del juez de marcha atlética	48
3.1.2.	La ubicación del juez de marcha atlética.....	49

3.2.	Necesidad de una solución electrónica en el juzgamiento de la marcha atlética	50
3.3.	Plantillas electrónicas para juzgar la pérdida de contacto con el suelo en la marcha atlética	51
3.4.	Requerimientos mínimos necesarios para la creación de un sistema electrónico detector de pérdida de contacto con el suelo.....	53
4.	DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PROPUESTO Y DESCRIPCIÓN DE SUS COMPONENTES FÍSICOS.....	55
4.1.	Generalidades del diseño.....	56
4.2.	Descripción de los componentes electrónicos utilizados.....	57
4.2.1.	Microcontrolador MSP430	57
4.2.1.1.	<i>Launchpad</i>	57
4.2.1.2.	Características técnicas.....	58
4.2.1.3.	Ventajas.....	59
4.2.2.	Microcontrolador TM4C123GH6PM.....	60
4.2.2.1.	Características técnicas.....	61
4.2.2.2.	Ventajas.....	61
4.2.3.	Fuente de alimentación	61
4.2.4.	Módulo bluetooth HC-05.....	62
4.2.4.1.	Configuración del módulo HC-05.....	65
4.2.5.	Sensores de fuerza resistivos FSR.....	65
4.2.5.1.	Curva característica fuerza vs resistencia.....	66
4.2.5.2.	Modelo utilizado.....	67
4.2.6.	Potenciómetros tipo trimmer	69
4.2.7.	Leds y Buzzer	70
4.3.	Diseño de la plantilla de sensores	72

4.3.1.	Colocación de los sensores.....	72
4.3.2.	Diagrama esquemático de conexión de los FSR.....	73
4.3.3.	Voltajes de referencia.....	74
4.3.4.	Fuente de alimentación	75
4.3.5.	Unidad de control del zapato.....	77
4.4.	Diseño de la unidad de control principal.....	78
4.5.	Diagrama de bloques del sistema electrónico implementado ..	79
4.5.1.	Descripción de bloques involucrados en la zapatilla	80
4.5.1.1.	Fuente de alimentación	80
4.5.1.2.	Unidad de control	81
4.5.1.3.	Calibración	82
4.5.1.4.	Plantilla instrumentada	82
4.5.1.5.	Transmisión de información	83
4.5.2.	Descripción de bloques involucrados en la unidad principal de control.....	83
4.5.2.1.	Fuente de alimentación	83
4.5.2.2.	Unidad de control	83
4.5.2.3.	Pulsadores de calibración	84
4.5.2.4.	Recepción de información	84
4.5.2.5.	Sistema de alertas.....	85
4.6.	Diagramas de flujo	85
5.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DETECTOR DE PÉRDIDA DE CONTACTO CON EL SUELO.....	89
5.1.	Fabricación del sistema electrónico	89
5.1.1.	Diseño de las pacas de circuito impreso	90
5.1.2.	Elaboración de las placas de circuito impreso.....	94

5.1.3.	Programación de la MSP430 para la plantilla de sensores	96
5.1.4.	Programación la TIVA C para la unidad de control.....	98
5.2.	Integración y montaje del sistema	101
5.2.1.	Sensores en la plantilla del zapato	101
5.2.2.	Placa de control de sensores.....	103
5.2.3.	Unidad de control principal	104
5.3.	Operación del sistema	106
5.3.1.	Instrucciones básicas de uso.....	106
5.3.2.	Calibración de los sensores.....	108
5.3.3.	Modo de alertas	109
5.4.	Experimentación y discusión de resultados del sistema implementado	110
5.4.1.	Metodología	110
5.4.2.	Pruebas iniciales y solución de problemas	111
5.4.3.	Pruebas finales	112
5.4.4.	Análisis del funcionamiento del sistema implementado	112
	CONCLUSIONES	115
	RECOMENDACIONES.....	117
	BIBLIOGRAFÍA.....	119
	APÉNDICES	123
	ANEXOS	133

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fase de apoyo doble.....	11
2.	Fase de tracción.....	11
3.	Fase de apoyo simple o relajación.....	12
4.	Fase de impulso.....	13
5.	Fases de marcha atlética según Ozolin & Markov.....	14
6.	Contacto con el suelo, doble apoyo.....	19
7.	Flexión de rodilla.....	20
8.	Mapa conceptual, generalidades de la marcha atlética.....	21
9.	Hoja resumen de un juez de marcha.....	27
10.	Diseño de la tarjeta roja que utiliza el juez de marcha.....	28
11.	Tablero de anuncios manual.....	39
12.	Tablero electrónico de anuncios Seiko.....	40
13.	Terminal electrónico utilizado por los jueces de marcha.....	42
14.	Punto de control.....	43
15.	<i>Launchpad</i> MSP430.....	58
16.	<i>Launchpad</i> EK-TM4C123GXL.....	60
17.	Batería de iones de litio, marca UltraFire modelo 14500.....	62
18.	Funcionamiento del módulo bluetooth HC05.....	63
19.	Módulo bluetooth HC05.....	64
20.	Construcción del FSR.....	66
21.	Fuerza vs resistencia.....	67
22.	Dimensiones modelo 402 (circular de 0,5").....	68
23.	FSR modelo 402.....	68

24.	Trimmer pvz3a	69
25.	Leds para la advertencia visual.....	71
26.	Buzzer para la advertencia auditiva	71
27.	Colocación de los sensores FSR.....	72
28.	Vista desfragmentada de la plantilla de sensores.....	73
29.	Conexión FSR.....	74
30.	Diagrama de conexión de trimmer	75
31.	Diagrama de conexión del regulador de tensión para el microcontrolador	76
32.	Diagrama esquemático general de la zapatilla	77
33.	Diagrama esquemático de unidad principal de control	79
34.	Diagrama de bloques del sistema electrónico implementado	80
35.	Diagrama de flujo de la unidad principal de control	86
36.	Diagrama de flujo de la plantilla instrumentada	87
37.	Vista frontal PCB de la zapatilla.....	91
38.	Vista posterior PCB de la zapatilla.....	92
39.	Vista frontal PCB unidad de control principal.....	93
40.	Vista posterior PCB unidad de control principal.....	93
41.	Elaboración final PCB unidad de control de sensores	95
42.	PCB unidad de control de sensores con sus componentes electrónicos soldados	96
43.	Colocación de sensores FSR	102
44.	Placa control de sensores, pie derecho	104
45.	Placa control de sensores, pie izquierdo	104
46.	Placa unidad de control principal	105
47.	Ubicación de la unidad de control principal en la cadera	106
48.	Diagrama de bloques del funcionamiento general del sistema propuesto.....	113

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
bps	Bits por segundo
cm	Centímetro
dBm	Decibelio referenciado a un miliwatt
°	Grado sexagesimal
Hz	Hertz
KHz	Kilohertz
Km	Kilómetro
KΩ	Kilo-ohmio
MHz	Megahertz
m	Metro
mA	Miliamperio
mAh	Miliamperio-hora
mm	Milímetro
μA	Microamperio
nm	Nanómetro
ns	Nanosegundo
#	Número
Ω	Ohmio
%	Porcentaje
”	Pulgada
V	Voltio
W	Watt

GLOSARIO

ADC	Convertidor analógico-digital (<i>analog to digital converter</i> , en inglés). Permite medir señales analógicas en forma digital, con el propósito de facilitar su procesamiento.
ARM	Tipo de arquitectura de microprocesadores, basado en un sistema de instrucciones simple, lo que permite ejecutar tareas con un mínimo consumo de energía.
ASCII	Código estándar estadounidense para el intercambio de información. (<i>American standard code for information interchange</i> , en inglés).
Atleta	Persona que practica el atletismo; en este trabajo, se refiere a la persona que práctica la marcha atlética.
Bit	Unidad básica de información equivalente a uno de dos estados lógicos igualmente probables.
Bluetooth	Tecnología de comunicación inalámbrica de corta distancia que permite la transmisión de datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia.

Buzzer	Transductor electroacústico capaz de producir un sonido del mismo tono cuando es polarizado.
Comandos AT	Es un estándar abierto de comandos para configurar y parametrizar módems.
Diodo	Dispositivo electrónico de dos terminales por el que circula la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido.
DIP	Es una forma de encapsulamiento, común en la construcción de circuitos integrados, que consiste en un bloque con dos hileras paralelas de pines. (dual in-line package, en inglés)
DipTrace	<i>Software</i> para diseño de diagramas esquemáticos y PCB.
DQ	Descalificado. Siglas que indican la descalificación de un atleta o marchista en una competencia.
EEPROM	Memoria de solo lectura programable y borrable eléctricamente. (<i>electrically erasable programmable read only memory</i> , en inglés)
Flicker	Es un disturbio o alteración en la amplitud de la tensión eléctrica.

FSR	Sensor de fuerza resistivo (<i>force sensitive resistor</i> , en inglés). Permite detectar la presión física, pulsación y peso, utilizado para la detección de pérdida de contacto con el suelo del marchista.
Headers	Tira de pines macho para facilitar el uso de conexiones en prototipos.
I2C	Es un estándar que facilita la comunicación entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos similares, sólo requiere de dos líneas de señal y un común o tierra. (<i>Inter-integrated circuit</i> , en inglés).
IAAF	Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo. Es la entidad suprema del atletismo a nivel mundial, encargada de todas las normas, reglamentos y organización de los eventos involucrados en este deporte. (<i>International Association of Athletics Federations</i> , en inglés).
ICSP	Programación serial en circuito. Es la característica de algunos microcontroladores de ser programados mientras están instalados en un sistema completo, en lugar de requerir que el chip sea programado antes de ser instalado dentro del sistema. (<i>In-circuit serial programming</i> , en inglés).

Launchpad	Se refiere a la herramienta de desarrollo y de evaluación para los dispositivos MSP430 y TIVA C de Texas Instruments.
Led	Diodo emisor de luz. Es un diodo compuesto por material semiconductor que emite luz en una o más longitudes de onda. (<i>Light-emitting diode</i> , en inglés).
Litio	Elemento químico empleado especialmente en baterías eléctricas recargables.
MCU	Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. (<i>Microcontroller unit</i> , en inglés).
Metatarso	El metatarso está conformado por cinco huesos, situados en la parte media del pie.
MSP430	Familia de microcontroladores fabricados por Texas Instruments. Diseñado para aplicaciones embebidas de bajo costo, sistemas inalámbricos y de ultra bajo consumo de energía.
PCB	Placa de circuito impreso (<i>printed circuit board</i> , en inglés).
Plantilla	Pieza de tela, corcho u otra materia que cubre interiormente la planta de la zapatilla.

Prototipo	Es el primer dispositivo que se fabrica, del cual se toman las ideas más relevantes para la construcción de otros diseños y representa todas las ideas en cuanto a diseño, soporte y tecnología que se les puedan ocurrir a sus creadores.
RAM	Memoria de acceso aleatorio, (<i>random access memory</i> , en inglés).
RISC	Es tipo de procesador con instrucciones de tamaño fijo y presentadas en un reducido número de formatos. (<i>Reduced instruction set computer</i> , en inglés).
Schmitt trigger	Su funcionamiento se basa en un comparador que permite conservar el nivel lógico hasta que no se produzca un cambio brusco. De esta manera se previene el ruido que podría tapar la señal original y que causaría falsos cambios de estado.
SMD	Dispositivo de montaje superficial, cuya principal característica es su reducida dimensión física. Estos dispositivos se montan sobre la superficie del circuito impreso. (<i>Surface mount device</i> , en inglés).
SPI	Interfaz serial periférica, es un estándar de comunicaciones, usado para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos. (<i>Serial peripheral interface</i> , en inglés).

Talón	Es la parte posterior del pie de una persona.
Timer	Se refiere al temporizador del microcontrolador, utilizado para generar pulsos de duración arbitraria, medir tiempo o contar pulsos externos.
Trimpot	Es un potenciómetro de precisión cuyo tamaño es muy pequeño y es utilizado para ajustes de precisión en circuitos donde se requiere que el usuario pueda modificar ciertos parámetros. (<i>Trimmer-potentiometer</i> , en inglés).
UART	<i>Universal asynchronous receiver-transmitter</i> , es el módulo de los microcontroladores que controla los puertos y dispositivos serie.
USB	El Bus Universal Serie, es un bus estándar industrial que define los cables, conectores y protocolos usados para conectar, comunicar y proveer de alimentación eléctrica entre, periféricos y dispositivos electrónicos. (<i>Universal serial bus</i> , en inglés).
VCC	Voltaje de corriente continua. Se denomina comúnmente con este acrónimo al pin de alimentación de los circuitos integrados.
Zapatilla	Calzado especial que se usa para practicar ciertos deportes; suele ser de material flexible, tener la suela de goma y llevar cordones.

RESUMEN

En la marcha atlética, la fase de pérdida de contacto con el suelo de un atleta de alto nivel no dura más de algunas centésimas de segundo, añadiendo a esto el hecho de que el ojo humano del juez de marcha debe prestar mucha atención, al mismo tiempo, a dos partes del cuerpo del atleta que están relativamente lejos entre ellos: los dedos del pie de la pierna de apoyo y el talón de la pierna de avance. Por tal razón en reiteradas ocasiones existen errores por parte de los jueces al momento de existir una falta por parte de los atletas.

Por lo mismo, este trabajo de graduación plantea el diseño e implementación de un sistema electrónico, capaz de detectar verídicamente la pérdida de contacto con el suelo de un marchista. El diseño e implementación del sistema plantea todo el conjunto de componentes físicos, circuitos eléctricos, módulos de comunicación, conectividad y programación que permitirán controlar todos los componentes y procesos del sistema.

El sistema implementado se basa en la utilización de plantillas ubicadas en cada zapatilla, las cuales contienen sensores de fuerza resistivos que miden la fuerza ejercida entre el zapato y el suelo. La zapatilla procesa la información proveniente de los sensores, independientemente del resto del sistema, para determinar la existencia de contacto con el suelo. Las señales de ambas zapatillas se transmiten hacia una unidad de control que se encarga de interrelacionar cada señal y, por consiguiente, determinar si el marchista incurrió en una falta por pérdida de contacto con el suelo. Si este fuera el caso, se detonan las alertas respectivas por cada falta cometida.

OBJETIVOS

General

Diseñar e implementar un sistema electrónico capaz de detectar la pérdida de contacto con el suelo durante la ejecución de la marcha atlética para determinar objetivamente la existencia de una falta al reglamento que amerite una amonestación.

Específicos

1. Determinar la estructura de un sistema que garantice la efectividad en la detección de la pérdida de contacto con el suelo, tomando en cuenta la comodidad y el rendimiento del atleta.
2. Establecer el tipo de sensor y la ubicación necesaria para detectar la presencia de contacto con el suelo, de modo que no lastime al atleta ni perjudique su desenvolvimiento en la ejecución de la marcha.
3. Implementar un medio de transmisión de información adecuado para el funcionamiento e interpretación de los datos recolectados por los sensores en las plantillas.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de graduación tiene como finalidad desarrollar el diseño y la implementación de un sistema que determine electrónicamente la pérdida de contacto con el suelo en la marcha atlética, con el objetivo de facilitar y asegurar un juzgamiento objetivo en los eventos de esta rama deportiva, también, para uso particular de cada atleta en sus sesiones de entreno.

Las partes críticas en el desarrollo de este sistema, principalmente, están centradas en la ubicación de los sensores e interpretación de las señales recolectadas por los mismos. De igual manera, la miniaturización de todo el conjunto, debido a la naturaleza del movimiento y flexibilidad que ocurre en cada zapatilla utilizada por el atleta.

Los primeros dos capítulos proporcionan los fundamentos teóricos de la marcha atlética: su historia, definición, reglamento, técnica utilizada por los atletas y la función de los jueces. En el tercer capítulo se define el problema actual con el juzgamiento de la marcha atlética y el sistema electrónico propuesto como una solución.

El cuarto capítulo aborda completamente el diseño y la descripción de cada parte del sistema: explicación de diagramas esquemáticos, componentes electrónicos utilizados y diagramas de flujo necesarios para comprender su funcionamiento. Finalmente, el quinto y último capítulo describen la implementación del sistema electrónico desarrollado y un análisis final de toda su operación y funcionamiento.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA MARCHA ATLÉTICA

Dado que el enfoque central del presente trabajo de investigación está puesto en el diseño e implementación de un sistema electrónico capaz de detectar el contacto con el suelo de un atleta de marcha, es necesario establecer una base teórica que sirva como eje conceptual. Por lo tanto, es de vital importancia conocer claramente la historia, definición oficial de marcha atlética, la técnica de los atletas de este deporte y las reglas básicas de competencia existentes que rige esta rama del atletismo en la actualidad.

1.1. Historia de la marcha deportiva

La marcha es una especialidad nacida de un gesto cotidiano de nuestra vida y reglamentada por normas precisas como una verdadera disciplina deportiva. Cuando es necesario desplazarse de un lugar a otro sin el auxilio de medios mecánicos, se puede hacer ya sea caminando o corriendo. En ambos casos, el traslado se origina en los miembros inferiores, que desembocan en la ejecución del paso.

Sin embargo, es muy diversa la mecánica de los dos movimientos: la carrera se presenta como una sucesión de saltos, es decir, una fase de vuelo tras un apoyo y así sucesivamente; mientras en la caminata o marcha, el contacto con el suelo es continuo, con un tiempo de doble apoyo, esto es, con ambos pies apoyados en el suelo.

Siempre que se mencionan las características del atletismo y de su importancia como deporte base, se recuerdan sus actividades primarias: correr,

saltar o lanzar como ejercicios que todos los seres humanos han realizado desde muy niños, pero se olvida que junto a estas ha estado siempre, sin ningún tipo de duda, la caminata. Este es el primero de los deportes universales que se practica naturalmente desde temprana edad, sin tomar clara conciencia de ello. Una recreación que se puede ejercitar a toda edad, más allá de lo deportivo y de la competencia que hace al mejoramiento de la condición física y mental del ser humano.

El caminar es algo realmente apasionante. “El único medio para descubrir un país, interesarse por él, penetrar en todo su carácter, en la poesía y en toda su alma, es recorrerlo a pie. No conozco otra forma más agradable de viajar. Es necesario que mi cuerpo esté en movimiento para que mi espíritu lo esté también”.¹

Diferentes estudios indican que aproximadamente desde hace treinta siglos antes de Cristo la presencia de la marcha ya es conocida; más tarde, los legionarios romanos revelaron sus bondades en sus largos desplazamientos por las sendas del mundo antiguo. Estos adelantados a la época de los grandes marchistas italianos del presente ya hacían jornadas de treinta kilómetros en seis horas, con todo el equipo al hombro; mientras que los griegos llegaron a unir más de 200 km marchando durante varios días, con armamentos completos, en algunos de sus innumerables enfrentamientos bélicos con los persas.

El sumergirse en la historia permite conocer ejemplos provenientes del Imperio Incaico y de los mayas, muy proclives a realizar largas caminatas; mientras que, en la Sierra Madre, prolongación de la cordillera norte de México,

¹ JACQUES ROUSSEAU, Jean. *Biografía*. https://es.wikipedia.org/wiki/Jean-Jacques_Rousseau. Consulta: 8 de enero de 2017.

viven los indios tarahumaras (nombre que proviene de una versión española corrompida del vocablo “ralemari” que significa andador) que eran expertos en efectuar extensas marchas a pie a más de 2 300 m de altura. Quizás sean estos los antecesores en el tiempo de los grandes campeones y recordistas que Latinoamérica ha dado al mundo en esta especialidad.

A lo largo de la historia se ha hablado mucho de las bondades de la marcha como especialidad deportiva y se lo seguirá haciendo en el futuro; ya en el siglo dieciséis el pedagogo inglés Richard Mulcaster (1533-1611) la recomendaba terapéuticamente afirmando los valores de los ejercicios físicos. Este pensador británico se anticipó al entendimiento de las venideras generaciones que en su medio fueron inspiradoras de la casi totalidad de las grandes manifestaciones deportivas modernas.

La primera competencia que se recuerda se disputó en 1655 en Francia bajo el auspicio del Duque de Borgoña quien apoyó la realización de una prueba de 100 kilómetros. En la Rusia de los zares y a través de los expedicionarios ingleses por el África, la caminata conoció además otras múltiples alternativas.

1.1.1. Primeras marcas

En Inglaterra, pionera de los deportes modernos, la actividad fue en aumento a partir de la segunda mitad del siglo diecinueve. De estos años quedó registrada la gesta de Samuel East quien en 1848 empleó 5 horas con 58 minutos para realizar treinta millas y las 3 horas con 42 minutos de Jack Smith en 1851 para las veinticinco millas.

En 1870 Thomas Griffith cronometró 2 horas con 47 minutos para caminar en Londres durante veinte millas; mientras que Harry Thatcher marchó 24 275 kilómetros en dos horas en 1875, marca que fue mejorada por Williams Perkins en 1877 con 24 393 kilómetros que evidenciaban la evolución y el grado de impulso que esta disciplina tenía en la Gran Bretaña, donde en 1878 se efectuó el primer campeonato inglés de la especialidad, sobre siete millas, distancia en la cual, en ese mismo año, el ya citado Griffith estableció la mejor marca mundial conocida con 55 minutos y 30 segundos, el día 6 de agosto en la ciudad de Leeds.

Las travesías entre ciudades, las competiciones campestres y de largas distancias forman parte de la expansión popular de la marcha en Europa en el siglo XIX. Es así como en la ciudad de Londres en 1883 se disputó por primera vez en 1891 la clásica prueba de 83 km que une la capital del Reino Unido con Brighton. Tiempo después, el 5 de junio de 1892, nació en Francia la Paris-Belfort, legendaria competición de 496 km organizada por el periódico *Le Petit Journal* donde participaron aproximadamente ochocientos cincuenta atletas y fue ganada por el francés Constan Ramoge.

Francia es una de las pioneras de la marcha tal como hoy en día se conoce. En 1888 se crearía la Unión de Sociedades Francesas de Deportes Atléticos cuyo secretario general era nada menos que el Barón Pierre de Coubertin. Esta entidad incorporaría en 1893 a los campeonatos franceses de atletismo dos competencias de marcha atlética. Una de un kilómetro que tendría como vencedor a Frantz Reichel, quien el 23 de junio de 1894 sería uno de los participantes en el congreso reunido en la Sorbona que establecerá el restablecimiento de los Juegos Olímpicos, y la restante de 20 km en la cual el ganador fue M. Spitzer.

La marcha fue incluida en los Juegos Olímpicos en su tercera edición en 1908, en los Juegos Europeos de 1934 y en los Juegos de la Commonwealth de 1966; la categoría femenina tuvo que esperar hasta los XXV Juegos Olímpicos de Barcelona 1992 para que fuera incluida en el programa olímpico. La marcha fue incrementando su popularidad hasta llamar la atención del resto de Europa, de tal forma que en Italia, Francia, Alemania y Suecia se organizaron marchas populares multitudinarias. Posteriormente, cruzó el Océano Atlántico para darse a conocer en Estados Unidos y muy especialmente en Latinoamérica.

1.1.2. Origen de la definición

La marcha atlética tuvo su definición oficial en 1928 el IX Congreso de la IAAF (Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo) reunido en Ámsterdam. Donde se estableció que: “Marcha es una progresión de pasos efectuados de manera tal que el contacto con el suelo sea mantenido sin interrupción”.²

La simple marcha de los comienzos había llegado en ese instante a la codificación reglamentaria para hacer posible controlar adecuadamente las grandes competiciones internacionales: observa el espíritu de las reglas y separa con exactitud la marcha de la carrera pedestre. Precisamente allí, se sentaron las bases de lo que fue por muchos años la reglamentación.

