



**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO**

---

---

**DIVISION DE CIENCIAS E INGENIERIAS  
CAMPUS LEON**

"Evaluación del uso de termografía pulsada para  
diagnóstico de neuropatía en pie diabético"

TESIS

Que para obtener el título de:

Maestro en Ciencias Aplicadas

presenta:

Ing. Gabriela Barrera Díaz

Asesores:

Asesor: Dr. Carlos Villaseñor Mora

Co-asesor: Dr. Victor Hugo Hernández

González

León-Guanajuato

Noviembre, 2017

## AGRADECIMIENTOS

En primera estancia agradezco a mi asesor de Tesis el Dr. Carlos Villaseñor Mora por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como, también haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante el desarrollo de la tesis.

A la DCI de la Universidad de Guanajuato campus León por aceptarme y abrirme las puertas para obtener el grado de maestría en Ciencias Aplicadas, así como, a todos los docentes que me impartieron clase y me aportaron parte de su conocimiento.

A mis padres que con su amor y trabajo me educaron y apoyaron en mi carrera profesional, siempre alentándome a conseguir mis metas y sueños.

Al departamento de Ciencias Médicas de la Universidad de Guanajuato campus León, en especial a la Dra. Ma. Eugenia Garay Sevilla por el apoyo para realizar las pruebas en pacientes con diabetes mellitus.

Y claro a mis amigos y compañeros de la DCI que me brindaron su ayuda, y con los cuales, compartí grandes momentos a lo largo de mis estudios de maestría.

## RESUMEN

La Diabetes Mellitus tipo 2 se considera como una de las principales causas de muerte y de amputaciones no traumáticas de los miembros inferiores. Además, representa un considerable gasto para las instituciones de salud con respecto a su tratamiento y control. Esta enfermedad se acompaña de complicación macro vascular, miocardiopatía, neuropatía e infecciones, entre otras, sobre todo cuando tiene una larga historia de descontrol glucémico.

En este trabajo de investigación se analizó la factibilidad del uso de termografía pulsada para el diagnóstico del pie diabético, con el objeto de ofrecer un método diagnóstico precoz, no invasivo, no doloroso, no involucra reacciones secundarias, donde el tiempo de prueba es corto, libre de químicos que puedan dañar la piel de los pies, que ahorraría dinero a las instituciones de salud, y que tenga confiabilidad en sus resultados de tal manera que se contribuya a mejorar la calidad de vida de los pacientes diabéticos.

Para la evaluación del uso de termografía pulsada para diagnóstico de neuropatía diabética se evaluó el desempeño de un equipo de refrigeración (controla la amplitud del pulso), en donde los pacientes introducen sus pies por un determinado tiempo (duración del pulso). En ese tiempo se adquiere la secuencia de imágenes de los pies con una cámara infrarroja de onda media, las cuales son analizadas y se calcula la energía a partir de las intensidades de niveles de gris se grafica para analizar el o los transientes de recuperación energética. Esta energía se correlaciona con el nivel de respuesta a estos pulsos térmicos que mantienen los pies de los pacientes con diferentes grados de neuropatía, para ello se han seleccionado zonas que se consideran claves para estudiar el daño neuropático.

Este trabajo de investigación detalla la forma en que se construyó el equipo de refrigeración, el protocolo para la adquisición y el análisis de las imágenes, los resultados obtenidos y conclusiones hablando de los pros y contras del uso de termografía pulsada en la caracterización de neuropatía en pie diabético.

# Contenido

INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO 1 .....	8
NEUROPATIA DIABETICA .....	9
PIE DIABÉTICO .....	10
FISIOPATOLOGÍA .....	11
Cuadro 1. Factores de riesgo y mecanismos de daño y lesión (Guadalupe Castro, 2009) .....	12
DIAGNÓSTICO.....	12
TRATAMIENTO.....	14
TERMOGRAFÍA .....	14
CAPÍTULO 2 .....	15
RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO.....	15
LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN.....	17
TRANSMISIÓN DE CALOR .....	19
CONVECCIÓN.....	19
CONDUCCIÓN .....	19
RADIACIÓN .....	19
SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA:.....	20
CALCULO DE ENERGÍAS:.....	20
TERMOGRAFÍA .....	21
CAPÍTULO 3 .....	22
DISEÑO DE EQUIPO PARA EL PULSO DE TERMOGRAFÍA EN PIE. ....	22
CÁMARA INFRARROJA.....	26
PIEDRA COMO REFERENCIA (CUERPO NEGRO).....	27
CLASIFICACION DE GRUPOS .....	29
ANALISIS DE IMAGENES .....	30
CAPITULO 4 .....	31
RESULTADOS .....	31
CONCLUSIONES .....	41

GLOSARIO .....	43
APENDICES .....	44
APENDICE A .....	44
APENDICE C .....	52
APENDICE D .....	53
APENDICE E .....	55
BIBLIOGRAFIA.....	56

# INTRODUCCIÓN

El avance continuo de la tecnología electrónica y termográfica ha permitido a la ingeniería apoyar diversas disciplinas, y de manera sobresaliente a la medicina, ya que es común y lamentable que el ser humano padezca diferentes y en ocasiones fuertes enfermedades, que de haberse detectado a tiempo, se hubieran evitado complicaciones e incluso la muerte; esta problemática se agudiza más por el hecho de que las clínicas o instituciones médicas tienen por lo general una marcada escasez de medios de diagnóstico disponibles; lo que exige y motiva la búsqueda de nuevas técnicas eficientes y de bajo costo que permitan un diagnóstico temprano, y por ende el tratamiento adecuado, lo que sin duda contribuye en la mejora de la calidad de vida de las personas.

La diabetes puede presentar como complicaciones otras alteraciones como la neuropatía periférica la cual constituye una de las principales causas de admisión hospitalaria en pacientes con diabetes (Antonio Martínez-Conde Fernández, 2002). Los servicios de atención a la salud dependen cada vez más de la tecnología médica, es por ello que este proyecto el proyecto, trata de buscar y evaluar la eficacia de una técnica fácil de aplicar y que permite un diagnóstico temprano de una complicación que es frecuente. En específico esta tesis se encaminó a estudiar si la aplicación de termografía pulsada puede ser útil en la valoración de neuropatía periférica en pie diabético, y su potencial aplicación como un diagnóstico complementario, que sea sencillo, económico y sobre todo rápido.

México ocupa el sexto lugar con más casos de diabetes en el mundo (DIABETES, 2015.), esto constituye la motivación principal de estudiar esta complicación, que es una de las causas más frecuentes de amputación y deterioro de la calidad de vida de las personas que sufren diabetes, las personas que la padecen deben estar en continua observación y tratamiento.

Este trabajo está encaminado a presentar los resultados obtenidos al aplicar termografía en el estudio del pie diabético, y más específicamente en evaluar el estado neuropático de esta extremidad.

En el **capítulo uno**, se encuentran las definiciones y conceptos relacionados con diabetes, neuropatía periférica y neuropatía en pie diabético, esto con el afán de que el lector comprenda la necesidad de diagnosticar de una manera rápida y eficaz la neuropatía en pie diabético.

En el **segundo capítulo**, se analizan los conceptos de termografía, haciendo hincapié en los conceptos de termografía activa para entender cómo usar la termografía pulsada; y en

general están expuestos todos aquellos conceptos que ayudaron a entender el enfoque de este trabajo de tesis.

El **capítulo tres**, contiene el desarrollo del proyecto, la forma de cómo se construyó el instrumento en el que se basa la aplicación de los pulsos térmicos, y el arreglo óptico utilizado para llevar a cabo la evaluación de neuropatía en pie diabético.

En el **capítulo cuatro** se encuentran los resultados obtenidos de las pruebas en los pacientes, las correlaciones encontradas de los diferentes niveles de neuropatía estudiados, métodos estadísticos y análisis de imágenes para evaluar el uso de termografía en casos de neuropatías en pie diabético.

Al final se tienen las **conclusiones**, se incorporan los pros y contras del uso de la técnica y tecnología propuesta para el estudio del grado de neuropatía en las personas. Así como un análisis del éxito obtenido y el trabajo a futuro.

# CAPÍTULO 1

Una de las enfermedades más comunes y lamentablemente con mayor número de muertes y amputaciones no traumáticas en México y en el mundo es la Diabetes Mellitus. Esta enfermedad es grave, exige tratamiento continuo, resultando muy costoso para las personas y el gobierno, requiere que cada año se incrementen los recursos económicos destinados a atención de estas personas, que, además, van en aumento.

