



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS  
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD ZACATENCO**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE BIOELECTRÓNICA**

**Propuesta de un equipo electrónico no invasivo de ayuda  
médica para la detección temprana por temperatura de las  
complicaciones del pie en pacientes diabéticos**

**TESIS**

**Que presenta**

Fátima Estela López Murillo

**Para obtener el grado de**

Maestra en Ciencias

**En la especialidad de**

Ingeniería Eléctrica

**Director de Tesis:** Dr. Lorenzo Leija Salas

México, D.F.

Diciembre 2014

## RESUMEN

El pie diabético representa una de las mayores causas de morbimortalidad en las personas que padecen Diabetes Mellitus. Se ha encontrado que el incremento o decremento en exceso en la temperatura registrada en el pie de estas personas es un indicador para ayudar a prevenir el desarrollo de esta complicación. Para poder enfatizar la importancia que tiene el estudio de la temperatura corporal del pie y poder evaluar la posibilidad de utilizarla como prediagnóstico en la patología del pie diabético se desarrolló el presente trabajo de tesis.

Se diseñó y construyó el prototipo de un sistema de monitoreo de temperatura del pie capaz de medir la temperatura de cuatro de las zonas de la planta del pie más propensas a una ulceración (dedo hallux, primer metatarsiano, zona opuestas al arco y talón del pie). A través del uso de este sistema se determinó la temperatura en estas zonas del pie cada minuto durante un lapso de 15 min. en 8 personas diabéticas y 4 no diabéticas. Posteriormente se realizó un análisis estadístico determinando la diferencia entre las temperaturas registradas en las zonas del pie derecho con las zonas correspondientes del pie izquierdo de cada participante, contrastando los resultados obtenidos en el grupo de participantes diabéticos con el del grupo de participantes no diabéticos.

El análisis estadístico no mostró una diferencia significativa en la temperatura de la misma zona entre el pie derecho y el pie izquierdo en ninguno de los participantes no diabéticos. Sin embargo, el análisis estadístico determinó una diferencia significativa entre la temperatura del pie derecho con la del pie izquierdo en algunos de los participantes diabéticos; esta diferencia registrada fue mayor a los 2.2 °C. La temperatura corporal del pie si puede ser utilizada como prediagnóstico en la patología del pie diabético. Con el resultado descrito corroboramos que la temperatura corporal del pie si puede ser utilizada como prediagnóstico en la patología del pie diabético.

## **ABSTRACT**

Diabetic foot ulcer (DFU) is a major cause of morbidity in patients with Diabetes Mellitus. It has been found that the difference of temperature on the sole of these persons could prevent the development of this complication.

This thesis was developed, to emphasize the importance of studying the foot temperature so that we can evaluate the possibility to use as a pre-diagnosis in the pathology of de diabetic foot.

A foot temperature monitoring system prototype was designed and implemented, to measure the temperature of four areas more susceptible to ulceration (hallux, first metatarsal, arch and heel). With this system we measured the four-foot areas temperature thirty times per minute for 15 minutes in eight diabetics persons and four non-diabetic persons. A health questionnaire was applied to each person to keep his or her medical data in the database system. Subsequently, a statistical analysis was made to determine the temperature differences between the same four areas on the right and the left foot of each person. Contrasting the results obtained in the diabetic group participants in the group of non-diabetic participants was conducted.

Statistical analysis did not show a significant temperature difference in the areas between the right foot and left foot in any of the non-diabetic participants. However, statistical analysis determined a significant temperature difference between the right foot to the left foot in some of the diabetic participants, this difference was greater than 2.2 ° C. The body temperature of the foot can be used as pre-diagnosis in the pathology of diabetic foot.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres Salvador y Margarita*

*A mis hermanas Teresa, Marisol y Xiadani*

*Y a mí nueva familia Jesús y mini*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado estos dos años.

Gracias al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) por permitirme realizar mis estudios de maestría en esta institución.

Le agradezco a Dios por permitirme vivir esta bonita experiencia y estar iluminando mi camino a lo largo de esta etapa de mi vida.

Gracias al Dr. Lorenzo Leija por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto y asesorarme en éste mi camino como profesionista. Al Dr. Arturo Vera por su apoyo otorgado durante estos dos años. A los técnicos del laboratorio Rubén y Hugo por su ayuda brindada en todo momento.

Muchas gracias a mis padres por su amor, apoyo incondicional y por ser el mejor ejemplo a seguir. A mis hermanas por su amistad, amor, confianza y por ser mis cómplices de toda la vida.

Agradezco a todos mis amigos de la maestría: a mi hermano Manuel, por acompañarme desde el primer día, a Efrén, Asul, Eve, Mel, José, Luis, Lara, Alvaro, Esmeralda, Ismael, Karina, Pedro y Neto por su amistad brindada, por su apoyo durante el posgrado y por hacer mi estancia muy Feliz estos 2 años, sin ustedes no lo hubiera logrado.

A mis hermanillos del LAREMUS: Fer por su amistad y loqueras, Tony por sus consejos y apoyo, Juan, Usiel, Kaled y Sagit por apoyarme y ser parte de mi familia en el Cinves.

Agradezco especialmente a mi compañero en esta vida, Chuy por estar siempre a mi lado, apoyarme en todos los momentos, cuidarme, hacerme Feliz todos los días y darme el mejor regalo de todos.

## ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>I. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE EN EL DIAGNÓSTICO DE LA DIABETES MELLITUS</b> .....	4
1.1 Clasificación de la Diabetes Mellitus.....	4
1.2 Diagnóstico de la Diabetes Mellitus .....	5
1.3 Estadísticas de la Diabetes Mellitus (DM).....	6
1.4 Complicaciones de la Diabetes Mellitus.....	8
1.5 Pie diabético.....	10
1.5.1 Causas que propician al desarrollo del pie diabético.....	10
1.5.2 Estadísticas de pie diabético .....	12
1.5.3 Amputación.....	12
1.5.4 Clasificación del pie diabético.....	13
1.5.5 Métodos para evaluar el pie diabético.....	14
1.6 Estado del arte de los métodos de diagnóstico propuestos.....	21
1.6.1 Medición de temperatura en el pie diabético.....	21
1.6.2 Medición de impedancia del pie .....	24
1.6.2.1 Principios y Fundamentos de Bioimpedancia.....	24
1.6.2.1.1 Medidor de impedancia y métodos multifrecuencia .....	27
1.6.2.2 Caracterización del pie diabético por medios bioeléctricos.....	30
<b>II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>33</b>
2.1 Propuesta .....	33
2.2 Hipótesis.....	33
2.1 Justificación .....	33
2.5 Objetivos.....	34
<b>III. PROPUESTA DE SOLUCIÓN</b> .....	<b>36</b>
3.1 Introducción.....	36
3.2 Sistema de monitoreo de temperatura de pie para pacientes diabéticos.....	36
3.2 1 Descripción del sistema.....	36
3.2.2 Materiales utilizados.....	41
3.2.2.1 Calibración de sensores de temperatura.....	42
3.2.3 Funcionamiento del sistema .....	44
3.2.3.1 Monitoreo de la temperatura.....	44

3.2.3.2 Adquisición de la señal.....	44
3.2.3.3 Interfaz USB .....	45
3.2.4 Interfaz usuario.....	45
3.2.4.1 Medir temperatura de los pies .....	45
3.2.4.2 Borrar medidas almacenadas en la memoria externa.....	47
3.2.4.3 Enviar medidas almacenadas por USB a una computadora.....	48
3.2.5 Diseño del sistema de monitoreo de temperatura en pie .....	49
3.2.5.1 Partes del sistema .....	49
3.2.5.2 Precauciones y consideraciones .....	50
3.3 Sistema de medición de impedancia eléctrica en la piel en pacientes diabéticos	51
3.3.1 Descripción del sistema.....	51
3.2 Protocolo para la medición de la temperatura del pie .....	60
3.4.1 Participantes .....	60
3.4.2 Criterio de selección .....	60
3.4.2.1 Criterios de inclusión para cada grupo .....	61
3.4.3 Materiales y equipos.....	62
3.4.4 Procedimiento.....	62
3.4.5 Análisis de Temperatura.....	63
3.4.5.1 Análisis Estadístico .....	64
3.4.5.2 Aspectos éticos.....	65
<b>IV RESULTADOS.....</b>	<b>66</b>
4.1 Datos registrados con e sistema de monitoreo de temperatura en pie.....	66
4.2 Comportamiento Térmico de las zonas de los pies monitoreados de cada participante .....	69
4.3 Análisis de las zonas térmicas del pie monitoreadas de cada participante.....	71
4.4 Análisis estadístico .....	74
<b>V CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>79</b>
BIBLIOGRAFÍA .....	83
ANEXOS .....	89

## INTRODUCCIÓN

La Diabetes Mellitus es una enfermedad crónica que ocurre cuando el páncreas no produce insulina suficiente o cuando el organismo no usa eficientemente la insulina que produce. El efecto de la diabetes no controlada es la hiperglicemia, que con el tiempo perjudica gravemente muchos órganos y sistemas en especial los nervios y los vasos sanguíneos, esto puede propiciar el desarrollo de enfermedades visuales, vasculares, renales, etc. o complicaciones severas como la aparición del pie diabético. Esta enfermedad tiene una alta incidencia a nivel mundial, en México el 14 % de la población es propensa a padecerla.

El “Pie Diabético” es definido como un grupo de alteraciones de las cuales la neuropatía, la infección y la enfermedad vascular periférica provocan la lesión de los tejidos o ulceración, resultando en morbilidad y posible amputación. Las áreas más propensas a ulceración son en gran parte las zonas donde el pie ejerce mayor presión y están asociadas con el aumento de la temperatura local debido a inflamación y autólisis enzimática de los tejidos.

Para poder estudiar y analizar el comportamiento térmico del pie en personas diabéticas y no diabéticas, en este trabajo de tesis, se propone el diseño del prototipo de un sistema de medición de temperatura en pie, el cual a través de sensores de temperatura monitoreará cada 2 segundos la temperatura registrada en cuatro de las zonas más propensa a ulceración, esto es en la planta del pie en personas diabéticas adultas (dedo hallux, primer metatarsiano, lado opuesto del arco y talón) durante un lapso de 15 minutos para posteriormente realizar, en este mismo trabajo de tesis, un estudio similar en personas no diabéticas contrastando los resultados estadísticos obtenidos en ambos casos y con ello evaluar la posibilidad de utilizar la temperatura corporal del pie diabético para su aplicación como prediagnóstico.

Así mismo, se pretende obtener una valoración de la tejido corporal en el pie de personas diabéticas, para esto, se propone el uso de la medición de la

bioimpedancia eléctrica, por lo que se propone el desarrollo de un sistema para medición de impedancia eléctrica, la solución que proponemos se realizará con corriente alterna a frecuencias de 10 Hz a 1 MHz.

El propósito de este trabajo de tesis es el desarrollo de prototipos de instrumentos que puedan formar un módulo de medición de temperatura e impedancia eléctrica en el pie, para posteriormente en trabajos futuros llegar a desarrollar un instrumento no invasivo capaz de proporcionar información útil al médico para que pueda determinar el mejor tratamiento a seguir para cada paciente y de esta manera vigilar el control y el desarrollo del pie diabético.

El presente escrito se divide en 5 capítulos que se describen a continuación:

Capítulo 1: Se presentan los antecedentes y el estado del arte en el diagnóstico de la diabetes mellitus. Se menciona en general la enfermedad de la Diabetes Mellitus, sus causas, síntomas, estadísticas a nivel mundial y complicaciones entre estas, en nuestro caso nos referimos al pie diabético. Así mismo se describe el estado del arte sobre el estudio de la temperatura en pie diabético y la medición de impedancia en zonas del pie en personas diabéticas.

Capítulo 2: Se plantea la justificación del proyecto basándose en estadísticas sobre la tasa de morbilidad y mortalidad de personas con pie diabético. Se describe el objetivo general de este trabajo de tesis; así como una serie de objetivos específicos desarrollados para concluir satisfactoriamente con este proyecto.

Capítulo 3: Se describe detalladamente la metodología utilizada para el desarrollo de los sistemas de medición de temperatura e impedancia en pie diseñados en este trabajo, los materiales utilizados, el principio de funcionamiento y las bases que se tomaron para realizar estos sistemas. Se muestra el protocolo de medición que se tomó para llevar a cabo las mediciones de temperatura en las cuatro zonas del pie en personas con y sin diabetes.

Capítulo 4: Se describen los resultados obtenidos en las mediciones realizadas de temperatura del pie en personas con y sin diabetes. Así como el análisis estadístico realizado para determinar la similitud entre los resultados arrojados por las personas diabéticas y las no diabéticas.

Capítulo 5: Se plantean las conclusiones, así como el trabajo a futuro que se propone para el seguimiento en este estudio sobre la patología del pie diabético.

# CAPÍTULO I

## I. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE EN EL DIAGNÓSTICO DE LA DIABETES MELLITUS

### 1.1 Clasificación de la Diabetes Mellitus

La Diabetes Mellitus es una enfermedad crónica que ocurre cuando el páncreas no produce insulina suficiente o cuando el organismo no usa eficientemente la insulina que produce.

Uno de los más importantes requisitos para la investigación clínica y epidemiológica y para el tratamiento clínico de la diabetes es el disponer de un adecuado sistema de clasificación que proporcione un marco apropiado para identificar y diferenciar los varios tipos y etapas. Recientemente, el Comité de Expertos de la Asociación Americana de Diabetes (ADA) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS) han propuesto clasificar la diabetes mellitus en cuatro grupos [1]:

- *Diabetes Mellitus tipo I:* También llamada insulino dependiente, juvenil o en el comienzo de la infancia; se caracteriza por una producción deficiente de insulina y requiere administración diaria de este hormono.
- *Diabetes Mellitus tipo II:* También llamada no insulino dependiente o de comienzo en la edad adulta; se caracteriza por el uso ineficaz de la insulina. El paciente experimenta una resistencia a la insulina en donde las células de grasa, de los músculos y del hígado no usan la insulina de forma adecuada. Ese tipo representa 90% de los casos mundiales y se debe en gran parte al exceso del peso corporal y la falta de actividad física. Actualmente, este tipo de diabetes viene siendo observado también en niños y adolescentes [2].

- *Otros tipos específicos de diabetes:* Representa alrededor del 1% de los casos y son originados por otras causas como defectos genéticos en la función de las células  $\beta$ , inducida por medicamentos o químicos, endocrinopatías, enfermedades del páncreas exocrino entre otras [3].
- *Diabetes Mellitus gestacional:* Corresponde a un estado hiperglicémico detectado durante el embarazo [2].

## 1.2 Diagnóstico de la Diabetes Mellitus

A menudo la diabetes es descubierta por la presencia de síntomas que distinguen a esta enfermedad (Tabla 1.1), a causa de los resultados anormales que arrojan los análisis de sangre y orina, donde se muestran la existencia de glucosa (Tabla 1.2) o por el desarrollo de algunas complicaciones vasculares y no vasculares [4,5].

Tabla 1.1 Síntomas de la diabetes

Diabetes tipo I	Diabetes tipo II
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ganas de orinar en grandes cantidades.</li> <li>• Sed excesiva</li> <li>• Hambre excesiva a toda hora</li> <li>• Pérdida de peso repentino</li> <li>• Debilidad somnolencia</li> <li>• Cambios repentinos en la visión, o visión borrosa</li> <li>• Nauseas y vómitos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ganas de orinar frecuentemente</li> <li>• Sed excesiva</li> <li>• Hambre excesiva y a toda hora</li> <li>• Sensación de cansancio</li> <li>• Cambios repentinos en la visión</li> <li>• Nauseas y vómitos</li> <li>• Infecciones frecuentes, generalmente en las encías o vías urinarias</li> <li>• Hormigueo en manos y pies</li> <li>• Picazón en la piel y genitales</li> <li>• Cortaduras y heridas que tardan en cicatrizar</li> <li>• Piel seca</li> </ul>

Tabla 1.2 Signos de la diabetes detectados en análisis de laboratorio

Signos
<ul style="list-style-type: none"><li>• Presencia de glucosa y cuerpos cetónicos en la orina.</li><li>• Más de 126 mg/dl de glucosa en sangre en ayunas.</li><li>• Más de 200 mg/dl de glucosa en sangre en cualquier momento, sumado a síntomas como aumento de la sed, de la micción y fatiga.</li><li>• Nivel bajo o nulo de insulina en sangre.</li><li>• Niveles de hemoglobina glicosilada.</li></ul>

Una vez que se desarrolla la diabetes, la glicemia puede ser controlada por cambios en el estilo de vida, incremento de actividad física y dietas balanceadas en algunos pacientes, mientras que en otros la insulina o agentes hipoglucemiantes orales son necesarios para prevenir o controlar la ketosis o ketoacidosis.

### 1.3 Estadísticas de la Diabetes Mellitus (DM)

La Diabetes Mellitus constituye un problema de tipo social a nivel mundial por las graves repercusiones crónicas y de salud que causan impacto, con mayor frecuencia en la población económicamente activa [6].

La tasa de incidencia es la medida más exacta para medir los casos de diabetes existentes. Para el cálculo de la tasa de incidencia, los nuevos casos de diabetes deben ser reconocidos y contados. La diabetes tipo I es fácil de reconocer, y prácticamente todos los nuevos casos se determinan en una sociedad con acceso a atención médica. El reconocimiento de nuevos casos de diabetes tipo II depende de la severidad de los síntomas y la elección de los criterios de diagnóstico [4].

Según los últimos datos del Atlas de la Federación Internacional de Diabetes (FID), se estima que actualmente hay en el mundo alrededor de 366 millones de diabéticos y se espera que esta cifra se eleve a 552 millones en el año 2030; el

aumento será de 40% en los países desarrollados y de 70% en los países en vías de desarrollo. El 25% del total de casos se concentra en los países del nuevo mundo. China es el país con mayor número de personas con diabetes, con una cifra actual de 90 millones, seguida de India con 61.3 millones. Detrás se encuentran los Estados Unidos (23.7 millones); Rusia (12.6 millones); Brasil (12.4 millones); Japón (10.7 millones); México (10.3 millones); Bangladesh (8.4 millones); Egipto (7.3 millones) y Indonesia (7.3 millones) Figura 1.1 [7].

En América Latina, México junto con Brasil presentan la mayor prevalencia de diabetes. En México, anualmente se registran 300,000 personas diabéticas y fallecen 40,000 aproximadamente. Por cada diabético que muere se detectan trece nuevos casos de enfermedad. Actualmente se ha difundido entre la población mexicana recomendaciones para disminuir el riesgo de padecer diabetes. De acuerdo con lo planteado en el Programa Nacional de Salud 2007-2012 es una enfermedad de muy alta prevalencia en México y un reto que enfrenta el Sistema Nacional de Salud, entre la población mayor de 20 años la prevalencia es de 8 de cada 100 personas del mismo grupo de edad, incrementándose con la edad, pues después de los 50 años es superior a 20 de cada 100. Para atenuarla, se han creado diversos programas para atacar el principal factor de riesgo en la población, que es la obesidad [8].

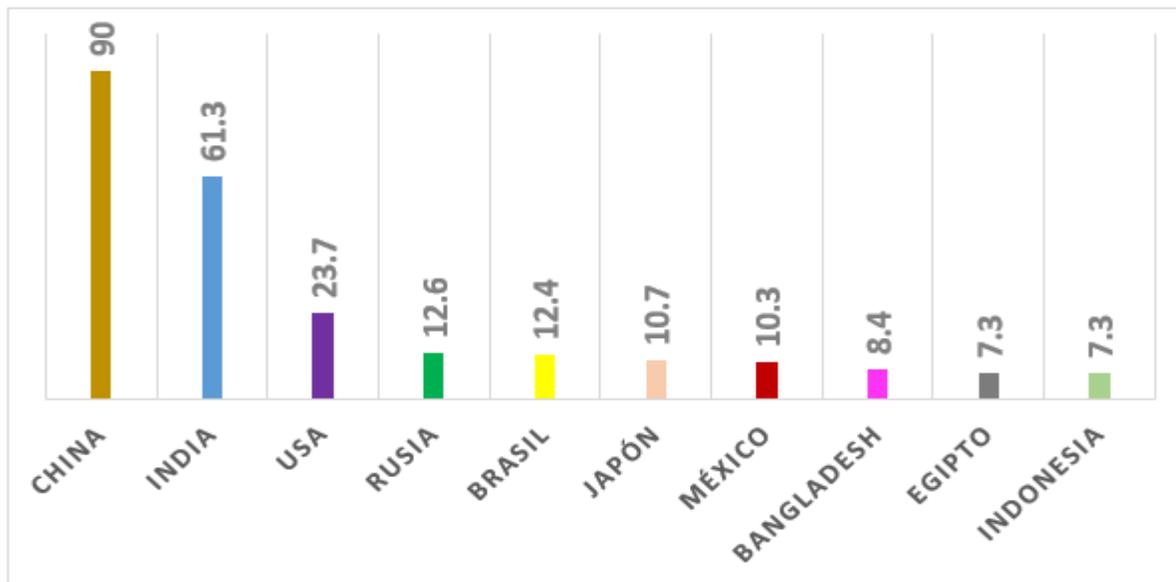


Fig. 1.1 Cantidad de personas con DM a nivel mundial (millones)

La diabetes impone una gran carga económica sobre el individuo, los sistemas sanitarios nacionales y los países. Los gastos sanitarios debidos a la diabetes representan el 11% del gasto total sanitario en el mundo en 2011. Se calcula que alrededor del 80% de los países que cubre este informe emplean entre un 5% y un 18% de su gasto total sanitario en diabetes. Los gastos sanitarios incluyen el gasto en diabetes por parte del sistema sanitario y por las personas que viven con diabetes.

Los gastos sanitarios mundiales estimados para tratar la diabetes y prevenir sus complicaciones sumaron un total de 465.000 millones de dólares estadounidenses (USD) en 2011. En 2011, se ha gastado en el mundo una media estimada de 1.274 USD (1.366 ID) por persona con diabetes en tratamiento y control de la enfermedad. Las personas que viven en países de ingresos medios y bajos pagan una proporción de los gastos sanitarios porque carecen de acceso a seguros sanitarios y no disponen de servicios médicos públicos. En América Latina, por ejemplo, las familias pagan un 40-60% de los gastos médicos de su propio bolsillo. En algunos de los países más pobres, las personas con diabetes y sus familias soportan casi el total del coste de la atención médica [7].

#### **1.4 Complicaciones de la Diabetes Mellitus**

Las complicaciones de la diabetes son problemas de salud que ocasiona esta enfermedad. La diabetes hace que el nivel de azúcar en la sangre sea más alto de lo normal. Con el tiempo, los niveles de azúcar altos pueden dañar los vasos sanguíneos y los nervios. Este daño puede ocasionar problemas en muchas áreas del cuerpo. El riesgo de complicaciones crónicas aumenta con la duración de la hiperglucemia; suelen hacerse evidentes en el transcurso del segundo decenio de la hiperglucemia. Como la DM de tipo II puede tener un período prolongado de hiperglucemia asintomática, muchas personas con DM de tipo II presentan complicaciones en el momento del diagnóstico [9].

Las complicaciones crónicas de la DM pueden dividirse en:

- No vasculares: comprenden problemas como gastroparesia, disfunción sexual y afecciones de la piel.
- Vasculares: se subdividen en microvasculares y macrovasculares.

Entre las enfermedades macrovasculares están:

- La Arteriopatía Coronaria: Se define como el estrechamiento de los pequeños vasos sanguíneos que suministran sangre y oxígeno al corazón (arterias coronarias). Sus síntomas son dolor torácico, dificultad para respirar y ataque cardíaco.
- El Accidente Vascular Cerebral: Ocurre cuando el suministro de sangre a una parte del cerebro se interrumpe repentinamente o cuando un vaso sanguíneo en el cerebro se rompe, derramando sangre en los espacios que rodean a las células cerebrales. Sus síntomas son entumecimiento o debilidad repentina, especialmente en un lado del cuerpo; confusión repentina o problemas con el habla o la comprensión; problemas repentinos en la vista con uno o ambos ojos; problemas repentinos al caminar, mareos o pérdida de equilibrio o coordinación; o un dolor de cabeza severo repentino sin causa conocida [10].
- La enfermedad Vascular Periférica: Es una condición en la cual las arterias que conducen a las piernas y los pies (o en algunos casos los brazos) se obstruyen con depósitos de grasa llamados placa, lo que reduce el flujo sanguíneo a estas áreas. Como síntomas se pueden mencionar dolor, palidez y disminución de temperatura en los pies [11].

Entre complicaciones vasculares microvasculares se encuentran:

- Retinopatía Diabética: Es una complicación de la diabetes y una de las causas principales de la ceguera. Ocurre cuando la diabetes daña a los pequeños vasos sanguíneos de la retina, que es el tejido sensible a la luz situado en la parte posterior del ojo. Todas las personas con diabetes, tanto del tipo I como del tipo II, corren riesgo de padecer retinopatía [12].

- Nefropatía diabética: Es una complicación vascular crónica, exclusiva de la DM, en la que se afecta la microcirculación renal originando una serie de alteraciones funcionales y estructurales principalmente a nivel glomerular. El cuadro clínico se caracteriza por proteinuria persistente, hipertensión arterial y deterioro progresivo de la función renal [13].
- Neuropatía diabética: Es la lesión o enfermedad de los nervios. Se produce por un mal control prolongado de la diabetes, es decir, por niveles glucémicos elevados durante mucho tiempo. Cuando la concentración de glucosa en la sangre se eleva por encima de ciertos niveles, los nervios de todo el organismo comienzan gradualmente a resultar dañados ocasionando así la pérdida de la sensibilidad, dolor o incapacidad para controlar los músculos [14].

## **1.5 Pie diabético**

El síndrome del pie diabético es considerado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la presencia de ulceración, infección y/o gangrena del pie asociada a la neuropatía diabética y diferentes grados de enfermedad vascular periférica, resultados de la interacción compleja de diferentes factores inducidos por una hiperglicemia mantenida [15].

### **1.5.1 Causas que propician al desarrollo del pie diabético**

Las principales causas que llevan a que un diabético desarrolle la patología del pie diabético son la neuropatía diabética y la enfermedad vascular periférica:

1. Neuropatía diabética: Existen tres tipos de neuropatía diabética, que afectan al sistema nervioso de diferentes formas:

- La Neuropatía sensorial: Provoca el daño en los nervios sensores los cuales permiten a las personas sentir dolor, temperatura y otras sensaciones. Entre sus síntomas están el adormecimiento u hormigueo en los pies, dolor o molestias en pies y piernas y la pérdida de la sensibilidad.

- La Neuropatía motora: Daña los nervios motores los cuales controlan los músculos y les dan resistencia y tono. Los síntomas relacionados con este tipo de neuropatía son: debilidad muscular en los pies y piernas, pérdida de equilibrio y cambios en la forma del pie (hiperextensión del pie, dedos en martillo y en garra) que pueden conducir a áreas de mayor presión propiciando el desarrollo de callosidades, ulceración e infección.
- La Neuropatía Autonómica: Causa disminución o ausencia de la sudoración de los miembros inferiores, responsable de la sequedad y descamación de la piel. Estas alteraciones predisponen al desarrollo de fisuras de los pies e infecciones. A su vez, el incremento del flujo sanguíneo aumenta la temperatura cutánea y aparecen venas dorsales prominentes en los pies [16].

2. Enfermedad vascular periférica: Se clasifican en:

- Microangiopatía: En ella los vasos que se afectan son los de pequeño calibre: arteriolas y capilares arteriolas. La piel de los pies se observa seca, las uñas se presentan engrosadas, deformes y con estrías longitudinales, pueden presentarse lesiones mínimas cutáneas, espontáneas o por traumas sin aparente trascendencia, de evolución tórpida y difícil cicatrización.
- Macroangiopatía: Los vasos afectados son los de mayor y mediano calibre como las arterias femorales, poplítea, tibiales y cubitales. Produce lesiones como úlceras isquémicas y gangrenas isquémicas: lesiones de color negruzco, distales, dolorosas. Disminuye la temperatura en el pie notablemente.

3. Lesiones e infecciones: Son procesos infecciosos que se presentan en el pie del diabético que tienen como causa más frecuente un grave “pinchazo”, aunque también pueden deberse a la infección de úlceras neurotróficas o isquémicas, onicomicosis, picaduras de insectos, rasguños o cualquier lesión mínima, que lesiona la piel y posteriormente se infecta [17].

### **1.5.2 Estadísticas de pie diabético**

La prevalencia de úlceras de pie diabético en los países desarrollados varía según el sexo, edad y población desde el 4% hasta el 10%. Se ha establecido una incidencia correspondiente del 2.2 al 5.9%. Se ha calculado que al menos un 15% de los diabéticos padecerá durante su vida ulceraciones en el pie, igualmente se estima alrededor de un 85% de los diabéticos que sufren amputaciones previamente han padecido una úlcera.

La prevalencia estimada de neuropatías periféricas, factor de riesgo prevalente para el desarrollo de úlceras, oscila entre el 30 y el 70 %. La prevalencia de enfermedad vascular periférica en diabéticos se ha calculado que oscila del 10-20% [18].

### **1.5.3 Amputación**

Una amputación es sometida cuando es la única opción terapéutica por presentar extensa necrosis tisular (muerte patológica de un conjunto de células o de cualquier tejido, provocada por un agente nocivo que causa una lesión tan grave que no se puede reparar o curar), o cuando las diversas alternativas terapéuticas han fracasado. A pesar de los avances en materia de información, profilaxis y alternativas terapéuticas médico-quirúrgicas, la tasa de amputación en el enfermo diabético sigue presentando una prevalencia elevada. Entre el 50% y el 65%, en función de las diversas publicaciones, de todas las amputaciones por causa no traumática, son realizadas en enfermos diabéticos, de los cuales, del 5% al 10% de los diabéticos sufren una amputación.

Las amputaciones se dividen en menores (distales de los dedos, transfalángicas, digital transmetatarsiana y atípicas) y mayores (Amputación de Syme, amputación de Pirogoff, amputación infracondilea, desarticulación de la rodilla y amputación supracondilea) [19].

### 1.5.4 Clasificación del pie diabético

El interés básico de disponer de una clasificación clínica de la severidad en que se encuentra el Pie Diabético responde a la conveniencia de articular los protocolos terapéuticos adecuados a la necesidad de establecer su valor predictivo en cuanto a la cicatrización de la ulcera. La clasificación de Wagner (Meggitt/Wagner), valora 3 parámetros: la profundidad de la ulcera, el grado de infección y el grado de necrosis (Figura 1.2) [6]:

- Grado 0: No hay lesión, pie de riesgo.
- Grado 1: Úlcera superficial.
- Grado 2: Úlcera no complicada.
- Grado 3: Úlcera profunda complicada.
- Grado 4: Gangrena localizada.
- Grado 5: Gangrena de todo el pie.