Habían quedado atrás, en parte, las duras polémicas de los Juegos Olímpicos de 1924, cuando se dio el caso de descalificar en la primera de las dos eliminatorias al austriaco Rudolf Kuhnel; luego, el Tribunal de Apelaciones

² Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo. *Historia*. https://www.ecured.cu/Asociaci%C3%B3n_Internacional_de_Federaciones_de_Atletismo. Consulta: 8 de enero de 2017.

le permitió participar en la segunda donde nuevamente fue descalificado por los jueces que amenazaron retirarse de los juegos sino era respetada su decisión.

Estas discusiones y otras que pusieron en duda la credibilidad de la marcha en pista, determinaron la supresión de la disciplina de los Juegos Olímpicos a los que volverá en 1932 al prosperar una propuesta de la Federación Italiana, pero ya sobre 50 km, distancia que para algunos se adapta más a la modalidad de esta especialidad. Las diferencias entre aquella caminata de los comienzos y esta veloz actividad tan desarrollada mundialmente son variadas, actividad que alguna vez, en los Juegos de Olímpicos de 1904, se integró en el decatón, cuando era su cuarta prueba: las 880 yardas de marcha, disciplina que practicó por aquellos años Avery Brundage, quien luego sería el presidente del Comité Olímpico Internacional.

1.1.3. Marcha atlética clásica y moderna

Estas diferencias conceptuales y prácticas muestran una marcha clásica donde solo pretendían mantener un estilo depurado y ortodoxo por encima de la velocidad de ejecución; se buscaba, fundamentalmente, mantener el contacto con el suelo ininterrumpido, antes que un ritmo incrementado y que pusiera en dudas la legitimidad de su accionar. La técnica era espontánea, con una amplia longitud de zancada, un elevado ángulo del pie al tomar contacto con el suelo, que permitía el fácil juzgamiento de los gestos por parte del juez. Era una marcha ideal para recorrer largas distancias, en la cual predomina siempre la resistencia sobre la velocidad.

Por otro lado, la marcha moderna, producto de los grandes progresos que la investigación científica ha logrado al estudiar la técnica y los gestos; utiliza la

biodinámica, la mecánica y todos los avances que en el campo de la medicina y la tecnología se han podido emplear aplicados al deporte.

Esto, unido al mejoramiento de los métodos de entrenamiento, conduce a ritmos excepcionales de menos de cuarenta minutos para los 10 kilómetros, de 1 hora con 20 minutos para los 20 kilómetros, y de 3 horas con 40 minutos para los 50 kilómetros. Como se observa nada ha quedado al azar ni las distintas morfologías de cada atleta. Ahora nada se improvisa y todo se programa racionalmente.

En esta creciente popularidad de la marcha y su desarrollo no está ausente, sin lugar a dudas, el aporte alcanzado por la Copa Lugano que se disputó para la rama masculina por primera vez los días 15 y 16 de octubre de 1961 en esta ciudad suiza ubicada a orillas del lago del mismo nombre en el cantón de Tesino. Esta competición fue una creación del suizo Armando Libotte, quien entre el año de 1952 y 1976 integró el comité de marcha de la IAAF. Esta, conjuntamente con la Copa Eschborn, para damas, realizada inicialmente en esa localidad alemana en el año 1979, conforman desde 1987 la Copa Mundial de Marcha, a las que se suman una enorme variedad de torneos internacionales de alto nivel como la Copa Panamericana de Marcha y otros cientos de certámenes que en el mundo tienen significación por la calidad y el número de los atletas que intervienen y a los que se le ha sumado con gran éxito en los últimos años el *Challenge* de la IAAF.

La proliferación de pruebas femeninas luego de la recomendación del Comité de Marcha de la Federación Internacional, reunido en Roma en 1974, para que se incrementara en los programas nacionales la realización de pruebas de 3 000 y 5 000 metros para damas y la homologación de récords mundiales a partir de 1981 fueron otro signo del progreso de esta especialidad

en el sexo femenino. Estas compitieron posteriormente sobre 10 000 metros, incluidos desde 1985 en todos los campeonatos internacionales; fue incorporada a los Juegos Olímpicos en 1992 en Barcelona. Una distancia que a partir de 1999 es de 20 kilómetros.

La caminata avanza sin prisa, pero sin pausas como podrá observarse; cada día son más las personas que en todas partes del mundo la practican en los parques, los paseos y en las instalaciones deportivas. Niños, jóvenes y adultos pueden encontrar en este deporte el mejor pasaporte para su bienestar físico y un medio adecuado en la búsqueda de la superación personal que debe intentar alcanzar siempre todo ser humano. Para que su progreso no se vea entorpecido, la gran responsabilidad está en el fiel cumplimiento de las reglas y de la inflexibilidad de los jueces encargados en fiscalizarlas.

1.2. Definición oficial de marcha atlética

La marcha atlética es una rama del atletismo que se distingue del resto porque en su ejecución no debiera existir pérdida de contacto con el suelo, es decir, el marchista en ningún momento de la prueba debiera estar con ambos pies en el aire, acto que comúnmente se le conoce como fase de vuelo. Esto obliga a los marchistas a ejecutar una técnica muy peculiar con varias diferencias respecto a la técnica usual de un corredor.

Esta forma peculiar e interesante de caminar constituye lo que en la actualidad se conoce como marcha deportiva, marcha atlética o caminata. La mayoría de autores consultados coinciden en definirla como una actividad deportiva en la que se realiza un desplazamiento paso a paso, en la cual hay que mantener un contacto constante con el suelo de al menos uno de los dos

pies; además, el movimiento se debe realizar sin flexionar las rodillas. Todo esto se debe a las precisas exigencias de las reglas de competición.

Sin duda, se puede afirmar que la marcha atlética tiene como objetivo desplazar el cuerpo en una distancia determinada a la mayor velocidad posible. Sin embargo, el reglamento impone dos restricciones fundamentales que hacen que la marcha deportiva mantenga características similares a las de la marcha normal, como la ausencia de la fase de vuelo. Es importante resaltar que estas restricciones, junto a la obvia búsqueda de velocidad por parte del deportista, hacen que el patrón de marcha, visto externamente, parezca incómodo, forzado y antinatural.

Es importante resaltar que en el transcurrir de los años, en este ámbito deportivo, se han tenido criterios muy semejantes al tratar de definir la marcha atlética, pero todos poseen un particular énfasis en las exigencias técnicas que impone el artículo 230.1 del reglamento de la IAAF (Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo) que establece la definición oficial de marcha atlética: “La marcha atlética es una progresión de pasos ejecutados de modo que el atleta se mantenga en contacto con el suelo, a fin de que no se produzca pérdida de contacto visible. La pierna que avanza debe estar recta, (es decir, no doblada por la rodilla) desde el momento del primer contacto con el suelo hasta que se halle en posición vertical”.³

Para lograr determinar si existe o no una fase de vuelo, es decir, la pérdida de contacto con el suelo, muchos autores corroboran que en verdad, a determinada velocidad, hay una pérdida de contacto con el suelo que puede oscilar entre 0,005-0,05 milésimas de segundo, dependiendo de la velocidad y

³ Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo. *Reglamento de la IAAF, artículo 230.1*. <http://factorrunning.com/reglamento-competencias-atletismo/>. Consulta: 8 de enero de 2017.

de la clase de marchista, pero que son imperceptibles al ojo humano y que se observa claramente con la ayuda de medios tecnológicos sofisticados.

1.3. Análisis de las fases y períodos de la marcha atlética

En el análisis de la marcha atlética se considera un ciclo como el movimiento ejecutado por una sola extremidad inferior, desde el contacto con el suelo hasta el siguiente contacto del mismo talón. Por consiguiente, en un ciclo completo de marcha atlética, de la misma manera que en marcha normal, cada extremidad inferior pasa por dos fases fundamentales:

- Fase de apoyo: se refiere al tiempo que se mantiene el pie en contacto con el suelo, este representa aproximadamente el 50 % del ciclo.
- Fase de oscilación: es el tiempo que el pie, se encuentra suspendido en el aire, compuesto aproximadamente por la otra mitad del ciclo.

Para profundizar un poco más su estudio, se puede dividir el ciclo en más fases, con mínimas diferencias:

- Fase de apoyo doble: se refiere al momento preciso cuando ambos pies se encuentran en contacto con la superficie a través del talón del pie adelantado y las puntas de los dedos del pie opuesto; es decir, coincide con la fase de tracción y el final de la fase de impulso. Esta fase es importante porque determina la longitud del paso, produciéndose una mayor flexión del tobillo en el instante del contacto del talón y, también, una mayor flexión del pie al momento del despegue. La duración de esta fase es muy corta y está en función de la velocidad que lleva el marchista.

Figura 1. **Fase de apoyo doble**



Fuente: ISFTIC España. *Guía para el aprendizaje del atletismo*. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/50_educacion_atletismo/curso/archivos/tecnica_marcha.htm. Consulta: 8 de enero de 2017.

- Fase de tracción: inicia luego de colocar el talón del pie adelantado con el suelo y abandonar el otro pie contrapuesto. Esta fase finaliza cuando el centro de gravedad del marchista se encuentra sobre la vertical del apoyo. Se llama fase de tracción por la acción de presión contra el suelo que ejerce la pierna de avance, esto es, cuando el atleta desplaza su cuerpo (que queda atrás) hacia adelante.

Figura 2. **Fase de tracción**



Fuente: ISFTIC España. *Guía para el aprendizaje del atletismo*. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/50_educacion_atletismo/curso/archivos/tecnica_marcha.htm. Consulta: 8 de enero de 2017.

- Fase de apoyo simple o relajación: comienza al momento de que el centro de gravedad del marchista se encuentra sobre la vertical de la pierna de apoyo. En esta fase la planta del pie se encuentra sobre el suelo, la pierna de dicho pie está totalmente recta, la rodilla rígida y la cadera en el mismo plano de los hombros y mayormente elevada del lado de la pierna de apoyo.

Figura 3. **Fase de apoyo simple o relajación**



Fuente: ISFTIC España. *Guía para el aprendizaje del atletismo*. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/50_educacion_atletismo/curso/archivos/tecnica_marcha.htm. Consulta: 8 de enero de 2017.

- Fase de impulso: se refiere al instante en que la proyección del centro de gravedad supera la vertical de la pierna de apoyo y finaliza al momento que la extremidad trasera pierde contacto con el suelo y continúa avanzando para extenderse y nuevamente contactar la superficie, momento en que se inicia la fase de doble apoyo y se vuelve a repetir el ciclo. Es importante mencionar que la posición del tronco es casi vertical con una inclinación máxima de unos 5° aproximadamente y se produce en el momento que la pierna de avance busca el contacto con el suelo, mientras que cuando se encuentra ya en el doble apoyo el tronco vuelve más a la vertical.

Figura 4. **Fase de impulso**



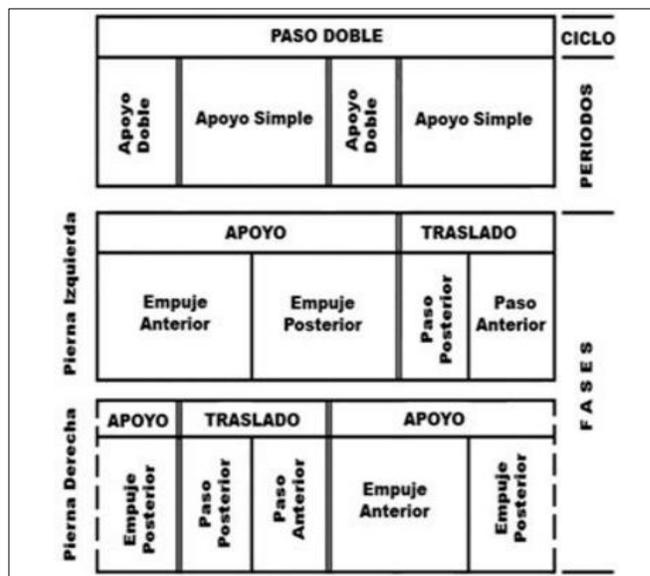
Fuente: ISFTIC España. *Guía para el aprendizaje del atletismo*. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/50_educacion_atletismo/curso/archivos/tecnica_marcha.htm. Consulta: 8 de enero de 2017.

Los autores que describen con mayor claridad las fases y períodos de la marcha atlética son Ozolin & Markov quienes, afirman que, en un ciclo completo, existe una alternancia de apoyos con uno y con ambos pies; es decir, hay dos períodos de apoyo simple y dos períodos de apoyo doble. En cada período los movimientos de cada pierna se efectúan en dos fases. El período de apoyo se conforma de las fases de apoyo anterior y apoyo posterior (el impulso). El período de avance incluye las fases de traslado posterior y traslado anterior, las cuales se dividen en función del momento en que la pierna de avance cruza la vertical del cuerpo.

- Período de apoyo: tiene tres fases:
 - Fase de apoyo anterior: es cuando el talón hace contacto con el suelo.
 - Fase del momento vertical de la pierna de apoyo.

- Fase de apoyo posterior: es el instante de separación de la pierna de avance con el suelo, es decir, el impulso.
- Período de avance o traslado. También se subdivide en tres fases:
 - Fase del traslado posterior: momento que va desde el impulso hasta que el centro de gravedad esté sobre la vertical de la pierna de apoyo.
 - Fase del momento vertical de la pierna de avance.
 - Fase del traslado anterior: instante que va desde la vertical de la pierna de avance hasta el nuevo contacto con el talón.

Figura 5. **Fases de marcha atlética según Ozolin & Markov**



Fuente: Efdeportes. *Biomecánica de la marcha atlética*. <http://www.efdeportes.com/efd217/biomecanica-de-la-marcha-atletica.htm>. Consulta: 10 de enero de 2017.

1.4. Cinética de la marcha atlética

En el evento de la marcha atlética, la cinética toma un papel relevante ya que permite analizar las fuerzas que actúan durante su ejecución. En el caso de la marcha, resulta del balance entre sus fuerzas internas y externas. La fuente energética de las fuerzas motoras en la marcha está ubicada en los músculos. Pero las fuerzas internas que se relacionan con las fuerzas de tensión de los músculos no pueden actuar por sí solas para trasladar el cuerpo en el espacio. Por lo que son necesarias las fuerzas externas: la fuerza de gravedad, la reacción del apoyo y la resistencia del medio (fricción), que surgen como resultado de la interacción entre el cuerpo del hombre y el apoyo.

- La fuerza de gravedad: actúa verticalmente de arriba hacia abajo y ayuda al movimiento solo cuando este se encuentra dirigido hacia abajo; si está dirigido hacia arriba lo frena.
- La fuerza de reacción del apoyo: es aquella que despliega el suelo sobre el marchista, es igual en magnitud y de sentido contrario a la fuerza que realiza el sujeto sobre el mismo. Se expresa en tres componentes: antero-posterior, vertical y lateral.

La componente antero-posterior actúa durante el contacto de talón, frenando el movimiento hacia delante, y en el despegue actúa a través de la punta del pie, proporcionando un punto de apoyo para generar la propulsión o impulso hacia delante. Se le conoce como movimiento horizontal y es aquel que debe prevalecer y, junto con el movimiento vertical, debe producirse durante el mayor tiempo posible.

También, la componente vertical actúa contraria al peso del cuerpo, contrarrestando la acción de la fuerza de gravedad, y mediante la elevación del tronco evitará un excesivo descenso del centro de gravedad.

A la componente lateral no se le presta mucha importancia, sin embargo, esta fuerza indica la fase de deceleración de la caída de la cadera y de las extremidades y también la preparación para el siguiente paso.

- La fuerza de fricción o resistencia del medio. Aparece siempre que un cuerpo se mueve o intenta moverse en contacto con otro cuerpo. La medida de la resistencia de fricción es la fuerza necesaria para mantener el movimiento uniforme y equilibrado de un cuerpo y varía según la naturaleza del suelo, del calzado y de las fuerzas establecidas entre éstos.

La efectividad del avance del marchista dependerá de las fuerzas positivas de la marcha: el impulso y la inercia.

El impulso es la fuerza que proyecta hacia delante la masa corporal, generado por la palanca del pie y el tobillo, al exigir el reglamento que la pierna se mantenga extendida en el apoyo vertical. El marchista inicia el impulso de talón, con el pie adelantado al centro de gravedad del cuerpo, acción que como se mencionó previamente en los ciclos y fases de la marcha se denomina tracción.

La inercia es la fuerza resultante del impulso y de la frecuencia de zancada y debe ser aprovechada al máximo, imprimiéndole el menor freno posible a la toma de contacto sobre el suelo.

1.5. Efectividad de la marcha atlética

La marcha atlética es una actividad de fondo, es decir, de largas distancias, en la que intervienen actitudes y gestos precisos que exigen mucha voluntad, gran resistencia mental y física, aguante y fuerza. Igualmente, se debe tener presente que el paso en la marcha atlética está en función de las reglas de competición impuestas que obligan al marchista a modificar la naturalidad de la marcha normal y lo someten a un trabajo articular y muscular extraordinario, pero que permiten alcanzar velocidades muy superiores. Esta velocidad, según Ozolin & Markov, llega a ser de 2 a 2,5 veces superior a la de la marcha común, aunque es difícil mantenerla a lo largo de toda la prueba. Así, en una prueba de 10 km, la velocidad disminuye gradualmente desde la salida hasta la llegada, la misma que está en dependencia, principalmente, de la longitud y frecuencia de la zancada. Para alcanzar altas velocidades, se puede incrementar una de estas dos variables o combinar las dos. Lógicamente, en estas dos variables influirán las características propias del sujeto, como su complexión física y su edad, pero, además, será esencial una técnica adecuada.

La técnica de la marcha atlética es semejante a la de la marcha normal, pero más compleja en coordinación y más efectiva. Su dominio es esencial, ya que una técnica eficaz y consolidada, determina el nivel competitivo del marchista, favoreciendo la eficacia de los movimientos, a la vez que debe cumplir con las reglas de competición. Por lo tanto, el logro de los altos resultados está ligado estrechamente con una técnica correcta.

El pasó o zancada debe ser largo pero económico, ya que un aumento sumamente grande de su longitud lleva a la pérdida innecesaria de energía, en detrimento de la técnica y de los resultados deportivos.

Por lo tanto, el marchista debe encontrar los valores óptimos que se ajusten a sus dimensiones anatómicas y a sus habilidades físicas. Se necesita realizar movimientos articulares diferentes a los ejecutados en una marcha normal para intentar alargar los miembros inferiores y así, lograr una mayor amplitud de la zancada, pero a la vez disminuir al máximo los desplazamientos del centro de gravedad, lo que hará que el gasto energético sea menor. Por ello, los atletas deben realizar una marcha lo más rectilínea posible, con escasos desplazamientos laterales y también con menos desplazamientos verticales que en la marcha normal. A esto contribuyen también los acentuados movimientos de la pelvis.

1.6. Faltas y violaciones técnicas al reglamento de competición

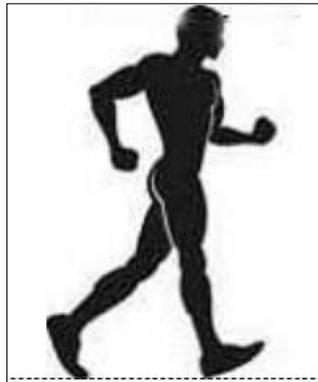
1.6.1. Pérdida de contacto con el suelo

Durante la marcha, el primer paso se da cuando el atleta está transfiriendo el peso total de su cuerpo de un pie al otro. Si el pie de apoyo se levanta antes que el pie de avance toque el suelo, esto significa que se ha interrumpido el contacto continuo con el suelo. Por lo que se ha cometido una falta por parte del atleta.

La pérdida de contacto con el suelo es una de las principales razones de un gran número de descalificaciones en eventos y campeonatos de atletismo a nivel nacional e internacional. Es por ello, de vital importancia que el pie de avance del marchista esté en contacto con la superficie antes de que permita que el pie de apoyo se levante desde el suelo.

Cuando ambos pies se encuentran en contacto con el suelo se denomina doble apoyo. El juez de marcha debe observar que esta situación ocurre a cada paso, aunque sea por una fracción de segundo.

Figura 6. **Contacto con el suelo, doble apoyo**



Fuente: Race Walk Judging & Coaching Handbook. *Little Athletics Victoria*. <http://www.tigch.nl/snelwandelen/judging-coaching.pdf>. Consulta: 10 de enero de 2017.

Las causas posibles de la pérdida de contacto con el suelo se pueden resumir en dos principales: Levantar la pierna trasera rápidamente y el uso de una larga amplitud de zancada.

Cuando se cae en el error de levantar la pierna trasera muy antes de terminar la zancada, el cuerpo no tiene soporte, por lo que el pie de avance debe caer ya sea frente al marchista o bajo el centro de gravedad para poder sostenerlo. Ahora bien, cuando el atleta durante la ejecución de la marcha usa una zancada excesivamente larga, es también muy susceptible de perder el contacto con el suelo. Esto se nota a menudo cuando el atleta intenta aumentar su velocidad al inicio o final de un cierre desesperado.

1.6.2. Flexión de rodilla

La definición de marcha atlética exige que la pierna de avance se mantenga recta desde el primer punto de contacto con el suelo hasta que el atleta se halle en posición vertical, a 90 grados del suelo. Esto significa, de forma resumida, que el sujeto en acción no debe doblar la rodilla en ese lapso de tiempo.

En el caso de atletas con flexión de rodilla que suele ocurrir continuamente, dicha situación tiene dos causas principales: la primera es que no se adquiere un gesto técnico correcto desde el inicio de su formación atlética, y caen en el error de ejecutar una caminata normal que no es de competencia; la segunda es debida a la falta de una adecuada formación del sistema muscular a nivel de los miembros inferiores.

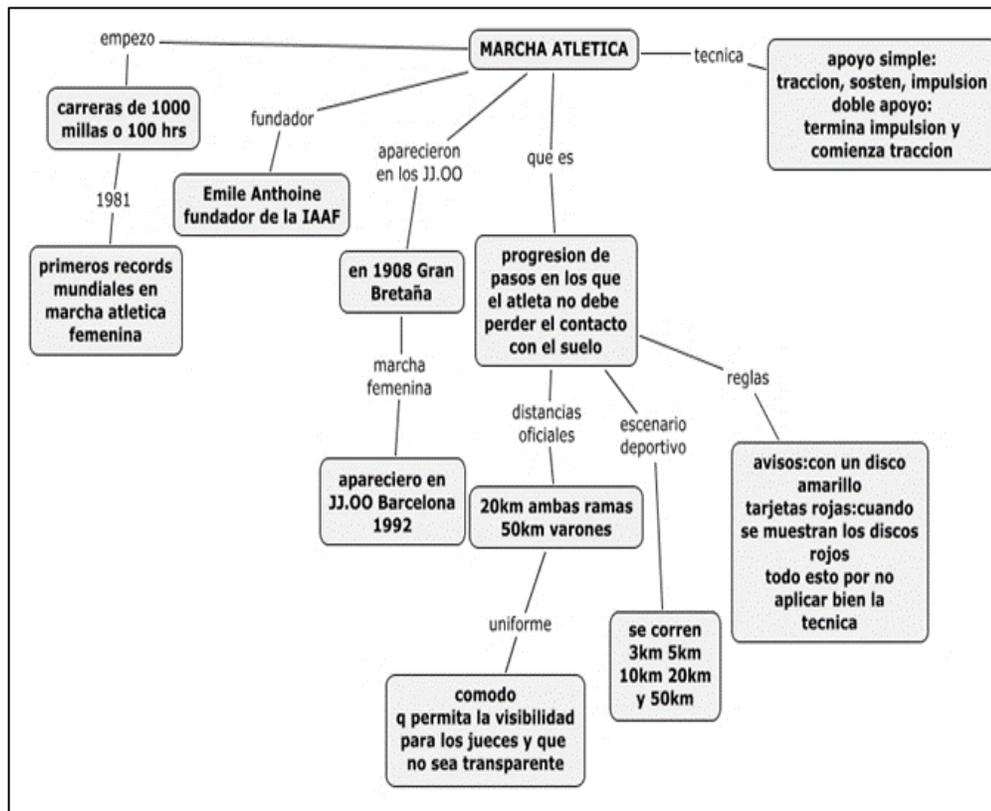
Figura 7. Flexión de rodilla



Fuente: Race Walk Judging & Coaching Handbook. *Little Athletics Victoria*. <http://www.tigch.nl/snelwandelen/judging-coaching.pdf>. Consulta: 10 de enero de 2017.