Según datos del IMSS, a partir del año 2001 la diabetes representó la primera causa de muerte, además de ubicarse entre los principales motivos de demanda de consulta de medicina familiar y especialidades, así como de ingresos hospitalarios. (IMSS, 2016)

Aplicando la “regla de las mitades”, se encuentra que, de 100 diabéticos, la mitad ignora que la padece, de los conscientes de su problema, la mitad recibe algún tipo de tratamiento y, entre éstos, sólo la mitad estaría correctamente controlada, esto es, solo el 12.5% de la población que padece diabetes está siguiendo un buen plan de tratamiento (Secretaría de Salud, 2015).

Según la Organización Mundial de la Salud, la diabetes mellitus es un trastorno metabólico que tiene causas diversas; se caracteriza por hiperglucemia crónica y trastornos del metabolismo de los carbohidratos, las grasas y las proteínas como consecuencia de anomalías de la secreción o del efecto de la insulina. Con el tiempo, la enfermedad puede causar daños, disfunción e insuficiencia de diversos órganos (OMS, 1999)

La Diabetes Mellitus tipo 2 (DM2), es el tipo de diabetes más común a nivel mundial con un 90% de los casos, se debe principalmente a que el páncreas no produce insulina suficiente o el organismo no la utiliza eficazmente. El efecto de la diabetes no controlada es la hiperglucemia, que con el tiempo daña gravemente muchos órganos y sistemas, especialmente los nervios y los vasos sanguíneos (OMS, 2012).

Como ya se mencionó anteriormente, el proceso se inicia por un estado mantenido de hiperglucemia que puede ser consecuencia de: a) un defecto en la producción de insulina por las células pancreáticas beta; b) una deficiente acción insulínica sobre la glucosa, o c) por una asociación de las dos causas antes mencionadas. La toxicidad crónica de la glucosa en exceso o la acción directa de la hiperinsulinemia, inducen cambios estructurales y funcionales en diversos órganos y sistemas, de los cuales los más relevantes son: el corazón, los pequeños y grandes vasos arteriales, el riñón, el sistema nervioso central y periférico, y la retina. En consecuencia, la DM provoca cardiopatía isquémica, insuficiencia cardíaca congestiva, arteriosclerosis generalizada con preferente afectación de las arterias distales de



miembros inferiores, trastornos neurológicos centrales y periféricos, nefropatía tendente a la falla renal absoluta y ceguera irreversible. (Gámiz, 2007)

## NEUROPATIA DIABETICA

La neuropatía diabética (ND) es la más común de las complicaciones de la diabetes mellitus, siendo causa importante de morbilidad y mortalidad asociada a la enfermedad. (Antonio Martínez-Conde Fernández, 2002).

La neuropatía diabética afecta a las fibras nerviosas sensitivas, motoras y autonómicas y produce diferentes manifestaciones. (Guadalupe Castro, 2009). Aparece aproximadamente en el 50% de las personas con diabetes, se puede presentar como poli neuropatía, mono neuropatía, o neuropatía autónoma, esto depende de:

- Edad del paciente
- Duración de la enfermedad
- Periodos sostenidos de hiperglucemia

Los principales factores que propician el desarrollo de la neuropatía diabética son:

- Factor metabólico
- Afectación de la función vascular
- Implicación de la microangiopatía.

La **neuropatía periférica**, también llamada neuropatía simétrica distal o neuropatía sensorio-motriz, es el daño de los nervios de los brazos y piernas. Es probable que los pies y piernas se vean afectados antes que las manos y brazos. La afectación sensitiva disminuye la sensibilidad profunda (sentido de la posición de los dedos) y la superficial (táctil, térmica y dolorosa) y, por tanto, la capacidad del sujeto de sentir una agresión en el pie (Guadalupe Castro, 2009).

Muchas personas con diabetes presentan signos de neuropatía periférica que el médico observa sin que la persona perciba ningún síntoma (cambio de coloración, baja o alta temperatura), o presentar síntomas que pueden incluir:

- Adormecimiento o insensibilidad al dolor o a la temperatura
- Una sensación de hormigueo, quemazón o picazón dolores o calambres agudos
- Sensibilidad extrema al tacto, inclusive el tacto leve
- Pérdida de equilibrio y coordinación ( Health, 2011)

La neuropatía periférica también puede causar debilidad muscular y pérdida de reflejos, sobre todo en el tobillo, produciendo cambios en el modo en que una persona camina, por

ejemplo. Pueden presentarse deformidades del pie, tales como los dedos en martillo y el colapso de la porción media del pie. Pueden aparecer erupciones y ampollas en las áreas adormecidas del pie debido a la presión o a las lesiones que pasan desapercibidas (Health, 2011)

A nivel del nervio, existe degeneración de los axones, desmielinización segmentaria, hiperplasia de las células de Schwann y edema endoneural (Gámiz, 2007), se afecta la conducción nerviosa, ya que el mioinositol disminuye al aumentar la concentración de glucosa en plasma.

La glicosilación no enzimática de las proteínas afecta a todas las proteínas del organismo incluyendo a la mielina de las células nerviosas. Debido a esta glicosilación se puede:

- Alterar la función de la mielina con lo que la desmielinización segmentaria puede ser el resultado de este proceso.
- Disminuir la síntesis de proteínas, afectando a las proteínas de las células de Schwann y mielina los factores vasculares que pueden influir en la aparición de neuropatía. (Ebersalud, 2007).

## **PIE DIABÉTICO**

Es el síndrome clínico y complicación crónica de la diabetes mellitus, de etiología multifactorial, ocasionada y exacerbada por neuropatía sensitivo-motora, angiopatía o enfermedad arterial periférica, edema y afectación de la inmunidad; lo que condiciona infección, ulceración y gangrena de las extremidades inferiores, provocando en etapas avanzadas hospitalización o cirugía mutilante, capaz de incapacitar parcial o definitivamente al paciente. (Guadalupe Castro, 2009)

La Organización Mundial de la Salud define al pie diabético como la infección, ulceración y destrucción de tejidos profundos de la extremidad inferior, asociadas con alteraciones neurológicas y diversos grados de enfermedad vascular periférica. (Jirkovska, 2001)

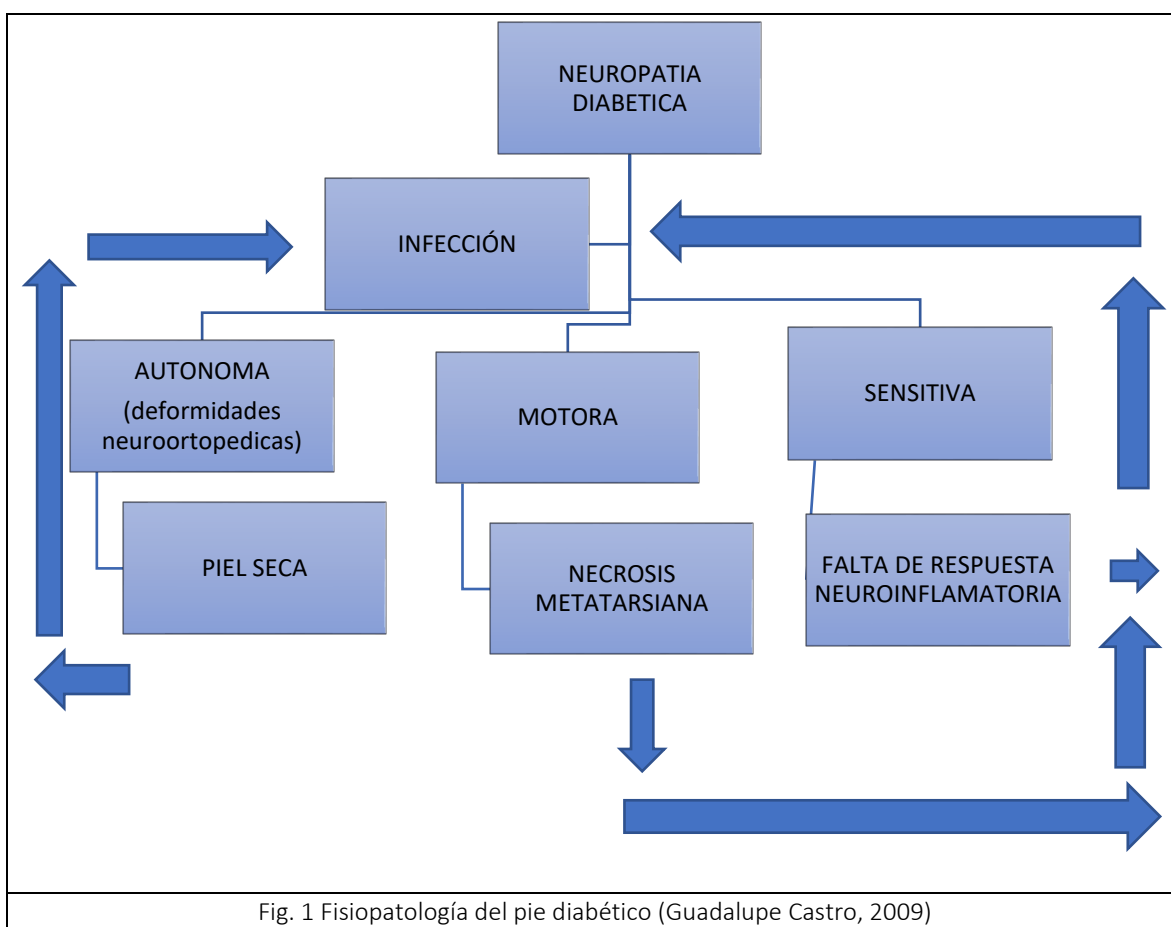
El desarrollo de infecciones en el pie diabético es multifactorial; la predisposición de los enfermos diabéticos a desarrollar úlceras de causa neuropática y macroangiopática, se asocia, como consecuencia de las alteraciones metabólicas, la alteración de la flora microbiana "fisiológica" de origen endógeno y el descenso en la eficacia de los mecanismos de resistencia a la infección.