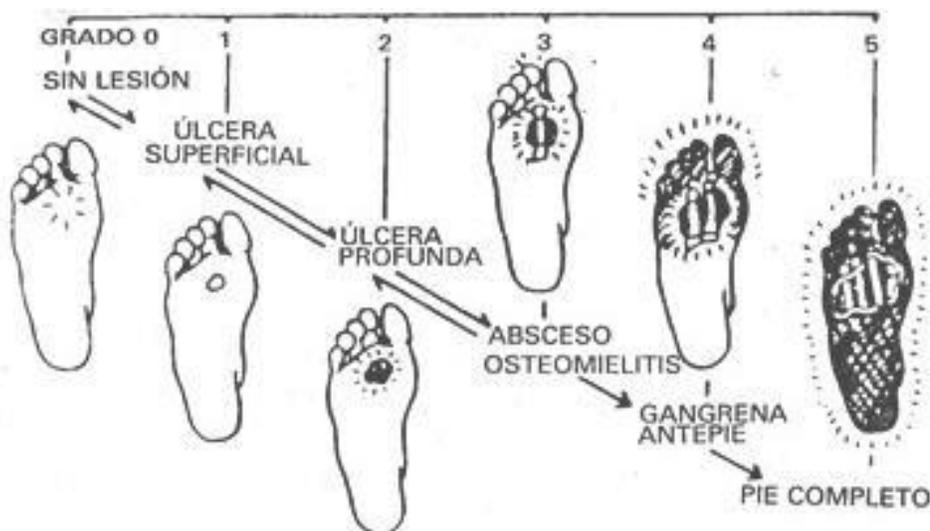


Fig. 1.2. Clasificación del pie diabético según Wagner

Actualmente, tanto la diabetes como las úlceras crónicas del pie diabético únicamente se controlan, no se curan, y frecuentemente las úlceras de pie terminan en amputación, porque se controla con curaciones parciales de la herida que frecuentemente se infecta y tiene un muy mal pronóstico [5], sólo la prevención y detección precoz de los factores de riesgo, así como su corrección, pueden disminuir la alta morbilidad y la mortalidad de esta complicación.

### **1.5.5 Métodos para evaluar el pie diabético**

Cualquier pequeña rozadura, herida o grieta puede pasar inadvertida y servir como puerta de entrada a una posible infección, que en caso de complicarse puede propiciar la aparición del pie diabético. Es por esto que la persona con diabetes debe vigilar y cuidar con esmero la higiene de sus pies y someterse a una evaluación regular para evitar su aparición [20].

La evaluación diagnóstica tiene que estar centrada en los siguientes aspectos:

1. *Historia clínica general:* Esta evaluación se realiza a cada paciente con el fin de tener su historial clínico. Este historial debe contener el nombre del paciente, su edad, tipo sanguíneo, antecedentes familiares, tipo de diabetes, evolución, fecha de cada revisión, duración de la enfermedad, control glicémico, tratamiento farmacobiólogo actual, cirugías y hospitalizaciones previas, evaluación cardiovascular, renal y oftalmológica, estado nutricional, etc.
2. *Historia clínica del pie:* Este historial se realiza a cada paciente para llevar el control del tipo de calzado utilizado, deformidades, presencia de hiperqueratosis, infecciones previas, síntomas neuropáticos (parestias, disestesias) así como, síntomas de claudicación o dolor en la región gemelar durante la caminata o en reposo a través de la clasificación de Fontaine.

3. *Historia Clínica de las heridas:* En este historial se registran las heridas que haya tenido el paciente previamente, su localización, duración, evento desencadenante, recurrencia, infección, cuidado de las heridas, antecedente de cirugía o trauma previo, presencia de edema uni o bilateral, pie de Charcot previo o activo.
  
4. *Exploración física:* Se recomienda una revisión sistemática y ordenada con el objetivo de identificar un pie en riesgo (Wagner 0), lo que permite realizar un abordaje diagnóstico terapéutico oportuno y eficaz. Esta revisión debe realizarse en todo paciente diabético una vez al año y en caso de la presencia de factores de riesgo debe ser cada 1 a 6 meses. Durante la exploración del pie es de importancia observar las características clínicas de las úlceras presentes que nos permita diferenciar la etiología isquémica o neuropática (Tabla 1.3) [21].

Tabla 1. 3 Características clínicas de tipos de úlceras

Úlcera neuropática	Úlcera isquémica
Indolora	Dolora
Pulsos Normales	Pulsos Ausentes
Localizada en la planta del pie	Localizada habitualmente en los dedos
Presencia de callosidad	Callosidad ausentes o infrecuentes
Pérdida de sensibilidad, reflejos y sensibilidad vibratoria.	Hallazgos sensoriales variables
Flujo sanguíneo aumentado	Flujo sanguíneo reducido
Venas dilatadas	Venas colapsadas
Pie seco, caliente	Pie frío
Aspecto rojizo	Aspecto pálido, cianótico
Deformidades óseas	No deformidades óseas

La exploración física se lleva a cabo evaluando los siguientes aspectos:

- Evaluación dermatológica y osteomuscular

- Exploración neurológica
- Exploración Vascular
- Evaluación de la infección

#### Evaluación dermatológica y osteomuscular.

Esta evaluación se realiza en el pie del paciente, los aspectos que se tratan de localizar son mencionados a continuación:

- Aspecto de la piel: Se evalúa la sequedad (anhidrosis); la hiperqueratosis; las callosidades; las deformidades; las fisuras y grietas; las maceraciones interdigitales; el eczema y las dermatitis; la atrofia del tejido celular subcutáneo; el color y tono cutáneos; la ausencia de vello en el dorso del pie, y la turgencia de los plexos venosos dorsales.
  - Edema: localización, bilateralidad, grado, consistencia.
  - Onicopatías: onicomycosis, onicogriphosis, onicocriptosis.
  - Trastornos en la alineación de los dedo hallux valgus, varus, garra, martillo.
  - Trastornos estructurales: pie cavo, plano, pronado, supinado; la atrofia de la musculatura intrínseca (p.ej. la subluxación metatarsfalángica).
  - Temperatura: asimetría de la temperatura plantar percibida con el dorso de la mano [22].
- Exploración neurológica

El examen clínico recomendado para la evaluación de la neuropatía diabética está dirigido no tanto a diagnosticar estadios incipientes de Neuropatía, sino más bien a identificar la presencia de la pérdida de sensibilidad. Los médicos pueden probar la función nerviosa de diversas maneras, porque diferentes fibras nerviosas parecen ser las responsables de tipos distintos de sensaciones, como roce leve, vibración y temperatura [23]. La Tabla 1.4 muestra las pruebas realizadas para el examen neuropático que se realiza hoy en día. Se recomienda usar dos de estas pruebas

para el diagnóstico neuropático del paciente, de las cuales la prueba Miofilamento es la más recomendada por diferentes asociaciones médicas [24].

Tabla 1.4 Pruebas diagnósticas de neuropatía diabética

Parámetro evaluado	Técnica
Sensibilidad algésica	Palillo romo y puntiagudo
Sensibilidad Térmica	Mango de Diapasón Barra fría y caliente
Sensibilidad a la presión	Monofilamento
Sensibilidad vibratoria	Diapasón de 128 Hz Diapasón calibrado Neurotensiómetro
Reflejos alquíleos	Martillo de reflejos

- **Monofilamento (MF):** Este instrumento médico está compuesto por un filamento de nailon unido a un mango, que al doblarse aplica una presión constante de 10 g, con independencia de la fuerza con que lo aplique el explorador. Permite evaluar la sensibilidad a la presión y táctil (Figura 1.3) [24].

#### *Procedimientos en la medición*

1. Se muestra el filamento al paciente y se le informa del procedimiento previamente, probándolo en el brazo o mano del paciente.
2. Se realiza el test con el filamento en las áreas indicadas en cada pie.
3. Nunca se debe aplicar en una úlcera, callo, piel necrótica u otra lesión.
4. Se aplica el filamento perpendicularmente a la piel, empleando siempre movimientos uniformes.
5. Se ejerce presión suficiente para que el filamento se doble.
6. Se retira de la piel procurando no realizar movimientos rápidos. La aproximación, el contacto con la piel y la retirada del filamento no debe durar más de 1- 1,5 segundos.
7. No permitir que el filamento se deslice sobre la piel ni hacer contactos reiterados sobre un lugar de test.
8. El paciente responderá "sí" si siente el filamento. Si no responde al contacto en un área concreta del pie, continuar en otro sitio. Al completar la secuencia,

se repite las áreas donde el paciente no haya indicado que siente el contacto del filamento.

9. Se usa una secuencia aleatoria para aplicar el filamento, para evitar que el paciente imagine donde le va a tocar.
10. Se indica con un signo "-" las zonas en las que no ha respondido al contacto con el filamento.

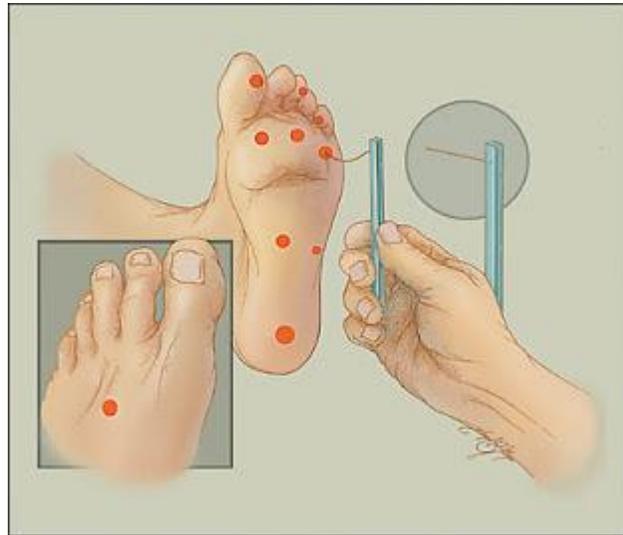


Fig. 1.3 Técnica medición de sensibilidad por monofilamento

El número de puntos que se recomienda explorar oscila entre cuatro y diez. En individuos normales la sensibilidad al MF es mayor en el dorso del pie y menor en el talón. La gran mayoría de las recomendaciones de los expertos consideran que la exploración de cuatro puntos de la planta del pie (la zona plantar del primer dedo y la base del primer, tercer y quinto metatarsianos) representa la exploración óptima. Su sensibilidad en la detección de enfermos con neuropatía sensitiva es del 95%-100% y su especificidad, del 80%. Tiene un carácter predictivo, en el caso de no percepción, de x 10 en cuanto al riesgo de desarrollar ulceración y x 17 en cuanto al de amputación [24].

- ❖ **Diapasón:** Es un método simple y barato para medir la sensación vibratoria, pero presenta problemas de fiabilidad (Figura 1.4). Los pasos que se siguen en esta técnica de medición de sensibilidad vibratoria son los siguientes:

1. Se utiliza un diapasón de 128 Hz de vibración o un diapasón graduado de 0 a base 8. \*Revise la redacción
  2. El paciente se colocará en decúbito supino sobre la camilla de exploración y con los ojos cerrados. Se aplicará el diapasón, perpendicularmente a la piel, y se preguntará al paciente si siente o no su contacto. Previamente enseñarle la sensación de vibración en la muñeca, en la prominencia cubital o radial.
  3. En el caso del uso de un diapasón graduado el número más próximo que aparece como punto de intersección de los lados largos de los dos triángulos que vibran en el momento en que el sujeto cesa de percibir la vibración, constituye la medida. Debe determinarse 3 veces en cada pie. Las medidas en cada pie se promedian por separado. Los pacientes vulnerables a las ulceraciones serían aquellos en los que la lectura fuese menor a 4.
  4. Se aplicará en ambos pies a nivel de:
    - Falange distal de primer dedo
    - Base de primer metatarsiano
  5. No se aplicará sobre zonas de hiperqueratosis o callo, si existe esta se explorará en la piel sana más próxima [25].
- **Reflejos alquileos:** Consiste en que un golpe en el tendón de Aquiles produce una flexión plantar del pie. Es un método simple y barato para medir la sensación vibratoria, pero presenta problemas de fiabilidad (Figura 1.5).

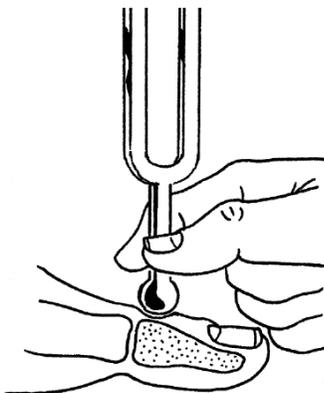


Fig. 1.4. Medición de sensibilidad vibratoria con diapasón

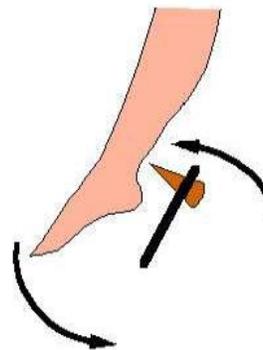


Fig. 1.5 Medición de reflejos alquileos

## Exploración Vascular:

El diagnóstico de isquemia periférica debe basarse en una anamnesis y exploración clínica adecuadas y en unas pruebas indirectas no invasivas, Los métodos más empleados en nuestro medio para su diagnóstico son el índice tobillo-brazo (ITB) por Doppler (o esfigmomanómetro en su defecto) y el ultrasonido dúplex arterial.

- **Índice Tobillo-brazo:** El índice tobillo brazo (ITB) es el cociente entre la presión arterial sistólica maleolar y la presión arterial sistólica en el brazo. El ITB es una exploración no invasiva útil para valorar la existencia de isquemia en miembros inferiores.

Antes de iniciar la medición de la presión sistólica, el paciente debe de estar tumbado en decúbito supino durante al menos cinco minutos. Se debe buscar con el transductor del doppler la zona que produce el sonido más audible y, a continuación, aumentar la presión del manguito al menos 20 mm Hg por encima de la presión arterial sistólica en brazo. Para el cálculo del ITB se utilizará la presión arterial braquial más elevada o la más próxima en el tiempo a la de la toma maleolar. De los cuatro valores de ITB, el de menor cuantía es el que delimita la existencia de enfermedad arterial periférica. En la Figura 1.6 se muestra la forma de medición del ITB y la interpretación de la enfermedad arterial periférica en función del ITB [26].

- **Ultrasonido Duplex Arterial:** El examen de ultrasonido dúplex/doppler examina el flujo sanguíneo en las principales arterias y venas en los brazos y las piernas. El examen utiliza ultrasonografía dúplex para visualizar el flujo sanguíneo y la ultrasonografía doppler constituye un medio audio para escuchar el flujo sanguíneo. Este examen se realiza como alternativa a la arteriografía y venografía y puede ayudar a diagnosticar anomalías en una arteria o vena [27].

**ITB = Presión tobillo/ Presión brazo**

**Interpretación ITB:**

>1,30: Rigidez arterial

0,91 – 1,30: Normal

0,41 – 0,90: Enfermedad arterial periférica (EAP) leve a moderada

<0,40: EAP severa

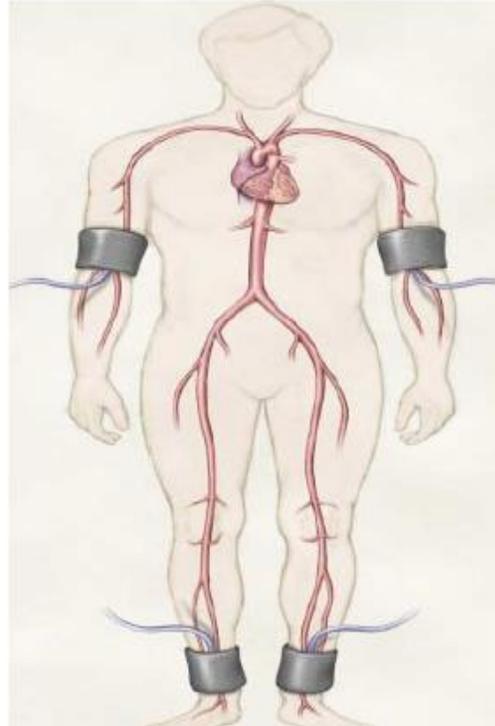


Fig. 1.6 Índice Tobillo/Brazo y tabla de interpretación

## 1.6 Estado del arte de los métodos de diagnóstico propuestos

### 1.6.1 Medición de temperatura en el pie diabético

Todos los seres vivos producen calor. El hombre y los vertebrados superiores poseen además el privilegio de tener una temperatura constante, sobre la cual ejercen escasa influencia las variaciones del medio en que viven. Las combustiones íntimas y los fenómenos múltiples de la nutrición son los que proporcionan el calor necesario a la conservación de esta temperatura individual; pero si el organismo lo produce sin cesar, pierde asimismo continuamente calor. Regular sin interrupción el gasto de calor a fin de mantener a un nivel constante la temperatura del medio interno en el que se efectúa la nutrición de los elementos, es lo que sucede en estado de salud. Si esta regulación falla, la temperatura tiende a rebasar los límites fisiológicos y aquí comienza el estado morbosos. O bien la temperatura del cuerpo

aumenta alcanzando mayor grado que el normal, porque el organismo fabrica más calor del que consume; o al contrario, desciende porque las pérdidas superan a la producción.

Cuando se eleva la temperatura, se dice que hay hipertermia; con frecuencia se indica que existe fiebre. De lo contrario cuando desciende la temperatura se dice que hay hipotermia; este descenso corresponde a menudo a otro síndrome llamado algidez o colapso algido [28].

A lo largo de los años se ha estudiado la relación que existe entre la presencia de una enfermedad y el aumento o decremento de temperatura en exceso en alguna zona del cuerpo, surgiendo de esta manera la necesidad de contar con instrumentos eficaces para la medición en la temperatura corporal y poder prevenir algunas enfermedades.

En los últimos años el estudio de la temperatura ha tomado mucha importancia en aplicaciones médicas como es en el caso del pie diabético, una de las complicaciones de la Diabetes Mellitus. El pie diabético, se ha asociado con anomalías neurológicas y vasculopatía periférica de diversa gravedad en las extremidades inferiores.

La neuropatía diabética se caracteriza por el aumento del flujo sanguíneo, por ello, una de las consecuencias más esperadas por este aumento es el incremento de la temperatura en la piel. La neuropatía provoca la disminución de la sensibilidad superficial y profunda. La pérdida de la propiocepción modifica las zonas de apoyo plantar, dando lugar a áreas de hiperpresión que pueden desencadenar úlceras. La enfermedad vascular periférica se caracteriza por la obstrucción del flujo de arterias de mayor calibre (macroangiopatía) o menor calibre (microangiopatía); esta reducción del flujo sanguíneo determina el enfriamiento de la piel, esto conlleva un retraso en la cicatrización y en la llegada de nutrientes o antibióticos para combatir la

infección. Todo ello hace que el diagnóstico precoz en el paciente diabético sea fundamental para evitar graves complicaciones o amputaciones [29].

Archer, Roberts y Watkins realizaron un estudio en personas diabéticas con y sin neuropatía, encontrando una temperatura media plantar entre 33.2 y 33.5 °C en los pacientes diabéticos con neuropatía, en comparación con 27,8 °C en los pacientes sin neuropatía [30].

Rayman, Hassan y Tooke encontraron una temperatura media en el dedo hallux de 32.2°C en pacientes diabéticos con neuropatía, comparada con 28,7°C en el grupo sin neuropatía [31]. Por otro lado Flynn, Edmonds, Tooke y Watkins encontraron en los pacientes diabéticos con neuropatía estudiados una temperatura media en el dedo hallux de 32.6°C en comparación con 31.5°C que se presentó en el grupo sin neuropatía [32].

Sun, Lin, Jao y Cheng consiguieron separar térmicamente los pacientes con neuropatía diabética con mayor riesgo de ulceración. Ellos encontraron una temperatura media plantar de  $30.2 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$ , mientras que en el grupo de menor riesgo de ulceración los valores fueron de  $27.9 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ . La temperatura media plantar en los diabéticos sin neuropatía fue de  $27,1 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$  y en el grupo de control fue de  $26,8 \pm 1,8^{\circ}\text{C}$  [33].

Benbow determinó que el valor de la temperatura media plantar en pacientes diabéticos con macroangiopatía era de  $25.6 \pm 1,9^{\circ}\text{C}$  [7]. Por otro lado Shindl encontró que la temperatura media plantar en pacientes diabéticos con microangiopatía era de  $29^{\circ}\text{C}$  [34,35].

Hace un par de años se realizó otro estudio de importancia en esta área de la medicina, éste fue desarrollado por Ammer, Melnizky, Rathkolb y Ring, con el objetivo de determinar si cambios en la piel como son callosidades y micosis podían identificarse a través de la termografía, sin embargo encontró que estos cambios en

la piel no presentaban ningún cambio de temperatura radical que pudiera servir para reconocerlos a través de la termografía infrarroja [36].

## **1.6.2 Medición de impedancia del pie**

### **1.6.2.1 Principios y Fundamentos de Bioimpedancia**

La Bioimpedancia es una técnica no invasiva y de fácil aplicación para la determinación de los parámetros eléctricos de la piel; mediante el paso de una corriente eléctrica se obtienen la resistencia, reactancia, ángulo de fase y otros parámetros. Con ésta técnica se ha llegado a valorar el tejido corporal, el grado de fatiga muscular y el contenido de fibra muscular así como determinar un diagnóstico en el estado nutricional y el pronóstico clínico de una persona [37].

La impedancia eléctrica es la oposición que presenta un cuerpo al paso de una corriente a través de él. La impedancia ( $Z$ ) es un número complejo definido como la relación entre la tensión medida ( $V$ ) y el flujo de corriente total ( $I$ ).

Cuando se aplica un campo eléctrico constante a la membrana celular, los iones cargados eléctricamente se mueven y se acumulan en ambos lados de la membrana. Sin embargo, cuando el campo es alterno, al aumentar la frecuencia, aparecen corrientes de desplazamiento a través de la pared celular, produciendo un fenómeno de relajación. El fenómeno de relajación dieléctrica en los tejidos es el resultado de la polarización de varios dipolos y del movimiento de las cargas que inducen un fenómeno de conducción (Rigaud et al., 1996). Los portadores de cargas son principalmente iones y la fuente principal de dipolos son las moléculas polares del agua en los tejidos.

El comportamiento eléctrico de tejidos biológicos revela una dependencia de los parámetros dieléctricos con la frecuencia de la corriente, debido a los distintos fenómenos de relajación que ocurren cuando la corriente pasa a través del tejido.

Cuando la frecuencia de la corriente aplicada aumenta, la conductividad de la mayoría de los tejidos se incrementa desde un valor bajo en corriente directa, que depende del volumen extracelular, hasta un nivel constante en el rango de frecuencia desde 10 a 100 MHz [38].

Una resistencia  $R$  de una longitud de material conductivo homogéneo de área transversal uniforme es proporcional a su longitud ( $L$ ) e inversamente proporcional a su área transversal ( $A$ ). Y aunque el cuerpo no es cilindro uniforme y su conductividad no es constante, una relación empírica se puede establecer entre la impedancia y el volumen de agua, la cual contiene electrolitos que conducen la corriente eléctrica a través del cuerpo.

La impedancia puede ser expresada en la forma rectangular  $R + jX$  o en la forma polar como una magnitud y un ángulo de fase:  $|ZZ| < \theta\theta$ . La reactancia ( $X$ ) surge de membranas celulares, y la resistencia ( $R$ ) se produce de fluidos intracelulares y extracelulares. Varios circuitos eléctricos se han empleado para describir el comportamiento de los tejidos biológicos. Uno de ellos es un arreglo RC en serie, otro es el arreglo de los componentes en paralelo y otros con configuraciones más complejas, Figura 1.7.

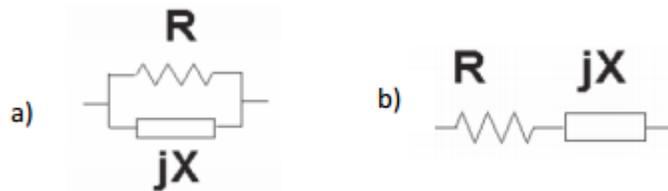


Fig. 1.7 a) Circuito en paralelo b) Circuito en serie

Un circuito que es comúnmente usado para representar tejidos biológicos es uno en el cual la  $R$  de fluido extracelular está en un arreglo en paralelo con una segunda rama del circuito, que consiste de capacitancia y  $R$  de fluido intracelular. La  $R$  y la capacitancia pueden ser medidas para en un rango de varias frecuencias.

A frecuencia cero o sin frecuencia, la corriente no penetra la membrana celular, lo que permite que actúe como aislante, y por lo tanto la corriente pasa a través del fluido extracelular. Para una frecuencia infinita (o muy alta frecuencia) el capacitor se comporta como capacitor perfecto (o casi perfecto), por lo tanto la R total medida representa la combinación de ambas, extracelular e intracelular [39].

Schwan descubrió que existían márgenes de frecuencia en los que la permitividad del material cambiaba de valor, él propone separar estas regiones en 3 categorías. Estas tres regiones o dispersiones se conocen como  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . La dispersión  $\alpha$  comprende desde los mHz hasta los 10 kHz y se relaciona con las pérdidas dieléctricas del medio, estructuras intracelulares y la difusión iónica. En esta zona no se suelen hacer las medidas de bioimpedancia porque aporta poca información y por la elevada impedancia de los electrodos. La dispersión  $\beta$  va desde los 10 kHz hasta los 100 MHz y está relacionada con la capacidad de la membrana celular y las moléculas de las proteínas. En esta región es donde se realizan la mayoría de las medidas. La dispersión  $\gamma$  va desde los 100 MHz hasta los 100 GHz y está relacionada con los mecanismos de la relajación dipolar como las moléculas de agua o las sales [40].

Las diferentes partes del cuerpo humano, tales como la piel, los músculos, la sangre, etc., presentan para la corriente eléctrica una impedancia compuesta por elementos resistivos y capacitivos.

Durante el paso de la electricidad la impedancia de nuestro cuerpo se comporta como una suma de tres impedancias en serie:

- Impedancia de la piel en la zona de entrada.
- Impedancia interna del cuerpo.
- Impedancia de la piel en la zona de salida.

El desarrollo de la metodología de BIA (bioimpedancia) ha dado lugar a numerosas técnicas, de acuerdo con el número de frecuencias del estímulo eléctrico aplicado al individuo y al tipo de medición. De ahí que en la actualidad se pueden encontrar en el mercado equipos de impedancia bioeléctrica mono y multifrecuencia [41].

La BIA es una herramienta que se utiliza dentro del ámbito hospitalario para:

- Estimar la composición corporal en dos o tres compartimientos (masa grasa y masa libre de grasa) o (masa grasa, masa celular y masa extracelular).
- Monitorear el desgaste o deterioro celular.
- Evaluar el nivel y la distribución del agua corporal.
- Observar las fluctuaciones de los fluidos corporales.

#### **1.6.2.1.1 Medidor de impedancia y métodos multifrecuencia**

La impedancia en un tejido biológico al aplicarle una corriente alterna es dependiente de la frecuencia. Ello significa que cuando se aplica una corriente de baja frecuencia, la misma fluye principalmente por el AEC (Agua corporal extracelular), debido a la alta impedancia capacitiva ( $X_c$ ) de las membranas celulares. A frecuencias mayores, las membranas celulares son atravesadas y así pueden medirse el AEC (agua extracelular) y el AIC (agua intracelular).

La piel es la barrera protectora contra el medio ambiente y constituye el órgano más grande del cuerpo humano. La piel tiene características físicas y fisiológicas que presentan una impedancia eléctrica,  $Z$ , que afecta la calidad de señales bioeléctricas registradas con electrodos de superficie.

Los valores reportados de impedancia de piel,  $Z_s$ , varían desde  $100 \Omega$  hasta  $1 M\Omega$  de acuerdo a la frecuencia usada y el tipo de piel. Para la medición de impedancia existen diferentes técnicas: el método de 2 electrodos o bipolar (2EM, del

inglés 2 Electrode Method), el método de 4 electrodos o tetrapolar (4EM, del inglés 4 Electrode Method) y el método de 3 electrodos (3EM, del inglés 3 Electrode Method)

- *Método a dos electrodos (2EM)*

En este método, se hace circular una corriente constante ( $I_0$ ) a través de dos electrodos, los cuales presentan una impedancia ( $Z_e$ ) cuyo valor es usualmente mayor que el de la impedancia de interés entre los electrodos, Figura 1.8. El detector es conectado a través de los mismos electrodos y el voltaje presente ( $V_0$ ) es una función de la impedancia entre los electrodos y de los cambios presentes debidos a los eventos fisiológicos. Por lo tanto, la impedancia medida es:

$$Z = \frac{V_0}{I_0} = 2Z_e + Z_x \quad \text{Ec.1}$$

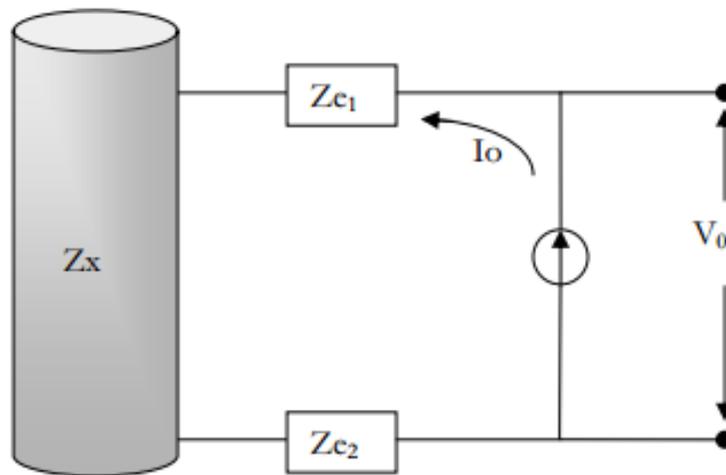


Fig. 1.8 Método de medida a 2 electrodos

- *Método a cuatro electrodos (4EM)*

Este método consiste en aplicar una corriente ( $I_0$ ) a través de dos electrodos y detectar la tensión en otros dos electrodos distintos, Figura 1.9. Con este método se consigue eliminar la impedancia de los electrodos, siempre y cuando los electrodos

empleados tengan una impedancia pequeña en comparación con la impedancia de entrada del circuito utilizado para detectar la tensión  $V_o$  y no provoquen una saturación de los circuitos que inyectan la corriente  $I_o$ . En el caso de realizar medidas superficiales, también se reduce la impedancia de la piel ya que queda en serie con cada electrodo.

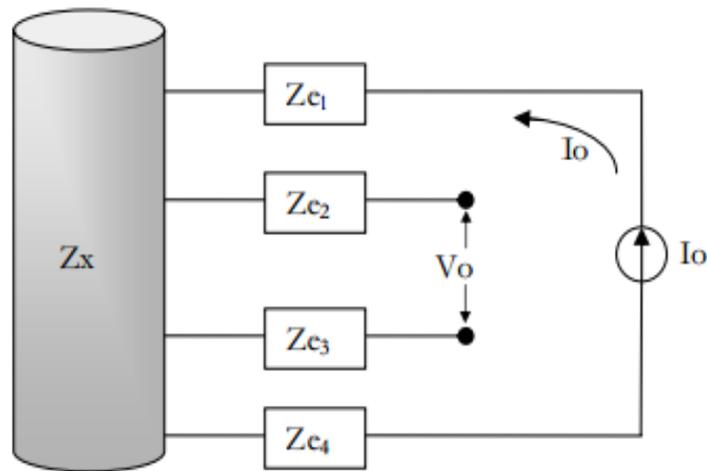


Fig. 1.9 Método de medida a 4 electrodos

- *Método a tres electrodos (3EM)*

Este método consiste en aplicar una corriente ( $I_o$ ) a través de dos electrodos: un electrodo inyector de corriente ( $Z_{e1}$ ) y un electrodo de referencia ( $Z_{e2}$ ). Esta corriente fluye a través del tejido. El voltaje ( $V_o$ ) se detecta entre un tercer electrodo ( $Z_{e3}$ ) y el electrodo de referencia ( $Z_{e2}$ ), Figura 1.10.