Para finalizar este primer capítulo, a continuación, se muestra un mapa conceptual que resume de forma visual, la teoría fundamental de la marcha atlética.

Figura 8. **Mapa conceptual, generalidades de la marcha atlética**



Fuente: Efedportes. *Generalidades de la marcha atlética.*

<http://marchaenatletismo.blogspot.com/>. Consulta: 10 de enero de 2017.

2. EL ARTE DE JUZGAR EN LA MARCHA ATLÉTICA

El propósito fundamental de tener jueces de marcha en cada evento de marcha atlética es para asegurar la equidad de la competencia para todos los marchistas. En la práctica sólo hay dos cosas que los jueces de la marcha buscan y se enfocan: la existencia de flexión de rodilla y la pérdida del contacto aparente y continuo con el suelo.

Todas las decisiones de los jueces se hacen de acuerdo a lo que se ve por el ojo humano, sin ayuda tecnológica, la única ayuda tal vez son las gafas que pueda utilizar algún juez. No se puede usar equipo de cámara o video para juzgar durante o después de una competencia. A pesar de que el ojo humano no es cien por ciento perfecto para juzgar el contacto con el suelo de un marchista, este es el método que el deporte ha decidido utilizar a lo largo de los años.

Cuando un juez de marcha observa a un competidor violar una o ambas reglas de la marcha, lo denunciará y al mismo tiempo mostrará al competidor una llamada de atención utilizando una tarjeta visual que le indica el tipo de falta cometida. En esta tarjeta puede estar el símbolo para la pérdida de contacto con el suelo o el símbolo que indica flexión de rodilla. Estas llamadas de atención son advertencias. Advertencias que por sí solas, no descalifican a un marchista de la competencia.

Cuando el marchista está reiteradamente perdiendo el contacto con el suelo y/o aterrizando con la rodilla doblada, el juez mostrará una descalificación (tarjeta roja) frente al competidor sin necesidad de expresar alguna palabra de forma verbal.

Solamente el juez principal tiene la autoridad de notificar al caminante que ha sido descalificado. Esta notificación se hace visualmente mostrando al marchista una paleta roja.

2.1. Principios básicos del juzgamiento en la marcha atlética

La misión a desempeñar por el juez de marcha es asegurar que ningún competidor finaliza la prueba si ha incumplido con la definición especificada en el artículo 230.1 de la IAAF.

Cada juez de marcha debe observar a todos los competidores en su juzgamiento, asegurándose de que está en una posición de buena visibilidad para evaluar que cada competidor marcha conforme al reglamento. Si, en la opinión del juez, basada en sus propias observaciones, cualquier competidor parece propenso a infringir el reglamento, entonces ese juez debe mostrar una paleta amarilla al competidor. En otras palabras, si el juez no está completamente satisfecho de que el atleta esté cumpliendo totalmente con el reglamento, debe advertir al competidor mostrándole una paleta amarilla con el símbolo que representa la infracción.

Si el juez cree que el marchista corre el riesgo de perder el contacto con el suelo o que el mismo sujeto puede no estar llevando su pierna de apoyo completamente recta, de acuerdo con el artículo 230.1 del reglamento de la IAAF, entonces el juez deberá avisar al competidor con la tarjeta amarilla

mostrándole la infracción cometida. Un juez puede mostrar una paleta amarilla a cada competidor una sola vez por cada infracción, es decir, por pérdida de contacto o por no tener la pierna de avance recta desde el momento del primer contacto con el suelo hasta que se halla en posición vertical.

Dos paletas amarillas como máximo. Cada juez registrará todas las paletas amarillas mostradas, indicando el número del competidor, infracción y hora cuando fue mostrada.

Si el juez decidiera que el competidor claramente no está marchando conforme a la definición en el artículo 230 del reglamento de la IAAF, el juez registrará la infracción en una tarjeta roja y enviará la tarjeta roja al secretario para que la publique. Una vez un juez ha emitido una tarjeta roja sobre un competidor, entonces ese competidor no será juzgado más por ese juez.

Es muy importante tener en cuenta 2 aspectos:

- El juez no puede enviar una segunda tarjeta roja sobre un competidor.
- El juez no puede mostrar una paleta amarilla a un competidor después de haber dado a ese atleta una tarjeta roja.

Al emitir una tarjeta roja, el juez no está autorizado a comunicar esta decisión de ningún modo al competidor afectado. El juez rellenará la tarjeta roja indicando la prueba, la hora cuando se emitió la tarjeta, el número del competidor, el número del juez, la infracción (es decir, pérdida de contacto o flexión de rodilla) y finalmente la propia firma del juez. Esta tarjeta debería ser entregada tan rápido como sea posible al secretario.

Los jueces deben llevar un registro de todas las tarjetas rojas que emiten. Los jueces, excepto el juez jefe, deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Un juez juzga solo en el área que le ha sido asignada por el juez jefe.
- Un juez no debe hablar con otros, excepto el juez jefe, sobre temas relativos al juzgamiento de los competidores en la carrera.
- Un juez no debe dejar su puesto sin permiso y no tampoco debe asumir que la carrera ha finalizado hasta que el último competidor ha completado la carrera.
- Un juez debe llegar al menos una hora antes de la prueba y presentarse al juez jefe.
- Después de la finalización de la carrera, los jueces deben entregar sus registros completos al juez jefe quien informará a los jueces cuándo se pueden ir. Esto es necesario dado que puede ser necesario que un juez en particular brinde testimonio en caso de controversia.
- Todos los jueces deben asistir a la reunión poscompetición dirigida por el juez jefe. El juez jefe dirige el debate y la reunión informativa sobre la carrera y trata cualquier asunto o discrepancia en el juzgamiento.
- Debe también clarificarse que un juez tiene que mostrar una advertencia a un competidor, enseñándole una paleta amarilla con el símbolo de la infracción a cada lado, antes de emitir una tarjeta roja, con las siguientes excepciones:

Figura 10. **Diseño de la tarjeta roja que utiliza el juez de marcha**

Judge's Red Card			
Distance:			
Men/Women			
Bib Number			
Reason: <small>(fill the time where the case)</small>		Hour	Minute
		Hour	Minute
Judge's No.:			
Judge's Signature:			

Fuente: IAAF. *Guía de para juzgar la marcha atlética*. <https://www.iaaf.org/download/download?filename=829b6e82-c23b-4072-96c2-705a3c7d2ccc.pdf>. Consulta: 15 de enero de 2017.

2.2. **Número de jueces**

El número de jueces requerido para las carreras es el siguiente:

- Pista cubierta (pista de 200 m): cinco (incluido el juez jefe).
- Pista al aire libre (pista de 400 m): seis (incluido el juez jefe).
- Circuito en carretera (1 km-2 km): dependiendo el tamaño y la forma del circuito, un mínimo de seis y un máximo de nueve (incluyendo el juez jefe).

Como guía, en carreras en pista, los jueces deberían estar situados uno en cada curva y uno o dos en cada recta. En un circuito en carretera se usa un sistema similar. En todas las carreras es prudente que el juez jefe y un número adecuado de otros jueces se dirijan a la recta de meta, o al menos en los últimos 100m. Todos los jueces deberían estar preparados con su material necesario: uniforme, distintivo o brazalete, tarjetas de registro, tarjetas rojas, paletas amarillas y un bolígrafo o lápiz adecuado. Ante inclemencias del tiempo, deberían también tener los medios para mantenerse a sí mismos y su documentación secos.

2.3. Resumen de las responsabilidades de los jueces de marcha atlética

- Estar disponible al menos una hora antes de la salida programada.
- Si no se ha decidido de otra forma, elegir un juez jefe.
- Seguir las instrucciones recibidas del juez jefe.
- Mostrar una paleta amarilla a un competidor que está en riesgo de incumplir las reglas y registrar el motivo de dicha paleta amarilla.
- Emitir una tarjeta roja sobre cualquier competidor que esté infringiendo las reglas.
- Rellenar la hoja resumen con exactitud y entregarla al juez jefe o al secretario.

- Informar al juez jefe tras la prueba y confirmar que todas las tarjetas rojas han sido recibidas.
- Estar disponible después de la carrera para una reunión informativa y debate y para contestar cualquier pregunta planteada por el juez jefe.
- Cuando emita una tarjeta roja el juez no debe tener lugar a dudas respecto a su decisión.

2.4. Posición de juzgamiento

2.4.1. A nivel general

Un juez debería situarse en una posición que presente una vista clara de las piernas de los competidores. En una prueba en pista, la posición ideal es en las calles exteriores donde el bordillo interior elevado no obstaculiza la vista de los pies del competidor. Para una prueba en carretera, el juez debería, donde sea posible, moverse a una posición donde pueda ver claramente el contacto con la superficie de la carretera.

Una buena posición de juzgamiento es la que permite un ángulo de visión horizontal de 45 grados desde el competidor conforme se aproxima hacia el juez. Las zonas clave de peligro, donde se debería prestar mayor atención, son:

- Durante la aceleración en la salida
- Al adelantar a otro competidor
- Durante la recta de meta
- En medio de un grupo
- En torno a los puntos de giro

2.4.2. En carretera

Las posiciones de juzgamiento indicadas en el siguiente mapa están recomendadas para un circuito de 1 a 2 kilómetros, donde se requieren ocho jueces para cubrir la carrera adecuadamente. El número específico de jueces para juzgar adecuadamente el circuito depende de la disposición del circuito.

Las zonas de carretera que es importante observar son:

- Puntos de giro
- Zonas con pendiente
- Giros bruscos
- Puestos de bebidas, esponjas y avituallamientos

2.5. Jerarquía de los jueces de marcha

2.5.1. El juez jefe

Normalmente el juez jefe se situará en, o cerca de, la línea de meta durante la carrera, particularmente en un circuito cerrado. Gran parte dependerá del tipo de sistema de comunicación usado entre el juez jefe, los adjuntos del juez jefe y el secretario. Sin ninguna duda, uno de los factores más importantes es la entrega de las tarjetas rojas por parte de los jueces al juez jefe y al secretario y hay varios modos en los que estas pueden ser comunicadas entre el juez jefe y los jueces. En cualquier caso, esto debe ser hecho con la máxima velocidad.

El método de comunicación más efectivo es con el juez jefe y el secretario en una posición fija, con cada juez individual teniendo un corredor, ciclista o patinador para entregar las tarjetas al secretario conforme son emitidas.

Después de entregar las tarjetas al secretario, el corredor debería volver inmediatamente junto al juez individual. Al recibir la tarjeta roja, el secretario debe primero examinar la tarjeta para ver si está correctamente emitida. Si la tarjeta no es correcta, en cuanto al número del atleta, hora, motivo e identificación del juez, debería ser devuelta al juez del que provino. El juez jefe no debería tomar ninguna acción hasta que una tarjeta correcta sea recibida.

Habiendo comprobado que la tarjeta roja se ha expuesto correctamente, el secretario introducirá la información en la hoja resumen del juzgamiento. El secretario informará inmediatamente al juez jefe cuando se han registrado tres tarjetas rojas contra cualquier atleta en particular. El juez jefe o los adjuntos del juez jefe deberían entonces, lo antes posible, descalificar a ese competidor. Antes de que esta notificación tenga lugar, el juez jefe debería recibir las tarjetas (al menos tres) por parte del secretario para comprobar los siguientes puntos:

- Todas las tarjetas están correctamente emitidas
- Todas las tarjetas son para el mismo corredor
- No hay dos tarjetas del mismo juez
- No hay dos tarjetas de jueces de la misma nacionalidad

2.5.1.1. Intervención en la descalificación

Conforme el competidor a ser descalificado se aproxima al juez jefe, el juez jefe debería dejar clara su acción sosteniendo el indicador rojo de DQ

(descalificado) a la altura del hombro delante del competidor infractor. Debe tenerse cuidado de no obstruir a otros competidores. En ciertos campeonatos internacionales avalados por la IAAF, el juez jefe tiene el poder de descalificar a un competidor en los últimos 100 metros cuando su modo de progresión infringe el reglamento, sin tener en cuenta si el atleta ha recibido alguna tarjeta roja previa.

2.5.1.2. Procedimientos poscompetición

Inmediatamente después de la prueba y tan pronto el juez jefe esté seguro de que no se recibirán más tarjetas, el juez jefe y el secretario deberían comprobar la hoja resumen del juzgamiento y todas las descalificaciones deben ser notificadas al juez árbitro. El resultado de la prueba no debería ser declarado como definitivo hasta que esto se haya producido.

Poco después de la carrera, el juez jefe y los otros jueces deberían reunirse para analizar la prueba. Las hojas resumen de los jueces deberían ser recopiladas y llevar a cabo una comprobación para asegurarse de que ninguna tarjeta roja ha sido extraviada o no registrada. Durante esta reunión, el juez jefe dirigirá una reunión informativa de todos los jueces, discutiendo cualquier asunto que surgiera durante la competición y también cualquier asunto del juzgamiento.

2.5.1.3. Resumen de las funciones del juez jefe

Entre sus deberes principales se encuentran:

- Dirigir una reunión previa a la prueba para asignar a los jueces a sus respectivas zonas de juzgamiento y explicar el proceso de juzgamiento a aplicar durante la carrera.

- Asegurarse de que los jueces tienen materiales de juzgamiento apropiados.
- Trabajar atentamente con el secretario para asegurarse de que todas las tarjetas rojas están emitidas y registradas correctamente.
- Notificar a los competidores su descalificación tan pronto como sea posible, después de verificar que tres tarjetas rojas de tres jueces diferentes han sido registradas.
- Asegurarse de que el tablón de anuncios es usado correctamente durante la carrera. La tercera tarjeta roja debería ser publicada en el tablón incluso si el juez jefe no ha notificado al atleta su descalificación.
- Comprobar que los resultados oficiales son correctos y asegurarse de que la hoja resumen del juzgamiento está disponible para todos los equipos y en los resultados oficiales.
- Dirigir una reunión poscompetición del panel de juzgamiento para revisar la prueba, presentar las hojas resumen del juzgamiento para su análisis y dirigir un debate sobre cualquier problema o discrepancia.

2.6. El secretario

2.6.1. Funciones principales

El secretario es de vital importancia para el juez jefe, especialmente si se trata de una competición con muchos participantes.

La principal función del secretario es recibir todas las tarjetas rojas provenientes de los jueces y registrarlas en la hoja resumen del jurado de marcha y asegurarse de que las tarjetas se reflejen en el tablero de anuncios. El secretario informará al juez jefe cuando un competidor haya recibido tres tarjetas rojas de tres jueces diferentes.

En resumen, el secretario realiza 3 principales funciones:

- Recopilar las tarjetas rojas de los jueces y registrar la información en la hoja resumen del juzgamiento.
- Notificar al operador del tablero de anuncios las tarjetas rojas.
- Notificar inmediatamente al juez jefe y adjuntos, si es pertinente, cuando se han recibido tres tarjetas rojas de tres jueces diferentes.

2.7. Tipos de advertencias o amonestaciones

2.7.1. Tarjeta amarilla

Es utilizada cuando un juez no esté completamente satisfecho con que un marchista cumpla con la definición de la marcha según el reglamento de la IAAF.

Cuando sea posible, mostrará al atleta una paleta amarilla que indique la infracción que ha cometido. Un atleta no podrá recibir una segunda tarjeta amarilla del mismo juez por la misma infracción. Habiendo avisado a un atleta, el juez tiene que informar de esta acción al juez jefe después de la competición.

2.7.2. Tarjeta roja

Cuando un juez observa a un atleta infringiendo el artículo 230.1 del reglamento de la IAAF, bien por pérdida visible de contacto o por doblar la rodilla en cualquier parte de la competición, el juez enviará una tarjeta o paleta roja al juez jefe.

2.8. Descalificación

- Cuando tres tarjetas rojas de tres jueces diferentes hayan sido enviadas al juez jefe del mismo atleta, el atleta será descalificado e informado de esta descalificación por el juez jefe o su adjunto mostrando al atleta un disco rojo. La ausencia de notificación no conllevará la recalificación de un atleta descalificado.
- En todas las competiciones, ya sean directamente controladas por la IAAF o se desarrollen con su autorización, en ninguna circunstancia las tarjetas rojas de dos jueces de la misma nacionalidad tendrán la facultad de descalificar.
- En las pruebas en pista, un atleta que es descalificado tiene que abandonar la pista inmediatamente.
- En las pruebas en carretera, el atleta, inmediatamente después de ser descalificado, se quitará los dorsales de identificación y saldrá del circuito (ruta).
- Uno o más tableros de anuncios se colocarán en el circuito y cerca de la llegada, para mantener a los atletas informados del número de tarjetas

rojas que han sido enviadas al juez jefe para cada atleta. El símbolo de cada infracción cometida deberá igualmente figurar en el tablero de anuncios.

- En todas las competiciones de la IAAF, aparatos informáticos portátiles con capacidad de transmisión deben ser utilizados por los jueces para comunicar todas las tarjetas rojas al secretario y al tablero de anuncios. Para el resto de competiciones en las que no se utilice el sistema citado, el juez jefe comunicará al juez árbitro, inmediatamente después del final de la prueba, la identidad de todos los atletas descalificados, con el número de dorsal, la hora de la notificación y el motivo de la infracción. El procedimiento será el mismo para todos los atletas que hayan recibido tarjetas rojas.

2.9. El tablero de anuncios

El tablero de anuncios es conocido también como tablero de descalificaciones. El propósito de este tablero es, principalmente, mantener informados a los competidores sobre el número de tarjetas rojas que ha recibido el secretario para cada uno de los competidores.

Su estructura es simple: una columna o serie de ellas con los números de los competidores, y con tres espacios en blanco después de cada número. El tablero debe situarse en una posición que realmente sea accesible al secretario y en donde el tablero y su contenido puedan ser vistos con facilidad por todos los competidores.

Cuando el secretario recibe una tarjeta roja, y una vez que haya sido verificada por el juez jefe y anotada en la hoja resumen del jurado de marcha,

se colocará un símbolo con la infracción realizada en el primer espacio libre situado al lado del número del competidor sancionado.

Cuando se recibe la segunda advertencia, se colocará un segundo símbolo en el segundo espacio, y así sucesivamente. Cuando aparecen tres símbolos al lado del número de un competidor, significa que dicho competidor ha sido descalificado.

El tamaño del tablero requerido dependerá del número de competidores en la prueba. Lo ideal es mostrar todos los números de los competidores en el tablero antes del comienzo de la prueba y en orden numérico, de modo que los competidores sepan dónde mirar. Sin embargo, con muchos participantes, es mejor trabajar con el tablero utilizando números solamente cuando llegan las tarjetas rojas, es decir, si el número de un competidor no está en el tablero, no se han recibido tarjetas rojas para ese competidor.

El tablero debe ser organizado por el secretario o por un operador encargado del tablero de anuncios en colaboración con el secretario, y comprobado por el juez jefe. Existen dos tipos de tableros: manual y electrónico.

Figura 11. **Tablero de anuncios manual**



Fuente: Reglamento IAAF. *La marcha atlética: una guía para juzgar y organizar*.
http://issuu.com/rfea-cnj/docs/la_marcha_atletica_spa/29. Consulta: 18 de enero de 2017.

En la práctica, el tablero puede ser usado solamente en un circuito de vueltas o en la pista, donde el tablero puede ser situado en una posición tal que los atletas puedan fácilmente ver y leer lo que está en el tablero cada vez que pasan cerca de su ubicación.

El tablero electrónico es el más utilizado actualmente y la marca que utiliza la IAAF para estos tableros en sus competiciones es la marca japonesa Seiko.

Figura 12. **Tablero electrónico de anuncios Seiko**



Fuente: Reglamento IAAF. *La marcha atlética: una guía para juzgar y organizar*.
http://issuu.com/rfea-cnjl/docs/la_marcha_atletica_spa/29. Consulta: 18 de enero de 2017.

2.10. Recopilación de datos y tablero de anuncios electrónicos

En todas las competiciones de la IAAF, los jueces deben usar dispositivos informáticos de mano con capacidad de transmisión de datos para comunicar las tarjetas rojas al secretario y al tablero de anuncios electrónicos.

2.10.1. Estructura del sistema

- Ocho terminales de mano para el uso de los jueces. Los terminales estarán conectados entre sí y con el ordenador central en el que se recogen los datos, mediante cable o conexión inalámbrica.
- Un tablero electrónico de anuncios para indicar el número de infracciones cometidas.

- Un ordenador que actúa como recepción de la información.
- Una impresora de tarjetas rojas.

2.10.2. Modo de operación

Cada juez de marcha, en su posición en el circuito, tiene acceso a un terminal de mano. Este terminal, operado normalmente por un secretario o asistente del juez, permite que la adjudicación de tarjetas rojas del juez sea transmitida electrónicamente hasta el punto de control.

2.10.3. Dispositivo o terminal de cada juez

En este dispositivo cada juez debe introducir la siguiente información:

- El número del juez (1 - 8).
- El número del dorsal del atleta, con un máximo de 4 dígitos.
- La infracción cometida: rodilla doblada (flexión) o pérdida de contacto con el suelo (elevación/vuelo)
- Confirmación de la información introducida: esta información es transmitida al ordenador que actúa como recepción de la información situado en el punto de control, donde todos los detalles son revisados con exactitud.

Figura 13. **Terminal electrónico utilizado por los jueces de marcha**



Fuente: Seiko. *Race walking judging system*. <http://www.seiko.co.jp/en/branding/sp/sports/team/road.html>. Consulta: 18 de enero de 2017.

2.11. Punto de control

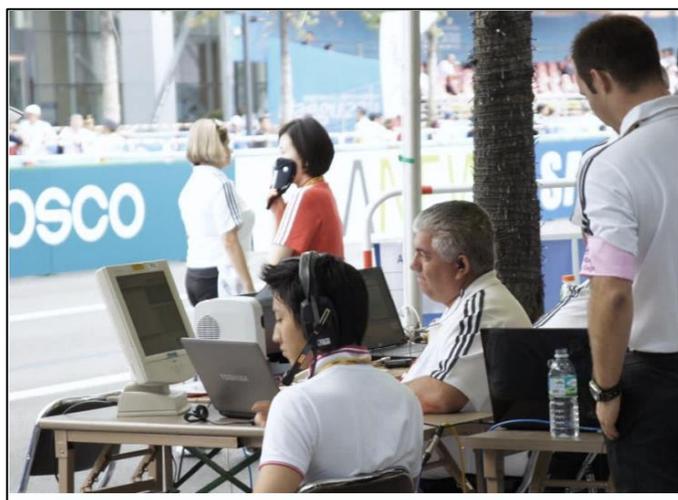
En el punto de control, el dispositivo recolector de información registra automáticamente, con la hora en que se ha recibido, toda la información que ha sido recibida desde los jueces y entonces se verifica que el dorsal del atleta sea válido. Si no lo es, un mensaje de error es remitido al terminal del juez que envió la información.