La neuropatía autonómica condiciona la pérdida de funciones vasomotoras, de reflejo y de sudoración a nivel del pie. Como consecuencia directa, provoca la sequedad de la piel y la aparición de grietas, casi siempre provocada por la disminución del flujo sanguíneo en los

capilares nutritivos, y/o por la apertura de derivatizaciones arterio-venosas, hacen que el pie en la DM constituya un potencial e importante punto de inicio de infecciones.

### FISIOPATOLOGÍA

Del 70 a 80% de los pacientes diabéticos padecen alteraciones en la velocidad de conducción nerviosa medida por electromiografía, incluso en fases tempranas de la evolución de la enfermedad; sin embargo, sólo 10 a 15% de ellos tendrá manifestaciones clínicas. Conforme evoluciona la enfermedad, dicho porcentaje se incrementará y se estima que alrededor de 50% tendrá síntomas a los 15 años del diagnóstico de diabetes mellitus (Figura 1). (Guadalupe Castro, 2009)



Factores de riesgo	Mecanismos de daño o lesión
Neuropatía Periférica motora	Anormalidad de la anatomía y los biomecanismos del pie, con dedos de garra, pie cavo y articulaciones

	metatarsofalángicas subluxadas <sup>1</sup> que conducen a un exceso de presión, formación de callos y úlceras
Neuropatía periférica sensorial	Falta de sensibilidad protectora que conduce a una menor atención de las lesiones mecánicas o térmicas y causadas por la presión excesiva.
Neuropatía periférica autonómica Deformidades neuro-ortopédicas (p. ej., Anormalidades anatómicas y biomecánicas que conducen a una presión excesiva, enfermedad de Charcot) o movilidad limitada especialmente en el área media plantar de las articulaciones	Sudoración deficiente que conduce a piel seca y formación de grietas

Cuadro 1. Factores de riesgo y mecanismos de daño y lesión (Guadalupe Castro, 2009)

## DIAGNÓSTICO

Para el diagnóstico de pie diabético y específicamente de neuropatía, existen varias pruebas y procedimientos que se siguen, en todos ellos es indispensable tener un historial clínico. El primer contacto con el paciente deberá incluir una exploración física y clínica que dará un diagnóstico inicial, este debe incluir interrogatorio y exploración física general, además, del examen dirigido de las extremidades inferiores, el cual se basa principalmente en cuatro valoraciones: Dermatológica, Neurológica, Vasculares y Músculo-esquelética.

### 1.- Exploración dermatológica

Consiste en la inspección de la piel de las piernas y las caras de los pies: dorsal, plantar, medial, lateral y posterior.

- a) Aspecto de la piel
- b) Edema
- c) Onicopatías
- d) Trastornos en la alineación de los dedos
- e) Trastornos estructurales
- f) Temperatura

### 2.- Exploración Neurológica

- a) Evaluación de la presión cutánea
- b) Evaluación de la sensibilidad vibratoria

- c) Exploración de la sensibilidad superficial táctil y térmica
- d) Exploración del reflejo Aquileo
- e) Estudios electrofisiológicos para la velocidad de conducción

### 3.- Exploración Vascular

- a) Prueba de esfuerzo
- b) Pletismografía
- c) Tensión transcutánea de O<sub>2</sub> Y CO<sub>2</sub>
- d) Estudio capilaroscopio
- e) Termometría
- f) Laser doppler
- g) Evaluación angiográfica

### 4.- Exploración osteomiarticular

- a) Exploración pie diabético infectado
- b) Diagnostico microbiológico

(National Institute for Clinical Excellence (NICE), 2004)

Las pruebas realizadas a las personas diabéticas, que participaron en este proyecto, fueron realizadas por personal del Departamento de Ciencias Médicas de la División de Ciencias de la Salud del Campus León de la Universidad de Guanajuato a cargo de la Dra. Ma. Eugenia Garay Sevilla.

Se convoco a un grupo de personas diabéticas a participar en el estudio y se les explico en que consistía el estudio y una vez que aceptaron, se les solicito que firmaran la carta de consentimiento informado donde la persona acepta participar de manera informada y voluntaria en el proyecto.

Para la clasificación del grado de neuropatía, se utilizó el Michigan Neuropathy Screening Instrument (MNSI), el cual está compuesto por dos partes: 1) cuestionario de 15 preguntas y 2) exploración física. Después de aplicar el cuestionario y siguiendo el criterio de haber alcanzado una calificación mayor de 6, se continua con la segunda parte del diagnóstico, que es la exploración físico, del instrumento Michigan Diabetic Screening Instrument (MDSI) el cual evalúa la sensibilidad: vibración (usando diapason), dolor (usando un monofilamento y alfiler) y reflejos osteotendinosos: bicipital, tricipital, patelar y aquileo (utilizando martillo de reflejos) (Herman WH, Use of the Michigan Neuropathy Screening Instrument as a measure of distal symmetrical peripheral neuropathy in Type 1 diabetes: results from the Diabetes

Control and Complications Trial, 2012). Con lo anterior se obtuvieron los siguientes diagnósticos:

Sin neuropatía, neuropatía leve, moderada ó severa.

## **TRATAMIENTO**

Una vez que se ha caracterizado el nivel de neuropatía diabética, se debería seguir un tratamiento para que la neuropatía no avance (que en esta investigación fueron canalizados con su médico tratante), y con ello evitar que lleguen a formarse úlceras y problemas más graves, al grado incluso de causar la amputación del miembro. Lo primero que se busca es bajar el nivel de glucosa en la sangre, por lo cual se le recomienda al paciente una dieta baja en azúcares, grasas y sobre todo evitar bebidas embriagantes y tabaco, así como recomendar el incremento de su actividad física.

En este trabajo se evaluó el uso de termografía pulsada para el diagnóstico precoz de neuropatía en pie diabético. Lograr un diagnóstico temprano y acertado en el menor tiempo posible, y sin exponer al paciente a dolor o pruebas que requieran esfuerzos que pongan en riesgo su salud, deberá contribuir a un mejor y eficaz tratamiento, además de ayudar en el mejoramiento de la calidad de vida de las personas.

## **TERMOGRAFÍA**

La termografía infrarroja utiliza la radiación emitida por cualquier cuerpo que se encuentre a una temperatura superior al cero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), esta radiación se puede estudiar bajo las leyes de radiometría, radiación de cuerpo negro, así como, de transferencia de calor. En el caso de su estudio con herramientas radiométricas, dos de las principales variables que contribuyen a la formación de dicha energía, son la temperatura, que directamente contribuye a determinar la región de longitudes de onda donde el cuerpo bajo estudio emite la radiación; así, se tiene que a  $33^{\circ}\text{C}$  se tendrá una mayor emisión en el rango de los 7 a los 14 micrómetros, con un pico de emisión en 9.6 micrometros. Esta radiación puede ser censada usando una cámara de infrarrojo, de modo que se generen imágenes a partir de la radiación incidente en el detector de la cámara. Esta formación de imagen radiométrica o de infrarrojo sigue las mismas leyes de formación de imágenes que se usan para el espectro visible, de tal manera que la radiación se puede manipular por medio de lentes ópticas, se puede alterar su absorción, su reflexión y su transmisión, de tal manera que se forme una imagen radiométrica, si además de lo anterior, se mide y controla otra de las variables importantes que es la emisividad, es posible tener mediciones de la temperatura de los objetos o cuerpos bajo estudio muy precisas; y en general energías superficiales, en este caso del pie.