La diferencia de tensión medida ( $V_o$ ) corresponde a la caída de tensión provocada por la corriente que se aplica a la impedancia de interés ( $Z_x$ ) y el segundo electrodo ( $Z_{e2}$ ) [38].

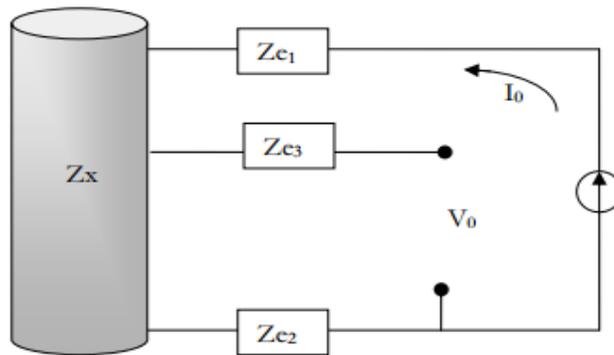


Fig. 1.10 Método de medida a 3 electrodos

### 1.6.2.2 Caracterización del pie diabético por medios bioeléctricos

Las medidas de impedancia eléctrica en tejidos biológicos tienen una historia que se remonta a finales del siglo XVIII, con los experimentos realizados por Galvani. Las medidas de impedancia eléctrica determinan o infieren información acerca del tejido, siempre y cuando el evento en análisis presente un cambio en dimensión, en sus propiedades dieléctricas o en su conductividad (Geddes, 1989). De acuerdo con Rigaud et al. (1996), no fue hasta principios del siglo XX cuando se estudió la estructura de los tejidos biológicos basados en sus propiedades eléctricas pasivas, lo cual demostró que los tejidos biológicos son conductores y su resistencia variaba con la frecuencia [38].

En la actualidad existen varios trabajos sobre estudios en la medición de bioimpedancia. Sugura Kimura et al. [42], aplicaron un método de Bioimpedancia para diagnóstico de la masa pulmonar de las personas. Ellos determinaron que la impedancia eléctrica del tejido depende del tipo de célula y de la densidad del tejido.

Por otra parte, Tomoka Uchiyawa et al. [43] aplicaron el método de multifrecuencia para analizar el nivel de rubor en la piel con el sistema de dos electrodos. Ellos encontraron que la resistencia se disminuyó en cerca del 90% y la

reactancia cerca del 87% en zonas con piel ruborizada. Concluyendo así que el rubor en la piel pudo ser identificado gracias a la bioimpedancia eléctrica.

El uso de análisis de impedancia bioeléctrica (BIA) para la determinación de la composición del cuerpo humano es ampliamente aceptado como una técnica segura, rápida y confiable. Aunque esta técnica ha sido validada en individuos normales y obesos, sólo escasos estudios se han realizado en poblaciones especiales, como en el caso del uso de BIA para la medición de la composición corporal en personas con Diabetes Mellitus.

Tsiu EY. et al. [44] evaluaron la validez de un nuevo dispositivo BIA (TBF 105) para la medición de la composición corporal en una población de individuos con diabetes mellitus tipo 2. Ellos midieron y compararon la composición corporal de pacientes con DM utilizando 2 técnicas diferentes la BIA y la absorciometría dual de rayos X (DXA). El porcentaje de grasa corporal determinada por BIA se correlacionó significativamente con el porcentaje de grasa corporal determinada por DXA ( $r = 0,89$ ,  $p < 0,0001$ ). De esta manera, concluyeron que la medición BIA por TBF 105 es una técnica útil y fiable para medir la composición corporal en sujetos con diabetes mellitus tipo 2.

Spotti D. et al. [45] aplicaron BIA para detectar el contenido de agua corporal total (TBW), grasa (FAT) y masa libre de grasa (FFM) en 80 sujetos normales y 65 diabéticos (Tipo I y II) . Por medio de un análisis multivariante ajustado por edad, sexo y enfermedad determinaron que el índice de masa corporal (IMC) aumenta con la edad y la presencia de DM; el TBW fue menor en los pacientes de sexo femenino, la FFM disminuyó con la edad, el sexo femenino y en sujetos con DM y la FAT aumentó con la edad, el sexo femenino y en sujetos con DM.

Moreno S. et al. [46] determinaron las características de la composición corporal de pacientes embarazadas con y sin diabetes gestacional mediante el uso de la bioimpedancia eléctrica. Para el análisis estadístico se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Obtuvieron que el IMC pregestacional fue mayor en las pacientes con

diabetes mientras que la masa magra y el agua corporal total fueron similares en los tres grupos; sin embargo, la masa grasa fue mayor en las mujeres con diabetes gestacional y pregestacional en comparación con las que tuvieron tolerancia normal a la glucosa.

## **CAPÍTULO II**

### **II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **2.1 Propuesta**

Medir, procesar y analizar la temperatura registrada en cada pie en cuatro de las zonas más propensas a ulceración en personas con y sin diabetes mediante el desarrollo de un sistema electrónico no invasivo, diseñado para la medición de temperatura en la planta del pie. Diseñar un sistema para la medición de bioimpedancia en dedo hallux del pie que permita trabajar en un rango de frecuencia de 10 Hz a 10000 Hz. Estos dos instrumentos se desarrollan con el fin de obtener información que permitan evaluar a personas diabéticas propensas a desarrollar al pie diabético.

#### **2.2 Hipótesis**

Es posible utilizar la temperatura y la impedancia eléctrica del pie para ayudar en el prediagnóstico de la patología del pie diabético, por medio de un análisis del comportamiento térmico y de la medición de bioimpedancia en la piel del pie en personas diabéticas, haciendo uso de métodos discretos y no invasivos.

#### **2.1 Justificación**

El pie diabético se está convirtiendo en uno de los mayores problemas que enfrentan las personas que padecen diabetes a nivel mundial ya que se ha convertido en el mayor causante de hospitalización y mortalidad. Actualmente, las úlceras crónicas del pie diabético al igual que la Diabetes Mellitus únicamente se controlan, no se curan, y frecuentemente las úlceras de pie terminan en amputación. Sólo la prevención y detección precoz de los factores de riesgo, así como su corrección, pueden disminuir la alta morbilidad y la mortalidad de esta complicación.

La evaluación diagnóstica que se realiza en el pie de un paciente diabético se efectúa en el mejor de los casos, cuando el paciente ya presenta un indicio de esta complicación de pie diabético. Estos exámenes de revisión son de poca ayuda para que el médico pueda proponer un buen tratamiento que pueda seguir cada paciente, y así evitar que se desarrolle o complique esta patología.

Para evitar el aumento de morbilidad debido a esta complicación, en este trabajo de tesis se propone el desarrollo de 2 técnicas para la medición de las características físicas del estado de salud en el pie de un paciente diabético (temperatura e impedancia eléctrica) para posteriormente junto con otros trabajos futuros formar un instrumento no invasivo, conformado por módulos, que sea capaz de proporcionar información útil al médico sobre el estado anormal que tiene el pie; con esta información se podrá determinar el mejor tratamiento terapéutico a seguir para cada paciente y de esta manera evitar la aparición o desarrollo del pie diabético.

## **2.5 Objetivos**

### Objetivo general

Proponer dos módulos instrumentales para la medición de temperatura y la impedancia en la planta del pie, estos módulos usarán métodos no invasivos y se aplicarán en el seguimiento del estado de avance de la diabetes en pacientes con esta enfermedad.

### Objetivos particulares

- Estudiar el estado del arte referente a las propiedades térmicas de la piel en personas diabéticas.
- Diseñar un sistema de monitoreo de la temperatura del pie con el uso de calzado, capaz de registrar la temperatura de las cuatro zonas más propensas a ulceración en el pie de pacientes con y sin diabetes.

- Implementar el sistema diseñado, midiendo la temperatura de las 4 zonas de la planta del pie señaladas en personas diabéticas y no diabéticas.
- Determinar estadísticamente la diferencia entre la temperatura registrada en el pie derecho con la del pie izquierdo en cada persona diabética y no diabética.
- Diseñar un sistema para la medición de impedancia eléctrica, basado en la técnica de inyección de corriente alterna en la piel por medio de 3 electrodos, en el dedo hallux del pie, zona del pie donde primero se manifiestan los daños provocados por el pie diabético. Las mediciones se realizarán en personas con y sin diabetes.

## CAPÍTULO III

### III. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

#### 3.1 Introducción

El pie diabético es una de las principales causas de morbilidad y mortalidad entre las personas que sufren de Diabetes Mellitus [15]. Las áreas del pie más propensas a ulceración están asociadas con aumento de la temperatura local debido a inflamación y autólisis enzimática de los tejidos [16]. Estas mismas áreas se localizan principalmente en las zonas del pie de mayor presión que se pueden ver en la Figura 3.1. El objetivo de este trabajo de tesis es diseñar un instrumento que pueda medir la temperatura y la impedancia eléctrica de la piel en algunas de las zonas de mayor riesgo de ulceración del pie. A continuación se describen detalladamente los instrumentos realizados en este trabajo de tesis.

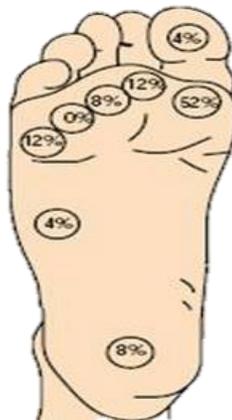


Fig. 3.1 Zonas de pie de mayor presión y prevalencia al desarrollo de úlceras en el pie neuropático

#### 3.2 Sistema de monitoreo de temperatura de pie para pacientes diabéticos

##### 3.2.1 Descripción del sistema

El sistema de monitoreo de temperatura de pie se desarrolló con la finalidad de poder medir la temperatura de cuatro de las zonas del pie más propensas a una

ulceración (dedo hallux, primer metatarsiano, arco y talón del pie), Figura 3.2. Este sistema cuenta con dos partes, las plantillas y el sistema electrónico que son descritas a continuación.



Fig. 6.2 Zonas que se medirán con el sistema de monitoreo de temperatura de pie diseñado

#### a) Plantillas

En una plantilla para zapatos, hechas de una base plástica (goma EVA) con una superficie de cuero, se colocaron cuatro sensores de montaje superficial LM35 para monitorear la temperatura en cuatro de las áreas del pie más propensas a una ulceración. El primer sensor se colocó en la plantilla de tal manera que pudiera medir la temperatura del dedo hallux (llamado comúnmente dedo gordo del pie), el segundo sensor se colocó en el sitio del primer metatarsiano, el tercer sensor está colocado para monitorear la temperatura del arco del pie y el cuarto sensor monitoreará la temperatura del talón del pie, Figura 3.3 y 3.4. Una segunda plantilla fue fabricada para monitorear las cuatro zonas de ambos pies. Se utilizaron un total de ocho sensores para monitorear la temperatura del pie derecho e izquierdo de una persona.

Se realizaron 2 pares de plantillas, un par para mujeres (24 cm) y otro par para hombres (27 cm). Cada plantilla fue diseñada para ser cómoda y económica.

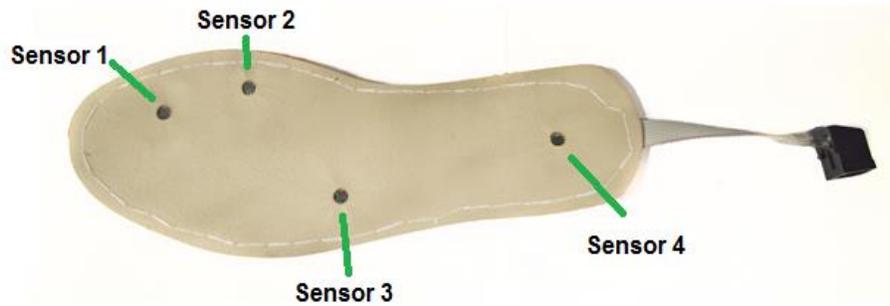


Fig. 3.3 Plantilla de zapato diseñada para medir la temperatura en cuatro zonas del pie.



Fig. 3.4 Plantilla diseñada vista por la parte de atrás

Las plantillas cuentan con un conector rj45 hembra, para ser conectadas mediante un cable UTP 5e al sistema de monitoreo, y de esta forma enviar los datos de las mediciones que realicen cada sensor al sistema.

#### b) Sistema electrónico

El sistema electrónico del sistema de monitoreo de temperatura consiste en una caja de plástico con dimensiones de 10x5x3 cm, Figura 3.5, cuyo interior contiene un circuito electrónico que es capaz de realizar las siguientes funciones:

- Medir y almacenar la temperatura de los pies de una persona
- Borrar las temperaturas almacenadas
- Enviar las temperaturas almacenadas mediante USB a una computadora



Fig. 3.5 Sistema electrónico diseñado para medir la temperatura en cuatro zonas del pie

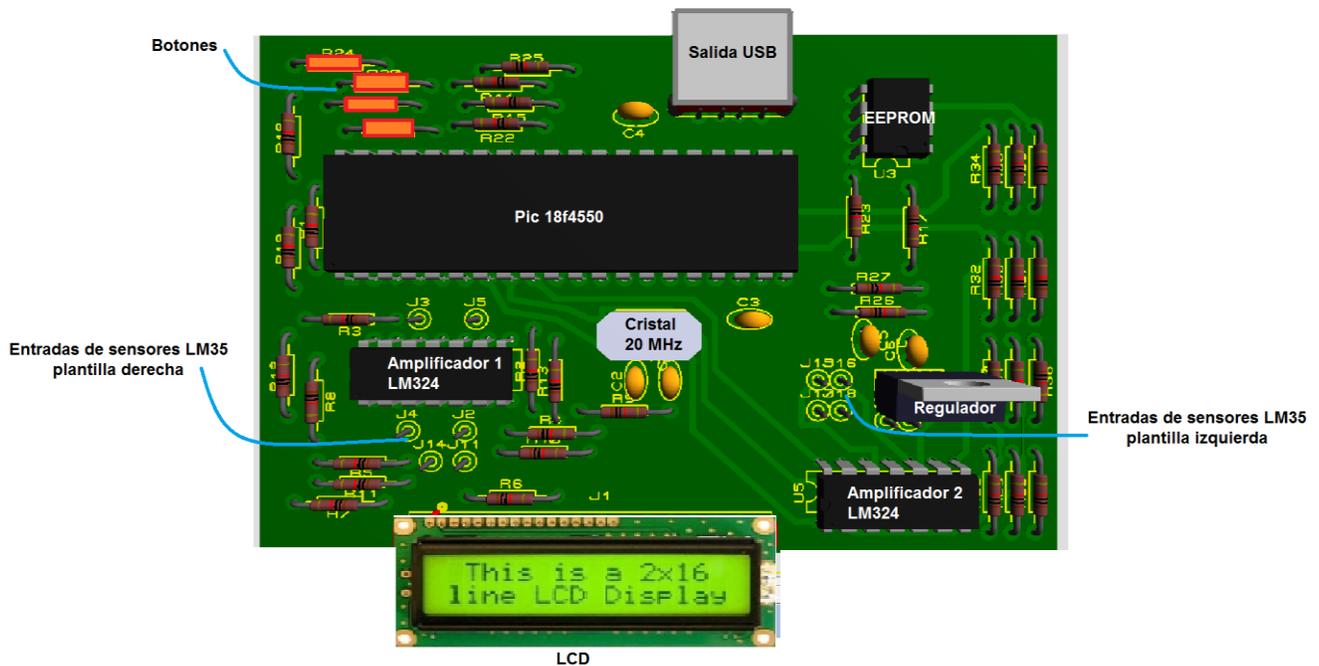


Fig. 3.6 Diagrama del circuito electrónico del sistema de monitoreo de temperatura en pie

El diseño del circuito electrónico del sistema de monitoreo de temperatura de pie se puede ver en la Figura 3.6. Este circuito cuenta con varias etapas las cuales se describen a continuación.

1. Amplificación: esta etapa está compuesta por los amplificadores LM324 y las resistencias R2-R3 (amplificador 1) y R28-R39 (amplificador 2). La señal proveniente de los cuatro sensores que corresponden a la plantilla derecha entran al amplificador 1, mientras que las señales de los sensores de la

plantilla izquierda entran al amplificador 2. Los LM324 amplifican cada señal diez veces para que puedan ser leídas y enviadas a una entrada analógica diferente del PIC.

2. Procesamiento: en esta etapa el PIC18f4550 recibe las señales que monitorean cada sensor por alguna de sus entradas ADC y las convierte en datos de temperatura que pueden ser visualizados en el display del sistema por el usuario.
3. Almacenamiento: en esta etapa el PIC18f4550 manda las señales digitales (señales monitoreadas por cada sensor) a una localidad de la memoria EEPROM para ser almacenadas.
4. Alimentación: el circuito es alimentado con una batería de 9 V. Debido a que el circuito está compuesto por componentes TTL se utiliza un regulador de voltaje para poder convertir los 9V a 5V y de esta forma alimentar todo el circuito del sistema.
5. Interfaz de salida: a través de puerto USB mostrado en la Figura 3.6, se envían los datos almacenados en la memoria EEPROM a la computadora para que puedan ser analizados y procesados.
6. Interfaz de usuario: a través de la pantalla del display y los botones que se muestran en la Figura 3.6, el usuario puede comunicarse con el sistema y elegir alguna de las opciones que se visualizan en la pantalla del sistema de monitoreo. El circuito electrónico diseñado del sistema de monitoreo de temperatura se puede apreciar en la Figura 3.7.

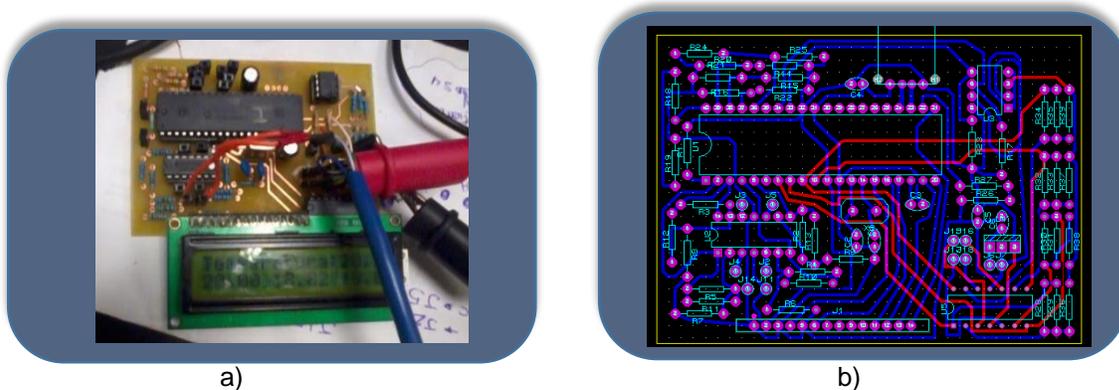


Fig. 3.7 Circuito electrónico diseñado para el sistema de monitoreo de temperatura

a) Circuito soldado b) Esquemático del circuito

Las plantillas son conectadas al sistema electrónico para conformar el sistema de monitoreo de temperatura en pie para pacientes diabéticos, Figura 3.8. Este sistema puede almacenar la temperatura de hasta 50 usuarios diferentes.

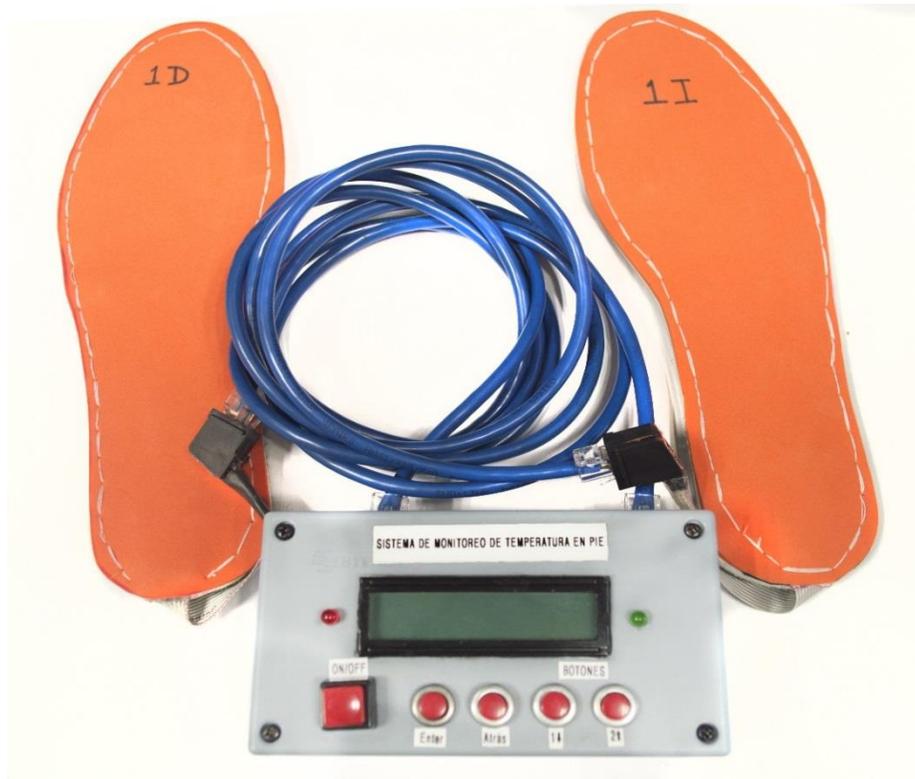


Fig. 3.8 Sistema de monitoreo de temperatura de pie

### 3.2.2 Materiales utilizados

El material que se utilizó para la construcción del sistema de monitoreo de temperatura es descrito brevemente a continuación.

- PIC18f4550 :este microcontrolador de Microchip de 8 bits fue utilizado debido a que cuenta con 13 canales ADC e interfaces como la I2C y USB que son indispensables para la construcción del sistema de monitoreo.
- Memoria EEPROM 24C256 (Memoria Eléctrica Programable Borrable de Solo Lectura EEPROM): esta memoria contiene 512 páginas a 64 byte por página (es

decir 256K de espacio). Se eligió esta memoria debido a que el programa necesita almacenar 1500 datos.

- Sensores LM35: los sensores que se utilizaron para medir la temperatura del pie fueron los sensores superficiales LM35. Sus principales características son las siguientes:
  - su tensión de salida es proporcional a la temperatura, en la escala Celsius
  - salida de voltaje lineal
  - sensibilidad: 10mV equivale a 1°C
  - rango de Medida: -55°C~150°C
  - bajo costo
  - baja corriente de alimentación (60uA)
  - exactitud del orden de  $\pm 0.25$  °C a temperatura ambiente (25°C)
- Amplificadores: los amplificadores utilizados fueron los lm324 que están compuestos por cuatro amplificadores operacionales de alta ganancia y son diseñados para trabajar con fuente de alimentación simple.
- Conector USB: el conector utilizado fue el USB- A hembra, éste se conecta a un cable USB- A macho a USB-A macho para que los datos sean enviados al sistema de monitoreo a la computadora.
- Software: la programación del sistema de monitoreo se realizó en lenguaje de programación gráfico Flowcode V5. Para la simulación del circuito electrónico se utilizó Proteus. El programa Matlab fue utilizado para recibir los datos enviados por el sistema de monitoreo a una computadora.

### **3.2.2.1 Calibración de sensores de temperatura**

Para poder tener una medición confiable y precisa, fue necesario calibrar cada sensor de temperatura utilizado al sistema de monitoreo de temperatura. La calibración realizada fue hecha utilizando agua destilada cuya temperatura se modificó empleando un baño maría.

Cada sensor superficial de temperatura fue soldado a una pequeña baquelita y se aisló completamente con silicón y barniz, Figura 3.9.

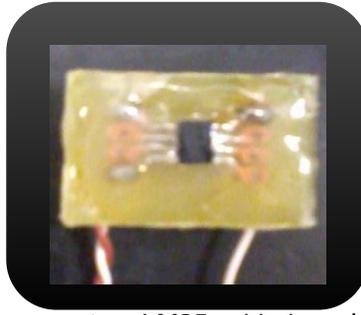
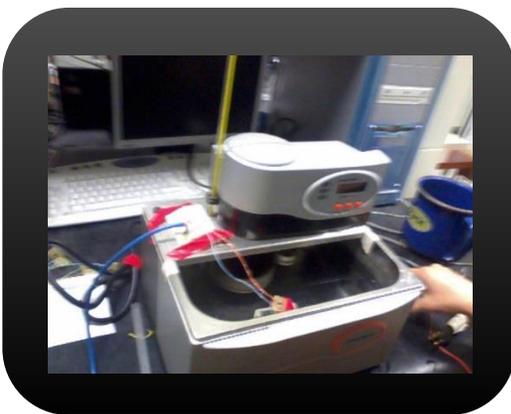
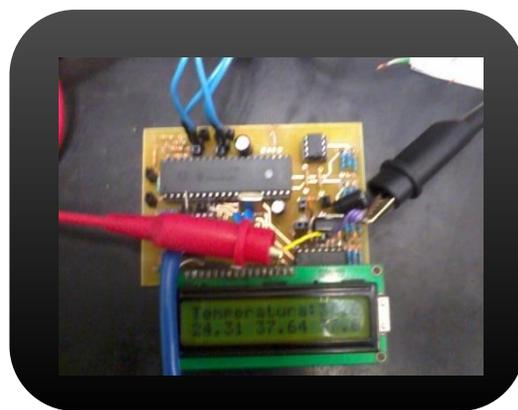


Fig. 3.9 Sensor de temperatura LM35 soldado y aislado en baquelita

Dentro del Baño María se introdujo agua destilada y se puso a una temperatura de 23°C. Se sumergieron cuatro sensores dentro del agua que corresponderían a los sensores de la plantilla 1 derecha, y se conectaron al sistema de monitoreo, Figura 3.10 a. Se registró la temperatura marcada por los cuatro sensores en el display del sistema cuando estaban sumergidos en agua a 23°C, Figura 3.10 b. Se calculó la diferencia en la temperatura que marcaba el display del sistema y la que marcaba el termómetro de mercurio del baño María. Se prosiguió a realizar la misma calibración, pero ahora poniendo la temperatura del agua destilada del Baño María a una temperatura de 35°C. Las diferencias de temperatura de 23 y 35°C se registraron para cada sensor y se promediaron. Este promedio fue sumado por Software para compensar la medición de los sensores y así tener cada sensor calibrado. Al finalizar se calibraron los siguientes cuatro sensores y así sucesivamente en el Baño María con agua destilada a 23°C y 35°C.



a)



b)

Fig. 3.10 Calibración en agua destilada de sensores LM35

- a) sensores LM35 dentro del baño maría
- b) sistema electrónico midiendo la temperatura registrada de cuatro sensores LM35 dentro del baño maría

### 3.2.3 Funcionamiento del sistema

El funcionamiento del sistema de monitoreo de temperatura se describe a continuación:

#### 3.2.3.1 Monitoreo de la temperatura

Usando las plantillas de zapatos con sensores de temperatura diseñadas y explicadas anteriormente se realiza el monitoreo de la temperatura. Las plantillas se colocan dentro de una sandalia de plástico, en seguida las personas ponen sus pies sobre las plantillas, Figura 3.11. Los sensores monitorean la temperatura de las cuatro zonas de ambos pies treinta veces por minuto. Al finalizar cada minuto se promedia las treinta mediciones realizadas y el resultado es almacenado en la memoria EEPROM del sistema electrónico. La duración de cada medición es de 15 minutos, es decir, al finalizar la medición son almacenadas 15 temperaturas de cada zona del pie en la memoria del sistema de monitoreo de temperatura diseñado.



Fig. 3.11 Monitoreo de temperatura del pie en un usuario usando las plantillas del sistema

#### 3.2.3.2 Adquisición de la señal

La señal monitoreada por los sensores de temperatura (temperatura de cada zona del pie medida) es enviada al sistema electrónico. Ya en el sistema, la señal es amplificada diez veces para ser leída y enviada al PIC18f4550. El PIC recibe cada señal a través de sus entradas analógicas. En seguida, cada señal es enviada por el PIC a una localidad de la memoria externa EEPROM 24C256 del sistema para ser almacenada, Figura 3.12.



Fig. 3.12 Etapas correspondientes a la adquisición de la señal del sistema de monitoreo de temperatura en pie

### 3.2.3.3 Interfaz USB

Una vez que la señal es almacenada en la memoria externa, puede ser enviada a través del puerto USB a una computadora. Un cable USB-A a USB-A macho debe ser conectado al sistema de monitoreo de temperatura y a una computadora. Los datos son enviados a una PC, para ser almacenados en una base de datos y procesados en el software Matlab.

### 3.2.4 Interfaz usuario

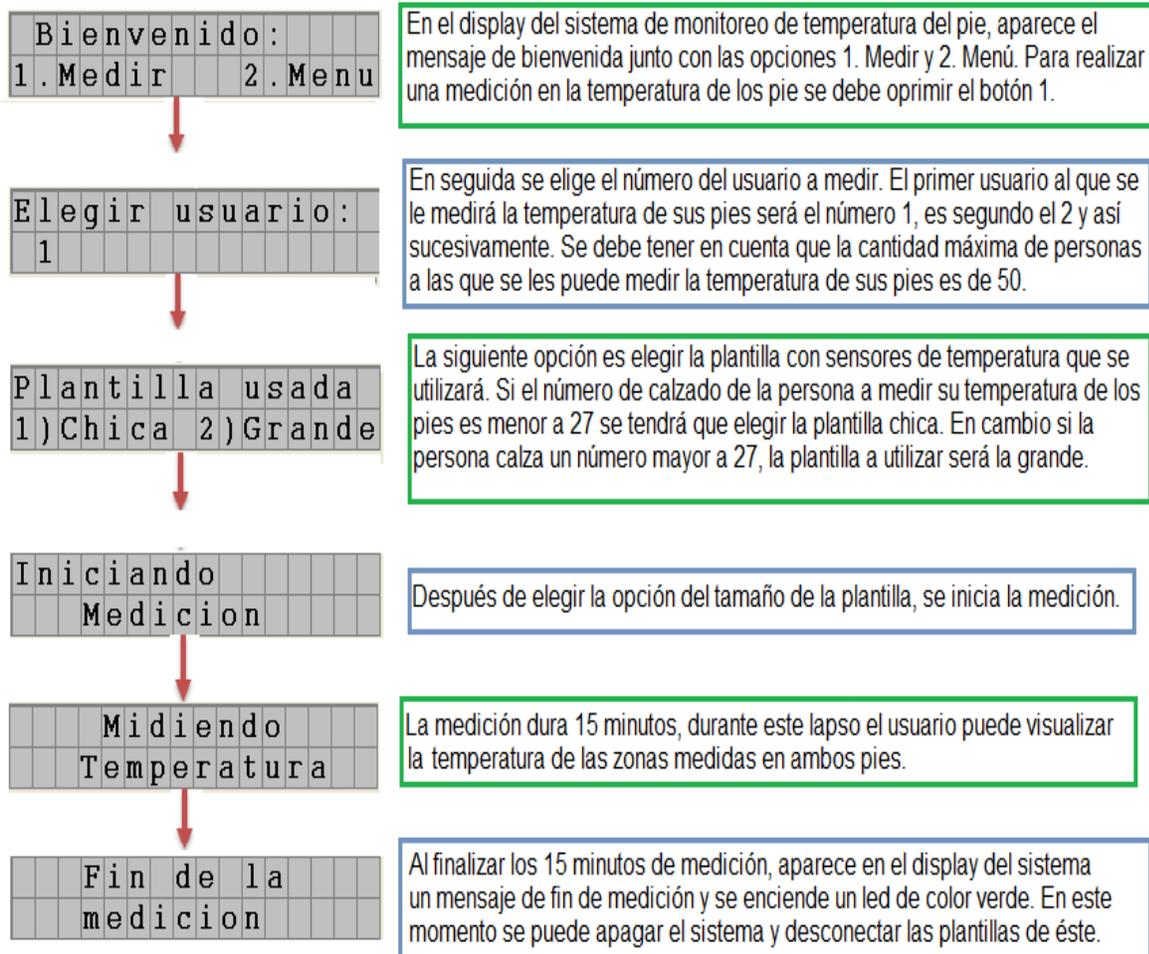
#### 3.2.4.1 Medir temperatura de los pies

Para realizar una medición de temperatura de ambos pies a una persona, primero hay que limpiar los pies de la persona con alcohol y dejarlos reposar 3 minutos sin contacto con ningún calzado o superficie. Al finalizar la espera, se colocan los pies de la persona sobre las plantillas y a su vez las plantillas sobre una sandalia de plástico como se muestra en la Figura 3.13. Se prosigue a conectar las plantillas con el cable del sistema al sistema electrónico para iniciar la medición.