Si la tarjeta roja esta duplicada por parte del mismo juez, no se remite mensaje de error. Sin embargo, la información queda registrada, pero no se realiza acción alguna. Si la información recibida es válida, entonces, se procede a realizar lo siguiente:

- Una tarjeta roja se imprime en el punto de control.

- El tablero de anuncios es actualizado añadiendo el símbolo de la infracción al correspondiente número de dorsal. Si es la primera tarjeta roja que recibe el atleta, entonces, el número del dorsal se añade al tablero por debajo del último número.
- Los números de dorsal no están en un orden numérico, sino en el orden en que los atletas han recibido su primera tarjeta roja. Esto quiere decir que los números de dorsal se mantienen siempre en la misma posición durante toda la carrera.
- El juez recibe una confirmación (acuse de recibo).
- Se envía a la persona encargada de la gestión de los resultados la información validada.

Figura 14. **Punto de control**



Fuente: Reglamento IAAF. *La marcha atlética: una guía para juzgar y organizar*.
http://issuu.com/rfea-cnj/docs/la_marcha_atletica_spa/29. Consulta: 18 de enero de 2017.

3. EL PROBLEMA ACTUAL CON EL JUZGAMIENTO DE LA MARCHA ATLÉTICA Y LA SOLUCIÓN ELECTRÓNICA PROPUESTA

El juzgamiento actual de la marcha atlética en las competiciones internacionales se basa en la subjetiva observación humana para detectar las faltas a las normas del reglamento y naturalmente esto tiene varios problemas inherentes. Las decisiones incorrectas al momento de juzgar pueden devastar a un atleta y, posiblemente, desacreditar al órgano de jueces internacional. El objetivo de este trabajo de investigación se enfoca en el diseño e implementación de una plantilla de sensores que ayude a mejorar la precisión y el seguimiento de cada paso que el atleta hace en su entrenamiento o competencia.

El atleta involucrado en este deporte tiene una larga historia y a veces polémica en competiciones internacionales. Un marchista puede ser descalificado por un juez debido a la violación de las reglas establecidas por la IAAF. La falta más común es la pérdida de contacto con el suelo, es decir, una fase de vuelo. Actualmente estas decisiones se basan en la evaluación subjetiva del ojo del juez, haciendo difícil el correcto juzgamiento de este deporte.

Los pocos estudios científicos realizados han provocado que, en reiteradas ocasiones, se haya visto cuestionada la credibilidad de la marcha atlética. Los investigadores han sido citados en las revistas y publicaciones populares de atletismo, afirmando que esta subjetividad es considerada una debilidad del deporte.

En el Campeonato Mundial de Atletismo de 2011 y los Juegos Olímpicos de Londres 2012, el 12 % de los marchistas fueron descalificados por el criterio de pérdida de contacto con el suelo o por flexión de rodilla. Según las estadísticas del sitio web de la IAAF, aproximadamente tres cuartas partes de las razones registradas para la descalificación fueron por pérdida de contacto con el suelo.

Durante las pruebas internacionales, la televisión y otros medios de comunicación, resultan ser el peor enemigo de los marchistas porque las cámaras a menudo se acercan a sus pies y la imagen no es tan alentadora. En cámara lenta, los espectadores pueden ver a los marchistas con los dos pies en el aire, aparentemente rompiendo una de las dos reglas cardinales del deporte, asociada a la pérdida de contacto con el suelo.

Durante el transcurso de una prueba de 20 kilómetros o 50 kilómetros, la visión que se tiene de los marchistas desobedeciendo las reglas, puede provocar un malestar y decepción por parte del público y los medios de comunicación.

El principal problema es que las reglas de marcha se pierden en el debate sobre si el deporte es legítimo o una farsa. El reglamento de la IAAF menciona que la marcha atlética es una progresión de pasos ejecutados de modo que el atleta se mantenga en contacto con el suelo, a fin de que no se produzca pérdida de contacto visible.

Pérdida de contacto visible: es la parte crítica porque resalta la naturaleza subjetiva de juzgar el deporte. En otras palabras, se le permite romper el contacto con el suelo si nadie lo observa.

La prueba tecnológica no importa. Resulta irónico permitir romper una regla fundamental de un deporte mientras nadie lo vea. Si se quiere ver desde otro punto de vista, esto es similar, a dejar que se utilicen los bates de aluminio en béisbol (siempre y cuando no lo pillen). Como resultado, el deporte está plagado de descalificaciones frecuentes en los niveles más altos, debido a un juicio que no se verifica objetivamente.

Lo que es único y tal vez, filosóficamente insostenible sobre el estado actual de la marcha competitiva, es que la característica esencial y definitoria del deporte en su conjunto es subjetiva. Incluso en deportes juzgados como la gimnasia, los competidores están siendo evaluados en elementos muy específicos. A nadie se le dice que está haciendo el deporte completamente mal. Pero cuando un marchista es descalificado, es porque se considera que la esencia total del deporte está incorrecta.

Un deporte debe tener principalmente parámetros objetivos, de lo contrario se vuelve un arte, una disciplina puramente interpretativa. Es por ello, que los órganos disciplinarios de este deporte deben permitir o no permitir una fase de vuelo. No más, puede correr un poco pero no mucho, dependiendo de la visión del juez. Los marchistas ya saben que están corriendo. Si estuviera completamente desautorizado, mantendrían el contacto con el suelo, porque las cámaras los atraparían. Si, por el contrario, se lo permite, entonces no habría más conflicto.

Esta problemática ha llevado a algunas escenas embarazosas, una de las más recordadas sucedió en los Juegos Olímpicos de Sidney en el año 2000. En la prueba masculina de 20 kilómetros, Bernardo Segura de México cruzó la línea de meta primero y pronto habló por teléfono con el presidente de México. Mientras lo felicitaba, Segura fue informado de que había sido descalificado.

Por otra parte, en esos mismos Juegos Olímpicos, solo que ahora en la prueba femenina de 20 kilómetros, la líder de la prueba, Liu Hongyu de China, fue descalificada. Después, la nueva líder, Elisabetta Perrone de Italia, también fue descalificada. Eso provocó que Jane Saville de Australia tomara la delantera y a falta de solo 100 metros para llegar a la meta, fue descalificada. Provocando una gran decepción en más de 90 000 australianos que se preparaban para coronar a su héroe natal.

A diferencia de las cámaras de televisión, el ojo humano tiene dificultad para confirmar que ambos pies están en el aire por menos de 50 o 60 milisegundos. Los marchistas y jueces comprenden esto, pero los críticos argumentan que esta incapacidad para vigilar el deporte erosiona su credibilidad.

3.1. Defectos en los criterios utilizados para juzgar la marcha atlética

El criterio de juzgamiento actual por los jueces de marcha atlética contiene dos defectos, que se describen a continuación:

3.1.1. La vista del juez de marcha atlética

El primer defecto se debe a que la frecuencia más rápida que un ojo humano puede retener una imagen es de 16 Hz, o su equivalente en tiempo que resulta en 0,06 segundos. Cualquier imagen más rápida no se puede procesar con precisión. Por lo tanto, si el período de vuelo del atleta es inferior a 0,06 segundos, no será detectado con precisión si solamente se basa en la observación del ojo humano.

Adicional a ello, en muchos casos durante las competiciones, los atletas marchan durante varios trayectos del recorrido en grupo.

Por lo tanto, al momento de realizar la observación, es difícil evaluar a todos los atletas de forma independiente, es decir, separar visual y claramente la marcha de un atleta de otro.

Lo anterior se apoya en una teoría de la psicología conocida como ceguera al cambio, que básicamente consiste en la incapacidad del cerebro humano para la detección de variaciones oculares a nuestro alrededor, especialmente si llegan otros estímulos que desvían la atención. Y puede provocar que un juez pierda de su vista los pasos ilegales de un atleta, o percibir una acción que en la realidad no está ocurriendo. Esto es particularmente común si distrae su atención de un punto de enfoque, como juzgar a los atletas que van marchando en grupo y simultáneamente verificar tanto la pérdida de contacto con el suelo, como también el ángulo de la rodilla al momento de aterrizar el pie.

3.1.2. La ubicación del juez de marcha atlética

La segunda falla radica en que los jueces sólo están posicionados en ciertos puntos del recorrido y, por lo tanto, existen tramos restringidos de evaluación, especialmente si el recorrido está lejos de un ambiente de pista, en el interior de un estadio.

Las competencias de marcha son de hasta 50 kilómetros de longitud y, por lo tanto, a menudo es imposible monitorear todo el curso. Además, un juez sólo puede observar a un atleta a la vez.

Estos dos defectos son mayoritariamente las razones que producen una incorrecta descalificación y posteriormente resultan ser devastadores para el atleta individual.

3.2. Necesidad de una solución electrónica en el juzgamiento de la marcha atlética

Ambos problemas pueden ser superados por el uso de la tecnología y la electrónica. Los sensores de presión y módulos de control que existen actualmente son discretos, ligeros, inalámbricos, relativamente baratos y disponibles en el mercado, lo que los convierte en una opción atractiva para la investigación en campo.

Una vez validado el perfil de marcha atlética de los competidores, se puede crear una plantilla de sensores que puede ser usada por cada atleta. Esta plantilla no solo eliminaría la subjetividad al juzgar la pérdida de contacto con el suelo, sino que también podría ser utilizada en las sesiones de entrenamiento del marchista para proporcionar retroalimentación estándar sobre cualquier técnica ilegal.

La IAAF ha tenido varias reuniones para discutir posibles cambios de reglas para el deporte, con la esperanza de evitar que se repitan escenas bochornosas. La mayoría de los cambios involucrarán principalmente a los jueces en lugar de los atletas, y tratarán las maneras de acelerar la comunicación de las descalificaciones.

Radios de comunicación y tabletas electrónicas de mano conectadas, se quieren convertir en equipos estándar para todos los jueces en todas las competencias.

También, se pretende examinar la terminología. Se desea aclarar la definición de marcha y estudiar la elección de las palabras correctas para describir de mejor manera dicha definición.

Otra idea ha sido la recomendación de alarmas en el zapato. Dispositivos que estén diseñados para encenderse y señalar las infracciones en caso de pérdida de contacto con el suelo. Estos dispositivos aún no han funcionado de manera confiable en las pruebas.

Varias personalidades relacionadas con este deporte, han sugerido el uso de esta alarma de zapato que se pueda desencadenar cada vez que un marchista tenga ambos pies fuera del suelo durante más de 50 o 60 milisegundos. La idea no se ha logrado aceptar porque hasta la fecha no existe un artefacto que garantice el correcto funcionamiento y a la vez sea cómodo para el atleta.

3.3. Plantillas electrónicas para juzgar la pérdida de contacto con el suelo en la marcha atlética

El Campeonato Mundial de Atletismo, Doha 2019, podría marcar un punto de inflexión en las competiciones de la marcha atlética.

En una reunión del consejo directivo de la IAAF, realizada en noviembre del 2016, se dio a conocer el interés de crear un proyecto de detección electrónica para tener un sistema de juzgamiento definitivo en los eventos de marcha atlética. El prototipo de este proyecto se quiere tener listo y funcionando para el Campeonato Mundial de Atletismo del año 2019, a realizarse en el mes de octubre del mismo año, en la ciudad de Doha, Qatar.

La IAAF ha firmado contratos para la realización de dos prototipos de demostración preindustriales, que consisten en plantillas de zapatos con sensores detectores de la pérdida de contacto con el suelo en los atletas de marcha.

Los marchistas deben tener un pie en contacto con el suelo en todo momento. Cualquier falla en hacer esto, es actualmente detectada y sancionada por los jueces de marcha, bajo una serie de amonestaciones que culminan en la descalificación del atleta, esto sucede siempre y cuando tres jueces diferentes consideren que el competidor ha cometido una falta. Estas plantillas ayudarían a los jueces a proceder con las amonestaciones y descalificaciones sin lugar a dudas.

Estas innovaciones se están llevando a cabo dentro de una disciplina que presenta atletas marchando a velocidades cada vez mayores, a veces, con velocidades de más de cuatro pasos por segundo.

Se tiene contemplado que uno de los prototipos a crear se utilice en el entrenamiento y el otro para las competencias, con un tiempo estimado de realización del proyecto de 18 meses.

Los resultados de este proyecto serán examinados por el Comité de Marcha Atlética, para después elaborar una propuesta de cambio en las reglas de la marcha, luego tendría que ser revisada por el Comité Técnico y si todo resulta bien, debería ser aprobada por el Consejo Directivo de la IAAF.

El objetivo es estar listos para el próximo Campeonato Mundial de la IAAF en el 2019 con este nuevo sistema electrónico, que eliminaría todo error de juicio con un método preciso y fiable.

3.4. Requerimientos mínimos necesarios para la creación de un sistema electrónico detector de pérdida de contacto con el suelo

El diseño de este sistema electrónico requiere, fundamentalmente, tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Debe estar integrado en la zapatilla para poder realizar mediciones en exteriores.
- Permitir el uso de cualquier tipo de zapatilla deportiva disponible en el mercado, dando la posibilidad al atleta de elegir libremente el más adecuado.
- Añadir el peso mínimo posible al calzado deportivo, dado que la ligereza del mismo es un valor importante que puede afectar al rendimiento del atleta en la competencia.
- Los sensores de presión a utilizar deben tener la suficiente precisión y durabilidad para soportar varios kilómetros recorridos.
- El equipamiento de todo el sistema (cables, placas, etc.) no debe ser incómodo a la persona que esté haciendo uso de este, de tal forma, que permita realizar sus movimientos de la manera más natural posible y así obtener unos resultados con una alta fiabilidad.
- Se debe utilizar la tecnología inalámbrica para la transmisión de señales, con el fin de evitar la limitación que suponen las conexiones con cables en cuanto a movilidad.

- Ofrecer la máxima exactitud y precisión en su funcionamiento.
- Debe ser totalmente impermeable, ya sea para salpicaduras o inmersión en un charco, así como a prueba del sudor propio del pie del atleta

En general, el uso de este sistema debe ser lo más transparente posible por el atleta, tratando de que sea cómodo y tenga el menor peso posible. El objetivo final es que el sistema electrónico sea de bajo costo y facilidad de uso, lo que favorece que cualquier atleta que lo necesite en su actividad diaria, pueda usarlo, por ejemplo, para comprobar su correcta técnica durante el entrenamiento.

4. DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PROPUESTO Y DESCRIPCIÓN DE SUS COMPONENTES FÍSICOS

El presente capítulo describe el diseño de cada una de las partes y dispositivos específicos que componen el sistema electrónico a implementar, así como los diagramas de cada circuito utilizado en el mismo. Finalmente, para comprender de mejor manera el funcionamiento, se describen los diagramas de flujo y el diagrama de bloques de todo el sistema en su conjunto.

Se ha tratado que a través de los recursos disponibles y en la medida de lo posible, el diseño del sistema para la detección electrónica de contacto con el suelo en las zapatillas, sea compacto y ligero. Un sistema con estas características y funciones no existe en el mercado comercial en la actualidad, por lo que mediante su diseño y posterior creación se brindaría un gran aporte en busca de las mejoras a los actuales procesos involucrados en el juzgamiento de la marcha y por supuesto, también, sería de beneficio para el uso propio de atletas de marcha que desean corregir su técnica en los entrenamientos.

Además, se debe tener claro y tomar en consideración que el prototipo a desarrollar, es básico pero funcional, por consiguiente, con una mayor capacidad de recursos, se puede mejorar. Sin embargo, lo más importante, es que se establece un punto de partida para que distintas empresas e instituciones involucradas en este deporte, apoyen la inversión en este tipo de proyectos tecnológicos que promueven el desarrollo y la competitividad de nuestro país en este sector deportivo.

4.1. Generalidades del diseño

Para conseguir el objetivo antes mencionado, se ha desarrollado básicamente un sistema inalámbrico de plantillas instrumentadas. Para ello se ha diseñado una plantilla de sensores por cada zapatilla, cada una contiene dos sensores conocidos como sensores de fuerza resistivos FSR (de sus siglas en inglés, *force sensitive resistor*).

Los sensores se ubican en dos puntos de la plantilla uno en la región del metatarsiano y el otro en el talón del pie. De esta manera se miden las presiones que se ejercen en esas dos partes sobre el suelo, a través de una comparación lógica entre las dos mediciones, se determina la existencia o pérdida de contacto con el suelo. Una vez realizada esta comparación, el controlador lógico permite determinar el número de faltas cometidas y se muestran de forma visual a través del encendido de tres leds indicadores.

El sistema de plantillas instrumentadas está enfocado para que sea portable, de tal forma que el atleta de marcha atlética pueda colocar la plantilla instrumentada debajo de la plantilla cotidiana que trae cada calzado deportivo. Controlador programable permite la interpretación de las presiones ejercidas por cada pie. De esta manera, al no existir impacto de ningún pie con el suelo, se muestra una advertencia visual a través de leds y un aviso auditivo a través de un buzzer.

La idea es básica: si de forma simultánea, en ambos pies del atleta, tanto en la parte del metatarsiano como en el talón del pie, no se mide ninguna presión a través de los sensores, se determina que ha sucedido una falta por pérdida de contacto con el suelo.

4.2. Descripción de los componentes electrónicos utilizados

4.2.1. Microcontrolador MSP430

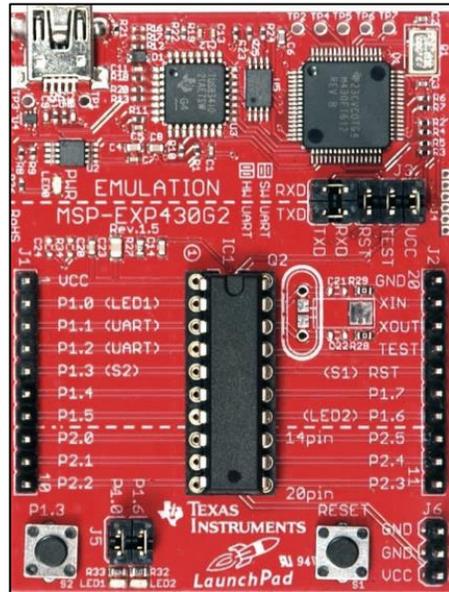
Es utilizado un microcontrolador MSP430 como principal instrumento para el procesamiento y análisis de la información recibida por los sensores de presión ubicados en la planta del zapato.

El MSP430 es un microcontrolador de 16 bits muy versátil, que puede realizar operaciones para 8 y 16 bits, presenta un modelo de programación fácil de aprender, los modos de direccionamiento que maneja permiten que se puedan usar con cualquier instrucción y en cualquier dirección de memoria. Esta familia de microcontroladores está diseñada específicamente para aplicaciones que requieran ser portátiles e inalámbricas ya que se alimenta con 3,3V y tiene formas de operación de muy bajo consumo de energía. En este trabajo de tesis se utiliza un microcontrolador MSP430G2553 que es uno de los más completos dentro de la familia MSP430G.

4.2.1.1. *Launchpad*

El Launchpad es una herramienta de evaluación y de desarrollo para los microcontroladores de Texas Instruments de la familia MSP430G. La tarjeta dispone de un socket DIP de 20 pines para los microcontroladores de 16 bits de la familia MSP430G y dispone además de una conexión USB que permite descargar y depurar programas directamente en el *hardware*, esta conexión será utilizada para la programación de la memoria Flash con el código del proyecto. Sin embargo, no será utilizada en la maqueta del proyecto. Dispone de dos botones: un par de LED y unos headers para poder acceder a los pines del microcontrolador.

Figura 15. **Launchpad MSP430**



Fuente: *Texas Instruments*. www.ti.com/product/MSP430G2553.

Consulta: 18 de marzo de 2017.

4.2.1.2. Características técnicas

- Rango de voltaje de 1,8 V a 3,6 V
- Ultra bajo consumo de energía
- Modo activo: 230 mA a 1 MHz, 2,2 V
- Modo apagado (retención de memoria RAM): 0,1 mA
- Cinco modos de ahorro de energía
- Arquitectura de 16-Bit RISC
- Tiempo de ciclo de instrucción de 62,5 ns
- Cristal de 32-kHz
- Fuente externa de reloj digital
- Dos Timer_A de 16 bits

- Tres modos de captura / comparación registros
- Interfaz de comunicación serial universal (UART)
- Comunicación serial SPI (interfase periférica serial)
- I2C (inter-circuitos integrados)

4.2.1.3. Ventajas

La familia de Texas Instruments de 16 bits es de bajo consumo y reúnen muchas ventajas entre las que destacan:

- Son microcontroladores rápidos al funcionar hasta 16 MHz.
- Alto desempeño análogo, ideal para soportar aplicaciones de medición precisas.
- Arquitectura Von Newman 16 bit RISC, que posibilita nuevas aplicaciones a una fracción de código.
- Cuentan con precio accesible en comparación con otras marcas.
- Periféricos integrados como conversores analógicos/digitales, comparadores analógicos.
- Lo más importante es su bajo consumo:
 - En modo activo con 3,3 volts de alimentación: 350 μ A
 - En modo standby: 0,7 μ A
 - En modo apagado (retención de RAM): 0,1 μ A

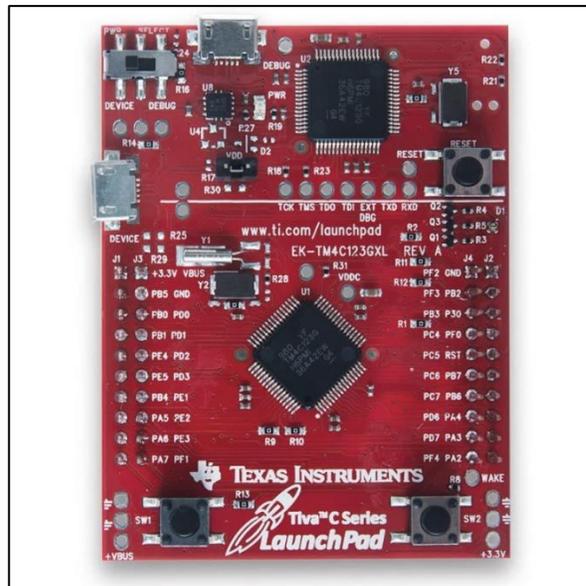
Esta última ventaja hace que se pueda hacer un dispositivo portátil y, que este ejecutando el microcontrolador sin consumirse casi nada de la batería, logrando llegar largos períodos de vida útil de la pila.

Además de todas estas ventajas, vale la pena mencionar su manejo rápido del convertidor A/D más el multiplexor de 8 entradas.

4.2.2. Microcontrolador TM4C123GH6PM

Este microcontrolador es el encargado de recibir la información proveniente de las plantillas instrumentadas por medio de la comunicación inalámbrica y el protocolo de transmisión de datos por UART para luego analizarlos y determinar si ha perdido el contacto con el suelo, basándose en las normas de la marcha atlética y notificar de las faltas cometidas, tanto al marchista como a los jueces pertinentes.

Figura 16. **Launchpad EK-TM4C123GXL**



Fuente: Texas Instruments. *Tiva C Series Launchpads*. http://processors.wiki.ti.com/index.php/Tiva_C_Series_LaunchPads. Consulta: 18 de marzo de 2017.

4.2.2.1. Características técnicas

- MCU de la serie TM4C - 80 MHz ARM Cortex-M4 CPU con punto flotante.
- Memoria Flash de 256KB, 32KB RAM, 2KB EEPROM, 2x12-bit 1MSPS ADC, 6x64-bit & 6x32-bit timers.
- Hasta 16 módulos PWM, 8 UART, 4 I2C, 4 SSI, 2 CAN, 1 USB H/D
- Interfaz de programación en el circuito por USB.
- 2 filas de 20 pines en configuración DIP.