Una vez que la imagen es adquirida, es posible aplicar también sobre ella todos los algoritmos de procesamiento digital de imágenes, de modo que se destaquen las anomalías causadas por los diferentes estados neuropáticos.

## CAPÍTULO 2

En este capítulo se profundiza en el estudio de la teoría de radiación de cuerpo negro, transmisión de calor, emisividad, infrarrojo y termografía pulsada, ya que, es muy importante conocer las bases en las que se sustenta el proyecto que se llevó a cabo.

### **RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO.**

Para entender cómo funciona una cámara infrarroja, es necesario comprender primero, la manera en que la energía responsable de formar las imágenes térmicas de las cámaras de infrarrojo es generada, emitida, y absorbida. Para ello se tiene como concepto fundamental la teoría de emisión de cuerpo negro.

El concepto de cuerpo negro, es una consideración teórica de un objeto capaz de absorber toda la radiación térmica que incide sobre él, y al mismo tiempo establece la distribución de probabilidad en la que sucederá la máxima emisión de energía, dependiendo de la longitud de onda; la teoría que describe esta emisión contempla la dependencia de la energía emitida respecto a la temperatura, longitud de onda, emisividad, ángulo sólido subtendido, reflectividad, transmisividad, y todos los factores que puedan alterar la emisión de energía desde el cuerpo y hasta el detector; para fines prácticos a esta distribución de energía se describe gráficamente como una Plankiana.

Los cuerpos negros teóricamente tienen una emisividad de 1, concepto que también fue postulado por Planck para diferenciar entre un cuerpo negro y un cuerpo gris (Barreto, 2008), por ello se dice que no existen en realidad, ya que, no existe ninguna superficie con reflexión y transmisión de energía igual a cero. Estos cuerpos negros también se usan para la calibración de las cámaras termográficas aun y cuando su emisividad solo es cercana a uno.

El termino radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de cualquier cuerpo, esta energía se denomina radiante y es transportada por las ondas electromagnéticas que viajan en el vacío a la velocidad de  $3 \cdot 10^8$  m/s. (García, 2010)

Todo cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas, tanto más intensa, más elevada es la temperatura del emisor; esto fue establecido en el año de 1879 por el físico austriaco Josef Stefan (1835-1893), quien encontró experimentalmente que: la potencia

total emitida por unidad de área desde un cuerpo sólido,  $e_{total}$ , es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, esto es:

$$e_{total} = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

en la que  $\sigma$  representa la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) (Rogelio Soto Ayala, 2009), cabe señalar que esta forma de la ecuación contempla la radiación de energía en todo el rango térmico del espectro electromagnético.

En 1900, Max Planck (alemán, 1858-1947), desarrolló una ecuación para la radiación de cuerpo negro para todas las longitudes de onda del rango térmico. La función propuesta por Planck afirma que la intensidad de radiación  $I(\lambda, T)$  correspondiente a un cuerpo negro a una temperatura absoluta T, está dada por (J.P, 1998):

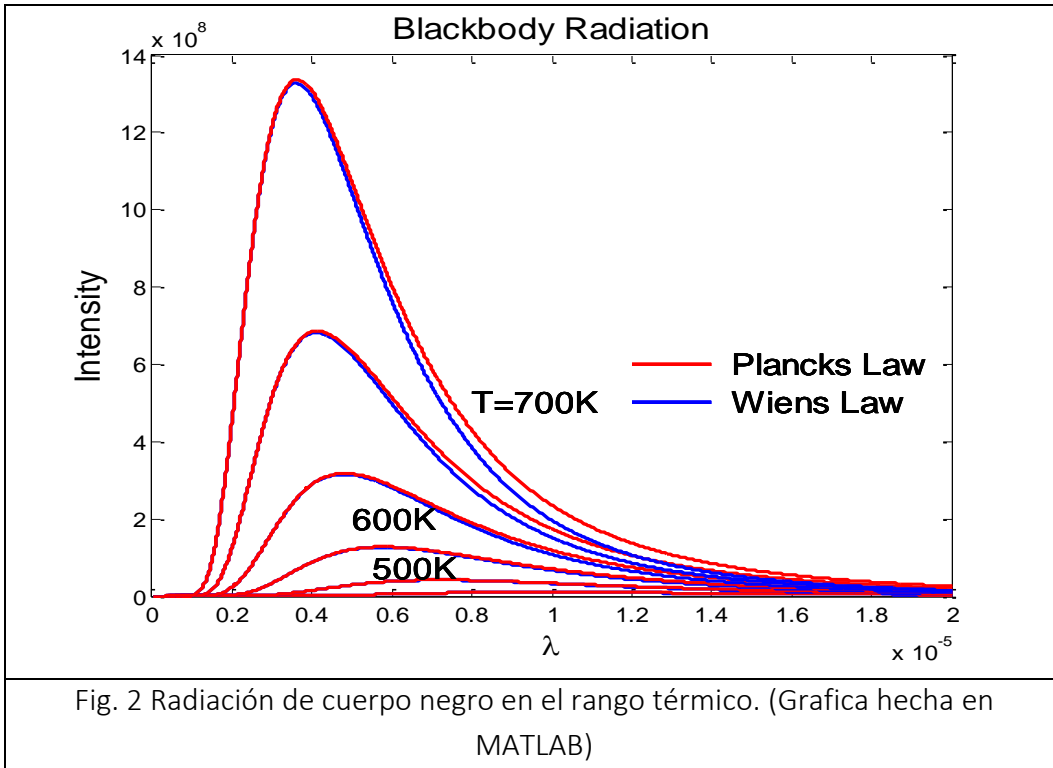
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^5}{\frac{ch}{e^{k\lambda T} - 1}} \quad (2.2)$$

donde  $I(\lambda, T)$  es la densidad de flujo de energía por unidad de longitud de onda, en  $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$ , h es la constante de Planck, y k es la constante de Boltzmann, de valor  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ . La gráfica de la función  $I(\lambda, T)$  para diferentes valores de temperatura se muestra en la Figura 2.

Una forma alternativa a longitud de onda para caracterizar la emisión de energía de un cuerpo es a través de la frecuencia de oscilación de dicha onda, para ello Planck propuso la ecuación en frecuencias descrita a continuación, para la emitancia  $E(\nu, T)$  que correlaciona la cantidad de energía radiante emitida por la unidad de área y tiempo:

$$E(\nu, T) = 4\pi I(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.3)$$





### LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN

Experimentalmente se observa que la máxima emisión tiene lugar a longitudes de onda cada vez más cortas según crece la temperatura. La ley de Planck prevé este comportamiento y permite obtener el máximo de la emisión mediante cálculo de máximos (Domingo, 2011), al derivar la ecuación de Planck,

$$\left. \frac{dE_{\lambda}^0(\lambda, T)}{d\lambda} \right|_{T \text{ cte}} = 0 \quad (2.3)$$

se obtiene:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} mK = 2898 \mu K \quad (2.4)$$

Que es la expresión conocida como la ley de desplazamiento de Wien, a partir de esta ecuación, es posible determinar a qué longitud de onda ocurrirá el máximo de emisión de energía para una temperatura dada, de tal manera por ejemplo, que cuándo una corriente pasa por un filamento metálico delgado se tiene una elevación de la temperatura de dicho filamento, y para determinar cuál es la longitud de onda más adecuada para el estudio térmico se utiliza la ecuación de desplazamiento de Wien (J.P, 1998):

$$T < 3400K \quad \lambda_{max} > 0.85 \mu m \quad (\text{Infrarrojo visible})$$

$$T \cong 3600K \quad \lambda_{max} \cong 0.80\mu m \quad (\text{Extremo rojo del espectro visible})$$

$$T > 4000K \quad \lambda_{max} > 0.7\mu m \quad (\text{Espectro visible})$$

Junto con la teoría de emisión, es posible también determinar la dirección y origen de la radiación que logra incidir sobre la superficie de un detector; considerando que la radiación que llega a los detectores de la cámara (y que es responsable de la formación de la imagen), proviene de distintas fuentes que rodean al propio objeto bajo estudio, se debe considerar que esta energía es la suma de energías que: son emitidas por el propio objeto, se reflejan desde él provenientes de otras fuentes, e incluso de aquellas que son transmitidas a través de dicho objeto, y también desde otras fuentes detrás de él, todas ellas deben ser consideradas, y la manera más sencilla de hacerlo es utilizando la ley de Kirchhoff, con la que es posible además de lo anterior, considerar que cuando el objeto bajo estudio se encuentra en equilibrio termodinámico, la energía que absorbe es matemáticamente igual a aquella que emite.

Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) estableció la proporcionalidad entre las cantidades de energía emitidas y absorbidas por los cuerpos. Esta proporcionalidad debe cumplirse separadamente para cada intervalo de longitudes de onda escribiendo que:

$$\frac{e\lambda_1}{a\lambda_1} = \frac{e\lambda_2}{a\lambda_2} = \frac{e\lambda_3}{a\lambda_3} = \dots = f(\lambda, T) \quad (2.5)$$

A esta expresión se le llama la Ley de Kirchhoff, la cual establece que “la relación entre la intensidad de energía emitida y la absorbida es constante para todos los cuerpos que se encuentren a la misma temperatura y sean estudiados bajo la misma longitud de onda de radiación: (Santiago Burbano de Ercilla, 2003)

$$\frac{e\lambda}{a\lambda} = f(\lambda, T) \quad (2.6)$$

La radiación infrarroja está comprendida dentro del rango térmico, se integra desde el infrarrojo cercano desde 0.78  $\mu m$  hasta el final del infrarrojo lejano o principio de las microondas 1000  $\mu m$  (= 1 mm), el rango térmico también comprende el rango del espectro visible (0.38 – 0.78  $\mu m$ ) e incluso una parte del ultravioleta. Las cámaras termográficas de onda larga (situadas en el rango de infrarrojo medio), miden la radiación entre 7  $\mu m$  y 14, ya que la atmósfera después de la segunda ventana permite la transmisión de energía en ese rango (AG, 2012)

El término **emisividad** se refiere a la fracción o razón de radiación que un cuerpo real emite en cierta longitud de onda con respecto a un cuerpo negro. La emisividad es distinta para cada longitud de onda, y depende de factores tales como la temperatura, la condición de la superficie (pulida, oxidada, limpia, etc.) y del ángulo de emisión. (William L. Wolfe, 1978)

## **TRANSMISIÓN DE CALOR**

El calor es una energía en tránsito que viaja desde los cuerpos de mayor temperatura a los de menor temperatura; un cuerpo perderá energía y bajará su temperatura y el otro la subirá, hasta que se igualen, momento en que cesará el flujo. Para aumentar o disminuir la temperatura de un cuerpo, hay que darle o quitarle calor o energía. Esa cantidad dependerá de la masa del cuerpo (a más masa, mayor capacidad calorífica) y de su naturaleza (unas sustancias se calientan con más facilidad que otras, tienen diferente calor específico), estas propiedades dependen de la estructura interna y se contemplan en sus capacidades de conductividad térmica, calor específico y capacidad calorífica, entre otras. (Domingo, 2011)

Además de elevar la temperatura, producir cambios de fase y de dimensiones, el calor puede provocar otros efectos sobre los cuerpos como cambios químicos o en sus propiedades físicas (densidad, viscosidad, resistencia eléctrica, propiedades mecánicas, etc.). Estos cambios se deben fundamentalmente a que cambia la forma de unión de las partículas que componen el cuerpo.

Existen tres maneras de transición de calor, estas son convección, conducción y radiación.

### **CONVECCIÓN**

En los fluidos (líquidos y gases) una forma de propagarse el calor es por convección. Cuando un líquido o un gas reciben calor por su parte inferior, las zonas calientes tienden a subir y las frías, a bajar. Se mezclan zonas calientes y frías, transmitiéndose el calor de una zona a otra, mediante movimientos llamados flujos convectivos. (distancia, 2016)

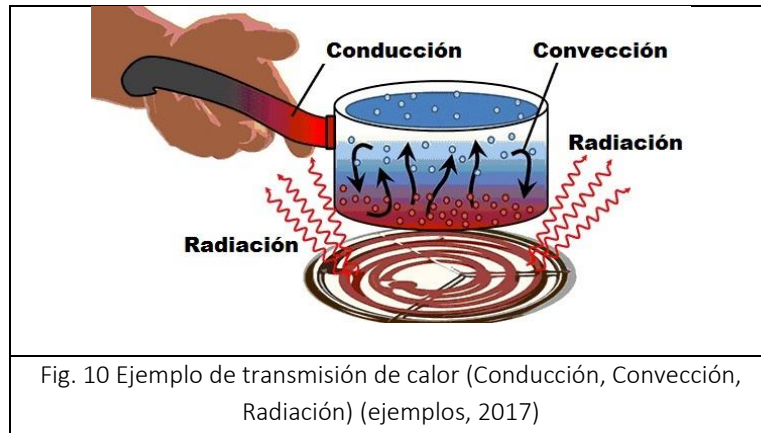
### **CONDUCCIÓN**

En la conducción, las partículas que componen un sólido no se desplazan, sólo vibran. Cuando un cuerpo sólido con mayor temperatura toca a otro con menor temperatura, le transfiere parte de su energía, al empezar a vibrar las partículas que quedan en la frontera de ambas superficies unidas, de forma que la energía de las partículas de un sólido disminuyen y la del otro aumenta hasta que las temperaturas se igualan. También es válida esta explicación para la transmisión del calor entre dos zonas dentro de un mismo sólido. (distancia, 2016)

### **RADIACIÓN**

El calor también se propaga por radiación. Se da en sólidos, líquidos, gases y en el vacío. Todos los cuerpos desprenden energía en forma de radiación. Cuanta más temperatura tiene más radiación desprende. La radiación es luz (hay luces que podemos ver, luz visible y otras que no como los rayos X, infrarrojos, ultravioletas...). Esta energía se propaga por cualquier

medio, incluso en el vacío, ya que la luz no necesita de ningún medio para viajar de un cuerpo a otro. (distancia, 2016)



## SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA:

El calor fluye espontáneamente del cuerpo más caliente al más frío, transfiriéndose de ese modo energía térmica de un cuerpo o lugar a otro, y es por ese hecho que al estudiar los gradientes de temperatura dentro de los tejidos se puede evaluar el transiente de energía causado por el pulso térmico negativo, la convección forzada dentro de las venas y arterias contribuye a determinar qué tan rápido la conducción de calor ocurre, y con ello indirectamente evaluar al condición arterial y nerviosa de la extremidad.

En investigaciones previas en el grupo de trabajo, se observó que las personas con diabetes mellitus presentan termoregulación más lenta comparando con personas sanas y diabéticas, se estudió el cambio de energía presentado al sumergir el dedo hallux<sup>4</sup> del pie en agua fría, encontrando un descenso de temperatura más rápido en las personas sanas y al sacarlo, la recuperación también tenía un aumento de temperatura más eficiente que en las personas diabéticas. (Y.Fujiwara, 2000)

## CALCULO DE ENERGÍAS:

Para calcular la energía (E) a partir de imágenes digitales, en términos de niveles de gris, se puede utilizar la forma discreta de la siguiente ecuación

$$E = \iint_{-\infty}^{\infty} I^2(x, y) dx, dy$$

Donde  $I$  representa la intensidad (o nivel de grises) de la imagen y  $(x, y)$  representa la posición de un píxel dado. (C. Villaseñor-Mora, 2009)

## TERMOGRAFÍA

Termografía infrarroja es una técnica de adquisición y análisis de información térmica a partir de dispositivos de toma de imágenes sin contacto, por lo general solo involucra la energía instantánea emitida en el momento de adquirir la imagen, y no permite el análisis anterior y posterior a la adquisición. Una manera de verificar que sucede antes de que el cuerpo entre en equilibrio térmico involucra técnicas de termografía activa, que para este estudio se limitó a evaluar el uso de termografía pulsada.

Termografía pulsada: es un área de la termografía activa que consiste en analizar los transientes de temperatura que ocurren después de suministrar un cambio en la temperatura de un objeto bajo estudio, por ejemplo, si a un cuerpo se le extrae calor (se enfría) por algún medio, es posible seguir el transiente negativo que sucede al ir perdiendo calor, esto se logra al adquirir secuencias de imágenes a la velocidad que requiera el experimento, es decir a condiciones de baja conductividad térmica los tiempos de adquisición serán menores, al contrario de cuerpos con altas conductividades en donde la velocidad de adquisición deberá ser de unos cuantos mili segundos para poder registrar correctamente el gradiente térmico generado. El perfil de propagación a través del material determinara las anomalías térmicas que este contenga o la uniformidad del mismo, cuando se encuentra con una heterogeneidad produce un contraste de térmico, tanto más pronunciado cuanto más cerca se encuentre dicha heterogeneidad de la superficie.