Fig. 3.13 Plantilla con sensores del sistema sobre una sandalia de plástico

La comunicación usuario-máquina que se realiza para efectuar una medición de la temperatura de los pies se describe a continuación.



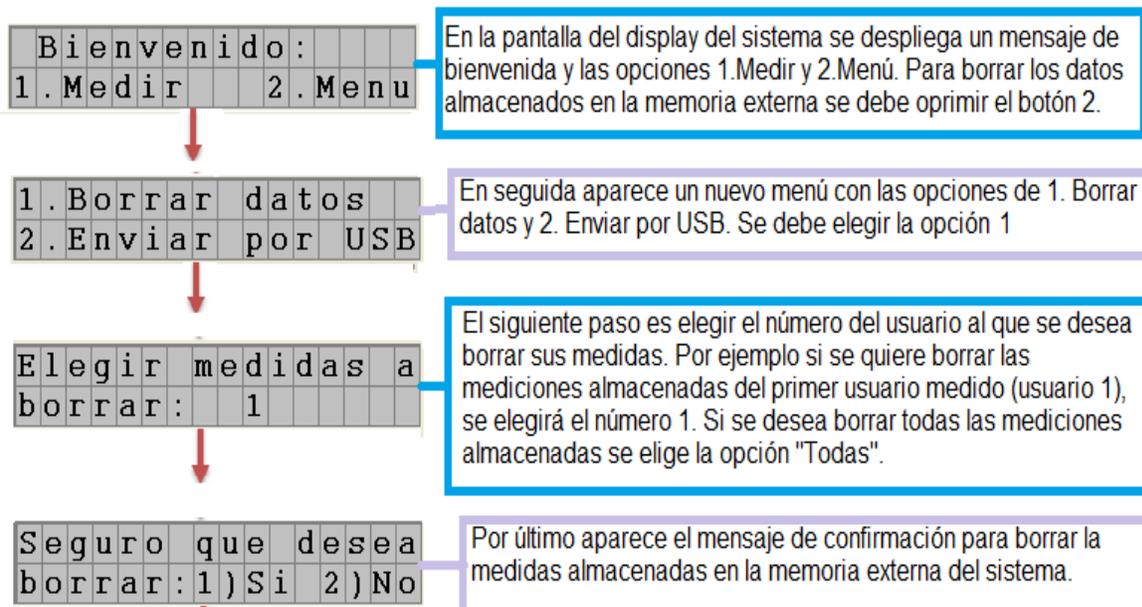
Las medidas realizadas se almacenan en la memoria externa del sistema de monitoreo de temperatura del pie. A cada usuario se le debe asignar un número de usuario, para que de esa manera se pueda saber cuáles son las medidas de temperatura que le corresponden a cada uno.

### 3.2.4.2 Borrar medidas almacenadas en la memoria externa

Algunas veces será necesario borrar las medidas almacenadas, a continuación se enlistan algunos casos:

- 1) las mediciones tomadas son erróneas
- 2) la plantilla dejó de funcionar mientras se medía la temperatura
- 3) se desea remplazar un usuario por otro
- 4) se desea reiniciar el sistema de monitoreo de temperatura del pie

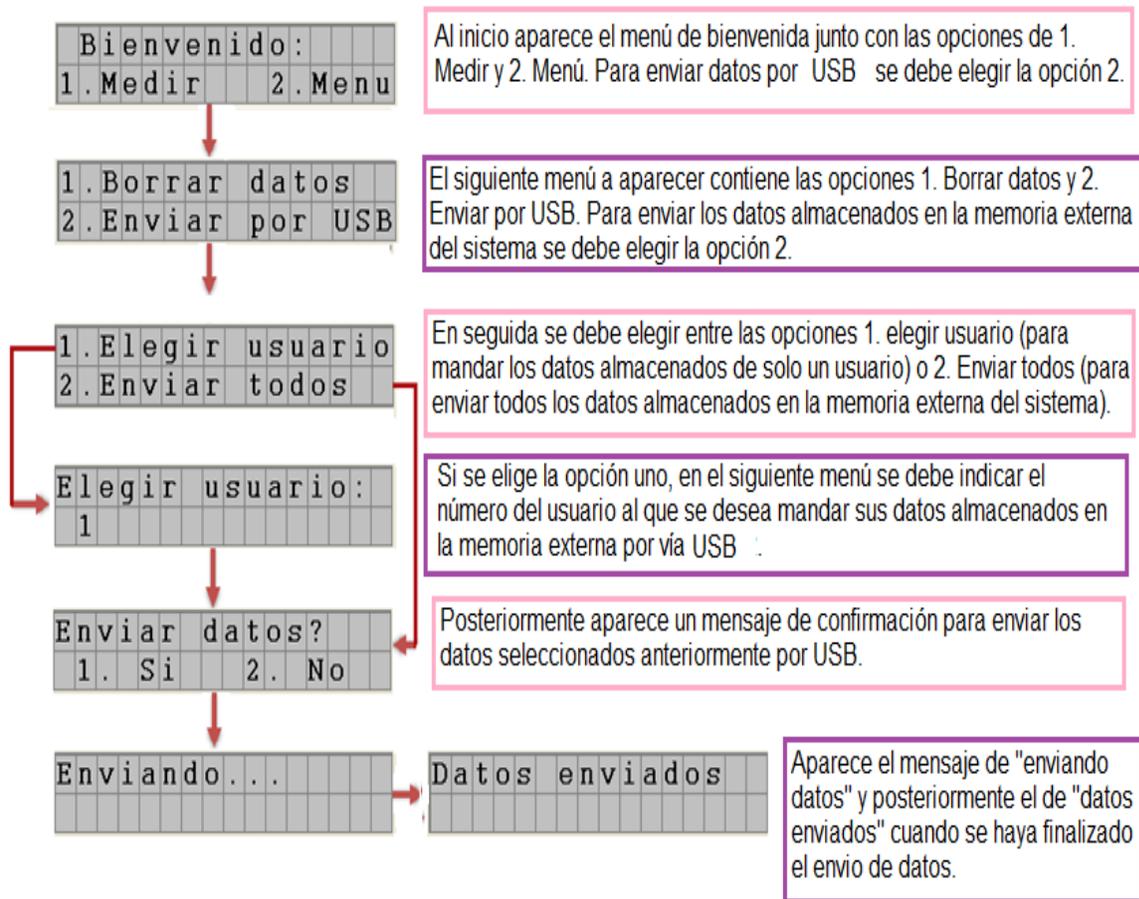
Para algunos de estos casos, es necesario borrar los datos almacenados en la memoria del sistema. La comunicación usuario-máquina que se debe realizar se muestra con las pantallas del display del sistema a continuación.



Una vez borrados los datos, ya no será posible recuperarlos ni acceder a ellos de ninguna forma. Por tal razón se recomienda estar seguro que se desean borrar los datos.

### 3.2.4.3 Enviar medidas almacenadas por USB a una computadora

Solo es posible visualizar las mediciones realizadas y almacenadas por medio de una computadora. Para ello se necesita que la computadora cuente con el programa Matlab instalado. Un cable USB A a USB A macho es utilizado para conectar el sistema de monitoreo de temperatura a una computadora. Cuando la conexión se realiza en seguida se prende el sistema (no es necesario ni se debe oprimir el botón ON/OFF). Se debe esperar a que la computadora reconozca el cable USB del sistema conectado, y en seguida abrir Matlab y correr el programa "serialtemperatura". La comunicación usuario máquina que se realiza se muestra a continuación.



Al finalizar el envío de datos aparece en el display del sistema el mensaje de “Datos enviados”, es ese momento es seguro desconectar el cable USB de la computadora al sistema. Los datos pueden ser visualizados y guardados en Matlab.

### 3.2.5 Diseño del sistema de monitoreo de temperatura en pie

#### 3.2.5.1 Partes del sistema

A continuación se describen las partes de las que consta el sistema de monitoreo de temperatura del pie, Figura 3.14.

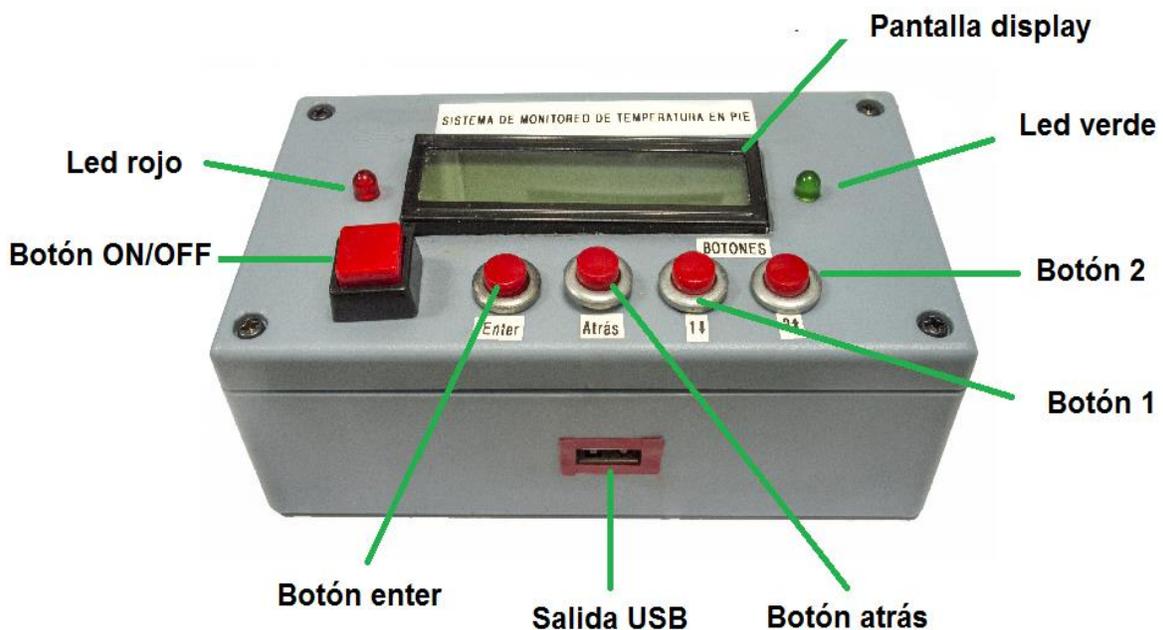


Fig. 3.14 Partes del sistema de monitoreo de temperatura

- Display del sistema: A través de él se realiza la comunicación usuario máquina.
- Led verde: Se enciende cuando una medición ha finalizado.
- Botón 2: Se utiliza para elegir la opción 2 en alguno de los menús desplegados en el display del sistema o para aumentar el número de usuario cuando se elige éste.

- Botón 1: Se utiliza para elegir la opción 1 en alguno de los menús desplegados en el display del sistema o para disminuir el número de usuario cuando se elige éste.
- Botón atrás: Se utiliza para regresar a un menú anterior al que se visualiza en el display del sistema.
- Botón enter: Este botón se utiliza para seleccionar el número de usuario cuando interroga en algún menú del sistema de monitoreo de temperatura.
- Puerto USB: Se utiliza para mandar los datos almacenados en la memoria EEPROM del sistema a una computadora.
- Botón ON/OFF: Se utiliza para encender o apagar el sistema de monitoreo de temperatura, exceptuando cuando se desea mandar datos por USB a una computadora.
- Led Rojo: Indica un fallo en la conexión de las plantillas al sistema. Este fallo puede indicar que un sensor no funciona bien.

### **3.2.5.2 Precauciones y consideraciones**

Las medidas de precaución que se deben de tomar para asegurar al usuario son las siguientes:

- revisar que los pies del usuario no estén mojados antes de pedirle que ponga sus pies sobre las plantillas y conectarlas al sistema, ya que esto puede dañar el equipo.
- si el sistema no enciende no se deben conectar las plantillas.
- no oprimir el botón ON/OFF del sistema cuando se conecta por USB a una computadora.
- no tratar de reparar el sistema cuando no encienda o en el display aparezca un mensaje de error.
- no hacer mediciones cuando el sistema esté conectado por el puerto USB al sistema.
- mantener fuera de un ambiente húmedo y caliente al sistema electrónico y las plantillas de éste, ya que esto podría afectar el funcionamiento de ambos.

Algunas consideraciones que se tomaron en la fabricación del sistema fueron las siguientes:

- Limpieza: cada plantilla fue diseñada para poder ser limpiada o lavada después de haber sido utilizada por un usuario y antes de ser usada por otro.
- Fallos en el equipo: Cuando el equipo no responde de manera adecuada, o cuando las plantillas han sufrido un fallo o se ha descompuesto alguno de sus sensores, en el display del sistema de monitoreo aparece un mensaje de error.
- Prevenir eliminar datos: Para evitar que por error se remplacen nuevas mediciones por otras almacenadas anteriormente, en el display del sistema aparece un mensaje de precaución para que el usuario pueda confirmar la sobrescritura de datos o cancelarla.
- Protección del usuario: Al ser un sistema que funciona solo con baterías se garantiza la seguridad de usuario y se evita cualquier daño irreparable al sistema.
- Portabilidad: El sistema de monitoreo de temperatura fue diseñado para ser fácil de transportar a cualquier lugar, así el usuario podrá utilizarlo sin necesidad de estar en un hospital.

### **3.3 Sistema de medición de impedancia eléctrica en la piel en pacientes diabéticos**

#### **3.3.1 Descripción del sistema**

El medidor de bioimpedancia se diseñó con la finalidad de medir la impedancia eléctrica en el dedo hallux del pie en personas sanas y diabéticas. En este trabajo de tesis solo se describe el diseño del prototipo del sistema de medición de bioimpedancia para posteriormente en un trabajo futuro construir el sistema y realizar las pruebas correspondientes para analizar los datos obtenidos en la medición de impedancia eléctrica de personas sanas y diabéticas.

La técnica utilizada para la medición de impedancia es la de 3 electrodos con inyección de corriente alterna en un espectro de frecuencias que va desde los de 10 Hz a los 10,000 Hz. El sistema está limitado a 22  $\mu$ A como máximo a 5Vpp.

- Etapa de generación de onda sinusoidal multifrecuencia

En esta etapa se utilizó un circuito multifrecuencia de onda sinusoidal positiva (ICL8038) configurado como un oscilador de frecuencia única con fuente positiva tal como se muestra en la Figura 3.15. En esta misma imagen se puede apreciar cómo fue configurado este circuito generador. La pata 10 es conectada a un conjunto de capacitores seleccionables a través de una llave de cambios para generar 10 posibles frecuencias en el rango de 10Hz hasta 10KHz.

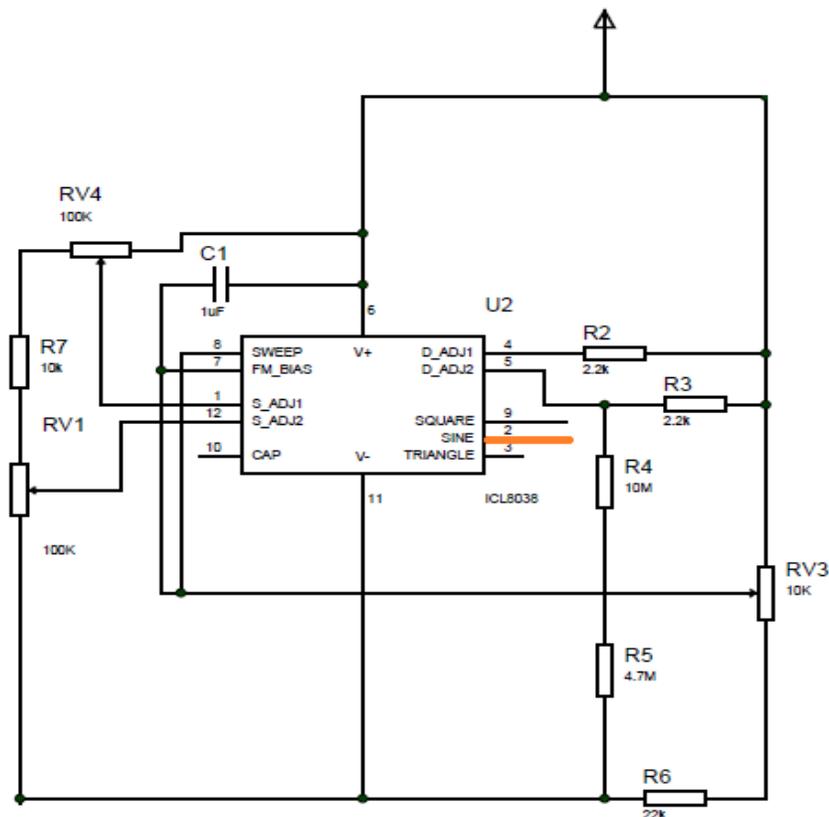


Fig. 3.15 Configuración del circuito generador ICL8038

El circuito ICL8038 es un generador de ondas triangular, cuadrada y sinusoidal de baja distorsión y alta linealidad con frecuencias de salida que varían desde 0.01 Hz

hasta 300 kHz, sin embargo, específicamente para este proyecto se eligió un rango de operación que abarca desde 10 Hz hasta 10 KHz. Las ondas utilizadas en el sistema diseñado fueron la sinusoidal y la cuadrada.

- Etapa de amplificación y limitación de corriente

La imagen 3.16 muestra el diagrama electrónico de un amplificador de transconductancia variable. Esta etapa limita la corriente suministrada al tejido. En un amplificador de transconductancia, la corriente de salida es proporcional a la tensión de entrada. La corriente está determinada por el voltaje de entrada y la resistencia variable en la terminal de salida del amplificador. La corriente de salida es compleja, por lo tanto está en función de la frecuencia. La configuración que se utilizó se muestra en la Figura 3.16, la corriente fue limitada a 20  $\mu$ A.

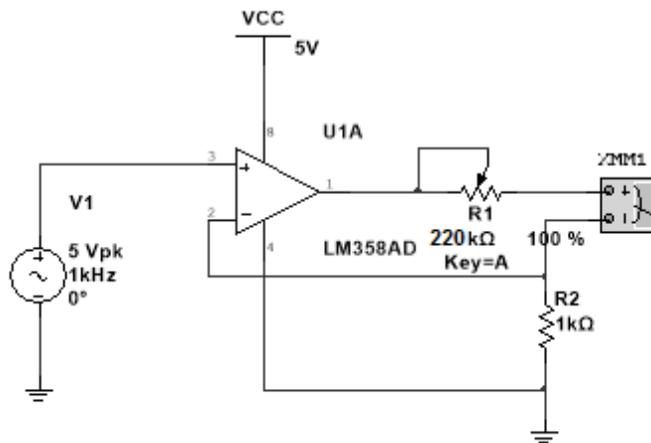


Fig. 3.16 Amplificador de transconductancia variable.

La relación de corriente y voltaje está dada por la siguiente ecuación:

$$I = V/R1$$

- Etapa de inyección de corriente

En esta etapa se aplica a una persona la señal de excitación, una señal sinusoidal positiva amplificada y limitada en corriente, a través de 3 electrodos de estimulación conectados en el dedo hallux (dedo gordo) tal y como se representa en la Figura 3.17.

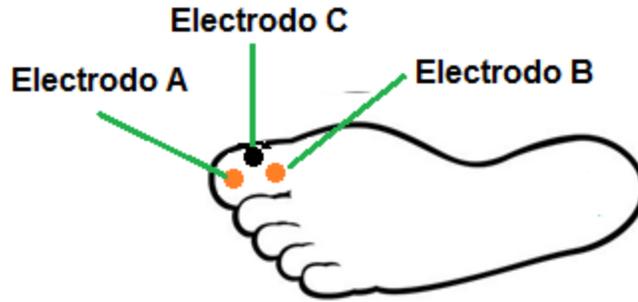


Fig. 3.17 Forma en que se conectan los 3 electrodos en la planta del pie para la medición de impedancia eléctrica.

Los electrodos A y B son los electrodos del circuito cerrado formado por la resistencia y la piel, mientras que el electrodo C es el electrodo de medición a través del cual se genera una tensión positiva a partir de la corriente inyectada.

El voltaje captado entre los electrodos B y C es el voltaje característico de la piel el cuál indicará a través de la ecuación (2) la impedancia de la piel.

$$Z = \frac{\text{Voltaje de la piel}}{22 \mu A} \quad \text{ec.2}$$

dónde el voltaje en la piel es el voltaje registrado en el electrodo C

Las mediciones de impedancia se realizarán en el dedo hallux de las personas. El dedo hallux es la parte del cuerpo en donde primero se manifiestan los daños provocados por el pie diabético, estos daños se desencadenan de pequeñas úlceras y se desarrollan de acuerdo a la clasificación de Wagner.

- Etapa de adquisición

En esta etapa son procesadas dos señales de interés externas al PIC controlador, la primera es la señal de excitación multifrecuencia cuadrada generada por el circuito ICL8038 mientras que la segunda es la tensión generada en la piel del paciente.

La primer señal (señal de excitación) solo es leída por el microcontrolador para realizar una aproximación de la frecuencia de oscilación, esto se hace a través de una de sus entradas analógicas, esta señal es procesada por software como un contador de pulsos para estimar la frecuencia seleccionada.

Por otro lado la segunda señal analógica, tensión generada en la piel sobre el electrodo C, se convierte a digital mediante el convertidor analógico digital del PIC16f877A.

- Etapa de procesamiento y control

El procesamiento de la tensión medida en la piel del paciente se convierte a una señal digital mediante el convertidor del microcontrolador. Este factor será el potencial generado en la piel del paciente por la señal de excitación.

Una vez obtenido el valor de la tensión registrada, se utiliza la ecuación (2) para determinar la correspondiente impedancia, teniendo como parámetros conocidos, la tensión registrada y la corriente inyectada al paciente. El control de entrada, salida y conversión de datos se lleva a cabo en la programación del PIC tal y como se muestran en la Figura 3.18 las etapas del control de señales.

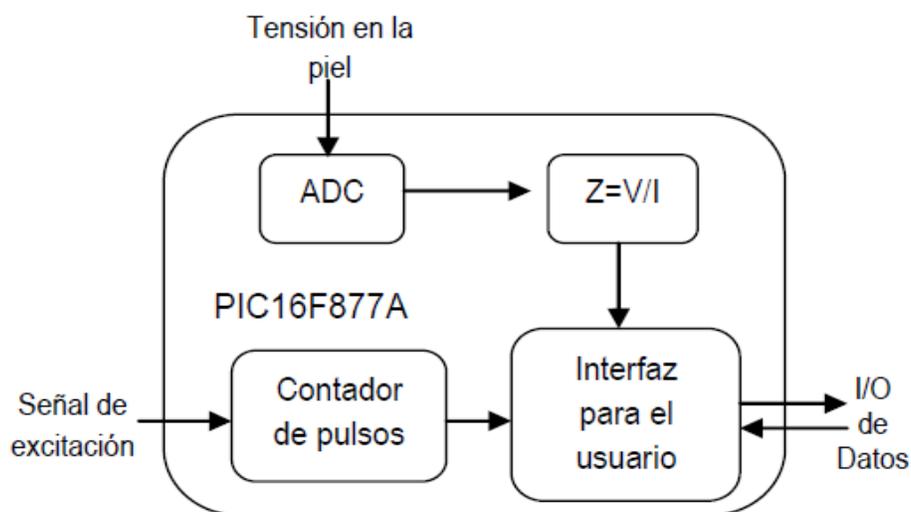


Fig. 3.18 Etapas de control de las señales de control analógicas.

- Etapa gráfica

En esta etapa se realizó el despliegado de resultados procesados por el PIC16f877A mediante una LCD 16x2. Dicha etapa cuenta con el intercambio de datos que le permite al usuario seleccionar el número de usuario para almacenar las correspondientes mediciones en una memoria interna del medidor. Posterior a la selección del usuario, se inicia la medición correspondiente y se despliegan los resultados de impedancia y frecuencia registrados.

Interfaz con el usuario

Las pantallas que se despliegan en el LCD del sistema de medición de impedancia se muestran en el Figura 3.19. Como se puede observar, primero se despliegan las pantallas de “Bienvenidos” y “Medidor de Bioimpedancia” para posteriormente mostrar el menú seleccionador con las opciones de “1.Medir” y “2.Datos”.

Si el usuario desea medir la impedancia eléctrica del pie de una persona, deberá colocar los electrodos como se mencionó anteriormente de este trabajo y posteriormente seleccionar la opción 1 “Medir” en el menú del sistema. En seguida, se elige el usuario a medir; si es el primer usuario el número a seleccionar será el 1, en cambio sí es el usuario número 50 que se mide se elige el número 50. Al aparecer en el display del sistema el texto “Seleccione la Frecuencia”, el usuario tendrá 30 segundos para elegir la frecuencia de trabajo y con la que quiere medir la impedancia de la piel de la planta del pie de una persona. En seguida aparecerá en el display la frecuencia seleccionada y la impedancia medida en el pie. Si el usuario desea guardar este dato deberá presionar el botón “Guardar” del sistema, por el contrario, si desea realizar otra medición con diferente frecuencia deberá presionar el botón de “atrás”.

Si se desea borrar los datos que se almacenaron en la memoria del sistema o enviarlos por interfaz RS232 a una computadora, se deberá elegir la opción 2 del

menú principal del sistema y posteriormente oprimir el botón 1. Si se desea borrar los datos, o el botón 2 si se quiere enviar los datos a una computadora.

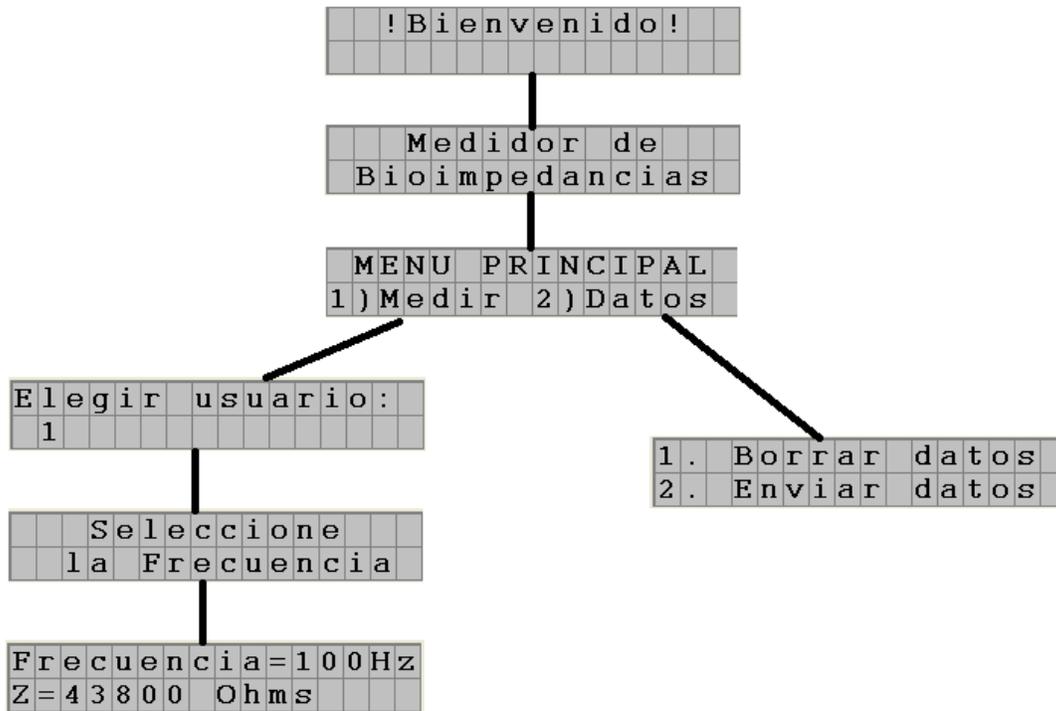


Fig. 3.19 Interfaz sistema-usuario, pantallas desplegadas en el sistema de medición de impedancia.

En la Figura 3.20 se puede observar el diagrama eléctrico de todas las conexiones del sistema de medición de impedancia; las etapas que lo conforman, los periféricos para el control y despliegado de información.

- Etapa de transmisión y guardado

A través del dispositivo de medición existe la posibilidad de guardar los datos de medición (impedancia y frecuencia) en una memoria EEPROM externa al PIC. Además se pueden enviar estos datos a la computadora a través de una comunicación RS232. En la Figura 3.21 se muestra el diagrama de conexión del PIC y de los circuitos integrados necesarios para lograr una comunicación PC- Controlador.