4.2.2.2. Ventajas

- Alta velocidad
- Frecuencia de operación máxima de hasta 80 MHz
- Bajo consumo energético
- Gran disponibilidad de pines
- Adaptación de otras placas de desarrollo en su base de pines
- Múltiple selección de fuente de alimentación
- 2 pulsadores montados en la placa de desarrollo

4.2.3. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación utilizada para los módulos involucrados en los controladores previamente mencionados, consiste en una batería de iones de litio, marca UltraFire modelo 14 500, con capacidad de 1 200 mAh y un voltaje nominal de 3,7 voltios, lo que hace necesario utilizar un diodo zener como limitador de voltaje para el controlador, con el objetivo de operar dentro de los límites tolerantes de alimentación de los mismos.

Así mismo, las dimensiones de la batería ayudan a que el proyecto sea ligero y pequeño, debido a que sus dimensiones comprenden solo 5 cm de largo por 1,4 cm de diámetro.

Figura 17. **Batería de iones de litio, marca UltraFire modelo 14500**



Fuente: Lightmalls. *Baterías Li-ion*. <http://es.lightmalls.com/14500-aa-battery>.

Consulta: 19 de marzo de 2017.

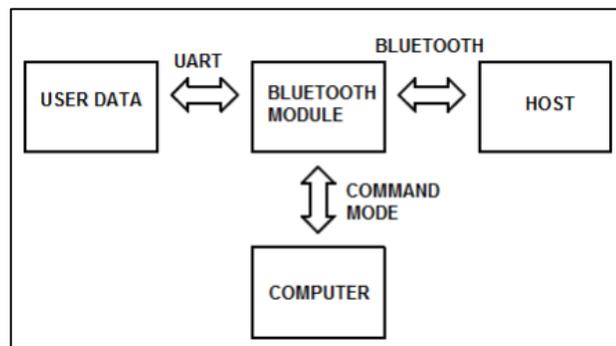
4.2.4. Modulo Bluetooth HC-05

Para la recepción de las señales provenientes de los zapatos se hace uso de dos receptores bluetooth, uno para cada zapato. Las señales de cada zapato son recibidas por separado para luego ser comparada con la lógica requerida.

Este módulo puede trabajar en dos modos: el modo de datos (modo comunicación) y el modo de comandos. Cuando está en modo de datos, el módulo está encargado de conducir la información hacia los puertos UART; al recibir y enviar datos por los puertos UART, el módulo construye un paquete que lo envía a lo largo de la conexión vía Bluetooth y viceversa.

Por otra parte, cuando está en el modo comandos, se cambia la configuración del módulo dependiendo las necesidades de la aplicación.

Figura 18. **Funcionamiento del módulo bluetooth HC05**



Fuente: LÓPEZ GIRÓN, Oliverio Jaime. *Funcionamiento del módulo bluetooth HC05*.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9770>. Consulta: 19 de marzo de 2017.

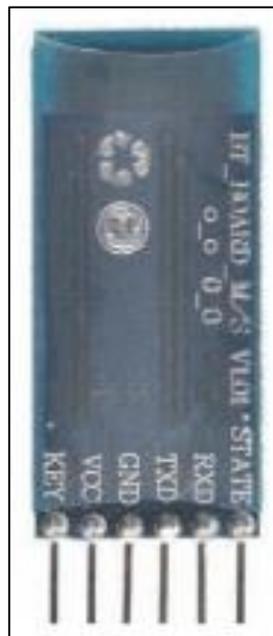
El módulo Bluetooth cuenta con puertos estándar HCI para la conexión UART o USB, trabaja con USB 1,1 y es compatible con USB 2,0. Cuenta con un LED color rojo que indica el funcionamiento del mismo. Las configuraciones por defecto del módulo son las siguientes:

- Modo esclavo
- Código PIN Bluetooth: 1 234
- Puerto de 9 600 bps, 8 bits, sin paridad y 1 bit de parada
- Sensibilidad de hasta -80dBm
- Voltaje de salida/entrada de 3,3 V a 5 V
- Con antena incluida
- Baja potencia de operación

Por las características de fábrica de este módulo es posible implementarlo en cualquier aplicación, puesto que vienen configurados como dispositivos esclavos y tener un tamaño reducido de 28 mm x 15 mm x 2,5 mm.

En operación este módulo Bluetooth puede consumir una corriente de 30 mA a 40 mA la corriente promedio es de 25 mA. Una vez terminada la conexión la corriente puede ser de 8 mA, sin la opción de modo sleep. El módulo viene con un adaptador para facilitar su manejo, permitiendo realizar las conexiones con otros dispositivos de una manera sencilla.

Figura 19. **Módulo bluetooth HC05**



Fuente: LÓPEZ GIRÓN, Oliverio Jaime. *Funcionamiento del módulo bluetooth HC05*.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9770>. Consulta: 19
de marzo de 2017.

4.2.4.1. Configuración del módulo HC-05

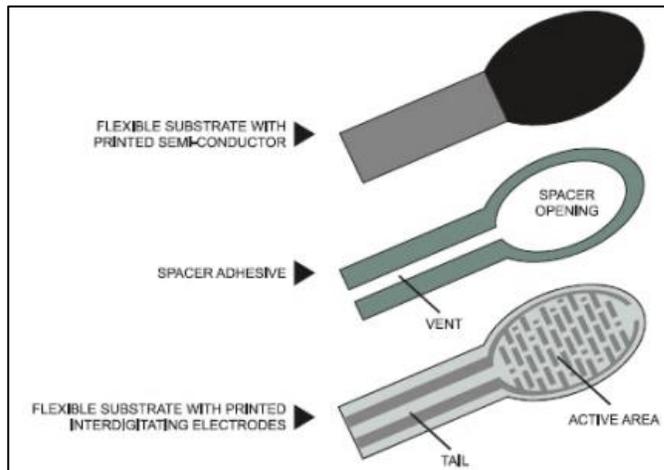
El módulo de bluetooth HC-05 es el que ofrece una mejor relación de precio y características, ya que es un módulo maestro-esclavo. Esto permite conectar dos módulos de bluetooth y formar una conexión punto a punto para transmitir datos entre dos microcontroladores o dispositivos.

Los módulos Bluetooth HC-05 poseen una configuración predeterminada que consta de una velocidad de 9 600 bps, nombre asignado HC-05 y una clave de acceso predeterminada la cual regularmente es 1 234 o 0000. La configuración del módulo HC-05, se realiza mediante comandos AT y se puede elegir su modo de operación, es decir, decidir si operará como esclavo o maestro, otras posibles configuraciones son: asignar al módulo una dirección específica de dispositivo o dejar que este se conecte a cualquier dispositivo que se encuentre disponible, asignarle dirección MAC, entre otras.

4.2.5. Sensores de fuerza resistivos FSR

El sensor de fuerza resistivo FSR es un dispositivo de película de polímero que a mayor presión aplicada al mismo reduce su resistencia de una forma inversamente exponencial, lo que permite conectarlo a un arreglo divisor de tensión para convertir este comportamiento resistivo en una salida de voltaje variable y dependiente de la presión aplicada.

Figura 20. **Construcción del FSR**



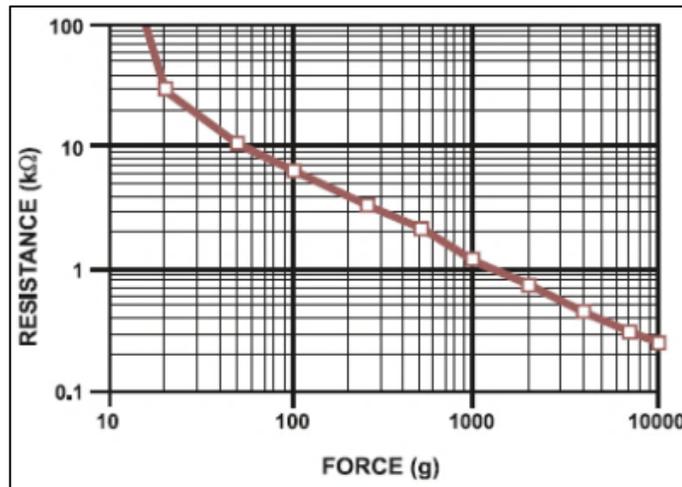
Fuente: CARRIÓN, Luis; OCHOA, Darío y VALVERDE, Juan Andrés. *Sensor de fuerza resistivo*. http://www.datalights.com.ec/site2/images/stories/robotica/nap/nap_fsr.pdf. Consulta: 19 de marzo de 2017.

4.2.5.1. **Curva característica fuerza vs resistencia**

La gráfica característica de fuerza vs resistencia se muestra en la figura 21, esta muestra el comportamiento típico del FSR (representado en formato log/log). En particular, la característica de fuerza resistencia es la respuesta del sensor #402 (12,7 mm de diámetro de su área activa circular).

Un actuador de acero inoxidable semiesférico de diámetro 10,0 mm y con punta de goma de poliuretano con dureza 60 se utiliza para accionar el dispositivo de FSR. La respuesta del FSR cumple aproximadamente con la relación $1 / R$.

Figura 21. **Fuerza vs resistencia**

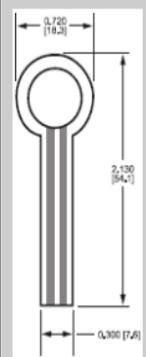


Fuente: CARRIÓN, Luis; OCHOA, Darío y VALVERDE, Juan Andrés. *Sensor de fuerza resistivo*. http://www.datalights.com.ec/site2/images/stories/robotica/nap/nap_fsr.pdf. Consulta: 19 de marzo de 2017.

4.2.5.2. **Modelo utilizado**

El modelo de sensor FSR utilizado en este proyecto es el número 402, cuyas dimensiones y características se pueden observar en las figuras 22 y 23.

Figura 22. Dimensiones modelo 402 (circular de 0,5")

	Área Activa	0.5" [12.7] diámetro	
	Espesor nominal	0.018" [0.46 mm]	
	Materiales	Capa Semiconductiva	0.005" [0.13] UItem
		Espacio Adhesivo	0.006" [0.15] Acrílico
		Capa Conductiva	0.005" [0.13] UItem
		Adhesivo Trasero	0.002" [0.05] Acrílico
		Opciones de Conector	a. Sin conector b. Pata para soldar (no mostrado) c. Conector AMP Hembra

Fuente: CARRIÓN, Luis; OCHOA, Darío y VALVERDE, Juan Andrés. *Sensor de fuerza resistivo*. http://www.datalights.com.ec/site2/images/stories/robotica/nap/nap_fsr.pdf. Consulta: 19 de marzo de 2017.

Figura 23. FSR modelo 402



Fuente: Canada Robotix. *Interlink force sensing resistor 402 FSR (0,5" Circle)*. <http://www.canadarobotix.com/force-sensors/interlink-fsr-402>. Consulta: 19 de marzo de 2017.

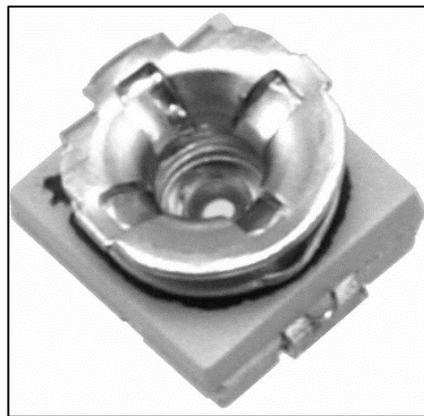
4.2.6. Potenciómetros tipo trimmer

Este potenciómetro sirve para la calibración de los voltajes de referencia utilizados en los sensores de presión que contiene la plantilla instrumentada. Esto es necesario, porque cada atleta ejerce distintas presiones sobre el suelo acorde a su fisionomía y técnica de marcha.

Los trimmer son utilizados para ajustes de precisión en circuitos donde se requiere que el usuario pueda modificar ciertos parámetros. Un potenciómetro son 2 resistencias conectadas en serie. A partir del nodo que se forma entre estas dos resistencias se forma un terminal, el cual normalmente será la pata del centro en un potenciómetro de 3 patas.

El trimmer a utilizar es el modelo pvz3a mostrado en la figura 24, debido a su pequeñez, ligereza y su naturaleza compacta.

Figura 24. **Trimmer pvz3a**



Fuente: Trimmer pvz3a. *Selection guide of trimmer potentiometers*. <http://www.mouser.com/catalog/supplier/library/pdf/MurataTrimmerPots.pdf>. Consulta: 19 de marzo de 2017.

4.2.7. Leds y Buzzer

Estos dos componentes electrónicos son altamente utilizados para indicar estados en los circuitos electrónicos ya sea de alerta o aviso. Para el caso de este proyecto se usan como medios de advertencia visual y auditiva para cada falta cometida por el atleta de marcha.

El buzzer o zumbador en español es un transductor que se encarga de transformar energía eléctrica en acústica. Posee dos terminales: una positiva donde se envía la señal eléctrica y otra negativa por lo general puesta a tierra. Está generalmente formado por un electroimán y una lámina metálica. Su funcionamiento consiste en generar un sonido a cierta frecuencia que para el oído humano se traduce a tonos.

Por otra parte, el led es un tipo especial de diodo, que trabaja como un diodo común, pero que, al ser atravesado por la corriente eléctrica, emite luz. Existen diodos led de varios colores que dependen del material con el cual fueron construidos. El led tiene un voltaje de operación que oscila entre 1,5 a 2,2 voltios y la gama de corrientes que debe circular por él está entre los 10 y 20 miliamperios en los diodos de color rojo y de entre los 20 y 40 miliamperios para los otros colores.

Cuando el atleta incurra en una falta por pérdida de contacto con el suelo, el buzzer emitirá un sonido al momento de la misma. Para llevar un control posterior al entreno o evento deportivo, se cuenta con un grupo de leds, el cual mostrará la cantidad de faltas totales cometidas en la sesión de entrenamiento, reiniciables al momento de apagar y volver a encender el dispositivo.

Figura 25. **Leds para la advertencia visual**



Fuente: LEDMAN. ¿Qué es un led? led-man.com.mx/ledman-que-es-un-led-ventajas.
Consulta: 20 de marzo de 2017.

Figura 26. **Buzzer para la advertencia auditiva**



Fuente: Robomart. *Digital buzzer module*. <https://www.robomart.com/digital-buzzer-module>.
Consulta: 20 de marzo de 2017.

4.3. Diseño de la plantilla de sensores

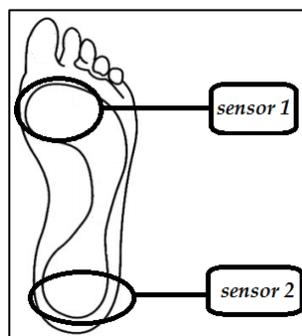
A continuación, se describen todos los criterios y diagramas utilizados para llevar a cabo el diseño de la plantilla de sensores que irá ubicada en cada zapatilla del atleta de marcha.

4.3.1. Colocación de los sensores

En cuanto a la colocación de los sensores FSR en la plantilla, esta se puede dividir en cuatro áreas: el talón, el arco, el metatarso y los dedos. Estas áreas son las que soportan la mayor parte del peso del cuerpo y ajustan el equilibrio del mismo.

Para reducir la complejidad del sistema, la colocación de los FSR se redujo a dos posiciones: uno en el talón y otro en el metatarso, porque estas áreas tienen una presión mayor durante la actividad normal de un marchista. Con que uno de los dos FSR utilizados detecte presión positiva, se considerará que el atleta está en contacto con el suelo.

Figura 27. Colocación de los sensores FSR

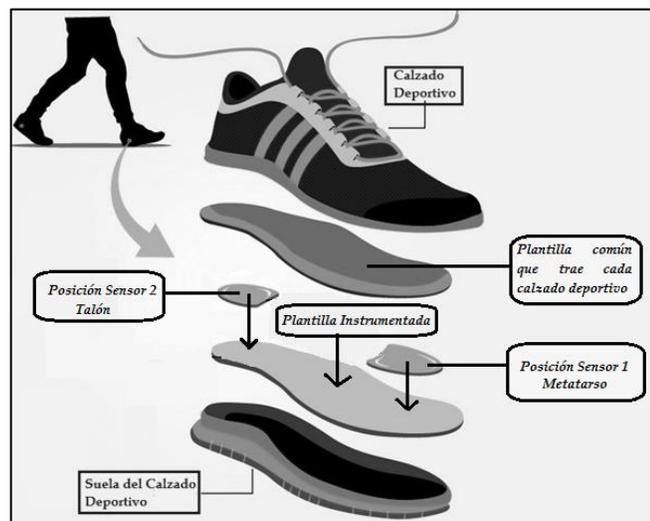


Fuente: elaboración propia, empleando *software* SketchUp.

El esquema general de la posición de la plantilla y sus respectivos sensores en el interior del calzado deportivo se muestra en la figura 28. La idea es que la plantilla instrumentada se coloque debajo de la plantilla ordinaria que trae cada zapato deportivo.

Prácticamente, el atleta no debería percibir molestia alguna debido a que los sensores FSR están conformados por una película de material extremadamente delgado y ligero.

Figura 28. **Vista desfragmentada de la plantilla de sensores**



Fuente: elaboración propia, empleando *software* SketchUp.

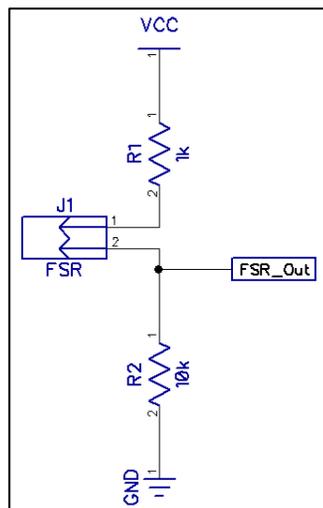
4.3.2. Diagrama esquemático de conexión de los FSR

En la figura 29 se muestra el diagrama a implementar para la conexión del sensor FSR mediante un divisor de tensión, elegido a conveniencia, dado el comportamiento del mismo. Con esto, al ejercer una presión sobre el FSR, el voltaje incrementa y al liberarla ocurre lo contrario.

El conector J1, denominado FSR, es el punto donde se conecta uno de los sensores de presión resistivos de la plantilla, es decir, cada zapatilla consta con dos circuitos idénticos en su mismo diseño.

La terminal FSR_Out es el voltaje medido para indicar la presión ejercida en el sensor.

Figura 29. **Conexión FSR**



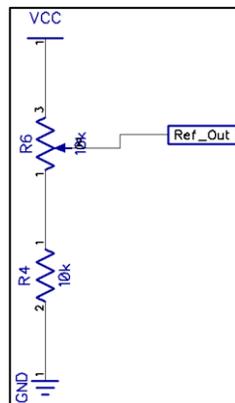
Fuente: elaboración propia, empleando DipTrace 3.0.0.1.

4.3.3. Voltajes de referencia

En este circuito se crea una referencia o umbral de voltaje para determinar cuándo se considera una señal positiva de contacto con el suelo según el voltaje de salida entregado por el sensor.

Se utiliza una resistencia en serie con el trimmer para reajustar su rango entre la mitad de VCC y VCC, esto debido a que, al ejercer una mínima presión en el FSR, este produce un voltaje alto, por lo que al ajustar el trimmer entre estos valores resultaría en vano.

Figura 30. **Diagrama de conexión de trimmer**



Fuente: elaboración propia, empleando DipTrace 3.0.0.1.

4.3.4. Fuente de alimentación

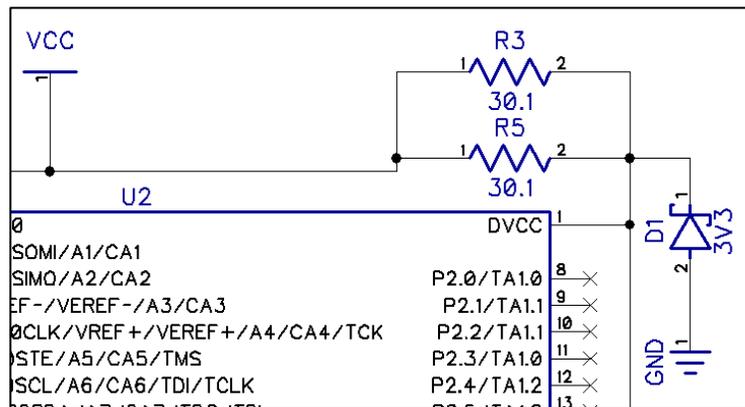
La fuente de alimentación la forma una batería de iones de litio que suministra un voltaje promedio de 3,7 voltios con rango de tolerancia de 0,5 voltios.

Debido a que el voltaje es superior al adecuado a utilizar por el microcontrolador, resulta necesario implementar un regulador de voltaje. La manera práctica y eficiente de hacer esto es mediante un regulador de voltaje por diodo zener para limitar su alimentación en 3,3 voltios.

Utilizando la ecuación de cálculo de resistencia en serie para la fuente de alimentación con diodo zener, se obtuvo que el valor de resistencia necesario es de 14,55 ohm, por lo cual se aproxima a un valor comercial existente de 15 ohm.

Luego, al calcular la corriente que pasará por este circuito, se obtiene que disipará un máximo de 0,3W y debido a que la resistencia utilizada es de un cuarto de watt, se hace necesario incrementar la capacidad de potencia disipada por la resistencia, por lo cual se llega al arreglo de dos resistencias de 30,1 Ω , de un cuarto de watt cada una, lo que da una capacidad máxima de medio watt, lo suficiente para el suministro energético del controlador.

Figura 31. **Diagrama de conexión del regulador de tensión para el microcontrolador**



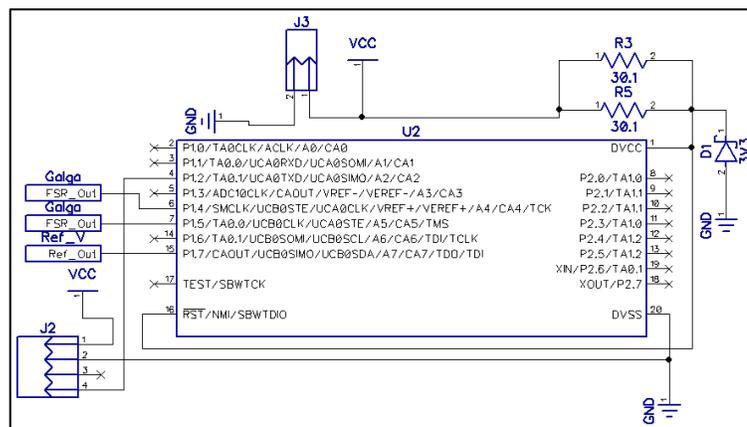
Fuente: elaboración propia, empleando DipTrace 3.0.0.1.

4.3.5. Unidad de control del zapato

La unidad de control de la zapatilla está conformada por el microcontrolador MSP430, el cual es el encargado de procesar toda la información proveniente de la plantilla instrumentada y usar esta información para determinar si se ha perdido el contacto con el suelo y luego transmitirla hacia la unidad de principal control.

El controlador hace una toma de datos de los valores analógicos de los sensores y los compara con la referencia de voltaje ajustada con el trimmer. El umbral de detección, con una zona muerta de respuesta, es ajustado internamente en el microcontrolador mediante el uso de un schmitt trigger para evitar los falsos positivos producidos por la naturaleza de los sensores implementados. Finalmente, estos resultados ya filtrados son enviados hacia la unidad de control principal mediante el uso del protocolo de transmisión de datos UART por medio de ondas de radio bluetooth.

Figura 32. Diagrama esquemático general de la zapatilla



Fuente: elaboración propia, empleando DipTrace 3.0.0.1.

4.4. Diseño de la unidad de control principal

El circuito de la figura 33 muestra la conexión de la unidad principal de control, la cual administra el conteo de las faltas cometidas por el marchista. Esta unidad es la responsable de determinar cuando el marchista ha perdido el contacto con el suelo, esto con base en la información recibida independientemente por cada una de las zapatillas. La unidad principal necesita la información proveniente de ambas zapatillas para su correcto funcionamiento.