Un perfil térmico se propaga de la misma manera ya sea caliente o frío: lo importante es la diferencia de temperaturas entre la fuente térmica y la muestra. Una ventaja de una fuente térmica fría es que no induce falsas reflexiones térmicas en la cámara IR como en el caso de una fuente térmica caliente. Las principales limitaciones de las fuentes de estimulación en frío se relacionan con consideraciones prácticas, ya que por lo general es más fácil y más eficiente calentar que enfriar.

Existen diferentes técnicas de termografía activa en función de cómo se realiza el calentamiento o enfriamiento externo de la pieza a inspeccionar.

Los métodos de observación posibles son los siguientes:

Por reflexión: la fuente térmica y el detector están situados en el mismo lado del componente inspeccionado,

Por transmisión, la fuente de calefacción y el detector están situados uno a cada lado del componente a inspeccionar.

En general, el enfoque de reflexión se utiliza para la detección de defectos situados cerca de la superficie calentada, mientras que el enfoque de transmisión permite detectar un defecto próximo a la superficie posterior, o más interna (debido al efecto de propagación de la energía que se propaga dentro de la muestra).

La termografía médica es una técnica de diagnóstico precisa, cuantificable y sin contacto utilizada para visualizar y cuantificar los cambios de temperatura de las superficies mediante el uso de cámaras termográficas de alto rendimiento. Entre sus aplicaciones se incluyen la evaluación vascular, la identificación de tejido tumoral, el examen de distensiones musculares y la detección de hemorragias. (AG, 2012)

La termografía se ha usado en varias investigaciones de diferentes ramos de la medicina, como son, cáncer de mama, problemas de trombosis venosa profunda, quemaduras, venas varicosas, cáncer en la piel, tumores de paratiroides, visualización de sitios de amputación, detección de neuropatía, etc. (B.B.Lahiri, 2012). En muchas de estas pruebas se ha comprobado que el uso de la termografía es una técnica viable, con muchas ventajas, pero aun, no ha sido utilizada en campo, debido a que no se tiene una prueba irrefutable que realmente sea un equipo de diagnóstico acertado para cada problema médico. Una de las principales limitantes es, de las enfermedades médicas ya mencionadas, todas deben ser evaluadas por un médico especialista, y a su vez revisarse su historial clínico, junto con todos los síntomas que pueda presentar el paciente.

En la mayoría de las investigaciones médicas en donde se hace uso de la termografía, se recurre a personas o pacientes con problemas ya conocidos, de hecho, en la investigación que se lleva a cabo en este proyecto, se sabe el grado de daño que hay en cada paciente. Por lo tanto, se comparan resultados en base a la información del paciente para validar la técnica utilizada.

## **CAPÍTULO 3**

En este capítulo se describe el prototipo que se utilizó para aplicar los pulsos térmicos negativos y aplicar termografía activa al pie, el empleo de la cámara infrarroja, el desarrollo del programa para analizar las imágenes, y los métodos estadísticos con los cuales partirá la evaluación del método de termografía pulsada para diagnosticar la neuropatía en pie diabético.

### **DISEÑO DE EQUIPO PARA EL PULSO DE TERMOGRAFÍA EN PIE.**

El equipo que se usó para dar el pulso negativo de calor fue diseñado con el objetivo de que el participante pueda tener una posición cómoda a la hora de la prueba, (eso principalmente para que el participante no se sienta incómodo en el tiempo de la prueba, o en una posición

difícil). La característica fundamental de este dispositivo es que debe bajar la temperatura de la extremidad con rapidez, pero sin causar dolor o algún tipo de afectación en la extremidad del participante, y además, debe permitir la adquisición de las secuencias de imágenes por medio de la cámara a una distancia de enfoque y posición de modo que se consigan imágenes bien enfocadas, en campo y con un buen contraste térmico, para que con el análisis de imagen posterior se consigan buenos resultados.

El equipo que se utilizó es un sistema de refrigeración a base de compresor que consta de 4 elementos básicamente, a través de los cuales fluye refrigerante, que en este caso fue el R134A. Estos son:

- Compresor
- Condensador
- Capilar
- Evaporador

El compresor: Bombea el fluido refrigerante a baja presión y lo comprime elevando su presión y temperatura, hasta unos valores tales que se pueda efectuar la condensación, dentro de un serpentín llamado condensador.

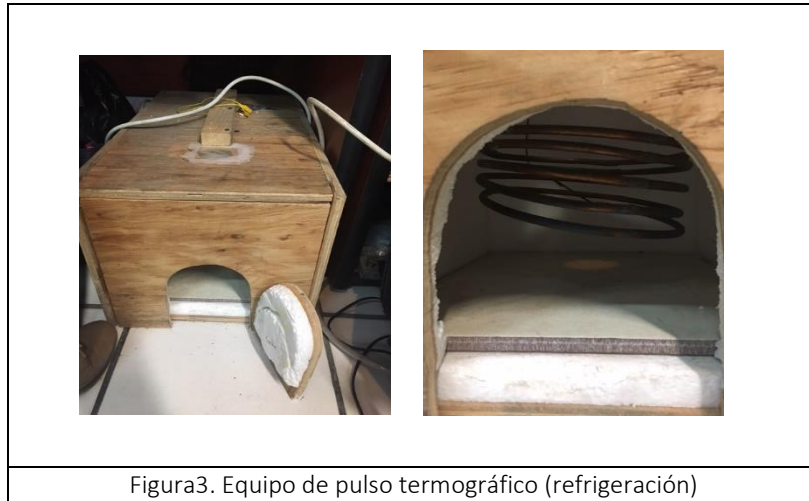
El condensador: Es el elemento que se encarga de pasar el gas refrigerante del estado de vapor a líquido, y además permite que el calor sea transferido a la atmósfera que rodea el sistema. El fluido refrigerante entra en el condensador en forma de gas y sale en estado de líquido a una temperatura de condensado que depende del refrigerante y la presión del mismo en el sistema en reposo, en este caso debe ser a menor temperatura.

Capilar o Dispositivo de expansión: A él entra un fluido en estado líquido, que sufre una caída de presión y temperatura que se equilibra en el evaporador, también controla la cantidad de refrigerante que entra en el evaporador a baja presión y temperatura.

Evaporador: Se encarga finalmente de enfriar o acondicionar la cámara que se requiere enfriar, por ejemplo, en un refrigerador, esta cámara es el congelador; Su misión es que el fluido refrigerante que entra a baja presión y temperatura, efectúe el enfriamiento de la cámara, es decir, se lleve el calor del recinto hacia fuera del mismo.

El fluido refrigerante está sometido a cambios de estado a lo largo del circuito (Lijo, 2007).

A continuación, se muestra en la Figura 3, el primer equipo utilizado para dar el pulso negativo de calor:



El primer equipo utilizado, se compone del sistema recuperado de un dispensador de agua de garrafón, con un ventilador para disipar el calor del condensador, el serpentín que se incorpora en el mismo, se encuentra en la parte de la cabina donde entran las extremidades, saliendo de la parte de arriba como se aprecia en la imagen de la Figura 3, esto limita el acceso de los pies de los voluntarios en el proyecto a la cabina, la cabina estaba recubierta de unicel para aislar el calor y en la base de la cabina, un vitropiso poroso, pensado para mantener baja la temperatura en la parte donde se apoyaban los pies.

Se hicieron pruebas con el equipo, con diferentes tiempos (tiempo que mantenían los participantes sus pies dentro), pero se descartó el equipo 1 debido a que el control de temperatura del sistema es mecánico (el mismo que usaba el dispensador de agua), lo que implica que su histéresis sea muy alta y por ende para propósitos de este estudio prácticamente no permitió controlar la temperatura, Este control causaba también que las pruebas de un día a otro, o de participante en participante variaban considerablemente debido al rango de temperaturas que el control mantenía.

Con esto se utilizó otro equipo que mantiene un diseño del evaporador del sistema diferente al que usa el dispensador de agua, de modo que el proceso de enfriamiento sea más rápido y eficiente dentro de la cabina; la Figura 4, muestra algunas fotografías de dicho evaporador.

Cabe mencionar que este equipo mantiene una presión de trabajo de 6PSI, lo que no estresa en funcionamiento del compresor y permite mantener una temperatura más baja en la cabina donde entran los pies.





La aportación de este proyecto de tesis en la mejora de este equipo fue la de diseñar e implementar un control electrónico para el encendido y apagado del compresor, y la regulación de la velocidad de giro del ventilador que homogeniza la temperatura dentro de la cabina.