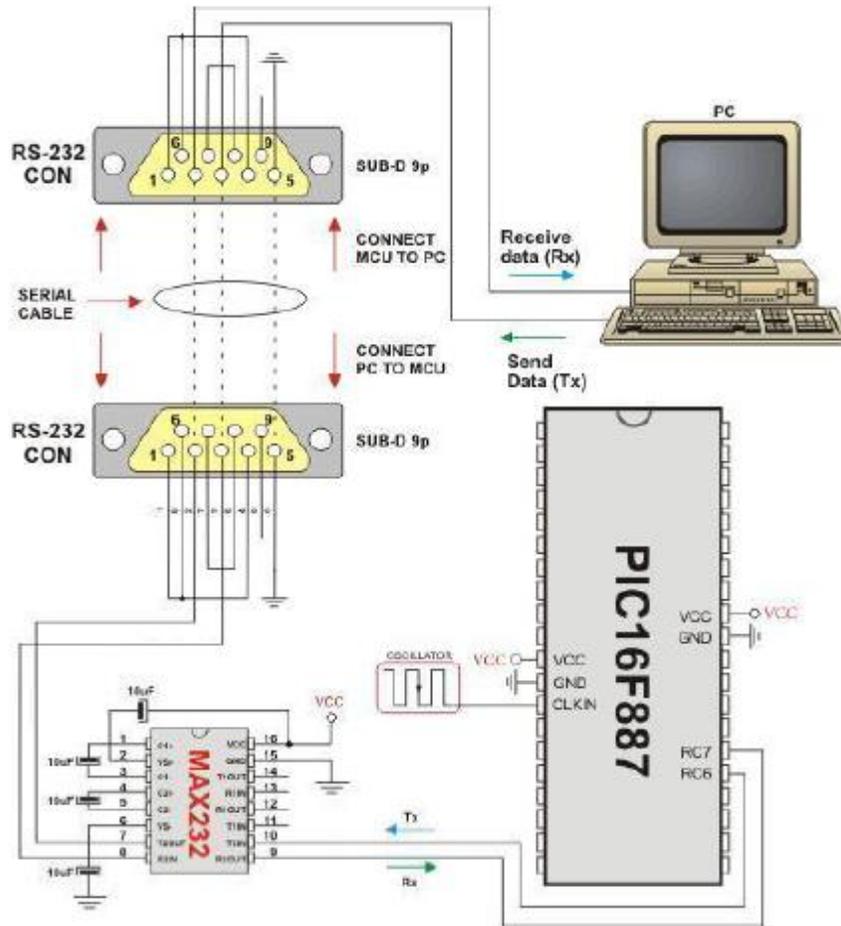


Fig. 71 Diagrama de conexión del protocolo RS232 para la comunicación USART PC-Controlador.

- *Diagrama a bloques del sistema*

En el diagrama de la Figura 3.22 se muestra el proceso para la medición de bioimpedancia en el dedo hallux del pie, y que se describieron anteriormente.



Fig. 3.22 Diagrama a bloques de las etapas del medidor de bioimpedancias.

## 3.2 Protocolo para la medición de la temperatura del pie

### 3.4.1 Participantes

El número de personas que participaron en este estudio fueron doce. A partir de esta muestra, se formó un grupo de control integrado por 8 “*Personas No-diabéticos*” y un grupo de evaluación conformado por 4 “*Personas Diabéticos*”. La edad promedio de ambos grupos de trabajo fue similar y las edades se encontraron en el rango de 25,65 años.

### 3.4.2 Criterio de selección

#### Personas Diabéticos

Las personas de este grupo fueron alumnos y trabajadores del CINVESTAV así como familiares de compañeros de esta institución, de esta manera, se logró reclutar 4 personas diabéticas adultas. Este reclutamiento se llevó a cabo durante los meses de septiembre y octubre del año 2014.

### Personas No-diabéticas

Para la selección de este grupo se contó con el apoyo de profesores, trabajadores y alumnos de la sección de Bioelectrónica del CINVESTAV Zacatenco. A cada persona se le aplicó un cuestionario de salud (Anexo I), las respuestas dadas se evaluaron y con ello se identificaron aquellas personas que no cumplieron con los criterios de inclusión de este grupo. Esta tarea se llevó a cabo en el mes de julio del 2014.

#### **3.4.2.1 Criterios de inclusión para cada grupo**

La selección de los participantes de cada grupo se realizó tomando en cuenta algunos criterios de edad, condición física y condición de salud; esto por la necesidad de contar con mediciones térmicas fiables en ambos grupos evitando factores internos que pudieran afectar la temperatura corporal de las personas y considerando que se debía contar con participantes con edades promedio similares.

### Participantes Diabéticos

Los criterios de inclusión tomados en cuenta en este grupo fueron:

- estar diagnosticado por la enfermedad de Diabetes Mellitus tipo II.
- rango de edad entre los 25 a 65 años.

### Participantes No-diabéticos

- para ese grupo se tomaron en cuenta los siguientes criterios de inclusión:
- rango de edad entre los 25 a 65 años.
- no tener un familiar directo que padezca Diabetes Mellitus.
- no sufrir de sobrepeso.
- no padecer ninguna enfermedad que modifique su presión sanguínea.
- no sufrir ninguna lesión en los pies.

### **3.4.3 Materiales y equipos**

El material médico y equipo electrónico utilizado para la medición de temperatura del pie en cada persona consistió en:

1. sistema de medición de temperatura del pie diseñado y realizado en este trabajo
2. medidor de temperatura ambiental (termómetro de mercurio).
3. sistema de control de glucosa en sangre para la toma de niveles de glucosa de cada persona. En nuestro caso se contó con el kit de medición de glucosa de FreeStyle Lite.
4. material médico como son guantes de latex, cubrebocas, algodón y agua destilada.

### **3.4.4 Procedimiento**

Los participantes de ambos grupos fueron informados sobre el objetivo de este proyecto. Se les tomaron algunos datos personales con el propósito de que cada participante cumpliera con los criterios de inclusión de su respectivo grupo, descritos en la sección 3.4.2.1 Todas las personas fueron voluntariamente parte de este estudio.

A cada participante se le asignó una hora y fecha para la medición térmica en su pie. El grupo de Personas No-diabéticos y Diabéticos fue citado en el laboratorio 14 de la Sección de Bioelectrónica “LAREMUS”.

El procedimiento que se siguió para la medición de temperatura del pie en cada persona fue el siguiente.

1. Se instaló el sistema de medición de temperatura del pie en el lugar de trabajo.
2. Se tomó la temperatura ambiental del lugar.
3. Se tomó el nivel de glucosa de la persona

4. Se pidió a la persona que se sentara en una silla de forma recta con los pies descubiertos.
5. Se hizo la limpieza de los pies de la persona con agua destilada y algodón.
6. Después de secarse los pies y esperar alrededor de 15 min, se pidió a las personas que colocaran sus pies sobre las plantillas utilizadas (si su número de calzado de la persona era menor a 27 se utilizó la plantilla chica, en cambio, si la persona calzaba más de 27 se requirió el uso de la plantilla grande).
7. Se conectaron las plantillas al sistema electrónico y se inició la medición de la temperatura de los pies de la persona. Para realizarla se siguieron los pasos descritos en la sección 3.2.4.1 de este trabajo.
8. Mientras se llevaba a cabo la medición se le hizo un par de preguntas a la persona, con el fin de llenar un cuestionario de salud (Anexo I) que se guardaría en la base de datos de cada persona.
9. Al finalizar la medición se desinstaló el equipo y se agradeció la participación a cada persona.

Cabe señalar que para todas las actividades en las que hubo necesidad de tener contacto con los participantes se utilizaron guantes de látex para evitar el riesgo de algún tipo de contagio de alguna enfermedad. Además, después de cada medición se lavaron y desinfectaron las plantillas utilizadas.

Para su futura validación se entregó un ejemplar del sistema de monitoreo de temperatura del pie al Instituto Nacional de Rehabilitación para su empleo en pacientes con y sin diabetes. Estas mediciones se realizarán en el año próximo 2015.

### **3.4.5 Análisis de Temperatura**

Después de que se almacenan todas las temperaturas en el sistema diseñado de cada persona que participó en este estudio, se envían por conexión USB a una computadora para posteriormente ser analizadas.

Con ayuda del software Matlab son recibidos los datos (temperaturas almacenadas de cada participante) mandados del sistema de monitoreo. Se desarrolló una base de datos para guardar todos los datos de este estudio en un computador. Esta base de datos contenía además de toda la información personal de cada participante, los datos relacionados a su temperatura registrada de las cuatro zonas monitoreadas cada minuto en cada pie.

Tabla 3.1 Ejemplo de las tablas donde se almacenaron las temperaturas medidas en cuatro zonas del pie en personas diabéticas y no diabéticas

PIE DERECHO					PIE IZQUIERDO				
Minutos	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Minutos	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
1	T1	T1	T1	T1					
2	T2	T2	T2	T2	2	T2	T2	T2	T2
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
15	T15	T15	T15	T15	15	T15	T15	T15	T15

Los datos de cada persona fueron almacenados en una computadora. Se realizaron 2 tablas para cada participante: en una se guardaron las temperaturas registradas del pie derecho y en la otra las del pie izquierdo de una persona como se muestra en la Tabla 3.1. Los datos fueron graficados posteriormente, para observar como fue el comportamiento térmico de cada zona del pie medida en cada persona que participó en este estudio.

### 3.4.5.1 Análisis Estadístico

El análisis estadístico del comportamiento térmico del pie en cada grupo de estudio se realizó empleando estadística no paramétrica y paramétrica. Con la ayuda del software Excel y IBM SPSS Statistics 22 se aplicaron las fórmulas estadísticas a los datos obtenidos; las gráficas adquiridas también se realizaron en estos softwares.

Se compararon las temperaturas registradas del pie derecho con las del pie izquierdo de cada persona, es decir se comparó la zona 1 del pie derecho con la zona 1 del pie izquierdo de una misma persona y así respectivamente. Esta comparación se hizo realizando un análisis estadístico. En este caso, se utilizó la prueba de T- Student para datos con distribución normal y la prueba de Mann Whitney para datos que no seguían este tipo de distribución, de esta manera se determinó si había una diferencia significativa en la temperatura entre la misma zona del pie derecho con la del pie izquierdo.

#### **3.4.5.2 Aspectos éticos**

Este estudio requirió la participación de doce personas. La participación de cada persona fue voluntaria, todos tenían el derecho de retirarse del estudio en cualquier momento. La información recopilada de cada participante es confidencial, solo está al alcance del investigador.

## CAPITULO IV

### IV RESULTADOS

Durante el presente estudio se requirió la participación de doce personas: 4 personas diabéticas y 8 no diabéticas, con edad en el rango de 25 a 65 años. Todos los participantes cubrieron los criterios de inclusión señalados en el punto 3.4.2. Los datos almacenados en el sistema de monitoreo fueron transmitidos a un computador con la implementación del software Matlab 7.8.0, R2009a. El análisis estadístico empleado para la interpretación de los datos adquiridos se realizó en el software Microsoft Excel 2010 e IBM SPSS Statistics Visor.

#### 4.1 Datos registrados con e sistema de monitoreo de temperatura en pie

Tabla 4.1 Estado de salud de las doce personas que participaron en este estudio

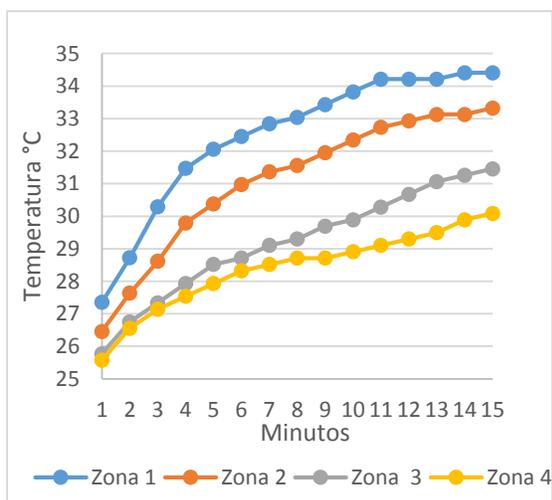
Número de Participante	Estado de salud	Sexo	Edad	Nivel de Glucosa mg/dl	Tiempo de padecimiento y tratamiento
1	No- diabético	Hombre	26	118	-
2	No- diabético	Hombre	27	99	-
3	No- diabético	Mujer	25	80	-
4	No- diabético	Hombre	34	113	-
5	No- diabético	Mujer	31	98	-
6	No- diabético	Mujer	29	94	-
7	No- diabético	Hombre	27	105	-
8	No- diabético	Hombre	50	130	-
9	Diabético	Hombre	27	154	8 (insulina)
10	Diabético	Mujer	45	174	20 (insulina)
11	Diabético	Hombre	60	118	29 (insulina y dieta)
12	Diabético	Hombre	65	159	2 (dieta)

Como se recordará, con el uso del sistema de monitoreo de temperatura del pie construido se monitoreó y se almacenó la temperatura de cada participante en cuatro zonas de ambos pies (dedo hallux, primer metatarsiano, lado opuesto del arco y talón) una vez por minuto durante un lapso de 15 minutos. A cada persona que colaboró en este estudio se le otorgó un número de participación, para tener su registro y base de datos como se muestra en la tabla 4.1.

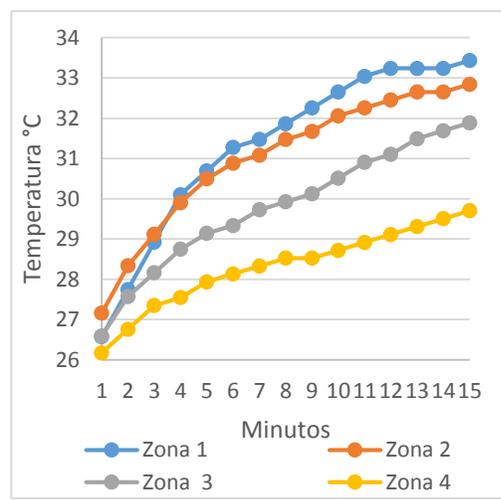
A continuación se muestra los datos que se almacenaron y monitorearon de la temperatura que se registró en una persona no diabética (Tabla 4.2 y Fig.4.1) y otra diabética (Tabla 4.3 y Fig.4.2). Los resultados del resto de los participantes se pueden apreciar en el Anexo II.

Tabla 4.2 Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 1 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	27.4	26.5	25.8	25.6	26.6	27.2	26.6	26.2
2	28.7	27.6	26.8	26.6	27.7	28.3	27.6	26.8
3	30.3	28.6	27.3	27.1	28.9	29.1	28.2	27.3
4	31.5	29.8	27.9	27.5	30.1	29.9	28.7	27.5
5	32.1	30.4	28.5	27.9	30.7	30.5	29.1	27.9
6	32.4	31.0	28.7	28.3	31.3	30.9	29.3	28.1
7	32.8	31.4	29.1	28.5	31.5	31.1	29.7	28.3
8	33.0	31.6	29.3	28.7	31.9	31.5	29.9	28.5
9	33.4	31.9	29.7	28.7	32.3	31.7	30.1	28.5
10	33.8	32.3	29.9	28.9	32.6	32.1	30.5	28.7
11	34.2	32.7	30.3	29.1	33.0	32.3	30.9	28.9
12	34.2	32.9	30.7	29.3	33.2	32.5	31.1	29.1
13	34.2	33.1	31.1	29.5	33.2	32.6	31.5	29.3
14	34.4	33.1	31.3	29.9	33.2	32.6	31.7	29.5
15	34.4	33.3	31.5	30.1	33.4	32.8	31.9	29.7



a) Pie Derecho

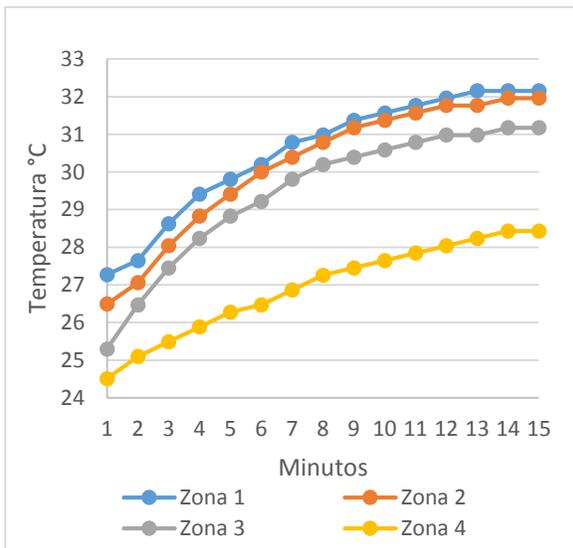


b) Pie Izquierdo

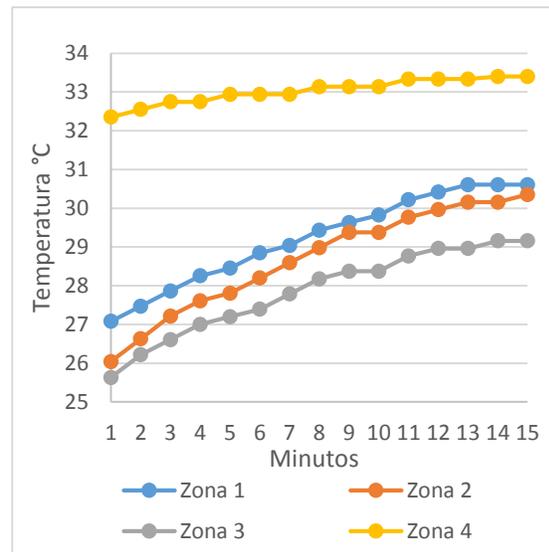
Fig. 4.1 Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 1 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

Tabla 4.3 Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 10 (diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	27.3	26.5	25.3	24.5	27.1	26.0	25.6	32.4
2	27.6	27.1	26.5	25.1	27.5	26.6	26.2	32.5
3	28.6	28.0	27.5	25.5	27.9	27.2	26.6	32.7
4	29.4	28.8	28.2	25.9	28.3	27.6	27.0	32.7
5	29.8	29.4	28.8	26.3	28.5	27.8	27.2	32.9
6	30.1	30.0	29.2	26.5	28.8	28.2	27.4	32.9
7	30.7	30.4	29.8	26.9	29.0	28.6	27.8	32.9
8	30.9	30.8	30.2	27.3	29.4	29.0	28.2	33.1
9	31.3	31.2	30.4	27.5	29.6	29.4	28.4	33.1
10	31.5	31.4	30.6	27.6	29.8	29.4	28.4	33.1
11	31.7	31.6	30.8	27.8	30.2	29.8	28.8	33.3
12	31.9	31.8	31.0	28.0	30.4	30.0	29.0	33.3
13	32.1	31.8	31.0	28.2	30.6	30.2	29.0	33.3
14	32.1	32.0	31.2	28.4	30.6	30.2	29.2	33.4
15	32.1	32.0	31.2	28.4	30.6	30.4	29.2	33.4



a) Pie Derecho



b) Pie Izquierdo

Fig. 4.2 Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 10 (persona diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

Como se recordará la zona 1 corresponde al dedo hallux, la zona 2 al primer metatarsiano, la zona 3 al lado opuesto del arco y la zona 4 al talón del pie. Como se puede observar en las figuras anteriores, Figuras 4.1 y 4.2, la temperatura de la persona diabética y la no diabética fue incrementando a medida de que transcurrían los minutos. Sin embargo, la temperatura del pie derecho de zona 4 del participante 10 (persona diabética) muestra un comportamiento notablemente diferente al compararlo con el que se presta en la zona 4 de su pie izquierdo. Las gráficas de los demás participantes de muestran en el Anexo II.

#### 4.2 Comportamiento Térmico de las zonas de los pies monitoreados de cada participante

Se obtuvo el promedio de la temperatura registrada en cada zona del pie (dedo hallux, primer metatarsiano, lado opuesto del arco y talón) de ambos grupos de estudio (personas diabéticas y no diabéticas). Las gráficas de las Figuras 4.3- 4.6 ilustran el comportamiento térmico de cada zona del pie obtenido en este estudio realizado.

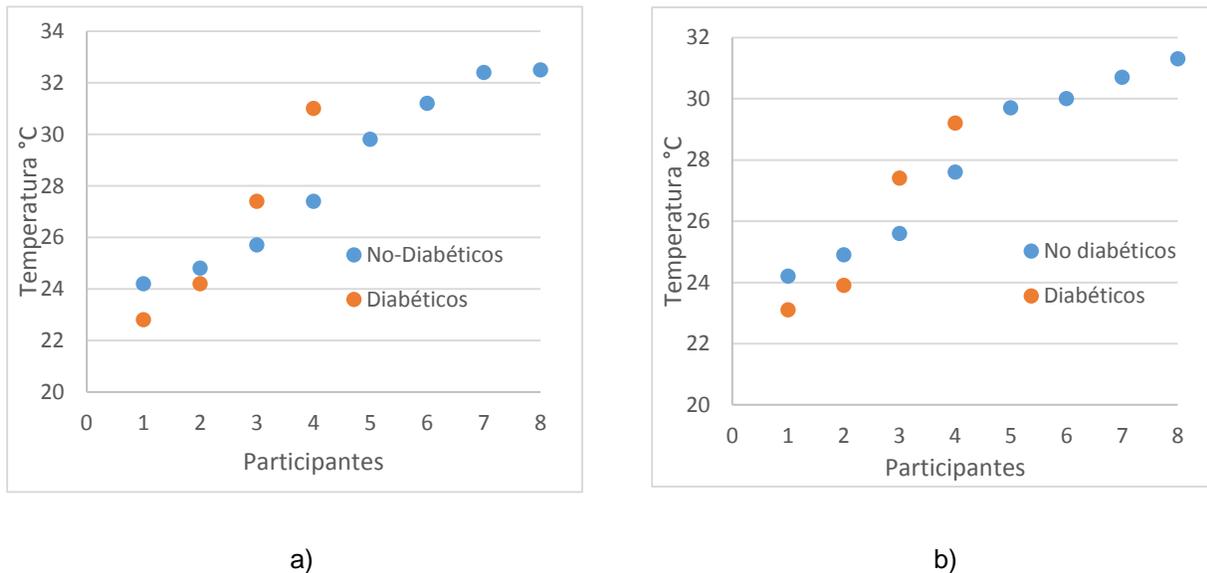
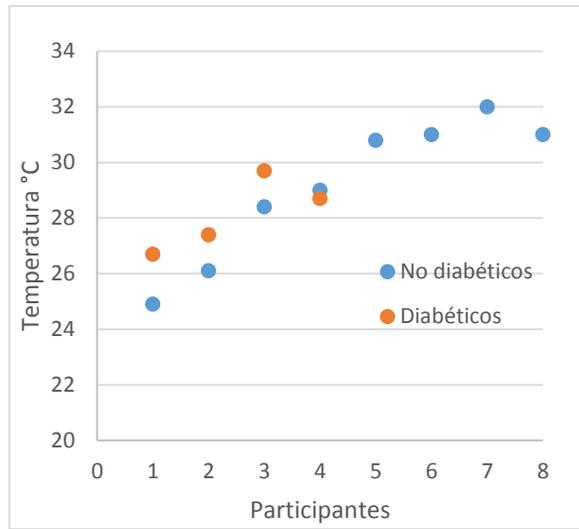
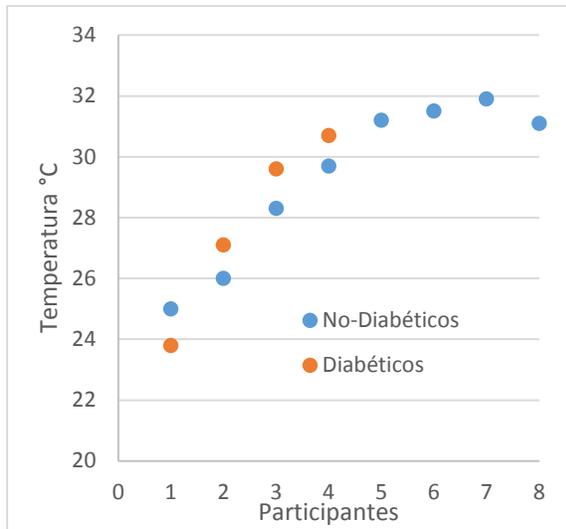


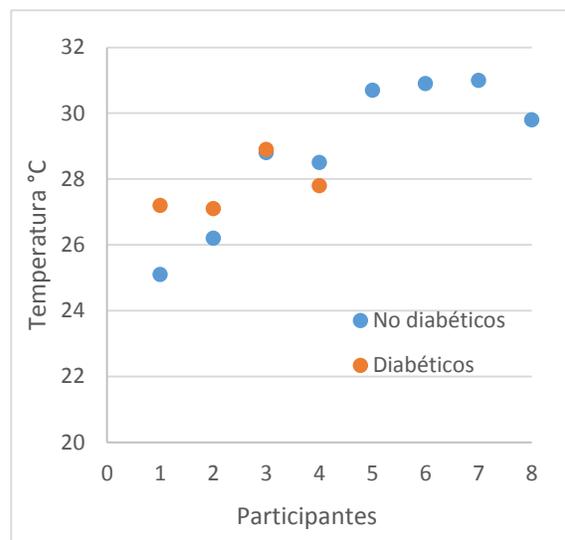
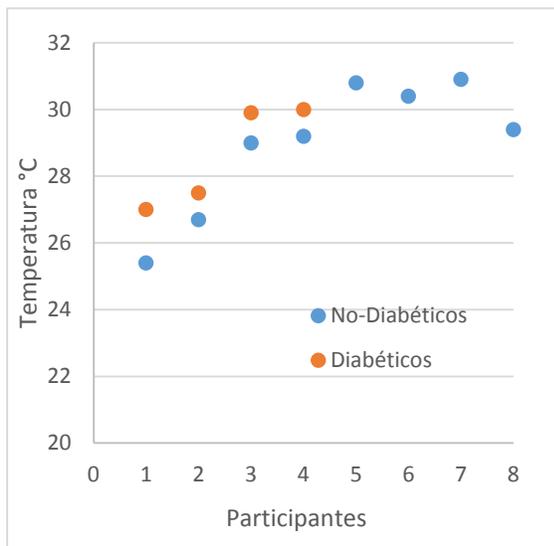
Fig. 4.3 Promedio de la temperatura monitoreada en cada participante del estudio para la zona 1 (dedo hallux) del pie derecho (a) y el pie izquierdo (b)



a)

b)

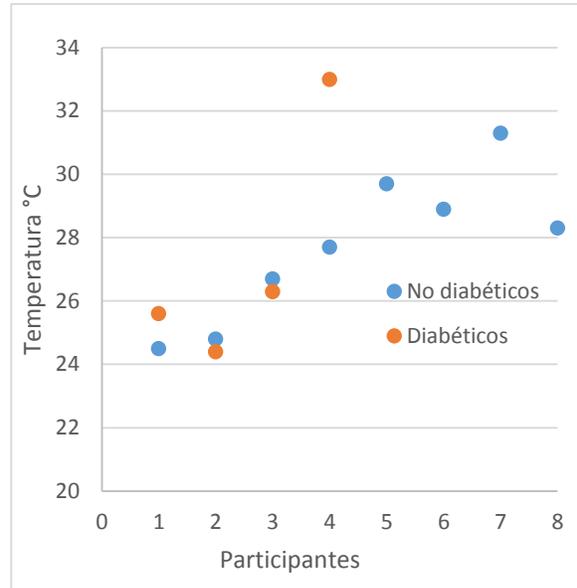
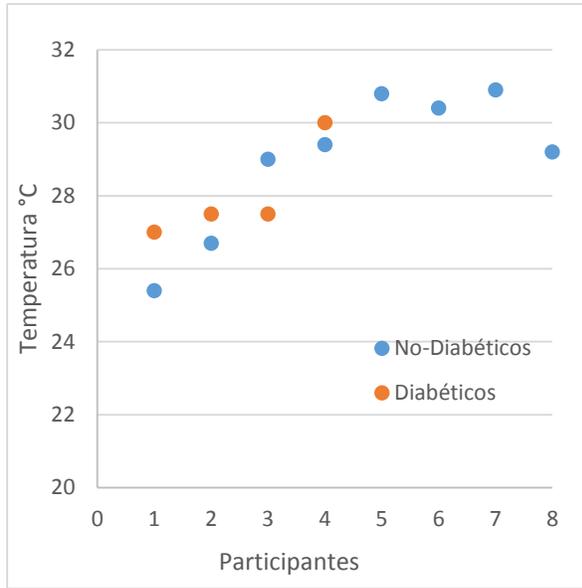
Fig. 4.4 Promedio de la temperatura monitoreada en cada participante del estudio para la zona 2 (primer metatarsiano) del pie derecho (a) y el pie izquierdo (b)



a)

b)

Fig. 4.5 Promedio de la temperatura monitoreada en cada participante del estudio para la zona 3 (lado opuesto al arco del pie) del pie derecho (a) y el pie izquierdo (b)



a)

b)

Fig. 4.6 Promedio de la temperatura monitoreada en cada participante del estudio para la zona 4 (talón) del pie derecho (a) y el pie izquierdo (b)

### 4.3 Análisis de las zonas térmicas del pie monitoreadas de cada participante

Como se mencionó anteriormente, varios estudios han señalado que una diferencia de más de 2.2 °C entre los lados correspondientes del pie derecho e izquierdo se considera anormal y puede indicar el indicio de alguna lesión. Por este motivo, se calculó la diferencia entre la temperatura registrada en cada zona del pie derecho con la del pie izquierdo de cada participante. A continuación se muestran las gráficas obtenidas para algunos de los participantes (Figuras 4.7 y 4.8). El resto de las gráficas se muestran en el Anexo III.