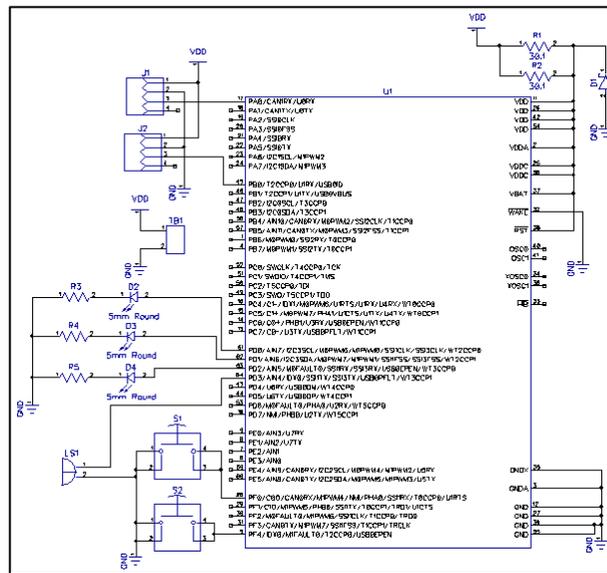
El sistema de alertas de la unidad principal de control está conformado por un conjunto de leds que indican al marchista la cantidad de faltas que ha cometido. Con cada falta cometida la unidad de control emitirá un pitido de corta duración a través del buzzer instalado en esta misma. Cuando el atleta incurra en una tercera falta se emitirá un pitido de mayor duración, indicando que ha llegado al límite del número de faltas permitidas, quedando descalificado del evento.

La unidad de control tiene un regulador de voltaje de zener para evitar voltajes superiores al nominal requerido por la misma, sin embargo, los módulos de recepción Bluetooth se pueden conectar directamente a esta sin necesidad de regulación, esto debido a su nivel de tolerancia admitida.

Para facilitar el proceso de calibración en las zapatillas, al mantener presionado uno de los botones de calibración, la unidad de control cambia a modo de alerta inmediata. El pulsador seleccionado indica la zapatilla deseada para calibrar, por lo tanto, cuando esta se encuentre fuera de contacto con el suelo, la unidad emitirá un sonido constante, con el fin de que el usuario ajuste

el trimmer localizado en dicha zapatilla para establecer el rango óptimo de detección de los sensores.

Figura 33. Diagrama esquemático de unidad principal de control

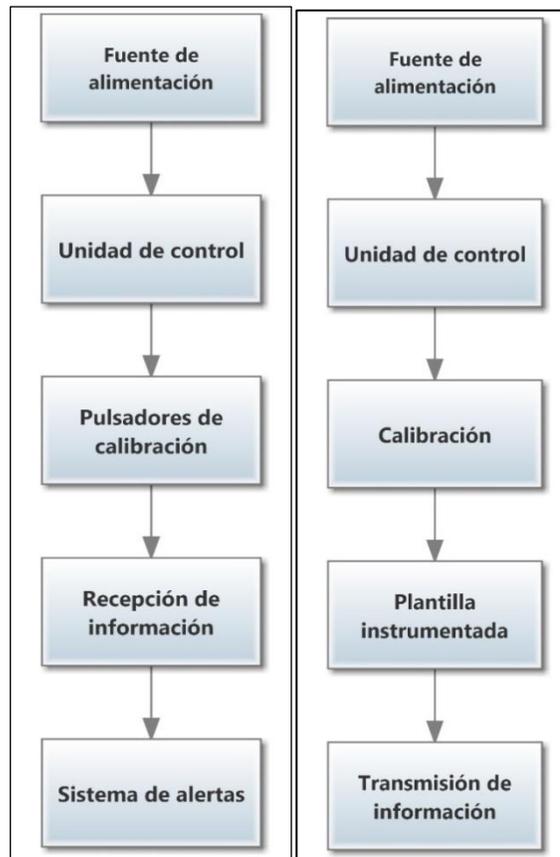


Fuente: elaboración propia, empleando DipTrace 3.0.0.1.

4.5. Diagrama de bloques del sistema electrónico implementado

A continuación, se ilustra el diagrama de bloques de todo el sistema utilizado para la detección electrónica de pérdida de contacto con el suelo del marchista. Básicamente, se divide en dos columnas jerárquicas: la columna izquierda hace referencia a la unidad principal de control y la columna derecha describe los bloques involucrados específicamente en la zapatilla.

Figura 34. **Diagrama de bloques del sistema electrónico implementado**



Fuente: elaboración propia, empleando el *software* SmartDraw.

4.5.1. Descripción de bloques involucrados en la zapatilla

4.5.1.1. Fuente de alimentación

Está conformada por una batería de iones de litio de 3,7 voltios con una capacidad de 1 200 mAh. Valor suficiente para la alimentación del microcontrolador MSP430 y los divisores de tensión utilizados para la lectura correcta de los sensores y voltajes de referencia.

Basado en el consumo de corriente que actualmente se tiene en el microcontrolador, se estima que la batería puede tener una duración de 12 horas continuas de uso.

4.5.1.2. Unidad de control

La unidad de control está conformada por el microcontrolador MSP430G2553. Este controlador cuenta con 20 pines en configuración DIP, entre las funciones principales utilizadas del controlador está el ADC, los comparadores de voltaje, interrupciones y protocolo de transmisión de datos UART.

Para determinar si existe pérdida de contacto con el suelo es necesario tomar el valor proveniente de los dos sensores de fuerza resistivos montados en la plantilla. Para ello se lee el valor de calibración cuya misión es definir el umbral de voltaje a considerar para determinar si existe pérdida de contacto con el suelo.

Se toma lectura de la referencia de voltaje y de cada uno de los FSR con el ADC del controlador, luego se comparan estas dos señales provenientes de los sensores. Si al menos uno indica que tiene contacto con el suelo es válida la marcha del atleta. Si, por el contrario, ninguno detecta contacto con el suelo, se determina la existencia de una falta por parte del marchista.

La lectura de los sensores tiende a oscilar considerablemente, provocando un flicker o ruido. Para evitar esto, se crea una zona muerta mediante el uso de un schmitt trigger.

Con esto se logra corregir los cambios abruptos en las señales y, por consiguiente, los falsos positivos en la transmisión de la información.

La transmisión de la información hacia la unidad de control principal se realiza mediante el protocolo de comunicación UART a través de un emisor de ondas de radio bluetooth, con el fin de que la transmisión sea lo más cómoda posible, evitando un cableado innecesario que podría perjudicar al marchista en el entrenamiento o competencia.

4.5.1.3. Calibración

Este bloque consiste en el uso de un trimmer de 10 K Ω y una resistencia en serie de 10 K Ω , para crear la referencia de voltaje necesaria en el umbral de comparación de voltajes. Esta configuración brinda la opción de calibrar la sensibilidad de detección de pisada, en el rango ubicado entre la mitad del voltaje de alimentación y el voltaje de alimentación completo.

4.5.1.4. Plantilla instrumentada

Está conformada por el uso de los sensores de presión resistivos FSR, ubicados en el área del metatarso y el talón. Con lo cual se puede determinar de una manera más práctica si existe o no contacto con el suelo.

Los sensores están ubicados y sujetos a una plantilla de acetato, la cual se puede introducir en cualquier zapato, de una manera fácil y práctica, debajo de la plantilla ordinaria que trae cada calzado deportivo. A mayor presión ejercida en la plantilla, la resistencia de los FSR disminuye, lo que conlleva al aumento de voltaje en la entrada al microcontrolador, indicando una señal positiva de contacto con el suelo.

4.5.1.5. Transmisión de información

La transmisión de la información se realiza a través del protocolo de comunicación UART, el cual es utilizado para transmitir esta información al módulo de ondas de radio bluetooth, para luego ser enviadas a la unidad de control principal.

4.5.2. Descripción de bloques involucrados en la unidad principal de control

4.5.2.1. Fuente de alimentación

Está conformada por el uso de una batería de iones de litio de 3,7 voltios con una capacidad de 1200 mAh. Esta batería alimenta el microcontrolador TM4C123GH6PM, montado en una placa de desarrollo Launchpad EK-TM4C123GXL, llamada comúnmente Tiva C.

En esta placa se conectan mínimos componentes: un buzzer, unos pulsadores, unos leds indicadores y dos módulos de recepción bluetooth para recibir la información de las plantillas instrumentadas.

4.5.2.2. Unidad de control

Está formada por el microcontrolador TM4C123GH6PM montado en la placa de desarrollo Tiva C. Esta unidad es la encargada de recibir e interpretar la información proveniente de las plantillas instrumentadas, es decir, es la que determina si se ha perdido contacto con el suelo en las dos plantillas.

La información la recibe de manera continua e ininterrumpida por parte de los sensores FSR. Si determina una falta, esta unidad envía una señal de activación de un buzzer, para indicarle al marchista su falta. A su vez, enciende la cantidad de leds respectivos al número de faltas cometidas.

Al momento de incurrir en una tercera falta, se emitirá un sonido de duración más prolongada y los tres leds estarán encendidos, indicando de esta manera a los jueces que el marchista ya ha cometido las tres faltas permitidas. Esto se puede reiniciar mediante el apagado y encendido de toda la unidad.

4.5.2.3. Pulsadores de calibración

La unidad de control cuenta con dos pulsadores de calibración, uno para cada plantilla. Cuando se presiona uno de los dos pulsadores, la unidad de control emitirá un sonido continuo para indicar que la plantilla seleccionada no tiene contacto con el suelo, sin importar el estado de la otra plantilla. Esto con el fin de que el marchista, ajustando el trimmer, pueda calibrar la sensibilidad de una de las plantillas sin interferencia de la otra.

Para calibrar la otra plantilla, se realiza de la misma manera. Al momento de soltar cualquiera de los botones de calibración, el contador de faltas será reiniciado para la nueva sesión.

4.5.2.4. Recepción de información

Está conformado por dos módulos de ondas de radio bluetooth, uno para cada plantilla instrumentada. Con ello, la unidad de control principal puede recibir la información de las dos plantillas, a través del protocolo de comunicación UART.

Luego determina si ha perdido el contacto con el suelo de cada plantilla respectiva y posteriormente realiza la lógica necesaria para afirmar la ejecución de una falta.

4.5.2.5. Sistema de alertas

Está compuesto por los indicadores leds y el buzzer que sirven al marchista y a los jueces como medios de advertencia para la cantidad de faltas cometidas al momento de realizar el evento.

Las primeras dos faltas son anunciadas con un sonido de corta duración y la cantidad de leds respectivos.

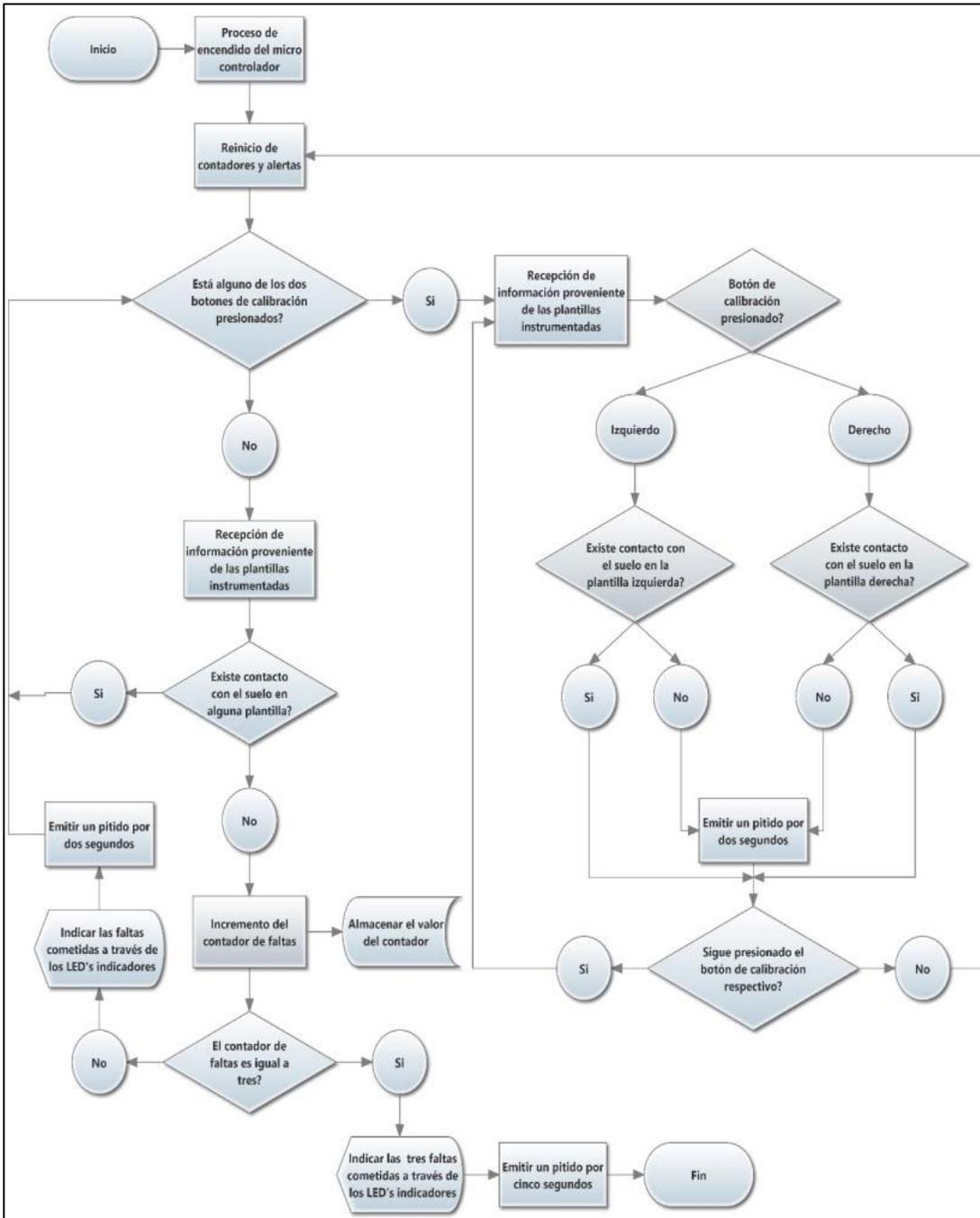
Al momento de cometer la tercera falta, el sonido emitido es de mayor duración y los tres leds indicadores estarán encendidos para la vista de los jueces y confirmar la descalificación del marchista.

Este sistema de alertas es reiniciado al apagar la unidad de control principal y nuevamente encenderla para un nuevo uso.

4.6. Diagramas de flujo

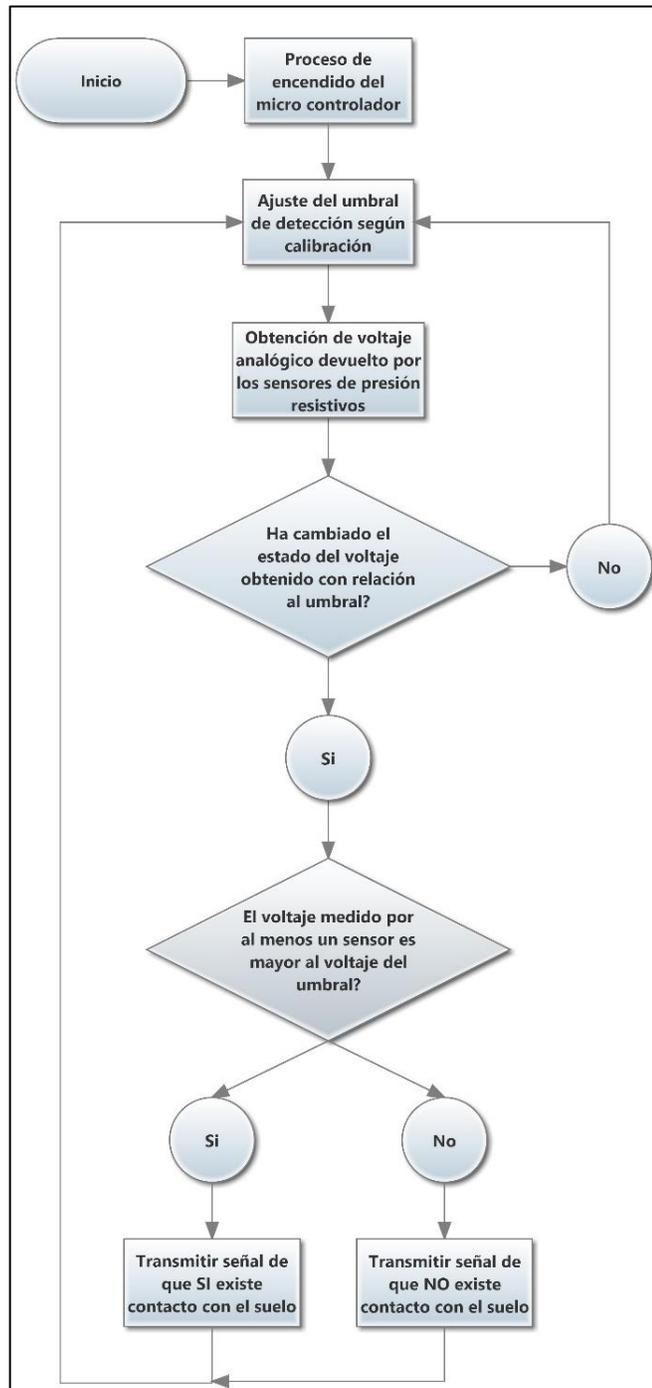
En las figuras 35 y 36 se muestran los diagramas de flujo necesarios para comprender íntegramente el funcionamiento del sistema electrónico implementado.

Figura 35. Diagrama de flujo de la unidad principal de control



Fuente: elaboración propia, empleando el *software* SmartDraw.

Figura 36. Diagrama de flujo de la plantilla instrumentada



Fuente: elaboración propia, empleando el *software* SmartDraw.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DETECTOR DE PÉRDIDA DE CONTACTO CON EL SUELO

En este último capítulo se describirán todas las actividades involucradas en la implementación del sistema detector de pérdida de contacto con el suelo y un análisis final de toda su operación y funcionamiento.

5.1. Fabricación del sistema electrónico

Una vez hecho el diseño de los circuitos necesarios para realizar pruebas finales, se realizó el montaje final en una zapatilla usada de correr. Se utilizaron componentes de tipo SMD (de montaje superficial) con el objetivo de minimizar el tamaño del dispositivo final.

Este dispositivo contendrá todos los elementos necesarios para que funcione el sistema salvo los sensores FSR que irán en el interior de la zapatilla y se conectarán al dispositivo a través de cables de sección transversal muy pequeña.

Debido a que uno de los requisitos principales de este sistema es minimizar el tamaño y optimizar el espacio, se usaron resistencias SMD. Por otra parte, se utilizó un PCB (placa de circuito impreso) a doble cara para evitar el uso de puentes externos de cables, lo que logra reducir el tamaño de la placa al máximo y brindar mayor comodidad al atleta.

5.1.1. Diseño de las pacas de circuito impreso

Esta etapa del proceso de fabricación del dispositivo es muy importante ya que es aquí donde se tuvo que minimizar todo lo posible el tamaño de los circuitos utilizados. Se colocaron todos los componentes a integrar en la placa realizando todas las conexiones necesarias entre ellos y se buscó minimizar el recorrido de las pistas que los interconectan.

Para el diseño de la PCB se utilizó el *software* DipTrace versión 3.0.0.1. Este programa cuenta con un entorno completo para diseñar circuitos esquemáticos y diagramas de PCBs. Está conformado por 4 módulos:

- *Schematic Editor* (editor esquemático)
- *PCB Layout Editor* (editor de diseño de PCB)
- *Component Editor* (editor de componentes)
- *Pattern Editor* (editor de diseños)

Posee una completa serie de herramientas de diseño y un manejo bastante accesible. Es ideal para proyectos con acabado profesional y de alta definición.

Se utilizó este *software* debido a varias ventajas:

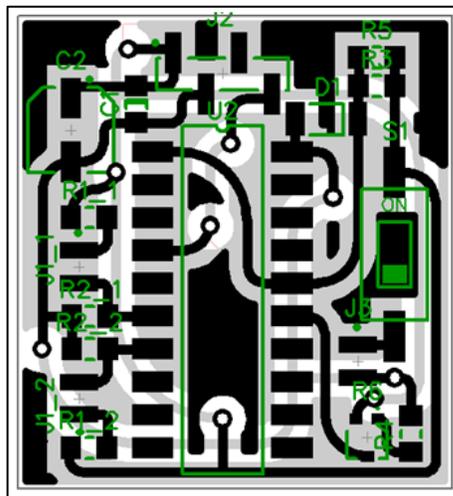
- Gran calidad en sus diagramas
- Autoruteo y autoposicionamiento de componentes
- Calidad del visor 3D aceptable
- Sencillo editor de componentes y librerías
- Capacidad de exportar los diseños y librerías
- Versión libre que cubre los requisitos de un diseñador de nivel medio

Para el diseño de la placa de control de la zapatilla se utilizó la parte posterior para las conexiones de puente entre las pistas. Esto brindó la opción de colocar el módulo bluetooth de manera perpendicular sobre el microcontrolador para ahorrar el mayor espacio posible.

El interruptor de encendido está posicionado junto al controlador para mayor practicidad y acceso. Para evitar falsos movimientos con el potenciómetro de calibración, se utilizó una base de potenciómetro SMD pequeño con control de punta de destornillador.

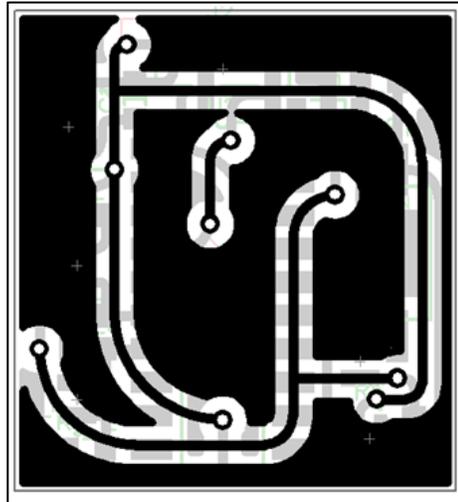
Las conexiones de la alimentación y de los sensores se ubicaron en las partes laterales de la placa para evitar cable desperdiciado en vueltas innecesarias. El diseño de la vista frontal y posterior de la PCB utilizada para el control de sensores en la zapatilla se muestran en las figuras 37 y 38.

Figura 37. **Vista frontal PCB de la zapatilla**



Fuente: elaboración propia, empleando Diptrace 3.0.0.1.

Figura 38. **Vista posterior PCB de la zapatilla**



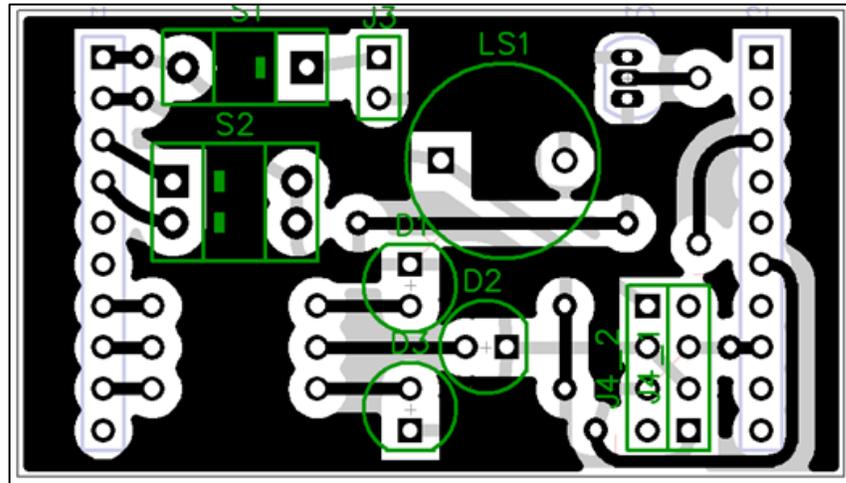
Fuente: elaboración propia, empleando Diptrace 3.0.0.1.