El ventilador de la cabina que se usa, está controlado por un sistema a base de Arduino y es el que manda la orden de encender el ventilador cuando los sensores dentro de la cabina no registran la misma temperatura en todo el recinto. Los sensores se encuentran en 3 posiciones diferentes dentro de la cabina, uno cerca del serpentín, otro en la superficie donde se apoya el pie, y el otro casi a la salida de la cabina, este ventilador se encuentra atrás del serpentín, en cuanto el ventilador empieza a funcionar el aire frío empieza a circular con más rapidez por toda la cabina.

El Arduino utilizado es el Atmega328p nano v3 y el programa hecho también sirve para mostrar en una pantalla LCD de dos líneas la temperatura de los 3 sensores, el código del

programa ya mencionado se anexa completo en el Apéndice B y en el Apéndice C el diseño eléctrico PCB.

En la prueba se incorporaron 2 tipos de puertas para la cabina, una para la entrada de un solo pie, y la otra para los dos pies al mismo tiempo

La cabina del enfriador está hecha con madera, pero por dentro se encuentra recubierta con unicel para aislar el material del aire frío, después del unicel, se forro con vidrio para así poder mantener la baja temperatura dentro de la cabina, el serpentín está en el fondo de la cabina en la pared de frente al paciente, pero también hay uno en la parte de abajo que se recubrió con un vidrio para propósitos de limpieza e higiene, donde se apoya el pie.

## CÁMARA INFRARROJA

La cámara infrarroja utilizada fue una Xenics Gobi-640-GE con una resolución de  $640 \times 480$  pixeles, controlada con su software Xeneth. Se utilizaron dos lentes dependiendo de si se desea examinar un pie se usa la lente de 18 mm, y se desea analizar los dos pies al mismo tiempo se utiliza una lente de 10 mm. La Figura 6, muestra la cámara utilizada.



El programa Xeneth permite controlar la cámara infrarroja, fijando los valores de humedad, distancia al objeto, apertura de la lente, temperatura ambiente, emisividades del objeto, etc. Además de estos parámetros básicos, incorpora diferentes modos de operación de la cámara, que, en este caso, lo importante fue la incorporación del módulo de adquisición de secuencias de imágenes que permite ajustar el tiempo de captura entre una imagen y otra, así como el tiempo de captura de la secuencia total de las imágenes, el formato de las imágenes guardadas, o si la imagen será en escala de grises o con paleta de falsos colores.

En el proyecto de investigación realizado, se concluyó que el tiempo más adecuado de captura en los participantes era de 10 minutos dentro de la cabina y 10 minutos fuera, y se consideró que un tiempo entre cada adquisición de 20 segundos, es también el ideal para monitorear los cambios que van ocurriendo en el pie.

En la Figura 7 se muestra una impresión de pantalla con el entorno del software Xeneth, y los parámetros utilizados para este proyecto.

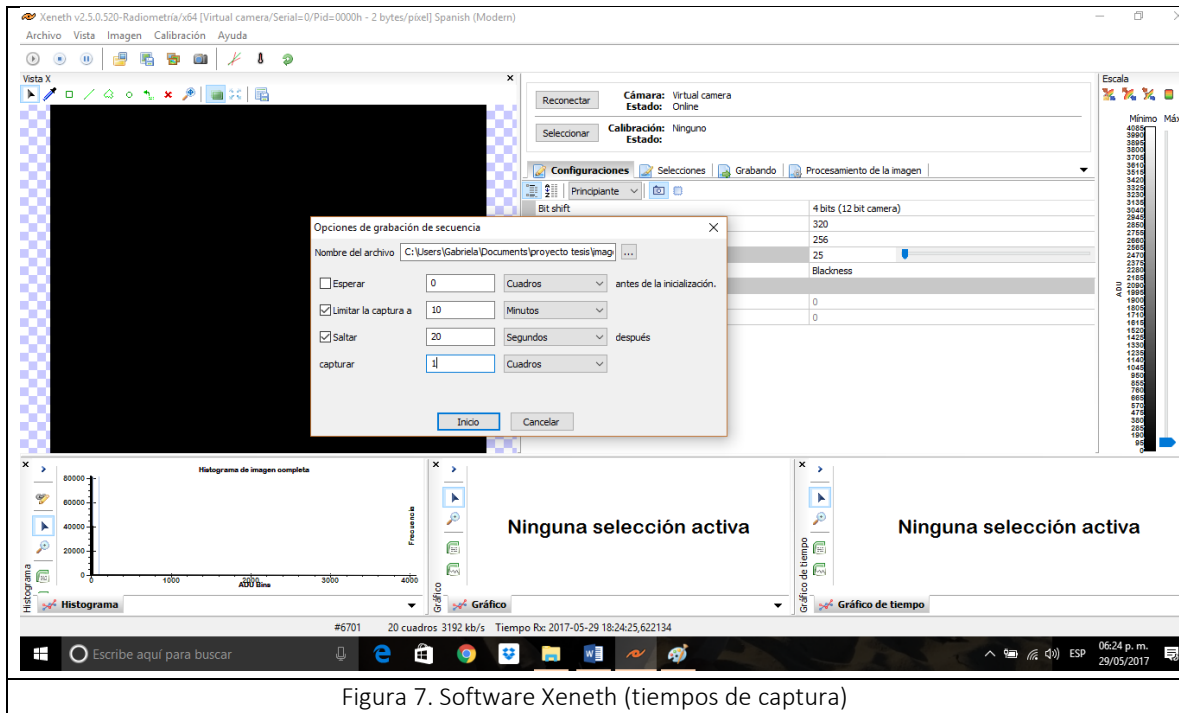
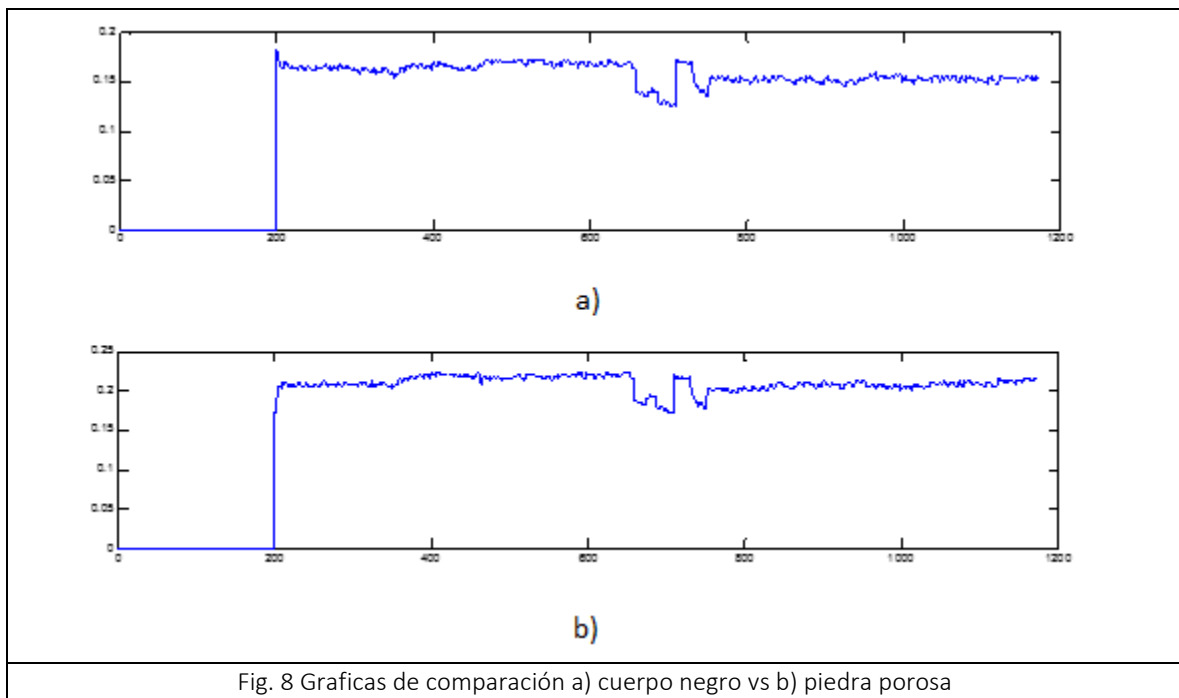


Figura 7. Software Xeneth (tiempos de captura)