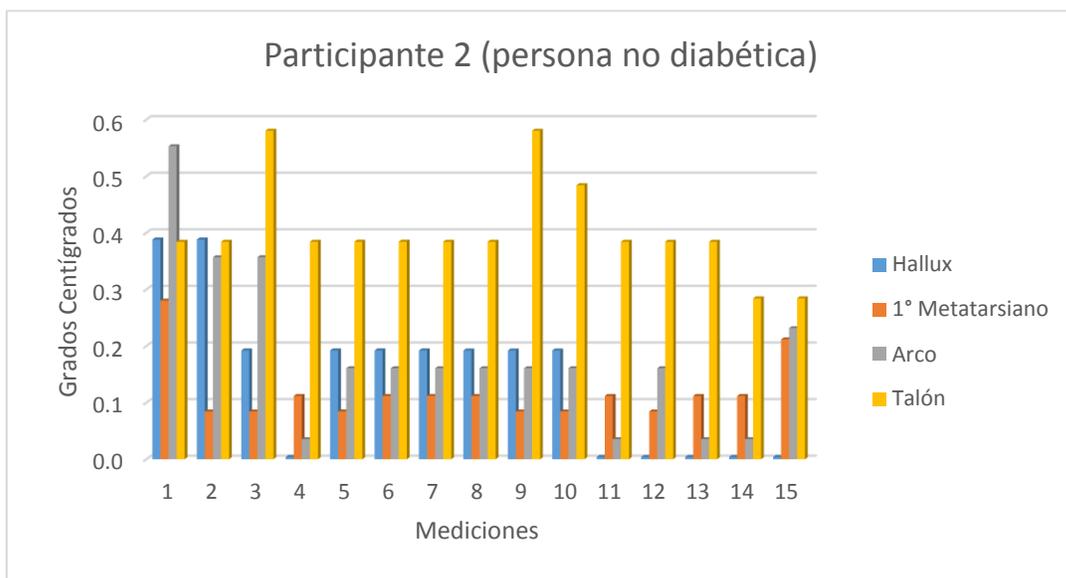
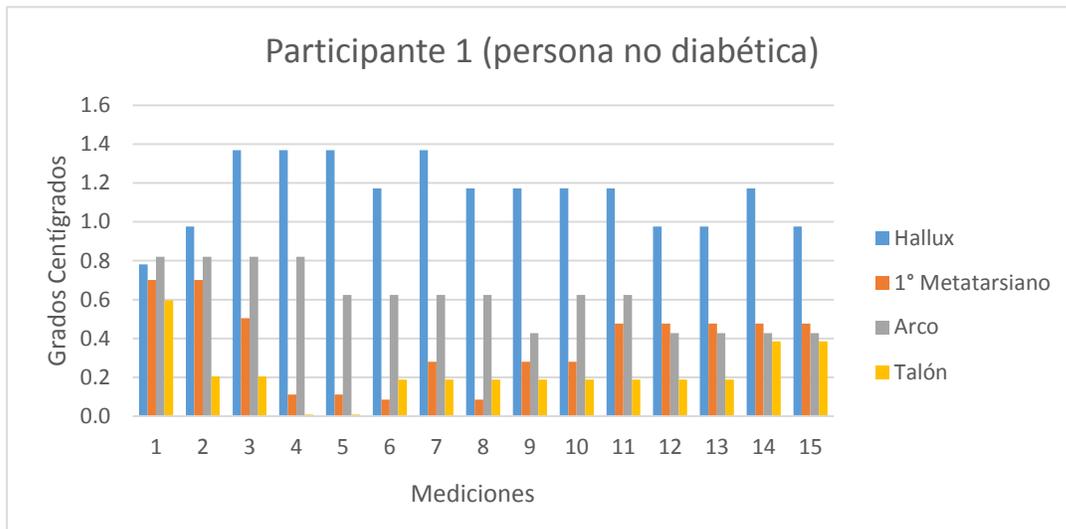


Fig. 4.7 Diferencias obtenidas entre cada medición de temperatura en la 4 zonas del pie las 15 monitoreadas en los participantes no diabéticos número 1 y 2

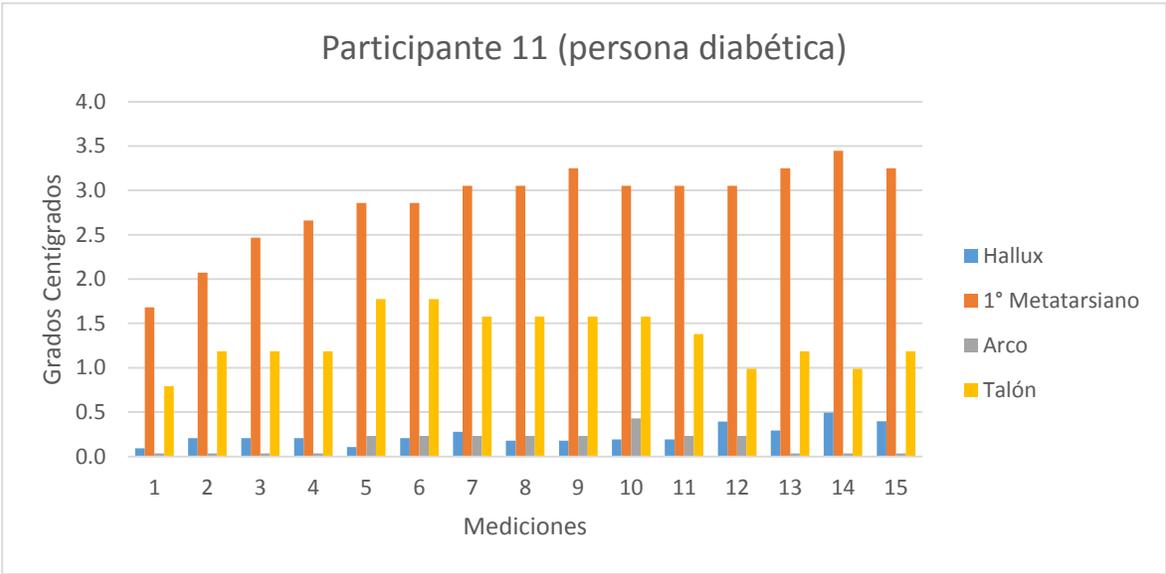
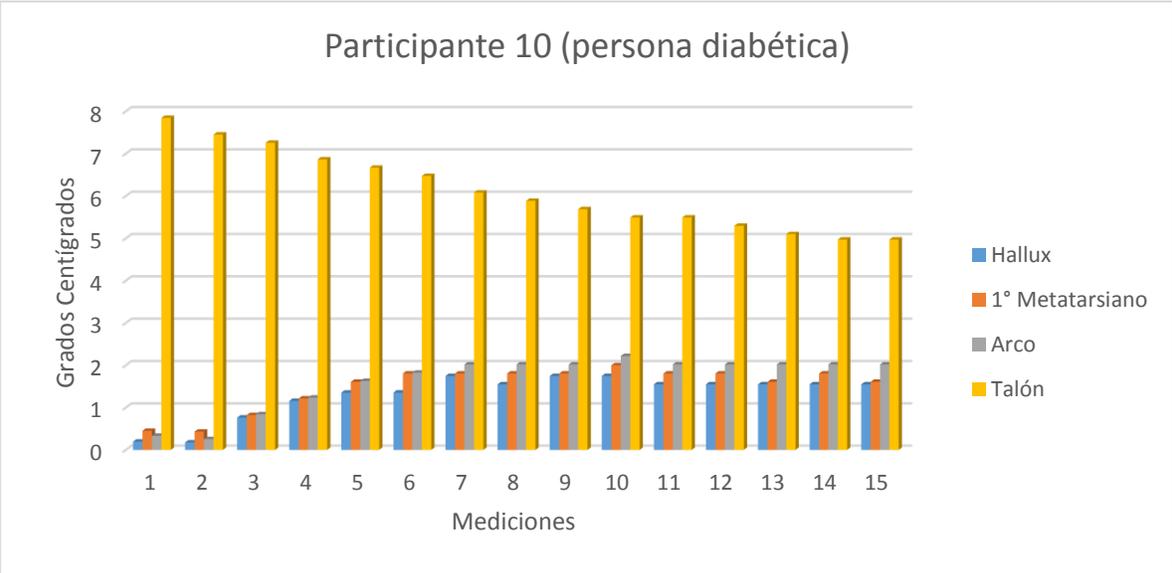


Fig. 4.8 Diferencias obtenidas entre cada medición de temperatura en la 4 zonas del pie las 15 monitoreadas en los participantes diabéticos número 10 y 11

En el grupo de personas no diabéticas no se encontraron diferencias mayores a 2°C en la temperatura registrada en la misma zona entre el pie derecho e izquierdo en ningún participante. Sin embargo, algunos de los participantes del grupo de diabéticos si mostraron diferencias de más de 2°C entre las mismas zonas. A continuación se muestra la Tabla 4.4, donde se puede apreciar las diferencias entre la temperatura de los lados correspondientes del pie de cada participante.

Tabla 4.4 Diferencias térmicas entre las zonas de los lados correspondientes del pie en cada persona.

Participante	Diferencias en °C entre las Zonas 1 Dedo hallux	Diferencias en °C entre las Zonas 2 Primer metatarsiano	Diferencias en °C entre las Zonas 3 Zona opuesta al arco	Diferencias en °C entre las Zonas 4 Talón del pie
1	1.1	0.1	0.6	0.1
2	0.1	0.0	0.1	0.4
3	0.1	0.1	0.5	0.3
4	0.0	0.1	0.2	0.0
5	0.1	0.4	0.2	0.5
6	0.2	0.1	0.9	0.4
7	1.2	0.4	0.5	0.7
8	1.7	0.1	0.1	1.5
9	0.0	0.1	1.0	1.2
10	1.8	2.0	2.1	5.8
11	0.2	2.9	0.2	1.3
12	0.3	0.2	0.3	0.8

#### 4.4 Análisis estadístico

Para demostrar estadísticamente si existían diferencias entre las misma zona del pie derecho con la del izquierdo de cada participante se hizo uso de algunas pruebas estadísticas.

Las estadísticas de prueba consideradas para denotar la diferencia existente entre estas zonas fueron la prueba de medias paramétrica t-Student y la prueba no paramétrica U Mann-Whitney. Al realizar estas pruebas se consideró:

- ✓ un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ . Para todo valor de probabilidad igual o menor que 0.05, se acepta  $H_a$  y se rechaza  $H_o$ .
- ✓ treinta grados de libertad (tamaño de la muestra a comparar).
- ✓ las pruebas estadísticas realizadas consideraron como hipótesis nula ( $H_o$ ) el hecho de que las medias de las zonas monitoreadas a comparar son similares y una hipótesis alterna ( $H_a$ ) de que las medias de las zonas monitoreadas a comparar no son similares.

La prueba estadística T-Student se utilizó con los datos que seguían una distribución normal. Con aquellos datos que no seguían esta distribución, fue necesario utilizar la prueba no paramétrica U- Mann-Whitney.

Se compararon los 15 datos correspondientes a la zona 1 del pie derecho con los 15 datos de la zona 1 del pie izquierdo y así respectivamente entre zonas en cada participante, Tabla 4.5. Con el implemento del software IBM SPSS Statistics se encontró cómo era la distribución de los datos. De esta forma, se pudo elegir entre las prueba t-Student o Mann-Whitney y poder obtener un resultado eficaz.

Tabla 4.5 Resultados obtenidos de la prueba de medias t-Student y Mann-Whitney realizada al grupo de Participantes Diabéticos y no diabéticos

Participante	Zonas comparadas	Prueba utilizada	Valor p obtenido	Resultado
<b>1</b> <b>No diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	Mann-Whitney	0.100	Se acepta $H_o$
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	Mann-Whitney	0.803	Se acepta $H_o$
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	t-Student	0.050	Se acepta $H_o$
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.068	Se acepta $H_o$
<b>2</b> <b>No diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	Mann-Whitney	0.318	Se acepta $H_o$
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	t-Student	0.985	Se acepta $H_o$
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	Mann-Whitney	0.739	Se acepta $H_o$
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.138	Se acepta $H_o$

Participante	Zonas comparadas	Prueba utilizada	Valor p obtenido	Resultado
<b>3</b> <b>No diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	Mann-Whitney	0.344	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	Mann-Whitney	0.662	Se acepta Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	t-Student	0.052	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.055	Se acepta Ho
<b>4</b> <b>No diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	Mann-Whitney	0.645	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	Mann-Whitney	0.783	Se acepta Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	t-Student	0.107	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	Mann-Whitney	0.508	Se acepta Ho
<b>5</b> <b>No diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	t-Student	0.890	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	t-Student	0.364	Se acepta Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	Mann-Whitney	0.506	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.247	Se acepta Ho
<b>6</b> <b>No diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	Mann-Whitney	0.100	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	Mann-Whitney	0.803	Se acepta Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	t-Student	0.050	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.068	Se acepta Ho
<b>7</b> <b>No diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	t-Student	0.540	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	t-Student	0.403	Se acepta Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	t-Student	0.352	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.050	Se acepta Ho

Participante	Zonas comparadas	Prueba utilizada	Valor p obtenido	Resultado
<b>8 No diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	t-Student	0.062	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	t-Student	0.949	Se acepta Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	t-Student	0.921	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.054	Se acepta Ho
<b>9 Diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	Mann-Whitney	0.020	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	Mann-Whitney	0.019	Se acepta Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	Mann-Whitney	0.005	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.533	Se acepta Ho
<b>10 Diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	Mann-Whitney	0.019	Se rechaza Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	Mann-Whitney	0.014	Se rechaza Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	Mann-Whitney	0.007	Se rechaza Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t-Student	0.0001	Se rechaza Ho
<b>11 Diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	t-Student	0.058	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	Mann-Whitney	0.0001	Se rechaza Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	Mann-Whitney	0.063	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t Mann-Whitney	0.0001	Se rechaza Ho
<b>12 Diabético</b>	Zona 1 Der.-Zona 1 Izq.	t-Student	0.061	Se acepta Ho
	Zona 2 Der.-Zona 2 Izq.	t-Student	0.169	Se acepta Ho
	Zona 3 Der.-Zona 3 Izq.	Mann-Whitney	0.081	Se acepta Ho
	Zona 4 Der.-Zona 4 Izq.	t Mann-Whitney	0.100	Se acepta Ho

Como se puede apreciar en este análisis estadístico la Ho (las medias de las zonas monitoreadas a comparar son similares) fue aceptada en todos los casos para

los participantes no diabéticos, mientras que algunos de los participantes diabéticos la  $H_0$  se rechazó.

Se puede observar que los participantes no diabéticos no mostraron diferencias significativas en el análisis estadístico, ni mayores a  $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la temperatura de las zonas correspondientes del pie derecho con las del pie izquierdo, caso contrario mostraron algunos de los participantes diabéticos al tener diferencias mayores a  $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre la temperatura del pie derecho con la del pie izquierdo.

## CAPITULO V

### V CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

#### CONCLUSIONES

Se lograron cumplir todos los objetivos específicos de este trabajo de tesis. Éstos se mencionan a continuación.

- La construcción del primer prototipo del sistema de monitoreo de la temperatura del pie se llevó a cabo con éxito. Gracias a esto, fue posible registrar la temperatura de cuatro de las zonas más propensas a una ulceración en el pie derecho e izquierdo en personas con y sin diabetes que participaron en este estudio.
- El diseño de un sistema para la medición de impedancia en el dedo hallux del pie fue realizado satisfaciendo todos los requerimientos que se plantearon (portabilidad, fácil manejo, utilizar la técnica por inyección de corriente alterna por 3 electrodos y el empleo de dispositivos analógicos).
- Se logró realizar un análisis en los datos obtenidos y almacenados en cada medición de temperatura con el implemento del sistema de monitoreo realizado. En este análisis se determinaron los siguientes aspectos.
  - Se encontraron diferencias en la temperatura de la misma zona del pie derecho con la del pie izquierdo de más de 2°C solo en algunos de los participantes diabéticos, ya que los no diabéticos no mostraron diferencias superiores a 2°C.
  - Se aceptó la hipótesis nula en todos los participantes no diabéticos en el análisis estadístico realizado para comparar cada zona del pie derecho con las correspondientes del pie izquierdo, con esto, se determinó que no hay una diferencia significativa entre la temperatura del pie derecho con las del pie izquierdo en este grupo de estudio. Sin

embargo, en algunos participantes diabéticos los resultados estadísticos determinaron una diferencia significativa en la temperatura que se registró en la misma zona del pie derecho con la del pie izquierdo, al ser rechazada la hipótesis nula.

El comportamiento de la temperatura de los pies que presentaron algunas de las personas diabéticas no fue similar al que presentaron las personas sin diabetes. Se evaluó la posibilidad de que estas diferencias de temperatura puedan indicar daños en el tejido del pie, ya que los participantes que mostraron diferencias significativas, padecían de cierto grado de neuropatía, enfermedad que disminuye la sensibilidad en los pies. Por todos los resultados obtenidos se concluye que la temperatura corporal de los pies puede ser utilizada como un indicador en el prediagnóstico en la patología del pie diabético.

#### PERSPECTIVAS FUTURAS

Como trabajo a futuro se planea realizar las siguientes actividades.

- ❖ Con el ejemplar entregado del sistema de monitoreo de temperatura en pie construido al Instituto Nacional de Rehabilitación (INR), se medirá la temperatura de los pies en pacientes del INR diabéticos y no diabéticos, para ampliar la base de datos en estos grupos de estudio.
- ❖ Se compararán las temperaturas obtenidas en ambos pie de personas no diabéticas con las de las personas diabéticas, con el uso de herramientas estadísticas, y se evaluará la posibilidad de obtener un comportamiento térmico en el pie en cada grupo de estudio.
- ❖ Se construirá el sistema para la medición de impedancia en el dedo hallux del pie diseñado así como se realizarán pruebas en personas con y sin diabetes.

Asimismo, se recomienda realizar los siguientes cambios en el sistema de monitoreo de temperatura realizado.

- ❖ En las plantillas del sistema de monitoreo: reemplazar los sensores LM35 utilizados en este primer prototipo por unos sensores de temperatura más pequeños y con más resolución para reducir las calibraciones que se necesitan realizar en el sistema.
- ❖ En el sistema electrónico: reemplazar la circuitería analógica utilizada por dispositivos más pequeños que cumplan la misma función pero que puedan hacer este sistemas más práctico reduciendo sus dimensiones y pueda ser transportado junto al usuario sin que le resulte molesto.
- ❖ Analizar la posibilidad de realizar este sistema de monitoreo de temperatura de pie de manera inalámbrica para que pueda ser más cómodo para las personas que lo utilizan y puedan utilizarlo sin la necesidad de estar en una misma posición durante determinado tiempo.

## **PRODUCTO OBTENIDO DE LA TESIS**

- F. Lopez Murillo, L. Leija, A. Vera, “A Foot Temperature Measuring System for Diabetic patients”, International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, Cd. Del Carmen, Campeche México 2014.
- L. Leija, F. Lopez Murillo, A. Vera, UO. García, C. Negreira, “Development of an electronic equipment for the pre medical diagnose in the progress of diabetic foot disease” IEEE, 2014

## BIBLIOGRAFÍA

[1] **Alberti, K.G. y Zimmet, P.Z (1998).** *Definition, diagnosis and classification of diabetes mellitus and its complications. Part 1: diagnosis and classification of 65 diabetes mellitus. Provisional report of a WHO Consultation.* Diabetic Medicine. Número15: 539-553.

[2] **Asociación Mexicana de Diabetes.** *Diabetes Mellitus.* Documento revisado el 23 de septiembre del 2013: <http://www.geocities.com/diabetesac/diabasic.html>

[3] **American Diabetes Association (2006).** *Standards of Medical Care in Diabetes.* Diabetes Care 29 (Suppl 1): S4-S42.

[4] **Kahn, R., Weir, G., King, G., Jacobson, A., Moses, A., Robert, J. y Smirth (2004).** *Joslin's Diabetes mellitus.* (14a ed.) USA: Lippincott Williams Wilkins.

[5] **Todo sobre la diabetes.** Documento revisado el 23 de septiembre del 2013: [www.diabetesaldia.com/todo\\_sobre\\_la\\_diabetes/bases\\_del\\_tratamiento/ejercicios.htm](http://www.diabetesaldia.com/todo_sobre_la_diabetes/bases_del_tratamiento/ejercicios.htm)

[6] **LoGerfo, F. y Pomposelli, F. (1995).** *Diabetic vascular disease.* Management of diabetic foot problems, (2nd ed.). WB Saunders Co.

[7] **Congreso de la Federación Internacional de Diabetes (2011),** *Diabetes Mellitus.* Documento revisado el 20 de septiembre del 2013: <http://www.elmundo.es/elmundosalud/2009/10/20/corazon/1256043460.html>

[8] **Altamirano, L. (2001).** *Epidemiología y diabetes.* Depto. de Salud Pública, Facultad de Medicina. UNAM, Rev Fac Med UNAM 44 (1).

[9] **Complicaciones crónicas de la Diabetes Mellitus.** Documento revisado el día 16 de noviembre del 2013:

<http://articulosdemedicina.com/complicaciones-cronicas-dela-diabetesmellitus/.htm>

**[10] National Institute of Neurological Disorders and Stroke**, National Institutes of Health. Documento revisado el 16 de noviembre del 2011:

[http://www.ninds.nih.gov/disorders/spanish/accidente\\_cerebrovascular\\_pr.htm](http://www.ninds.nih.gov/disorders/spanish/accidente_cerebrovascular_pr.htm)

**[11] Edmonds, M. (1986).** *The diabetic food: pathophysiology and treatment.* Clin Endocrinol Met. Vol. 15:889-916.

**[12] U.S Department of health and human services (2003).** *Diabetic retinopathies.* National Institutes of Health, National Eye Institute: 06-2171.

**[13] González, G.M. (2002).** *Nefropatía diabética.* Hospital General. Vol. 5(1-2).

**[14] Wong, M.C., Chung, J.W. y Wong, T.K. (2007).** *Effects of treatments for symptoms of painful diabetic neuropathy.* Systematic review, *BMJ*:335:87.

**[15] Lázaro Martínez, J. (2008)** *Determinación de las Características Biomecánicas en el pie Diabético con y sin Neuropatía.* Tesis doctoral. 67

**[16] Comité de Educación Pública de la América College of food and Ankle Surgeons (2007).** *Neuropatía Diabética Periférica.* Documento revisado el 16 de septiembre del 2013.

[http://www.podiatryofhouston.com/pdfs/Spanish/Diabetic\\_Per\\_Neu\\_S.pdf](http://www.podiatryofhouston.com/pdfs/Spanish/Diabetic_Per_Neu_S.pdf)

**[17] Nelsa Sagaró y Sánchez De la Guardia (2004).** *Pie Diabético: Elementos básicos para el estudiante de medicina.*

Documento revisado el 19 de septiembre del 2013 de:

<http://www.revistaciencias.com/publicaciones/EEFEyVEpplrVgPufHI.php>

**[18] Hospital Universitario Ramón y Caja (2005).** *Protocolos de cuidados del pie diabético.* Salud Madrid.

**[19] J.M, Pou, J.Ybarra (2012).** *Complicaciones vasculares en la diabetes: micro y macroangiopatía.* Pie diabético I. Módulo 2, Capítulo 1

**[20] Prevención del pie diabético:** <http://www.cun.es/la-clinica/servicios-medicos/departamento/cirugia-vascular/prevencion-pie-diabetico>. Documento revisado electrónicamente el 22 de septiembre del 2013.

**[21] Y. Rincón, V. Gil, J. Pacheco, I. Benítez, M. Sánchez (2012)** *Evaluación y tratamiento del pie diabético.* Protocolo del Servicio de Endocrinología del Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes. 176-187.

**[22] Marinel J., Carreño P., Estadella P. (2010)** *Procedimientos diagnósticos en el pie diabético.* Capítulo VI

**[23] Yara Sánchez J. (2008)** *Enfermedades Vasculares Periféricas.* Instituto Superior de Santiago de Cuba.

**[24] Pesquera C. (2012)** *Monofilamento de Semmes-Weinstein.* Hospital Universitario Marqués de Valdecilla. Santander.

**[25] Diapasón, Exploración de la sensibilidad vibratoria.** Documento revisado electrónicamente el 25 de septiembre del 2013: [www.1aria.com](http://www.1aria.com)

**[26] Herranz de la Morena L. (2005)** Índice tobillo brazo para la evaluación de la enfermedad arterial periférica. *Diabetol* 224-226.

**[27] Examen de ultrasonido dúplex/Doppler.** Documento revisado electrónicamente el 25 de septiembre del 2013.

[http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/esp\\_imagepages/9284.htm](http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/esp_imagepages/9284.htm)

**[28] Termometría cutánea.** Documento revisado electrónicamente el 11 de abril del 2014

**[29] Serrano Rios M. y Gutierrez Fuentes J. (2010) “Type 2 Diabetes Mellitus”.** Elsevier España, S.L. Barcelona España

**[30] [Archer, A.G., Roberts, V.C. y Watkins, P.J. (1984). *Blood flow patterns in painful diabetic neuropathy. Diabetologia; 27:563–567.***

**[31] Rayman, G., Hassan, A. y Tooke, J.E. (1986). *Blood flow in the skin of the foot related to posture in diabetes mellitus. British Medical Journal; 292:87– 90.***

**[32] Flynn, M.D., Edmonds, M.E., Tooke, J.E. y Watkins, P.J. (1988). *Direct measurement of capillary blood flow in the diabetic neuropathic foot. Diabetologia; 31:656.***

**[33] Sun, P.C., Lin, H.D., Jao, S.H., Ku, Y.C., Chan, R.C. y Cheng, C.K. (2006). *Relationship of skin temperature to sympathetic dysfunction in diabetic at-risk feet. Diabetes Res Clin Pract.; 73(1):41-6.***

**[34] Schindl, A., Schindl, M. y Heidemarie, S. (1998). *Low intensity laser irradiation improves skin circulation in patients with diabetic microangiopathy. Diabetes Care; 21(4):580-4.***

**[35] Benbow, S.J., Chan, A.W., Bowsher, D.R., Williams, G. y Macfarlane I.A. (1994). *The prediction of diabetic neuropathic plantar foot ulceration by liquid-crystal contact thermography. Diabetes Care; 17(8):835-9.***

**[36] Brioschi, M., Mehl, A., Oliveira, A.G., Freitas, M.A., Macedo, J.F., Fouto, J.E. y Macedo, R. (2010).** Examen de termometría cutánea infrarroja en la evaluación del pie diabético. *Revistapodologia*: 30:4-24.

**[37] Llames L, Baldomero V, Iglesias M. y Rodota L. (2013)** “*Valores del ángulo de fase por bioimpedancia eléctrica; estado nutricional y valor pronóstico*”. *Nutrición Hospitalaria*. 28 (2); 286-295

**[38] Salazar Muñoz Y. ()** Introducción a la medida de impedancia eléctrica de tejidos biológicos. Capítulo 2.

**[39] Arellano Olivares F. (2012)** “Estudios por biompedancia del pie diabético”. Instituto Tecnológico de Celaya. Departamento de Ingeniería Electrónica.

**[40] Paco Bogonez,** “Medidas de bioimpedancia para la detección del estado de los órganos”, pp. 49-51.

**[41] Francisco José Berral de la Rosa (2007)** “*Impedancia bioeléctrica y su aplicación en el ámbito hospitalario*”, Medigraphic , *Rev Hosp Jua Mex* 2007; 74(2):104-112, pp.2-8.

**[42] S Kimura, T Morimoto, T. Uyama, Y Monden. (1994)** “*Application of electrical impedance analysis for diagnosis of a pulmonary mass*”. Official publication of the American College of Chest Physicians; 105; 1679-1682.

**[43] Uchiyama T. Ishigame S. Niitsuma J. Aikawa Y. y Ohta Y. (2008).** “*Multi-frequency bioelectrical impedance analysis of skin rubor with two electrode technique*”, *Journal of Tissue Viability*, Volume 17, Issue 4, Pages 110-114.

**[44] Tsiu EY, Gao XJ, Zinman B. (1998)** *“Bioelectrical impedance analysis (BIA) using bipolar foot electrodes in the assessment of body composition in Type 2 diabetes mellitus”*. Diabet. Med. Feb; 15(2): 125-8.

**[45] Spotti D., Librenti MC., Melandri M, Salaviero T, Quatagno R, Vedani P, Tagliabue V. and Pozza T. (1993)** *“Bioelectrical impedance in the evaluation of the nutritional status of hemodialyzed diabetic patients*. Clin. Nephrol. Mar; 39 (3); 172-174.

**[46] Moreno S. Tufiño E. Chavez V. Rodríguez M. Guerrero F. y Levario M. (2009)** *“Composición corporal en mujeres con diabetes mellitus gestacional”*. Ginecología Obstetricia Mexicana; 77(6); 270-6

# ANEXOS

## ANEXO I

### CUESTIONARIO DE MEDICIÓN

#### Participante No.:

- Nombre:
- Edad:
- Peso:
- Estatura:
- Sexo:

#### DATOS CLÍNICOS

- ¿Sufre de Diabetes Mellitus?: \_\_\_\_\_ tipo \_\_\_\_\_
- Tiempo de padecimiento: \_\_\_\_\_
- Medicamentos que toma:
- ¿Tiene parientes con DM?
- ¿Sufre otra enfermedad?
- ¿Sufre alguna lesión en el pie?
- ¿Práctica algún deporte?
- ¿Fuma?
- ¿Toma?

#### DATOS EN LA MEDICIÓN

- Hora de la medición:
- Temperatura ambiente:

#### Datos de medición de glucosa

- Nivel de glucosa en la medición :
- Comida ingerida:

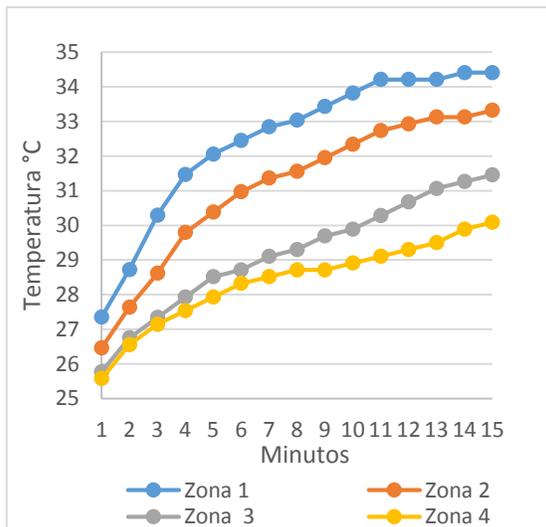
## ANEXOS II

A continuación se muestran los datos de la temperatura que se almacenaron y monitorearon en cada participante de este estudio.