Para el diseño de la placa de circuito impreso de la unidad de control principal fue necesario realizarla del tamaño de la placa de desarrollo Tiva C, con lo cual se alinearon los conectores de la placa de circuito impreso con los pines de la placa de desarrollo.

En esta placa se utilizaron ambos lados de la misma para la sujeción y soldadura de los componentes para aprovechar el espacio utilizando componentes para atravesar.

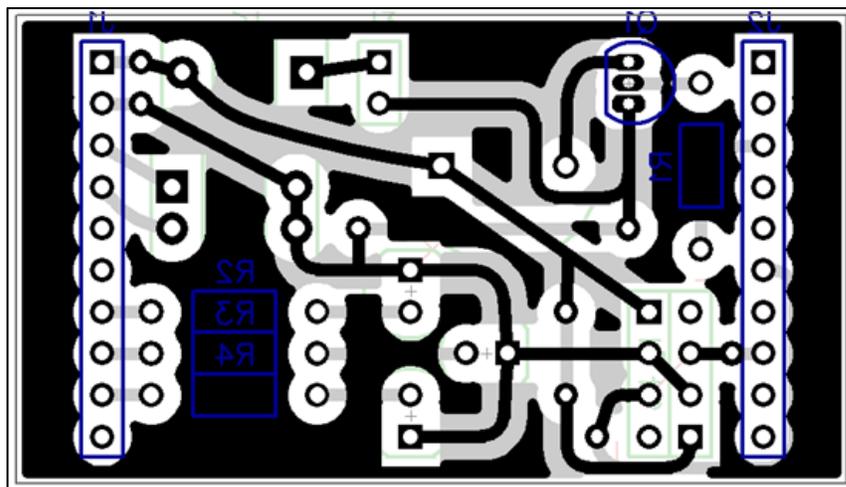
El diseño de la vista frontal y posterior de la PCB utilizada para la unidad de control principal se muestra en las figuras 39 y 40.

Figura 39. Vista frontal PCB unidad de control principal



Fuente: elaboración propia, empleando Diptrace 3.0.0.1.

Figura 40. Vista posterior PCB unidad de control principal



Fuente: elaboración propia, empleando Diptrace 3.0.0.1.

5.1.2. Elaboración de las placas de circuito impreso

Durante la elaboración de la PCB se intentó conservar la máxima precisión, debido al mínimo tamaño de la placa. Se optó por utilizar una técnica distinta a la transferencia térmica con plancha, mediante una técnica en frío, utilizando la acetona como principal componente activo.

Esta técnica se basa en el método de transferencia de tóner, pero en este caso no se usa plancha ni papeles especiales. Solamente es la acetona quien realiza la transferencia y lo hace considerablemente mucho más rápido.

El material necesario consiste solo en acetona, alcohol, ácido férrico y un paño para limpiar la placa de fibra de vidrio.

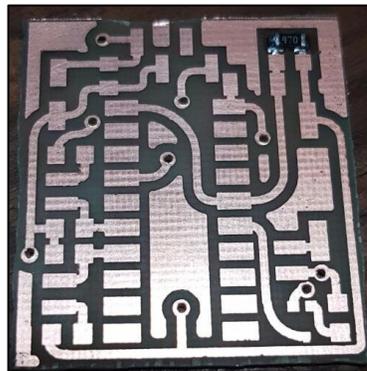
Los pasos a realizar en esta técnica son los siguientes:

- Preparar la placa. Esto implica pasar una lija fina en la placa a tratar y limpiarla con alcohol.
- Imprimir el diseño de PCB en un papel fotográfico estilo glossy.
- Aplicar una proporción de acetona con alcohol en la placa previamente preparada.
- Colocar el diseño sobre la superficie cubierta con la mezcla de acetona y alcohol. Dejarla reaccionar durante 5 segundos sin aplicar presión.
- Aplicar presión moderada y equitativa hasta que la mezcla se volatilice.

- Sumergir en agua de 1 a 2 minutos y arrancar el papel fotográfico.
- Sumergir la placa en ácido férrico durante un par de minutos hasta que el diseño quede sin residuos de cobre.
- Lavar la placa con agua y retirar el tóner con thinner.

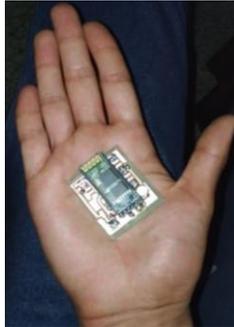
La elaboración y tamaño final de la placa de circuito impreso de la unidad de control de sensores ubicada en la zapatilla se muestra en las figuras 41 y 42; muestra la misma placa con la diferencia que esta tiene integrada todos sus componentes electrónicos.

Figura 41. **Elaboración final PCB unidad de control de sensores**



Fuente: elaboración propia, empleando Diptrace 3.0.0.1.

Figura 42. **PCB unidad de control de sensores con sus componentes electrónicos soldados**



Fuente: elaboración propia.

5.1.3. Programación de la MSP430 para la plantilla de sensores

El código de programación MSP430 consiste en una secuencia de pasos e instrucciones, las cuales se pueden encontrar en la sección de apéndices. Sin embargo, es importante notar que la programación de la aplicación conlleva específicamente la siguiente secuencia:

- Declaración de constantes y variables

Consiste en la asignación de pines a utilizar en el microcontrolador, de los cuales se utilizan nomenclaturas específicas por cada pin en un puerto dado, con el propósito de facilitar la comprensión en la escritura del programa y en la modificación futura. Se hace una declaración de variables utilizadas en el programa para el control de la información y rutinas usadas en el procedimiento sistemático de la lógica de detección en la plantilla del zapato.

- Rutina de ajustes y condiciones iniciales

En esta sección se llevan a cabo las rutinas de instrucciones que necesita que se ejecuten una sola vez para la configuración adecuada de los puertos a utilizar y los protocolos de transmisión mediante la comunicación serial. Además, se realiza la inicialización de valores a las variables de control necesarias para el inicio de operación del sistema.

- Secuencia de bucle infinito

Esta es la rutina de programación que se repite constantemente en el microcontrolador para el control de los sensores y la secuencia de información.

Esta sección se divide en:

- Parámetro de calibración: utilizado para definir el umbral de detección en los sensores de presión resistivos, debido a que para cada atleta serán condiciones diferentes, sea por postura, peso, calzado y técnica. La lectura del valor de calibración se ejecuta al inicio de la rutina de repetición para que pueda ser ajustado en cualquier momento.
- Detección de contacto con el suelo. para esta etapa se necesitan realizar operaciones múltiples para el correcto funcionamiento de los sensores, luego son procesados por la unidad de control principal.
 - Schmitt trigger: utilizado para definir una zona muerta en la transición de estado del sensor, debido a que es un sensor

analógico, la señal de salida posee cierto ruido que puede perjudicar en la interpretación de la información

- Comparador de voltaje: este es utilizado en conjunto con el Schmitt trigger para determinar los umbrales de detección de los sensores.
- Lógica de comparación entre los dos sensores: el resultado devuelto por los comparadores es contrastado entre ellos para determinar la pérdida de contacto con el suelo.
- La condición es que los dos sensores deben perder contacto con el suelo, para considerarlo como pérdida de contacto con el suelo. Esto se hace realizando la comparación lógica AND en la pérdida de contacto.
- Transmisión de información: para la transmisión de la información se hace uso de un módulo de comunicaciones por bluetooth. Luego, la información es enviada como un carácter ASCII para su interpretación por la unidad de control, la cual hará la comparación lógica entre los dos zapatos.

5.1.4. Programación la TIVA C para la unidad de control

El código de programación de la TIVA C se encuentra también en la sección de apéndices. Básicamente la programación de la aplicación conlleva la siguiente secuencia:

- Declaración de constantes y variables

Consiste en la asignación de pines a utilizar en el microcontrolador, de los cuales se utilizan numeraciones específicas para cada pin en un puerto dado, con el propósito de facilitar la comprensión en la escritura del programa y en una modificación futura.

Se realiza la declaración de variables utilizadas en el programa para el control de la información y las rutinas utilizadas para el procedimiento sistemático de la lógica control en la interpretación de las señales provenientes de cada una de las plantillas.

- Rutina de ajustes y condiciones iniciales

En esta sección se llevan a cabo las rutinas de instrucciones que se ejecutan una sola vez en la configuración de los puertos a utilizar para las indicaciones visuales y auditivas de las faltas cometidas y los protocolos de recepción utilizados mediante la comunicación serial. Además, se realiza la inicialización de valores a las variables de control necesarias para el inicio de operación del sistema.

- Secuencia de bucle infinito

Esta es la rutina de programación que se repite constantemente en el microcontrolador para el control de la recepción de la información proveniente de cada una de las zapatillas y para determinar cuándo se ha cometido una falta y así ejecutar su respectivo aviso lumínico y auditivo. Esta sección se divide en:

- Interruptor de calibración: utilizado para la calibración del umbral de detección de cada una de las zapatillas. Al momento de estar activado el interruptor respectivo de calibración para cada zapatilla, sonará un pitido si no está en contacto con el suelo dicho pie, sin importar el estado de la otra zapatilla.

- Interpretación de señales de las zapatillas: para esta etapa se necesitan realizar operaciones múltiples para el correcto funcionamiento de los indicadores auditivos y visuales.

Estas operaciones se dividen en:

- Recepción de información: secuencia de recepción de información a través de los puertos seriales en el microcontrolador, utilizando un puerto serial por cada zapatilla.

- Lógica de comparación entre las señales recibidas: se realiza una comparación de los caracteres ASCII recibidos mediante la lógica AND entre las condiciones de pérdida de contacto en el suelo para ambas zapatillas.

- Indicadores visuales y auditivos: después de cometer una falta, se activa la cantidad de leds respectivos al conteo acumulativo de faltas cometidas. La duración del sonido de cada alerta es de 1 segundo para las primeras dos faltas, y un pitido de 2 segundos de duración para la última falta. Luego de esto sigue sonando 100 milisegundos por cada

falta extra cometida, con el propósito de utilizarlo para una sesión de entrenamiento.

5.2. Integración y montaje del sistema

A continuación, se describirán todas las actividades de ensamblaje e integración final de todo el sistema detector de pérdida de contacto con el suelo. Se colocaron cada uno de los sensores FSR en las posiciones que se comentaron en el capítulo anterior y se ubicó la placa de control de sensores en cada zapatilla y la placa de la unidad de control principal en la cintura del atleta.

5.2.1. Sensores en la plantilla del zapato

Para la detección de presencia de contacto con el suelo de una manera práctica y simple, se utilizaron sensores de fuerza resistivos FSR, ubicados en dos puntos: uno en la parte plana del talón y otro en la base del metatarso, lo que permite que, al efectuar el ciclo característico de marcha, se mantenga la condición de tener al menos un sensor en contacto con el suelo en algún momento.

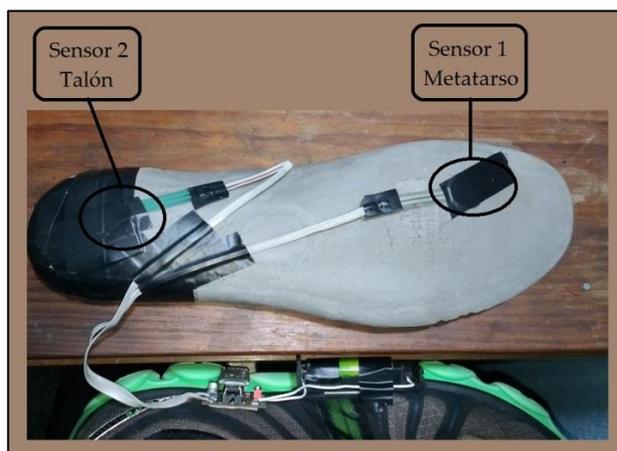
Debido la posición de los sensores no es recomendable usar un cable grueso, por otro lado, si se utiliza uno muy delgado, resulta demasiado frágil y se rompen debido a la presión ejercida en la plantilla. El cable utilizado para este sistema es uno en forma paralela con refuerzo en el conductor.

Para la colocación de los sensores en la zapatilla se siguieron los siguientes pasos:

- Se midió la longitud aproximada de cable necesario para cada sensor hasta la conexión con la placa de control de sensores ubicada en la parte exterior de la zapatilla.
- Se fijó a la plantilla de la zapatilla los sensores FSR con ayuda de cinta de aislar.
- Se llevaron los cables hacia la zona de salida de la zapatilla usando cable ultradelgado e intentando que no se superpongan unos a otros para evitar que cuando usemos la zapatilla se note alguna protuberancia molesta en el pie. Se utilizaron pequeñas tiras de cinta de aislar para que los cables queden fijos.

El resultado final de la colocación de sensores en la parte inferior de la plantilla de cada zapatilla se puede ver en la figura 43.

Figura 43. **Colocación de sensores FSR**



Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Placa de control de sensores

La placa de control de las plantillas hace uso del microcontrolador MSP430. En busca de una mayor facilidad en la programación y montura en la placa de circuito impreso, se hace uso de su configuración DIP de 20 pines. Para reducir el tamaño de la placa de circuito impreso se realizó un diseño a doble cara con el uso de tecnología SMD.

La conexión de los sensores se realiza mediante un cable directamente soldado a la placa, en conjunto con el sistema de alimentación. La razón de esto es porque al usar un conector, se agrandarían las dimensiones de la placa, por el espacio abierto que ocupa el mismo.

Para sujetar la placa a la zapatilla, se utilizó cinta de doble adhesión. Debido su peso, no resulta en desprendimiento por la agitación, caso contrario para la batería utilizada, la cual es de iones de litio de capacidad de 1 200 mAh, lo que hace necesario sujetarla con una costura fuerte e inmovilizarla con una pequeña tira de velcro.

La posición de todos los elementos de control y alimentación se encuentran en la parte exterior lateral de la zapatilla para evitar la colisión con la otra zapatilla.

El resultado final de la colocación y ubicación de la placa de control de sensores y su batería para cada zapatilla se puede observar en las figuras 44 y 45.

Figura 44. **Placa control de sensores, pie derecho**



Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Placa control de sensores, pie izquierdo**



Fuente: elaboración propia.

5.2.3. **Unidad de control principal**

La unidad de control principal se localiza en la cintura, sujeta por una bolsita con cincho, dado el tamaño pequeño de la placa, en la misma bolsita está ubicada la alimentación del microcontrolador, la cual consiste en una batería de iones de litio con capacidad de 3 000 mAh, unidas a través de un cable paralelo soldado directamente a la placa, tal y como se observa en la figura 46.

Figura 46. **Placa unidad de control principal**



Fuente: elaboración propia.

En el sistema de alertas de la unidad de control principal se colocaron las luces LED cuya posición sean lo más expuestos posibles para su fácil visualización.

La calibración de las zapatillas cuenta con un par de interruptores DIP para la selección de la plantilla a calibrar. También cuenta con interruptor de alimentación principal, la cual energiza a la placa de expansión creada para el microcontrolador y a la misma placa de desarrollo.

Para la fuente de alimentación de la placa de desarrollo se utiliza el regulador de voltaje incorporado en la misma, con esto se asegura un margen de alimentación que va desde 3 voltios hasta 5 voltios, por lo que los niveles de carga de la batería lo suplen sin ningún inconveniente, ya que los niveles de voltaje de una batería de iones de litio pueden abarcar desde 3,2 voltios hasta un máximo de 4,2 voltios.

Figura 47. **Ubicación de la unidad de control principal en la cadera**



Fuente: elaboración propia.

5.3. Operación del sistema

Esta sección está dedicada al funcionamiento general de todo el sistema electrónico implementado.

5.3.1. Instrucciones básicas de uso

- Instalación o verificación de baterías

Se inserta una batería de iones de litio de 3,7 voltios en cada una de las zapatillas y la unidad de control principal, con lo cual el lado negativo de la batería debe quedar apuntando hacia el resorte y el positivo hacia el lado opuesto.

- Verificación de interruptores de calibración en unidad principal

Verificar que los interruptores de calibración de la unidad de control principal se encuentren en la posición de apagado.

- Colocación de accesorios

Colarse las zapatillas y la unidad de control principal, teniendo cuidado de no golpear los lados externos de las zapatillas ni la unidad de control principal.

- Encendido del sistema

Si enciende el interruptor principal de las zapatillas, seguido del interruptor principal de la unidad de control. Inmediatamente después de encender la unidad de control, se debe visualizar que los módulos de transmisión bluetooth se encienden y comienza un led a parpadear.

- Realice la sesión de entrenamiento o prueba de marcha

Comenzar la rutina de marcha. Al momento de cometer una falta, se emitirá un pitido y un LED indicando la cantidad de faltas cometidas.

Para reiniciar el contador puede accionar a encendido cualquiera de los interruptores de calibración y luego regresarlo a la posición de apagado; luego de 2 segundos, los indicadores de faltas se apagarán y el contador vuelve a cero.

- Apagado del sistema

Para apagar el sistema, cambie los interruptores principales de cada unidad a la posición de apagado.

5.3.2. Calibración de los sensores

Para realizar la calibración de los sensores se debe asegurar de realizar los 4 primeros pasos descritos en la sección anterior y luego se procede con lo siguiente:

- Se enciende el interruptor de calibración de la zapatilla que desee ajustar.
- El interruptor número 1 es para la zapatilla izquierda y el número 2 para la zapatilla derecha.
- Luego de encender el interruptor, la unidad de control emitirá un pitido siempre y cuando no haya contacto con el suelo con la zapatilla seleccionada.
- Con esto, el atleta tiene la oportunidad de ajustar el trimpot localizado en la placa de control de sensores.
- Si el trimpot se gira hacia la derecha se hará más sensible al peso y si se gira al lado contrario será menos sensible, por lo que requerirá mayor peso para detectar la presencia con el suelo.
- Para calibrar la otra zapatilla repita el procedimiento anterior, pero debe de regresar a cero el interruptor de calibración que no va a utilizar, para poder activar el otro, de lo contrario, tomará prioridad la calibración de la zapatilla derecha.

- Al terminar de ajustar las zapatillas y haber regresado los interruptores de calibración a la posición de apagado, el contador de faltas será reiniciado y la unidad entrará en modo normal de operación.

5.3.3. Modo de alertas

El funcionamiento de las alertas para las faltas cometidas consiste en lo siguiente:

- Al cometer la primera falta se escuchará un pitido de una duración de 1 segundo y un LED de color verde estará iluminado.
- Cuando se cometa la segunda falta, nuevamente se emitirá un pitido de 1 segundo y ahora estará encendido un LED de color azul.
- Luego de producirse la tercera falta, se emitirá un pitido de 2 segundos de duración, indicando la última falta permitida y un LED de color rojo se encenderá.
- Después de haber cometido todas las faltas, por cada próxima falta que se cometa, se emitirá un pitido de 100 milisegundos de duración ya con todos los LED encendidos. Esto con el propósito de seguirlo usando en una posible sesión de entrenamiento.

5.4. Experimentación y discusión de resultados del sistema implementado

Se realizaron una serie de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y analizar los resultados. Estas pruebas al sistema se realizaron en la plena ejecución de la marcha y también corriendo.

5.4.1. Metodología

La prueba de marcha para la verificación de la sensibilidad del sistema hacia la detección de las faltas se realizó creando faltas intencionadas durante una rutina de entreno.

Las pruebas al correr fueron para verificar que pueda marcar faltas de manera continua sin ninguna interrupción en el sistema y que los tiempos de reacción de procesamiento sea lo adecuado para evitar los retrasos en la detección.

Las pruebas del sistema se realizaron en diferentes tipos de terreno para comprobar su confiabilidad y estabilidad del sistema bajo las circunstancias que puede presentar el terreno con el impacto que produce en la marcha.

Los tiempos de procesamiento entre las faltas fue calibrado mediante la misma marcha atlética, para establecer un tiempo prudente de respuesta entre las mismas. Esto debido a que al cometer una falta se pueda seguir detonando las siguientes faltas sin existir un motivo real, dado a que es la misma falta.

5.4.2. Pruebas iniciales y solución de problemas

Luego de realizar la primera prueba andando y analizar los resultados se observó que el programa detecta el sensor del talón y el sensor delantero. Ahora bien, se había establecido un tiempo después del envío de transmisión para evitar falsas detecciones de contacto con el suelo, sin embargo, resultó de mayor factibilidad reduciendo este tiempo significativamente para un mejor tiempo de respuesta.

A la hora de analizar los resultados, se observó que, entre la fase de apoyo y la fase de despegue, se dieron señales de pérdida de contacto con el suelo, a pesar de que el otro pie se encuentre en contacto con el suelo. Este comportamiento ocurrió de manera inversa con la otra plantilla sin perder el contacto con el suelo. Lo que conllevó a reubicar de mejor manera los sensores y calibrar su sensibilidad para recoger los resultados verídicos de presencia de contacto.

Analizando dicho comportamiento se observa que el problema radica en la posición errónea de los sensores que resulta en pérdida de contacto con los mismos antes de la fase de apoyo y durante el movimiento del pie, entre las fases de apoyo y despegue. A la hora de marchar o correr, cuando se inicia el movimiento del pie para avanzar, lo primero que hacemos es levantar la punta del pie hacia arriba, tirando un poco con los dedos del pie. Esto hace que la zona superior de apoyo del pie presione la zapatilla ligeramente lo que puede activar el sensor, dependiendo de si el movimiento es más o menos acentuado.

Al interpretar los resultados obtenidos, condujo a nuevamente reubicar los sensores más próximos entre ellos, para que el movimiento al marchar no afecte en las lecturas erróneas del contacto con el suelo.

Posterior a reubicar los puntos de apoyo de los sensores fue necesario calibrar su sensibilidad para recoger los resultados verídicos de acuerdo al peso del marchista.

5.4.3. Pruebas finales

Al haber solucionado los inconvenientes que surgieron en las pruebas iniciales del prototipo, se completó la programación de la unidad de control principal para poder llevar a cabo la prueba definitiva de todo el sistema funcionando como un todo.

Al haber realizado las pruebas completas del sistema, surgió la necesidad de terminar de calibrar la sensibilidad de los sensores de fuerza implementados en las plantillas, dado que no se había considerado la presión recibida por los sensores al momento de realizar el ciclo de marcha completo.

Por último, se corrigió la posición de los conductores entre los sensores y la placa de control de la zapatilla para evitar flexibilidad extrema de los mismos al momento de realizar la marcha.

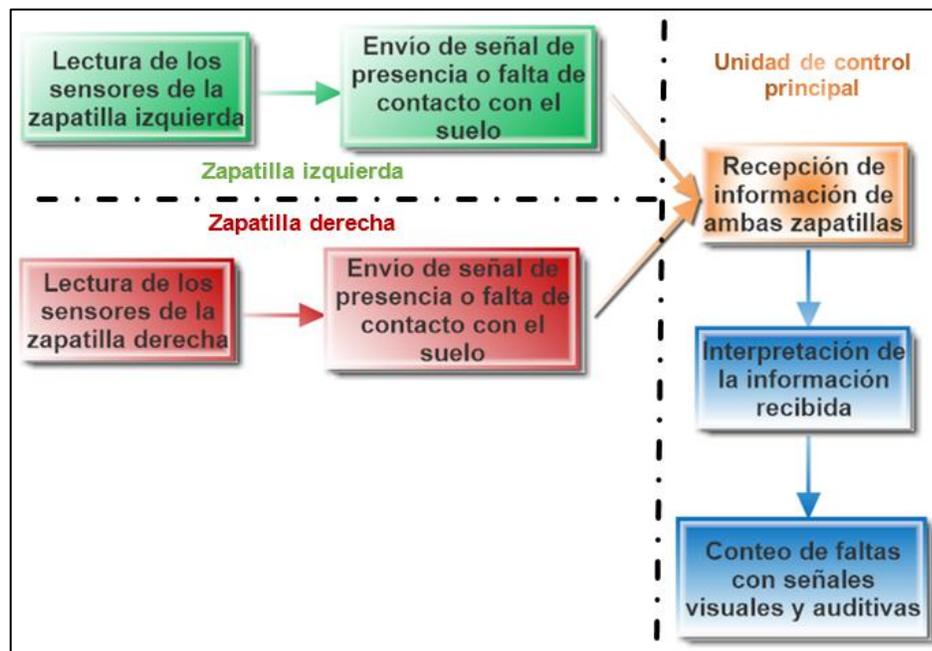
5.4.4. Análisis del funcionamiento del sistema implementado

Se realiza un análisis final del sistema implementado con sus características principales:

- Las zapatillas procesan las señales de los sensores de presión resistivos de manera independiente entre las mismas, sin necesidad de hacer uso de la unidad de control principal, facilitando el procesamiento de información recibida por la unidad de control principal.

- La unidad de control principal recibe la información ya procesada con relación de que si existe o no contacto con el suelo en cada una de las zapatillas. Por lo que la unidad principal determina el momento cuando el atleta está completamente en el aire, dependiendo de la información recibida de manera simultánea por las zapatillas, ya que por su propia cuenta las zapatillas no saben el estado de la otra, por lo que la unidad de control principal es el vínculo o enlace existente entre las mismas.

Figura 48. **Diagrama de bloques del funcionamiento general del sistema propuesto**



Fuente: elaboración propia, empleando el *software* SmartDraw 2012.

CONCLUSIONES

1. En el desarrollo de la unidad de control de las zapatillas, se utilizó el microcontrolador MSP430 por su conveniente dimensión y fácil programación, dando lugar al uso de componentes SMD para un tamaño compacto y ligero. Para la unidad de control principal se implementó el microcontrolador TM4C123GH6PM ensamblado en una placa de desarrollo Tiva C y se logró ajustar de manera práctica, una placa conectada a través de los pines de la misma, para la interfaz del sistema.
2. Se determinó el uso de unidades de control independientes con alimentación propia, consistente en una batería recargable de iones de litio, una para la interpretación de la información de los sensores y otra para la unidad de control principal ubicada en la cadera para el manejo de información y el sistema de alertas.
3. El tipo de sensor implementado en las plantillas es un sensor de fuerza resistivo, debido a su tamaño y fácil conexión sin perjudicar la postura ni posición del pie del atleta. Para la detección óptima de contacto con el suelo, se usaron dos sensores por plantilla: uno en el talón y otro en el metatarso.
4. Para intercomunicar las dos zapatillas con la unidad de control principal de manera eficiente se utilizaron módulos de ondas de radio bluetooth, debido a que estas señales son moduladas con corrección de errores y de esta forma se evita el uso de cables que puedan afectar e incomodar el desarrollo de la marcha de cada atleta.

RECOMENDACIONES

1. Para las placas de control se podría implementar un microcontrolador más pequeño con menor cantidad de pines que cumpla el mismo requerimiento para esta aplicación para lograr mayor reducción en el diseño de las placas y hacerla compacta y ligera.
2. Para el sistema de alimentación se puede implementar un controlador de carga y descarga para la batería de iones de litio, logrando así un puerto de acceso rápido para la carga de la misma sin removerla del compartimento de baterías.
3. En la ubicación de los sensores se debería implementar una plantilla externa al zapato deseado para facilitar su colocación y posicionamiento para cada marchista.
4. Empacar la unidad de control del zapato en una carcasa plástica liviana con sujeción de costura en el zapato que involucre a la misma unidad de control con su compartimento para la batería, integración del módulo de transmisión y un puerto de carga con acceso al interruptor de control. Para el sistema de alertas se podría implementar una transmisión de información por medio inalámbrico hacia los jueces respectivos de cada evento para mejorar el control y manejo del conteo de faltas cometidas por cada atleta.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Análisis del funcionamiento del sensor FSR.* [En línea]. <http://www.datalights.com.ec/site2/images/stories/robotica/nap/nap_fsr.pdf>. [Consulta: 19 de marzo de 2017].
2. *Aplicaciones de un buzzer.* [En línea]. <<https://www.robomart.com/digital-buzzer-module>>. [Consulta: 20 de marzo de 2017].
3. *ARM Cortex-M4F Based TM4C123G LaunchPad Kit.* [En línea]. <<http://www.ti.com/tool/ek-tm4c123gxll>>. [Consulta: 8 de enero de 2017].
4. *Batería de litio modelo ultrafire 14450.* [En línea]. <<http://www.lightmalls.com/ultrafire-c3-uv-395-purple-3w-1-mode-led-flashlight-1-14450>>. [Consulta: 19 de marzo de 2017].
5. *Biomecánica de la fase de apoyo de la marcha atlética.* [En línea]. <<http://www.terapia-fisica.com/biomecánica-de-la-marcha.html>>. [Consulta: 8 de enero de 2017].
6. *Biomecánica de la marcha atlética. Análisis de las presiones plantares durante su desarrollo, revisión actualizada.* [En línea]. <<http://www.efdeportes.com/efd217/biomecanica-de-la-marcha-atletica.htm>>. [Consulta: 8 de enero de 2017].

7. *Bluetooth HC05, características y aplicaciones*. [En línea]. <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9770>>. [Consulta: 19 de marzo de 2017].
8. *Generalidades de la marcha atlética*. [En línea]. <<http://marchaenatletismo.blogspot.com>>. [Consulta: 10 de enero de 2017].
9. *Guía para el aprendizaje del atletismo*. [En línea]. <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/50_educacion_atletismo/curso/archivos/tecnica_marcha.htm>. [Consulta: 8 de enero de 2017].
10. *Guía para juzgar la marcha atlética*. [En línea]. <<https://www.iaaf.org/download/download?filename=829b6e82-c23b-4072-96c2-705a3c7d2ccc.pdf>>. [Consulta: 15 de enero de 2017].
11. IAAF. *Designs electronic insoles to spot loss of contact during race walk competitions*. [En línea]. <<https://www.trackarena.com/36594/the-iaaf-designs-electronic-insoles-to-spot-loss-of-contact-during-race-walk-competitions>>. [Consulta: 18 de enero de 2017].
12. _____. *Rules governing racewalking*. [En línea]. <<http://www.vrwc.org.au/vrwciaafrules.shtml>>. [Consulta: 10 de enero de 2017].
13. _____. *The judging of Race Walking and the organization of a Race Walking event*. 5a ed. Mónaco: IAAF, International Association of Athletics Federations, 2006. 24 p

14. Facultad de Ingeniería, UNAM, Departamento de Electrónica. *Introducción al microcontrolador MSP430*. [En línea]. <http://kali.azc.uam.mx/erm/Media/1123021/introduccion_al_msp430.pdf>. [Consulta: 8 de enero de 2017].
15. *La marcha atlética: Una guía para juzgar y organizar*. [En línea]. <http://issuu.com/rfea-cnj/docs/la_marcha_atletica_spa/29>. [Consulta: 18 de enero de 2017].
16. *Línea de bajo costo de microcontroladores MSP430*. [En línea]. <<http://www.ti.com/ww/mx/mcu/valueline/index.shtml>>. [Consulta: 8 de enero de 2017].
17. LÓPEZ, Elvira; MEANA RIERA, Marta; VERA, Francisco y GARCÍA, Juan. *Respuestas, adaptaciones y simetría de la huella plantar producidas por la práctica de la marcha atlética*. México: Cultura, Ciencia y Deporte, 2006. 73 p.
18. *MSP430G2553, especificaciones técnicas*. [En línea]. <www.ti.com/product/MSP430G2553>. [Consulta: 19 de marzo de 2017].
19. *Potenciómetro de precisión tipo trimmer*. [En línea]. <<http://www.mouser.com/catalog/supplier/library/pdf/MurataTrimmerPots.pdf>>. [Consulta: 19 de marzo de 2017].
20. *Race walk judging and coaching handbook*. [En línea]. <<http://www.tigch.nl/snelwandelen/judging-coaching.pdf>>. [Consulta: 18 de enero de 2017].

21. *Race walking judging system*. [En línea]. <<http://www.seiko.co.jp/en/branding/sp/sports/team/road.html>>. [Consulta: 18 de enero de 2017].
22. *Sensor FSR*. [En línea]. <<http://www.canadarobotix.com/force-sensors/interlink-fsr-402>>. [Consulta: 19 de marzo de 2017].
23. *Tiva C series Launchpads*. [En línea]. <http://processors.wiki.ti.com/index.php/Tiva_C_Series_LaunchPads>. [Consulta: 18 de marzo de 2017].
24. *Ventajas de un LED*. [En línea]. <led-man.com.mx/ledman-que-es-un-led-ventajas>. [Consulta: 20 de marzo de 2017].

APÉNDICES

Apéndice 1. Código de programación, unidad de control principal Tiva C TM4C123GH6PM

Se muestra el código del programa desarrollado en *Energia* versión 0101E0017 para el control de la recepción de la información proveniente de cada zapatilla y determinar la existencia de una falta.

```
1. const uint8_t BUZZER = 38;
2. const uint8_t RED_LIGHT = 29;
3. const uint8_t BLUE_LIGHT = 28;
4. const uint8_t GREEN_LIGHT = 27;
5. const uint8_t CAL1 = 24;
6. const uint8_t CAL2 = 23;
7.
8. uint8_t cal_state, fault_state, faults, dato1, dato2 = 0;
9.
10.
11. void setup()
12. {
13.     Serial2.begin(9600);
14.     Serial3.begin(9600);
15.     pinMode(BUZZER, OUTPUT);
16.     pinMode(RED_LIGHT, OUTPUT);
17.     pinMode(GREEN_LIGHT, OUTPUT);
18.     pinMode(BLUE_LIGHT, OUTPUT);
19.     pinMode(CAL1, INPUT_PULLUP);
20.     pinMode(CAL2, INPUT_PULLUP);
21.
22.     digitalWrite(BUZZER, LOW);
23.     digitalWrite(RED_LIGHT, LOW);
24.     digitalWrite(GREEN_LIGHT, LOW);
25.     digitalWrite(BLUE_LIGHT, LOW);
26.
27.     dato1 = 'I';
28.     dato2 = 'D';
29.     delay(3000);
30.     faults = 0;
31.     fault_state = 0;
32.     cal_state = 0;
33. }
```

Continuación del apéndice 1.

```
34. void loop()
35. {
36.   if(Serial2.available()){
37.     dato1 = Serial2.read();
38.   }
39.
40.   if(Serial3.available()){
41.     dato2 = Serial3.read();
42.   }
43.
44.   if(digitalRead(CAL1) && digitalRead(CAL2)){
45.     if(cal_state){
46.       faults = 0;
47.       fault_state = 1;
48.       cal_state = 0;
49.       delay(2000);
50.     }
51.     if(((dato1 == 'D') && (dato2 == 'I')) || ((dato1 == 'I'
) && (dato2 == 'D'))){
52.       faults = faults + 1;
53.       fault_state = 1;
54.     }
55.   }
56.   else{
57.     cal_state = 1;
58.     if(digitalRead(CAL1) == 0){
59.       if((dato1 == 'I') || (dato2 == 'I')){
60.         digitalWrite(BUZZER, HIGH);
61.       }
62.       else{
63.         digitalWrite(BUZZER, LOW);
64.       }
65.     }
66.     else{
67.       if(digitalRead(CAL2) == 0){
68.         if((dato1 == 'D') || (dato2 == 'D')){
69.           digitalWrite(BUZZER, HIGH);
70.         }
71.         else{
72.           digitalWrite(BUZZER, LOW);
73.         }
74.       }
75.     }
76.   }
77.
78.   if(fault_state){
79.     fault_state = 0;
80.     digitalWrite(BUZZER, HIGH);
81.
82.     switch(faults){
```

Continuación del apéndice 1.

```
83.         case 0:{
84.             digitalWrite(REDD_LIGHT, LOW);
85.             digitalWrite(GREEN_LIGHT, LOW);
86.             digitalWrite(BLUE_LIGHT, LOW);
87.             break;
88.         }
89.         case 1:{
90.             digitalWrite(GREEN_LIGHT, HIGH);
91.             delay(1000);
92.             break;
93.         }
94.         case 2:{
95.             digitalWrite(BLUE_LIGHT, HIGH);
96.             delay(1000);
97.             break;
98.         }
99.         case 3:{
100.            digitalWrite(REDD_LIGHT, HIGH);
101.            delay(2000);
102.            break;
103.        }
104.        default:{
105.            delay(100);
106.            break;
107.        }
108.    }
109.    digitalWrite(BUZZER, LOW);
110. }
111. }
```

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Código de programación MSP430G2553, zapatilla derecha

Se muestra el código del programa desarrollado en *Energia* versión 0101E0017 para el control e interpretación de los datos provenientes de cada sensor y también para la etapa de calibración de la zapatilla derecha.

```
1. const char FSRF = P1_5;
2. const char FSRP = P1_4;
3. const char CAL = P1_7;
4.
5. uint16_t Val_cal = 0;
6. uint8_t estado, SF, SP = 0;
7.
8. void setup()
9. {
10.     // put your setup code here, to run once:
11.     pinMode(FSRF, INPUT);
12.     pinMode(FSRP, INPUT);
13.     pinMode(CAL, INPUT);
14.     Serial.begin(9600);
15.     Val_cal = analogRead(CAL);
16. }
17.
18. void loop()
19. {
20.     if(analogRead(FSRF) > (analogRead(CAL)+50)) {
21.         SF = 1;
22.     }
23.     else{
24.         if(analogRead(FSRF) < (analogRead(CAL)-50)) {
25.             SF = 0;
26.         }
27.     }
28.
29.     if(analogRead(FSRP) > (analogRead(CAL)+50)) {
30.         SP = 1;
31.     }
32.     else{
33.         if(analogRead(FSRP) < (analogRead(CAL)-50)) {
34.             SP = 0;
35.         }
36.     }
37.
38.
39.
40.
```

Continuación del apéndice 2.

```
41.     if((SF == 0) && (SP == 0)){
42.         if(estado == 0){
43.             Serial.write('D');
44.             delayMicroseconds(200);
45.             estado = 1;
46.         }
47.     }
48.     else{
49.         if(estado == 1){
50.             Serial.write('d');
51.             delayMicroseconds(200);
52.             estado = 0;
53.         }
54.     }
55. }
```

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Código de programación MSP430G2553, zapatilla izquierda

Se muestra el código del programa desarrollado en *Energia* versión 0101E0017 para el control e interpretación de los datos provenientes de cada sensor y también para la etapa de calibración de la zapatilla izquierda.

```
1. const char FSRF = P1_5;
2. const char FSRP = P1_4;
3. const char CAL = P1_7;
4.
5. uint16_t Val_cal = 0;
6. uint8_t estado, SF, SP = 0;
7.
8. void setup()
9. {
10.     // put your setup code here, to run once:
11.     pinMode(FSRF, INPUT);
12.     pinMode(FSRP, INPUT);
13.     pinMode(CAL, INPUT);
14.     Serial.begin(9600);
15.     Val_cal = analogRead(CAL);
16. }
17.
```

Continuación del apéndice 3.

```
18. void loop()
19. {
20.     if(analogRead(FSRF) > (analogRead(CAL)+50)) {
21.         SF = 1;
22.     }
23.     else{
24.         if(analogRead(FSRF) < (analogRead(CAL)-50)) {
25.             SF = 0;
26.         }
27.     }
28.
29.     if(analogRead(FSRP) > (analogRead(CAL)+50)) {
30.         SP = 1;
31.     }
32.     else{
33.         if(analogRead(FSRP) < (analogRead(CAL)-50)) {
34.             SP = 0;
35.         }
36.     }
37.
38.
39.
40.     if((SF == 0) && (SP == 0)) {
41.         if(estado == 0) {
42.             Serial.write('I');
43.             delayMicroseconds(200);
44.             estado = 1;
45.         }
46.     }
47.     else{
48.         if(estado == 1) {
49.             Serial.write('i');
50.             delayMicroseconds(200);
51.             estado = 0;
52.         }
53.     }
54. }
55.
```

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Zapatilla con MSP430 y batería, vista superior**



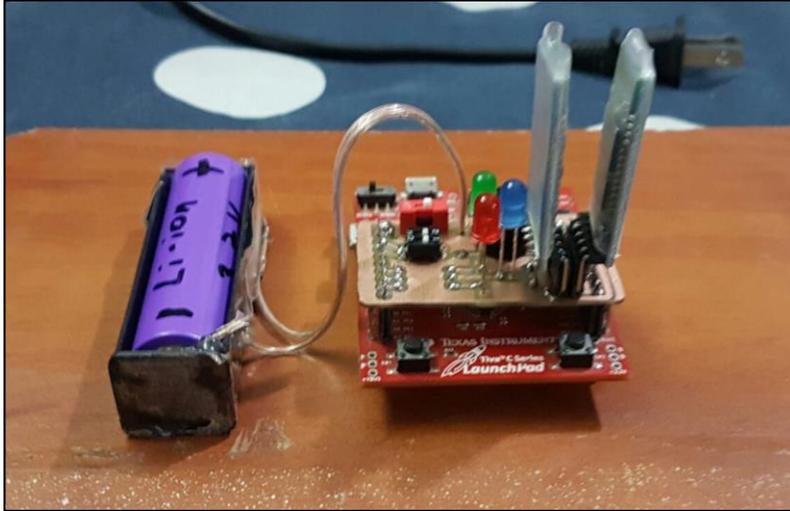
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Zapatilla con MSP430, batería y sensores FSR debajo de la plantilla, vista superior**



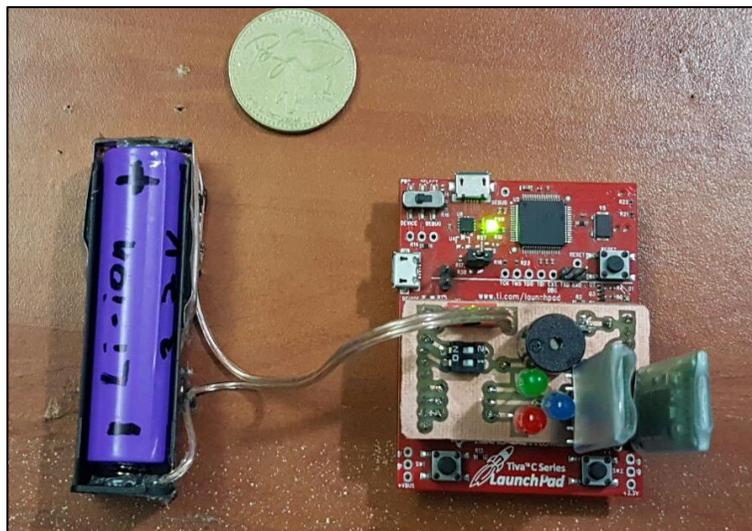
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Unidad de control principal, vista frontal**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Tamaño de la unidad de control principal, vista superior**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Prototipo completo, zapatillas y unidad de control principal**



Fuente: elaboración propia.

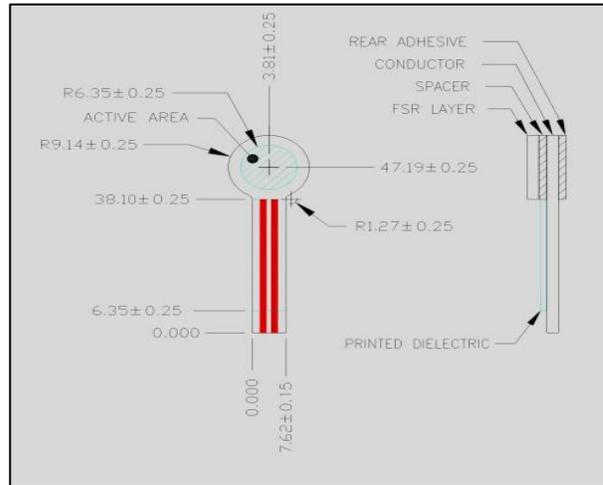
ANEXOS

Anexo 1. Aplicaciones y características técnicas del sensor FSR

	Feature	Condition	Value*	Notes
<p>Applications</p> <p>Detect & qualify press Sense whether a touch is accidental or intended by reading force</p> <p>Use force for UI feedback Detect more or less user force to make a more intuitive interface</p> <p>Enhance tool safety Differentiate a grip from a touch as a safety lock</p> <p>Find centroid of force Use multiple sensors to determine centroid of force</p> <p>Detect presence, position, or motion Of a person or patient in a bed, chair, or medical device</p> <p>Detect liquid blockage Detect tube or pump occlusion or blockage by measuring back pressure</p>	Actuation Force		0.1 Newtons	
	Force Sensitivity Range		0.1 - 10.0 ² Newtons	
	Force Repeatability³	(Single part)	± 2%	
	Force Resolution³		continuous	
	Force Repeatability³	(Part to Part)	±6%	
	Non-Actuated Resistance		10M W	
	Size		18.28mm diameter	
	Thickness Range		0.2 - 1.25 mm	
	Stand-Off Resistance		>10M ohms	Unloaded, unbent
	Switch Travel	(Typical)	0.05 mm	Depends on design
	Hysteresis³		+10%	$(R_{F+} - R_{F-})/R_{F+}$
	Device Rise Time		<3 microseconds	measured w/steel ball
	Long Term Drift		<5% per log ₁₀ (time)	35 days test, 1kg load
	Temp Operating Range	(Recommended)	-30 - +70 °C	
Number of Actuations	(Life time)	10 Million tested	Without failure	

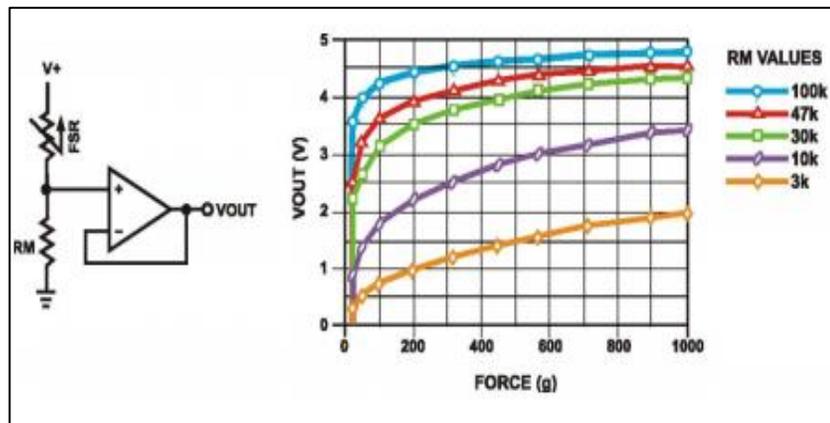
Fuente: *Interlink Electronics*. <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf>. Consulta: 18 de enero de 2017.

Anexo 2. Características mecánicas del sensor FSR



Fuente: *Interlink Electronics*. <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf>. Consulta: 18 de enero de 2017.

Anexo 3. Diagrama y gráfica de funcionamiento del sensor FSR



Fuente: *Interlink Electronics*. <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf>. Consulta: 18 de enero de 2017.