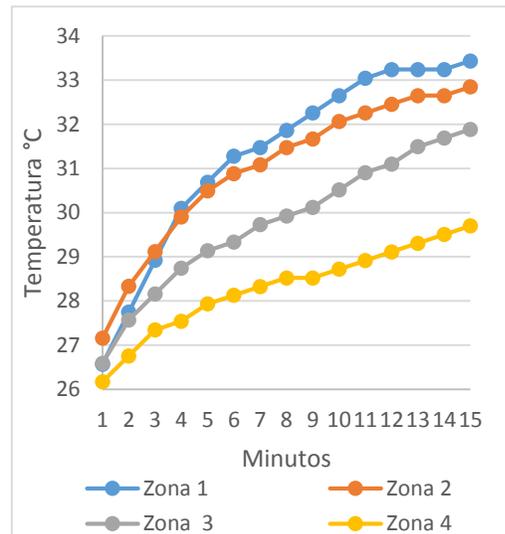
### PARTICIPANTE 1

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 1 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	27.4	26.5	25.8	25.6	26.6	27.2	26.6	26.2
2	28.7	27.6	26.8	26.6	27.7	28.3	27.6	26.8
3	30.3	28.6	27.3	27.1	28.9	29.1	28.2	27.3
4	31.5	29.8	27.9	27.5	30.1	29.9	28.7	27.5
5	32.1	30.4	28.5	27.9	30.7	30.5	29.1	27.9
6	32.4	31.0	28.7	28.3	31.3	30.9	29.3	28.1
7	32.8	31.4	29.1	28.5	31.5	31.1	29.7	28.3
8	33.0	31.6	29.3	28.7	31.9	31.5	29.9	28.5
9	33.4	31.9	29.7	28.7	32.3	31.7	30.1	28.5
10	33.8	32.3	29.9	28.9	32.6	32.1	30.5	28.7
11	34.2	32.7	30.3	29.1	33.0	32.3	30.9	28.9
12	34.2	32.9	30.7	29.3	33.2	32.5	31.1	29.1
13	34.2	33.1	31.1	29.5	33.2	32.6	31.5	29.3
14	34.4	33.1	31.3	29.9	33.2	32.6	31.7	29.5
15	34.4	33.3	31.5	30.1	33.4	32.8	31.9	29.7



a) Pie Derecho



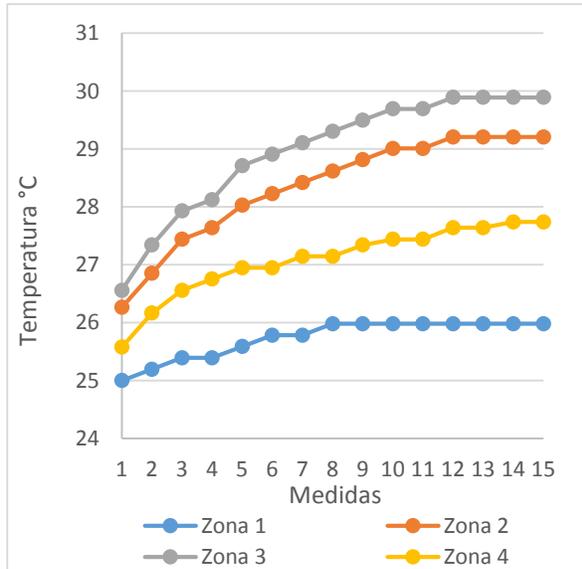
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 1 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

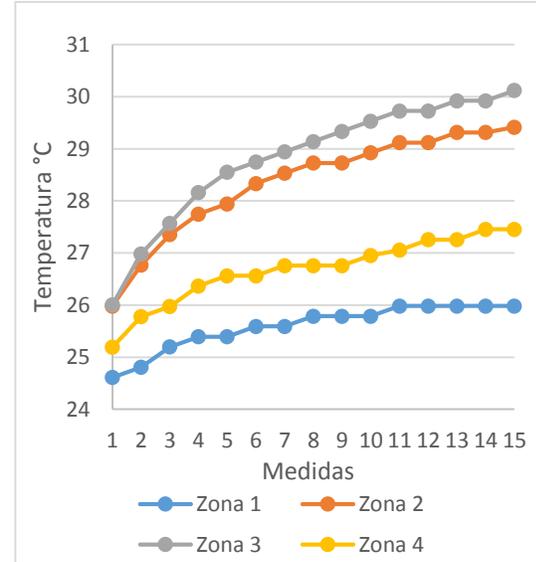
## PARTICIPANTE 2

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 2 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	25.0	26.3	26.6	25.6	24.6	26.0	26.0	25.2
2	25.2	26.9	27.3	26.2	24.8	26.8	27.0	25.8
3	25.4	27.4	27.9	26.6	25.2	27.4	27.6	26.0
4	25.4	27.6	28.1	26.8	25.4	27.7	28.2	26.4
5	25.6	28.0	28.7	26.9	25.4	27.9	28.6	26.6
6	25.8	28.2	28.9	26.9	25.6	28.3	28.7	26.6
7	25.8	28.4	29.1	27.1	25.6	28.5	28.9	26.8
8	26.0	28.6	29.3	27.1	25.8	28.7	29.1	26.8
9	26.0	28.8	29.5	27.3	25.8	28.7	29.3	26.8
10	26.0	29.0	29.7	27.4	25.8	28.9	29.5	27.0
11	26.0	29.0	29.7	27.4	26.0	29.1	29.7	27.1
12	26.0	29.2	29.9	27.6	26.0	29.1	29.7	27.3
13	26.0	29.2	29.9	27.6	26.0	29.3	29.9	27.3
14	26.0	29.2	29.9	27.7	26.0	29.3	29.9	27.5
15	26.0	29.2	29.9	27.7	26.0	29.4	30.1	27.5



a) Pie Derecho



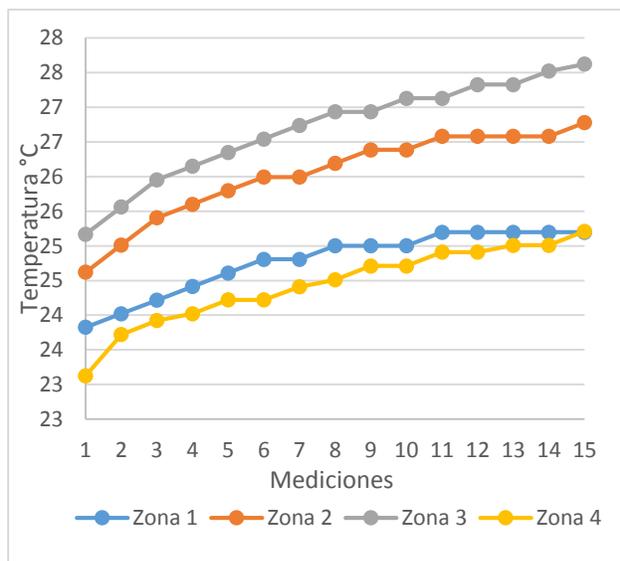
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 2 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

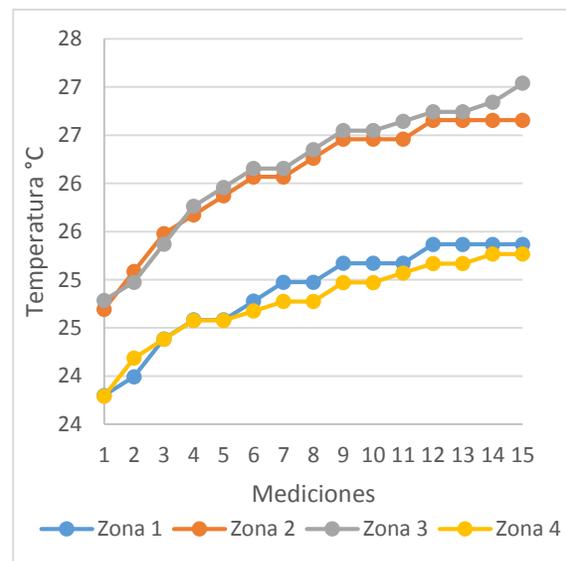
### PARTICIPANTE 3

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 3 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	23.8	24.6	25.2	23.1	23.8	24.7	24.8	23.8
2	24.0	25.0	25.6	23.7	24.0	25.1	25.0	24.2
3	24.2	25.4	26.0	23.9	24.4	25.5	25.4	24.4
4	24.4	25.6	26.2	24.0	24.6	25.7	25.8	24.6
5	24.6	25.8	26.3	24.2	24.6	25.9	26.0	24.6
6	24.8	26.0	26.5	24.2	24.8	26.1	26.2	24.7
7	24.8	26.0	26.7	24.4	25.0	26.1	26.2	24.8
8	25.0	26.2	26.9	24.5	25.0	26.3	26.4	24.8
9	25.0	26.4	26.9	24.7	25.2	26.5	26.5	25.0
10	25.0	26.4	27.1	24.7	25.2	26.5	26.5	25.0
11	25.2	26.6	27.1	24.9	25.2	26.5	26.6	25.1
12	25.2	26.6	27.3	24.9	25.4	26.7	26.7	25.2
13	25.2	26.6	27.3	25.0	25.4	26.7	26.7	25.2
14	25.2	26.6	27.5	25.0	25.4	26.7	26.8	25.3
15	25.2	26.8	27.6	25.2	25.4	26.7	27.0	25.3



a) Pie Derecho



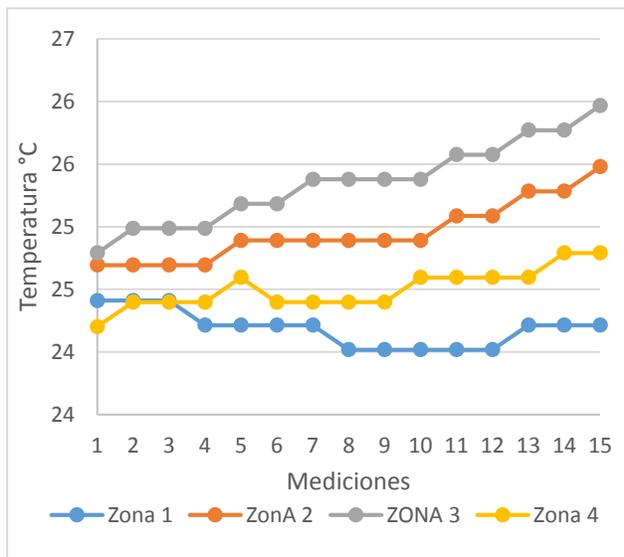
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 3 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

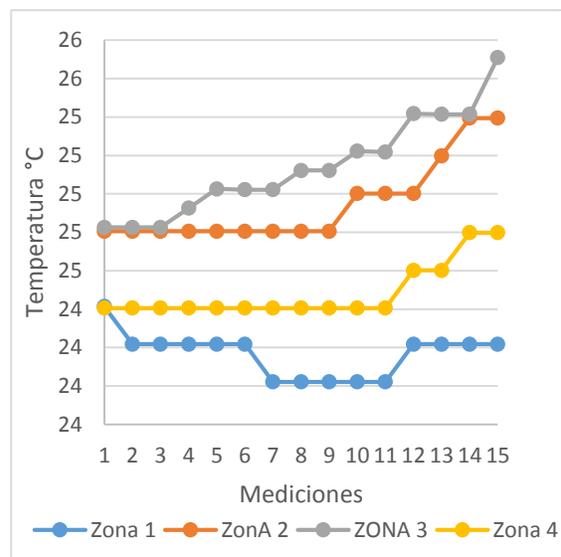
## PARTICIPANTE 4

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 4 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	24.4	24.7	24.8	24.2	24.4	24.8	24.8	24.4
2	24.4	24.7	25.0	24.4	24.2	24.8	24.8	24.4
3	24.4	24.7	25.0	24.4	24.2	24.8	24.8	24.4
4	24.2	24.7	25.0	24.4	24.2	24.8	24.9	24.4
5	24.2	24.9	25.2	24.6	24.2	24.8	25.0	24.4
6	24.2	24.9	25.2	24.4	24.2	24.8	25.0	24.4
7	24.2	24.9	25.4	24.4	24.0	24.8	25.0	24.4
8	24.0	24.9	25.4	24.4	24.0	24.8	25.1	24.4
9	24.0	24.9	25.4	24.4	24.0	24.8	25.1	24.4
10	24.0	24.9	25.4	24.6	24.0	25.0	25.2	24.4
11	24.0	25.1	25.6	24.6	24.0	25.0	25.2	24.4
12	24.0	25.1	25.6	24.6	24.2	25.0	25.4	24.6
13	24.2	25.3	25.8	24.6	24.2	25.2	25.4	24.6
14	24.2	25.3	25.8	24.8	24.2	25.4	25.4	24.8
15	24.2	25.5	26.0	24.8	24.2	25.4	25.7	24.8



a) Pie Derecho



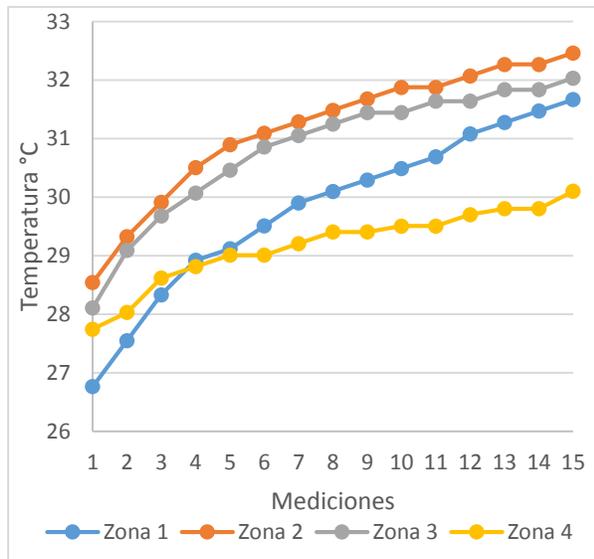
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 4 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

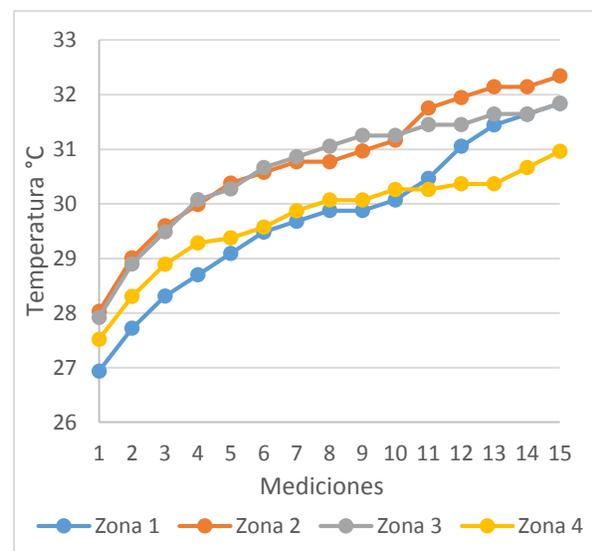
## PARTICIPANTE 5

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 5 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	26.8	28.5	28.1	27.7	26.9	28.0	27.9	27.5
2	27.6	29.3	29.1	28.0	27.7	29.0	28.9	28.3
3	28.3	29.9	29.7	28.6	28.3	29.6	29.5	28.9
4	28.9	30.5	30.1	28.8	28.7	30.0	30.1	29.3
5	29.1	30.9	30.5	29.0	29.1	30.4	30.3	29.4
6	29.5	31.1	30.9	29.0	29.5	30.6	30.7	29.6
7	29.9	31.3	31.1	29.2	29.7	30.8	30.9	29.9
8	30.1	31.5	31.2	29.4	29.9	30.8	31.1	30.1
9	30.3	31.7	31.4	29.4	29.9	31.0	31.3	30.1
10	30.5	31.9	31.4	29.5	30.1	31.2	31.3	30.3
11	30.7	31.9	31.6	29.5	30.5	31.8	31.4	30.3
12	31.1	32.1	31.6	29.7	31.1	31.9	31.4	30.4
13	31.3	32.3	31.8	29.8	31.4	32.1	31.6	30.4
14	31.5	32.3	31.8	29.8	31.6	32.1	31.6	30.7
15	31.7	32.5	32.0	30.1	31.8	32.3	31.8	31.0



a) Pie Derecho



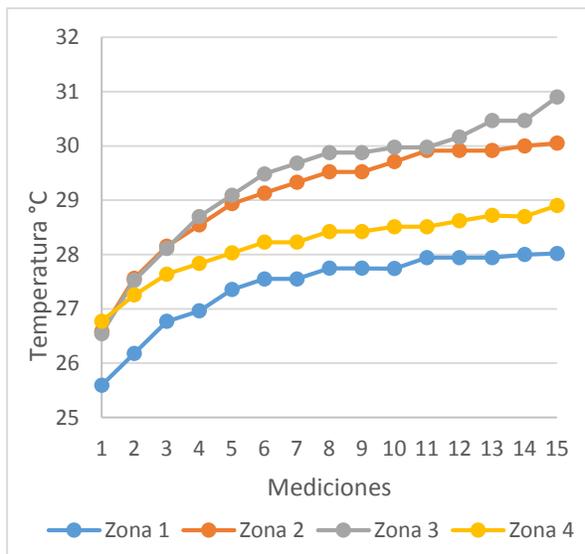
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 5 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

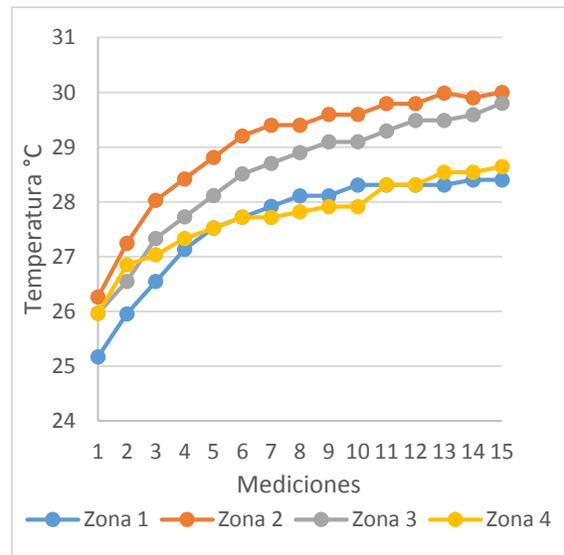
## PARTICIPANTE 6

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 6 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	25.6	26.6	26.5	26.8	25.2	26.3	26.0	26.0
2	26.2	27.6	27.5	27.3	26.0	27.2	26.5	26.8
3	26.8	28.2	28.1	27.6	26.5	28.0	27.3	27.0
4	27.0	28.5	28.7	27.8	27.1	28.4	27.7	27.3
5	27.4	28.9	29.1	28.0	27.5	28.8	28.1	27.5
6	27.6	29.1	29.5	28.2	27.7	29.2	28.5	27.7
7	27.6	29.3	29.7	28.2	27.9	29.4	28.7	27.7
8	27.7	29.5	29.9	28.4	28.1	29.4	28.9	27.8
9	27.7	29.5	29.9	28.4	28.1	29.6	29.1	27.9
10	27.7	29.7	30.0	28.5	28.3	29.6	29.1	27.9
11	27.9	29.9	30.0	28.5	28.3	29.8	29.3	28.3
12	27.9	29.9	30.2	28.6	28.3	29.8	29.5	28.3
13	27.9	29.9	30.5	28.7	28.3	30.0	29.5	28.5
14	28.0	30.0	30.5	28.7	28.4	29.9	29.6	28.5
15	28.0	30.1	30.9	28.9	28.4	30.0	29.8	28.6



a) Pie Derecho



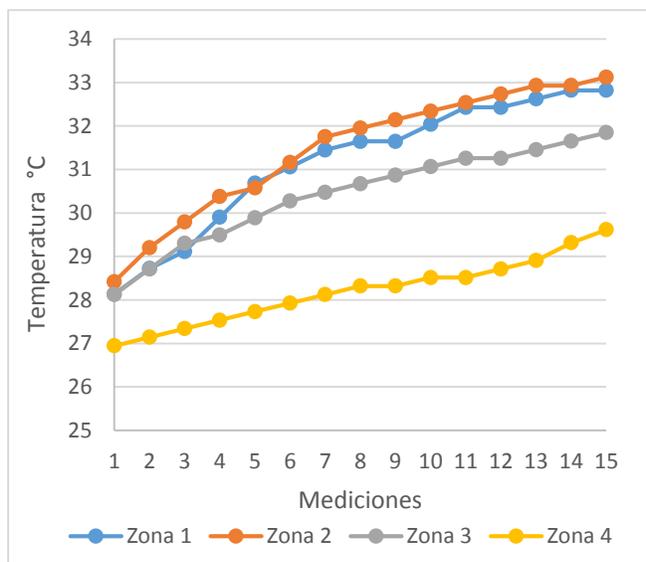
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 6 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

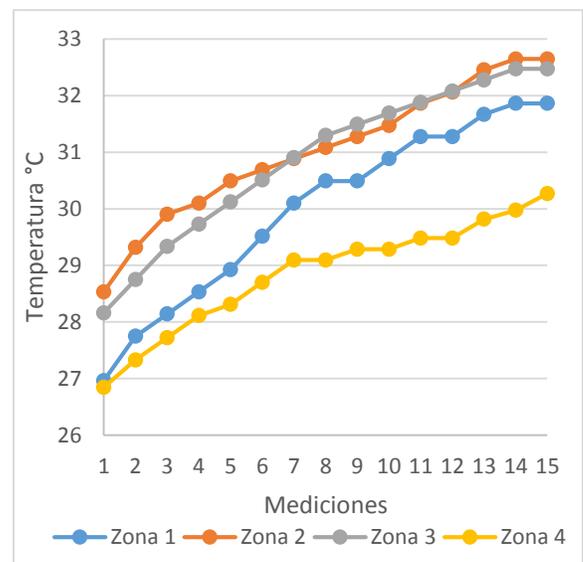
## PARTICIPANTE 7

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 7 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	28.1	28.4	28.1	26.9	27.0	28.5	28.2	26.8
2	28.7	29.2	28.7	27.1	27.7	29.3	28.7	27.3
3	29.1	29.8	29.3	27.3	28.1	29.9	29.3	27.7
4	29.9	30.4	29.5	27.5	28.5	30.1	29.7	28.1
5	30.7	30.6	29.9	27.7	28.9	30.5	30.1	28.3
6	31.1	31.2	30.3	27.9	29.5	30.7	30.5	28.7
7	31.4	31.8	30.5	28.1	30.1	30.9	30.9	29.1
8	31.6	31.9	30.7	28.3	30.5	31.1	31.3	29.1
9	31.6	32.1	30.9	28.3	30.5	31.3	31.5	29.3
10	32.0	32.3	31.1	28.5	30.9	31.5	31.7	29.3
11	32.4	32.5	31.3	28.5	31.3	31.9	31.9	29.5
12	32.4	32.7	31.3	28.7	31.3	32.1	32.1	29.5
13	32.6	32.9	31.5	28.9	31.7	32.5	32.3	29.8
14	32.8	32.9	31.7	29.3	31.9	32.6	32.5	30.0
15	32.8	33.1	31.8	29.6	31.9	32.6	32.5	30.3



a) Pie Derecho



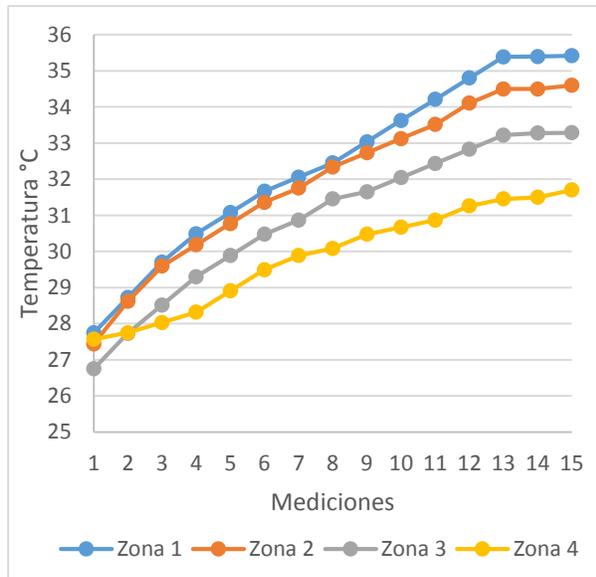
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 7 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

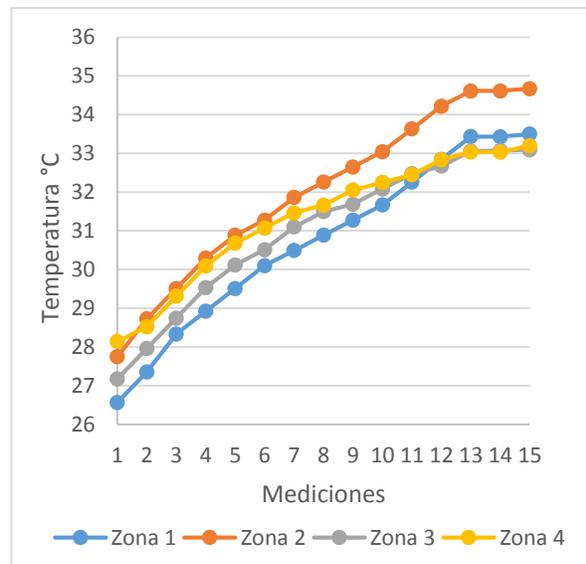
## PARTICIPANTE 8

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 8 (No diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	27.7	27.4	26.8	27.6	26.6	27.7	27.2	28.1
2	28.7	28.6	27.7	27.8	27.4	28.7	28.0	28.5
3	29.7	29.6	28.5	28.0	28.3	29.5	28.7	29.3
4	30.5	30.2	29.3	28.3	28.9	30.3	29.5	30.1
5	31.1	30.8	29.9	28.9	29.5	30.9	30.1	30.7
6	31.7	31.4	30.5	29.5	30.1	31.3	30.5	31.1
7	32.1	31.8	30.9	29.9	30.5	31.9	31.1	31.5
8	32.4	32.3	31.5	30.1	30.9	32.3	31.5	31.7
9	33.0	32.7	31.7	30.5	31.3	32.6	31.7	32.1
10	33.6	33.1	32.0	30.7	31.7	33.0	32.1	32.2
11	34.2	33.5	32.4	30.9	32.3	33.6	32.5	32.4
12	34.8	34.1	32.8	31.3	32.8	34.2	32.7	32.8
13	35.4	34.5	33.2	31.5	33.4	34.6	33.1	33.0
14	35.4	34.5	33.3	31.5	33.4	34.6	33.1	33.0
15	35.4	34.6	33.3	31.7	33.5	34.7	33.1	33.2



a) Pie Derecho



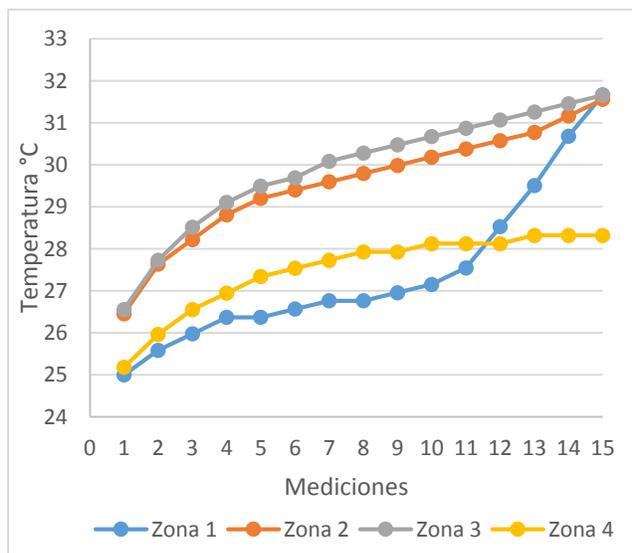
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 8 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

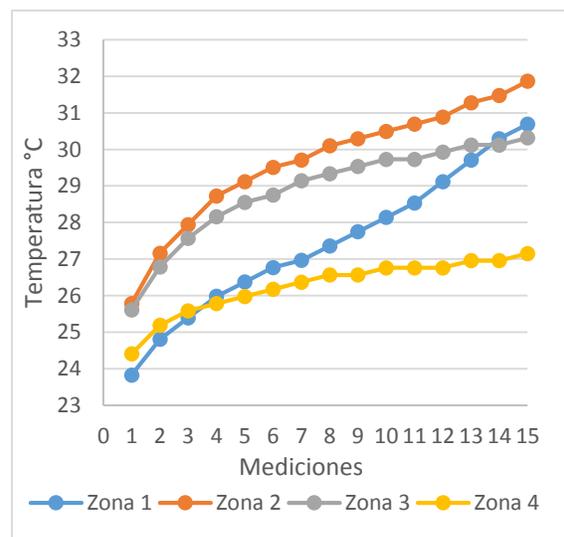
## PARTICIPANTE 9

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 9 (Diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	25.0	26.5	26.6	25.2	23.8	25.8	25.6	24.4
2	25.6	27.6	27.7	26.0	24.8	27.2	26.8	25.2
3	26.0	28.2	28.5	26.6	25.4	27.9	27.6	25.6
4	26.4	28.8	29.1	26.9	26.0	28.7	28.2	25.8
5	26.4	29.2	29.5	27.3	26.4	29.1	28.6	26.0
6	26.6	29.4	29.7	27.5	26.8	29.5	28.7	26.2
7	26.8	29.6	30.1	27.7	27.0	29.7	29.1	26.4
8	26.8	29.8	30.3	27.9	27.4	30.1	29.3	26.6
9	27.0	30.0	30.5	27.9	27.7	30.3	29.5	26.6
10	27.2	30.2	30.7	28.1	28.1	30.5	29.7	26.8
11	27.5	30.4	30.9	28.1	28.5	30.7	29.7	26.8
12	28.5	30.6	31.1	28.1	29.1	30.9	29.9	26.8
13	29.5	30.8	31.3	28.3	29.7	31.3	30.1	27.0
14	30.7	31.2	31.5	28.3	30.3	31.5	30.1	27.0
15	31.7	31.6	31.7	28.3	30.7	31.9	30.3	27.2



a) Pie Derecho



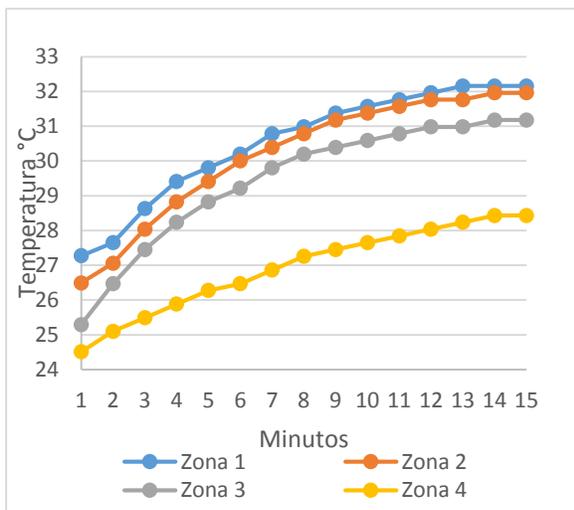
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 9 (persona no diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

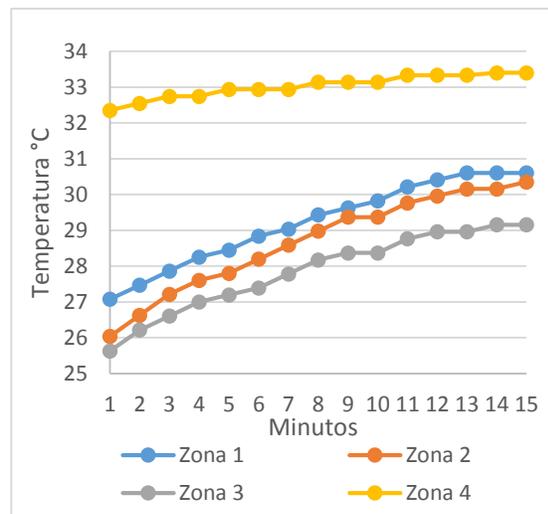
## PARTICIPANTE 10

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 10 (Diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	27.3	26.5	25.3	24.5	27.1	26.0	25.6	32.4
2	27.6	27.1	26.5	25.1	27.5	26.6	26.2	32.5
3	28.6	28.0	27.5	25.5	27.9	27.2	26.6	32.7
4	29.4	28.8	28.2	25.9	28.3	27.6	27.0	32.7
5	29.8	29.4	28.8	26.3	28.5	27.8	27.2	32.9
6	30.1	30.0	29.2	26.5	28.8	28.2	27.4	32.9
7	30.7	30.4	29.8	26.9	29.0	28.6	27.8	32.9
8	30.9	30.8	30.2	27.3	29.4	29.0	28.2	33.1
9	31.3	31.2	30.4	27.5	29.6	29.4	28.4	33.1
10	31.5	31.4	30.6	27.6	29.8	29.4	28.4	33.1
11	31.7	31.6	30.8	27.8	30.2	29.8	28.8	33.3
12	31.9	31.8	31.0	28.0	30.4	30.0	29.0	33.3
13	32.1	31.8	31.0	28.2	30.6	30.2	29.0	33.3
14	32.1	32.0	31.2	28.4	30.6	30.2	29.2	33.4
15	32.1	32.0	31.2	28.4	30.6	30.4	29.2	33.4



a) Pie Derecho



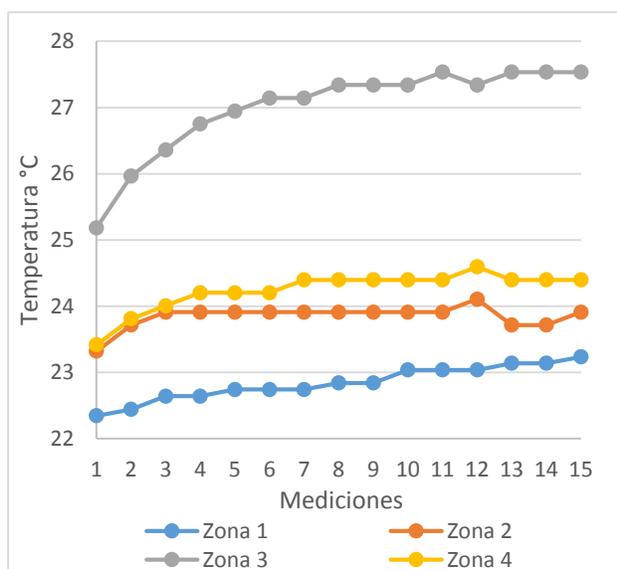
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 10 (persona diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

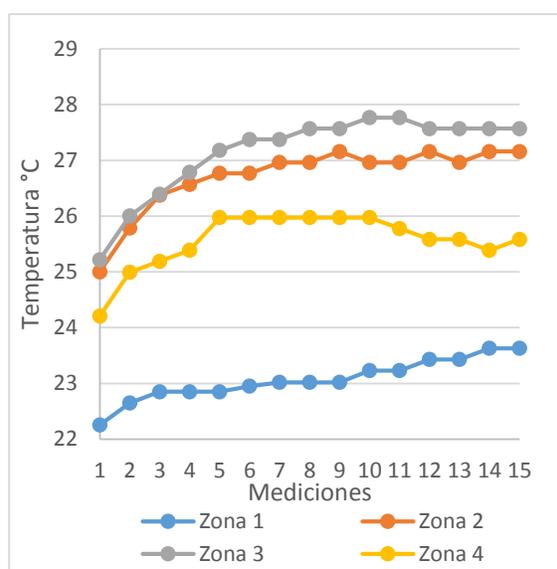
## PARTICIPANTE 11

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 11 (Diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	22.3	23.3	25.2	23.4	22.3	25.0	25.2	24.2
2	22.4	23.7	26.0	23.8	22.6	25.8	26.0	25.0
3	22.6	23.9	26.4	24.0	22.8	26.4	26.4	25.2
4	22.6	23.9	26.8	24.2	22.8	26.6	26.8	25.4
5	22.7	23.9	26.9	24.2	22.8	26.8	27.2	26.0
6	22.7	23.9	27.1	24.2	22.9	26.8	27.4	26.0
7	22.7	23.9	27.1	24.4	23.0	27.0	27.4	26.0
8	22.8	23.9	27.3	24.4	23.0	27.0	27.6	26.0
9	22.8	23.9	27.3	24.4	23.0	27.2	27.6	26.0
10	23.0	23.9	27.3	24.4	23.2	27.0	27.8	26.0
11	23.0	23.9	27.5	24.4	23.2	27.0	27.8	25.8
12	23.0	24.1	27.3	24.6	23.4	27.2	27.6	25.6
13	23.1	23.7	27.5	24.4	23.4	27.0	27.6	25.6
14	23.1	23.7	27.5	24.4	23.6	27.2	27.6	25.4
15	23.2	23.9	27.5	24.4	23.6	27.2	27.6	25.6



a) Pie Derecho



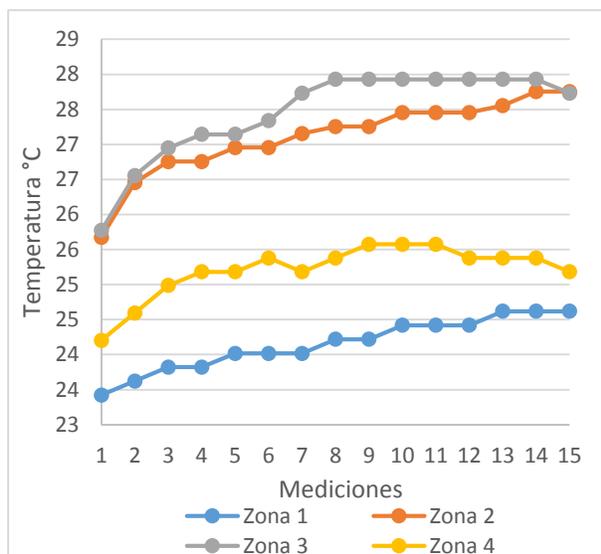
b) Pie Izquierdo

Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 11 (persona diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

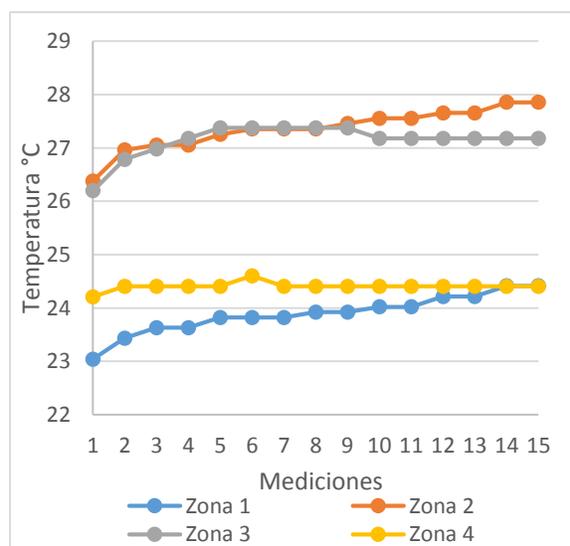
## PARTICIPANTE 12

Temperatura registrada en las cuatro zonas monitoreadas en el participante 12 (Diabético)

Min	Pie Derecho				Pie Izquierdo			
	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C	Zona 1 °C	Zona 2 °C	Zona 3 °C	Zona 4 °C
1	23.4	25.7	25.8	24.2	23.0	26.4	26.2	24.2
2	23.6	26.5	26.6	24.6	23.4	27.0	26.8	24.4
3	23.8	26.8	26.9	25.0	23.6	27.1	27.0	24.4
4	23.8	26.8	27.1	25.2	23.6	27.1	27.2	24.4
5	24.0	27.0	27.1	25.2	23.8	27.3	27.4	24.4
6	24.0	27.0	27.3	25.4	23.8	27.4	27.4	24.6
7	24.0	27.2	27.7	25.2	23.8	27.4	27.4	24.4
8	24.2	27.3	27.9	25.4	23.9	27.4	27.4	24.4
9	24.2	27.3	27.9	25.6	23.9	27.5	27.4	24.4
10	24.4	27.5	27.9	25.6	24.0	27.6	27.2	24.4
11	24.4	27.5	27.9	25.6	24.0	27.6	27.2	24.4
12	24.4	27.5	27.9	25.4	24.2	27.7	27.2	24.4
13	24.6	27.6	27.9	25.4	24.2	27.7	27.2	24.4
14	24.6	27.8	27.9	25.4	24.4	27.9	27.2	24.4
15	24.6	27.8	27.7	25.2	24.4	27.9	27.2	24.4



a) Pie Derecho

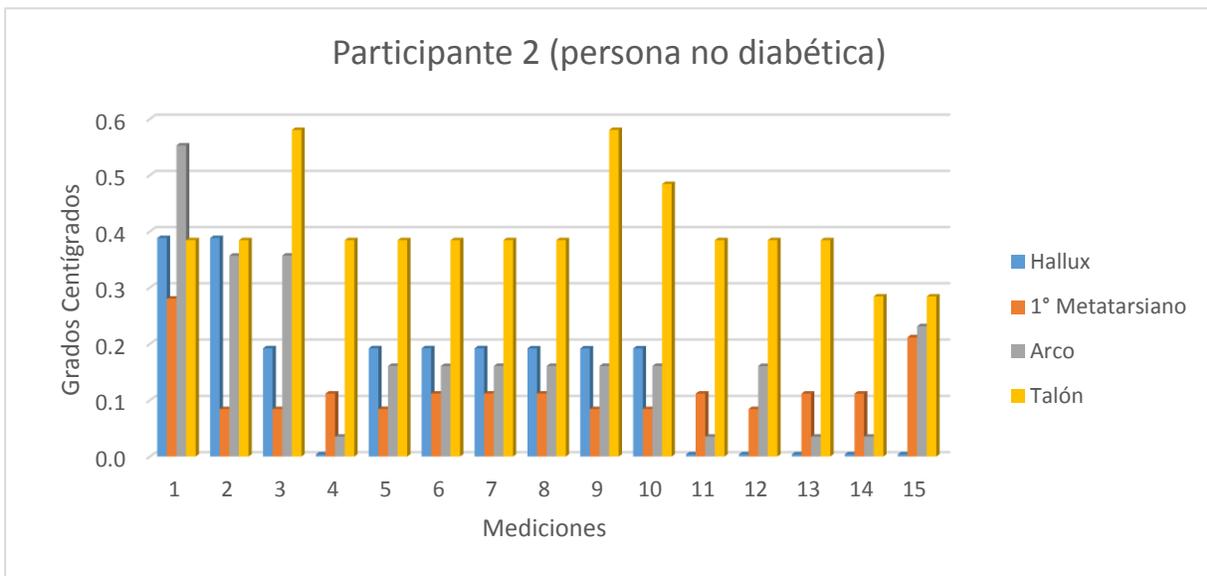
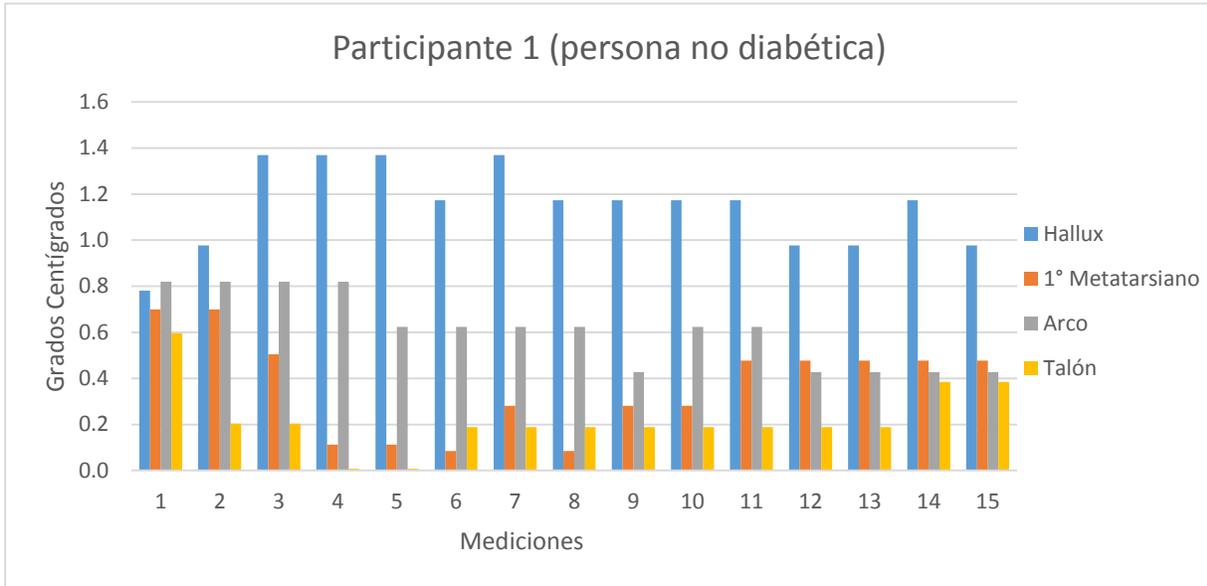


b) Pie Izquierdo

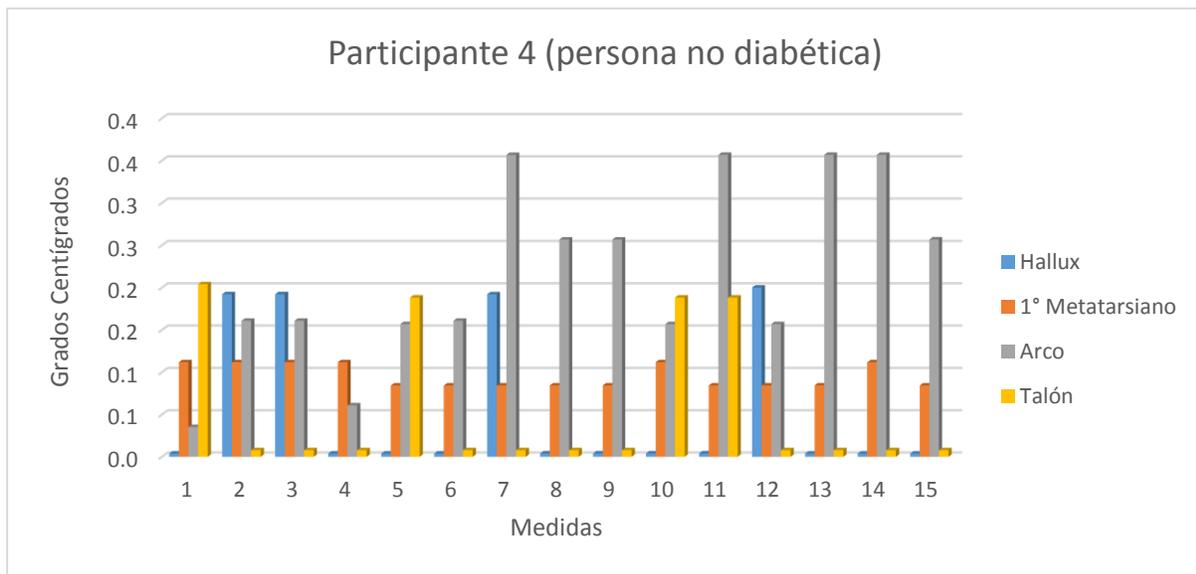
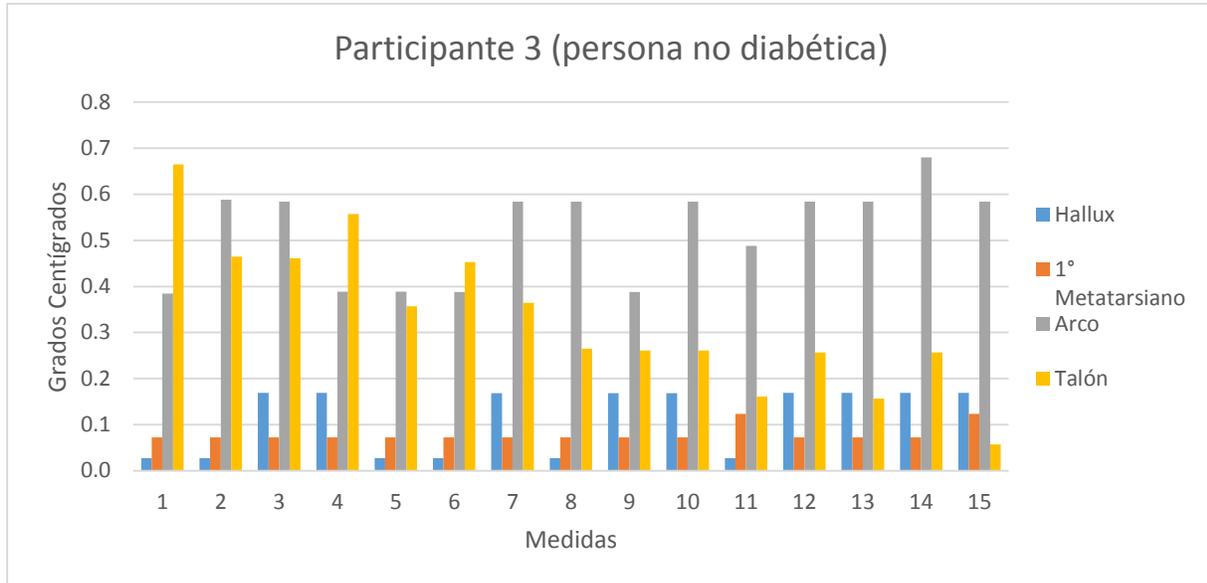
Comportamiento térmico de las cuatro zonas monitoreadas del participante 12 (persona diabética) a) pie derecho b) pie izquierdo

### ANEXO III

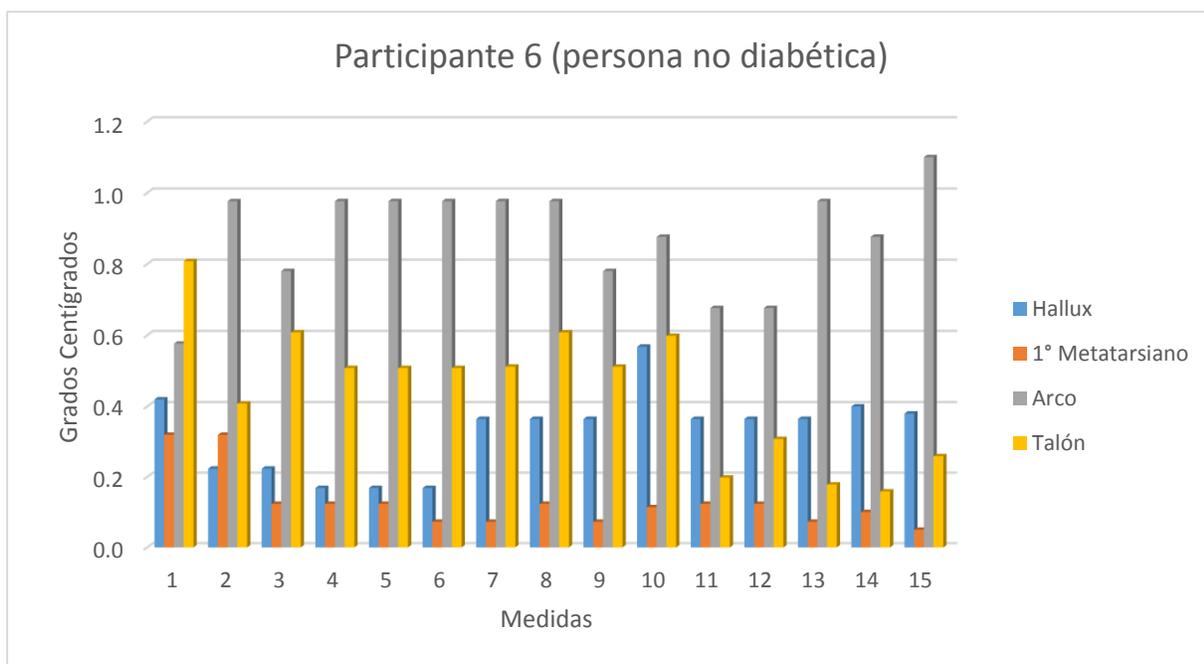
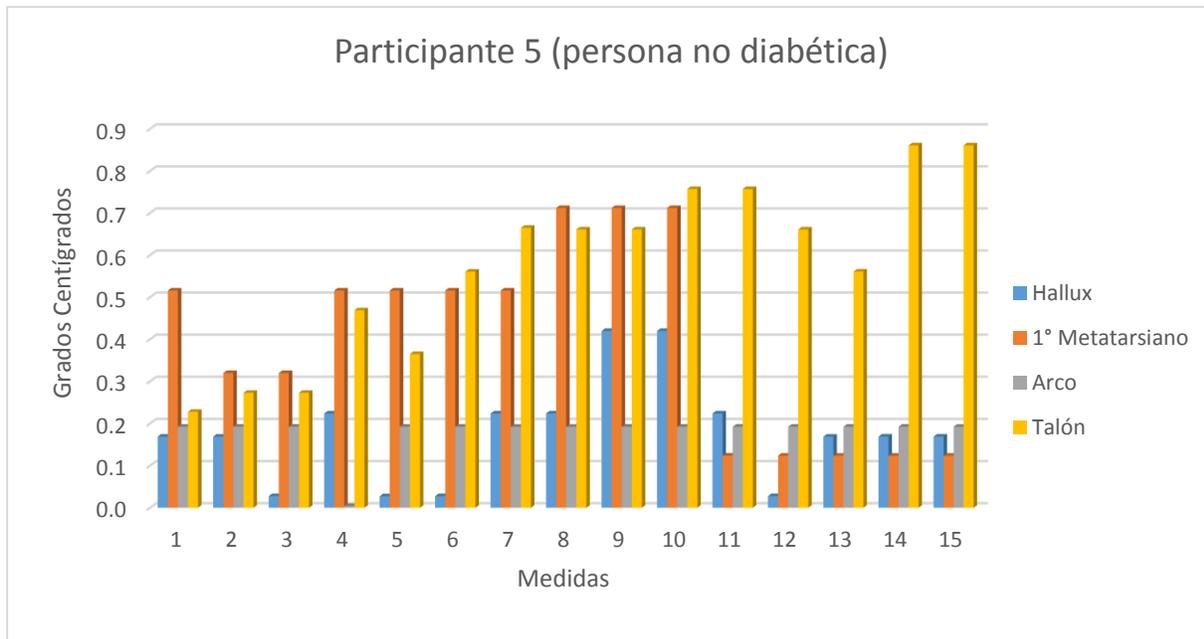
Diferencias obtenidas entre cada medición de temperatura en la 4 zonas del pie las 15 monitoreadas en los participantes no diabéticos número 1 y 2



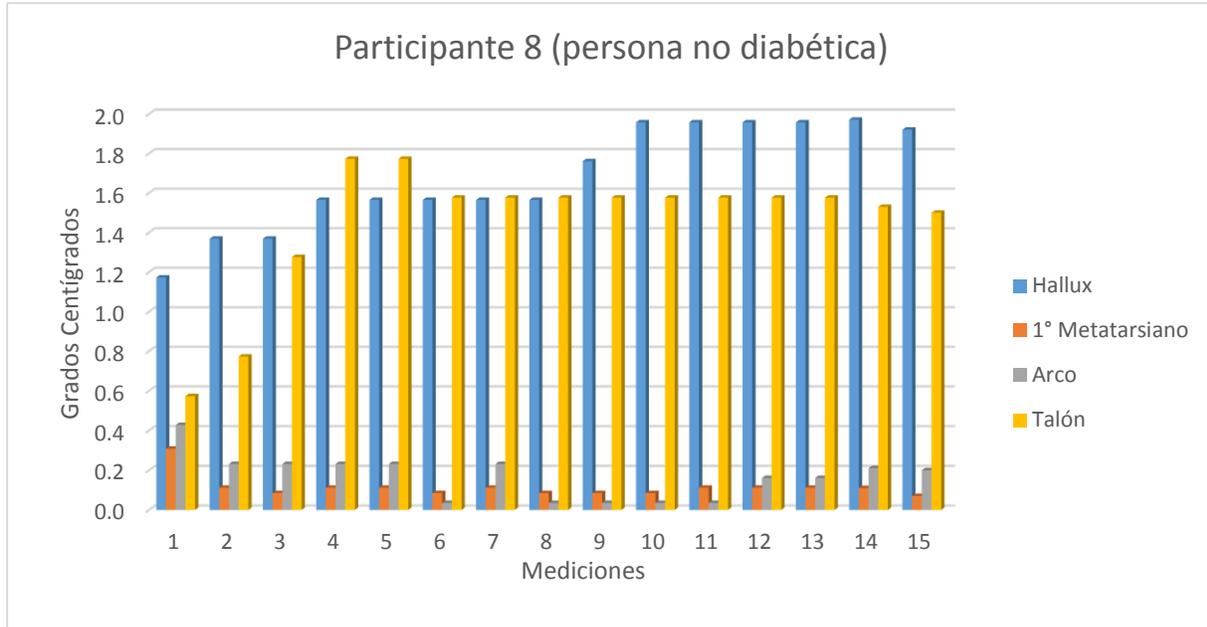
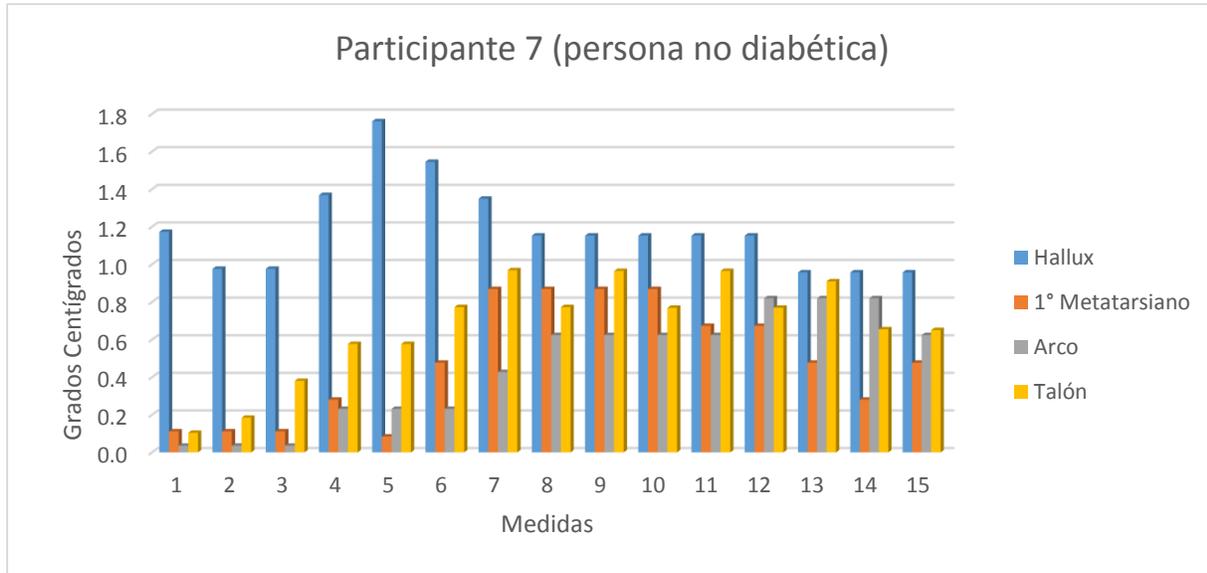
**Diferencias obtenidas entre cada medición de temperatura en la 4 zonas del pie las 15 monitoreadas en los participantes no diabéticos número 3 y 4**



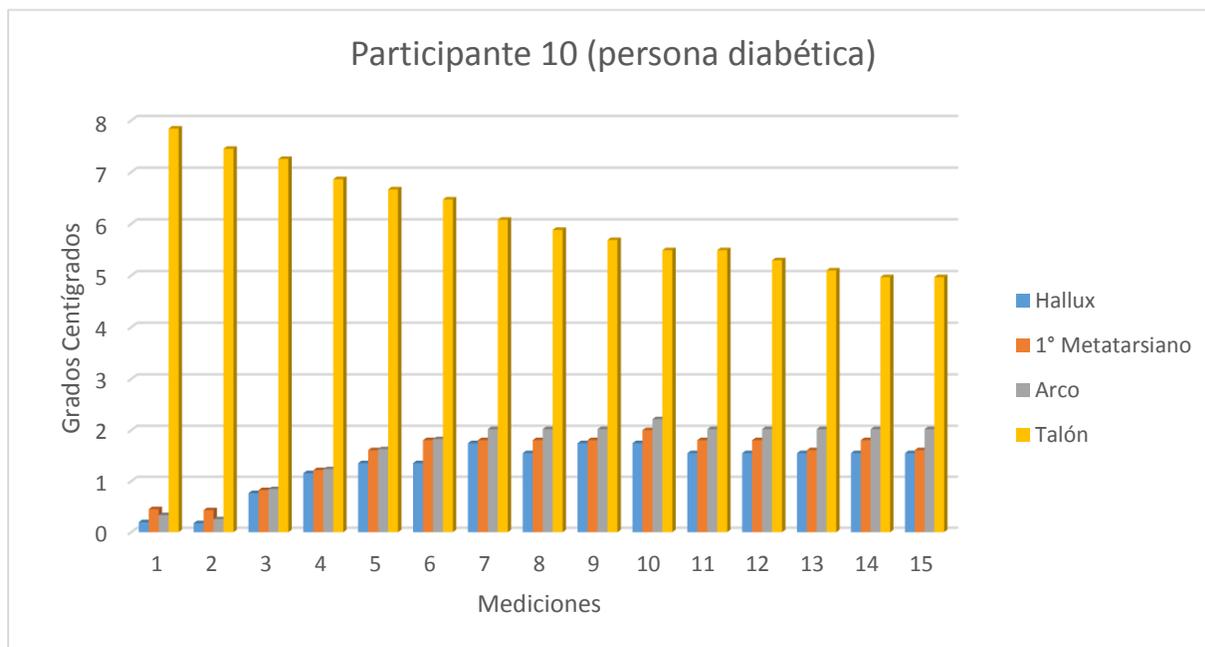
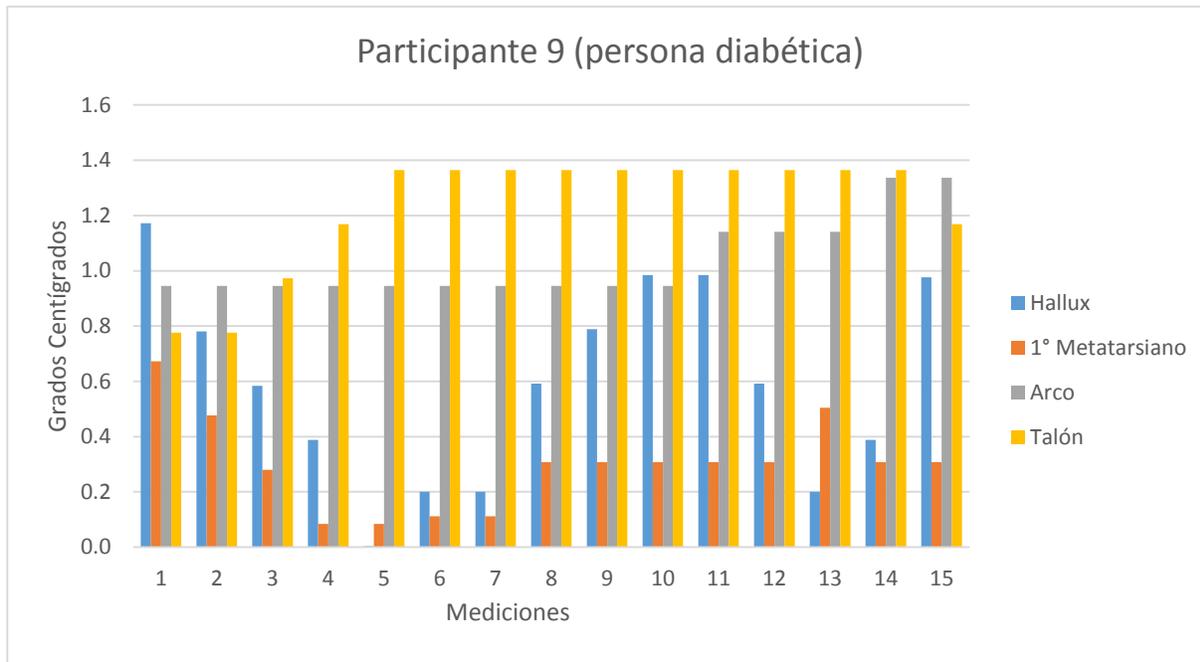
**Diferencias obtenidas entre cada medición de temperatura en la 4 zonas del pie las 15 monitoreadas en los participantes no diabéticos número 5 y 6**



**Diferencias obtenidas entre cada medición de temperatura en la 4 zonas del pie las 15 monitoreadas en los participantes no diabéticos número 7 y 8**



**Diferencias obtenidas entre cada medición de temperatura en la 4 zonas del pie las 15 monitoreadas en los participantes no diabéticos número 9 y 10**



**Diferencias obtenidas entre cada medición de temperatura en la 4 zonas del pie las 15 monitoreadas en los participantes no diabéticos número 11 y 12**