## PIEDRA COMO REFERENCIA (CUERPO NEGRO)

Debido a que todo equipo electrónico y en este caso la cámara de infrarrojo, mantiene una deriva térmica a través de su operación continua en el tiempo, es necesario establecer parámetros de control externos que permitan compensar estos cambios en el contraste de las imágenes debidos a estas variaciones en la operación de la cámara. Con esto es necesario que siempre exista dentro de la escena un elemento que no cambie significativamente su temperatura con el tiempo, este puede ser un cuerpo negro, pero debido al tamaño de la cabina del equipo utilizado, no es posible meter ninguno de los cuerpos negros con que se cuenta, y es por ello que se decidió utilizar una piedra volcánica ya caracterizada en emisividad y propiedades térmicas como un testigo dentro de la cabina, así cuando la cámara sufre de un cambio en su ganancia debido a la deriva de temperatura, provocará falsos cambios en la intensidad de las imágenes adquiridas, sin que este cambio se pueda atribuir

a un cambio en la emisión de la escena capturada, y este cambio es fácil de detectar en el testigo colocado, ya que la piedra o cuerpo negro no deberán presentar cambios repentinos de emisión de energía en el tiempo y si estos son observados, se deberán atribuir a un cambio en el contraste térmico de la cámara. Esto deberá considerarse en el análisis de las imágenes. Ésta no sufre un cambio, que absorba y A continuación, en la Figura 8 se muestra el resultado de la gráfica donde se exhibe el comportamiento comparativo entre el cuerpo negro ideal y la piedra porosa, dada en función a intensidades, los datos graficados son energía vs tiempo, y el programa donde se analizaron estas imágenes esta hecho en Matlab, este programa se encuentra en el Apéndice D. La Figura 9 muestra una imagen infrarroja de las pruebas hechas para comparar el comportamiento entre el cuerpo negro a) y la piedra porosa b).



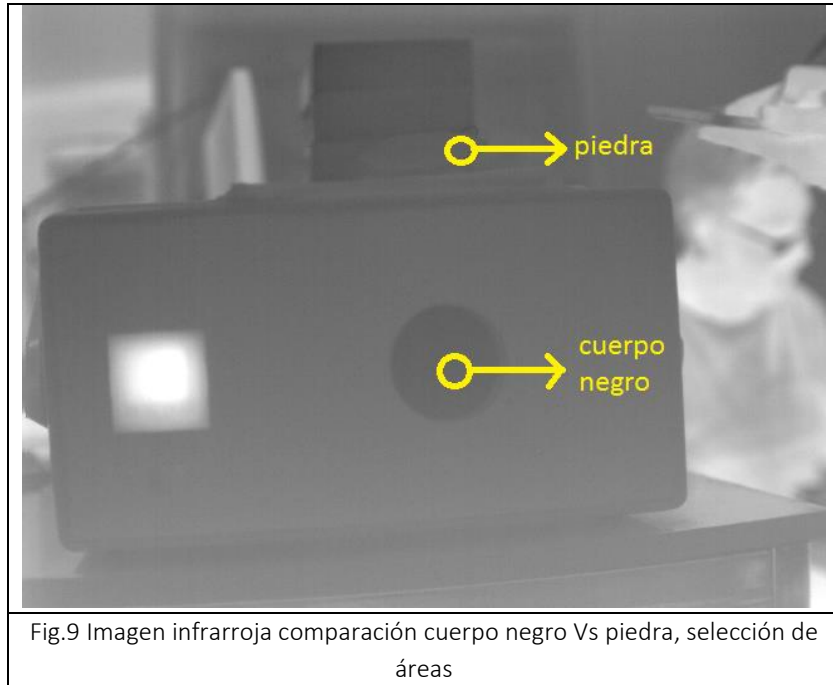


Fig.9 Imagen infrarroja comparación cuerpo negro Vs piedra, selección de áreas

## CLASIFICACION DE GRUPOS

Los participantes en este proyecto de investigación fueron clasificados en dos grupos, de la forma ya mencionada en el capítulo uno, en la parte de diagnóstico, donde se describe el uso de (MNSI) y (MDSI) para la evaluación de neuropatía.

Un grupo control

Son estudiantes o trabajadores de la Universidad de Guanajuato de la División de Ciencias e Ingenierías Campus León, personas sin diabetes, aparentemente sanas.

Personas con diabetes y neuropatía periférica

Estas personas se encuentran en un rango de edad de entre 45-75 años. Diagnosticados con diabetes y neuropatía en diferentes etapas, 35 pacientes diabéticos voluntarios a participar en la prueba. Ya con los pacientes clasificados, se procedió a adquirir las secuencias de imágenes.

El grupo 2: personas con diabetes y neuropatía periférica se incluyeron en grupos como sigue personas sin neuropatía, con neuropatía leve, con neuropatía moderada y con neuropatía severa.

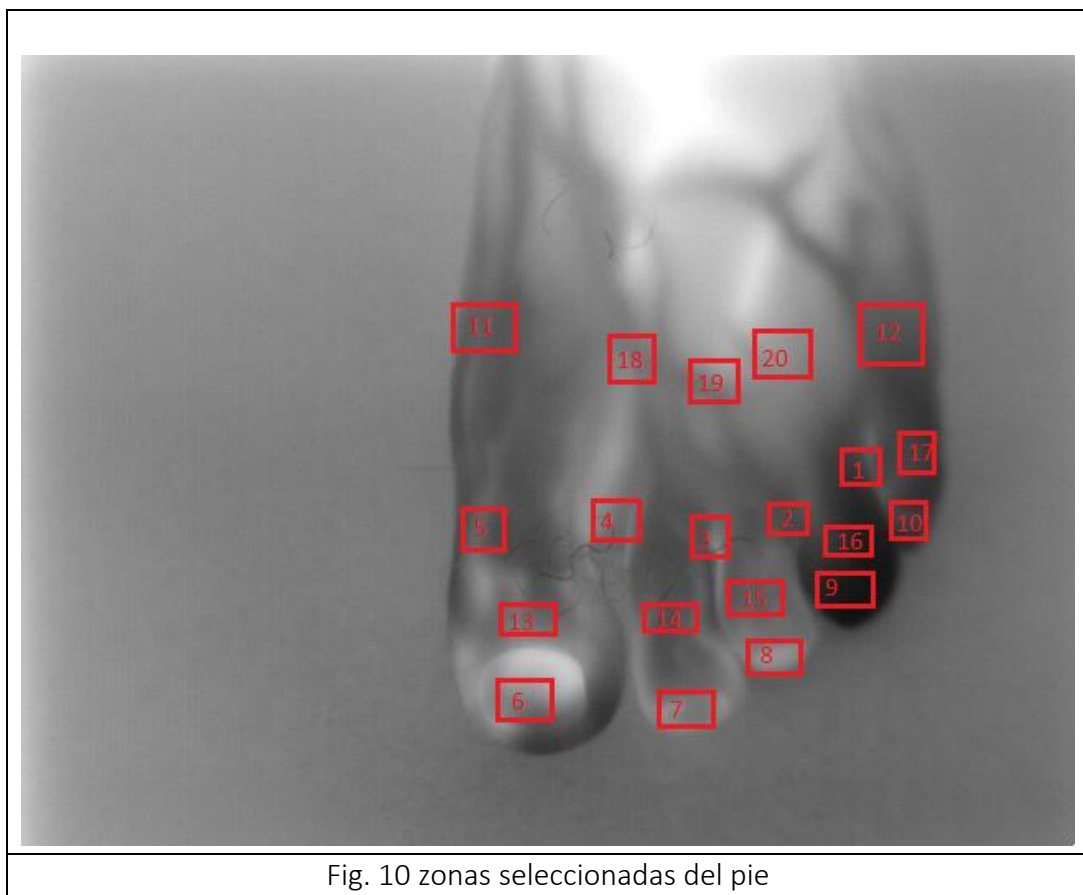
## ANALISIS DE IMAGENES

Después de obtener las secuencias de imágenes se analizan con un programa realizado en MatLab, el programa se muestra en el Apéndice G, el cual hace un análisis basado en intensidades, las imágenes están dadas en escala de grises con 8 bits de resolución.

Se considera una de las imágenes como referencia, de esta imagen se selecciona parte de la piedra que en este caso hace la función de un cuerpo negro, para lograr una normalización respecto a variaciones en el tiempo debidas a la operación de la cámara.

Después se seleccionan 20 puntos de interés en el pie, para obtener la energía asociada a la intensidad en la escala de grises de cada imagen y así adquirir una representación gráfica de los datos en función del tiempo. En la Figura 10 se muestra las 20 zonas seleccionadas.

El programa envía los datos de energía en función del tiempo a Excel en donde se hacen las gráficas de estos datos.



El control de los pacientes se lleva acorde a lo establecido en los acuerdos de ética, de modo que los datos personales de cada participante permanecen anónimos y la base de datos con la información de los cuestionarios aplicados, sus secuencias de imágenes y temperaturas quedan establecidos solo con códigos que no permiten descifrar los datos personales de los participantes. El cuestionario que se realizó se añade en el Apéndice A. También se agrega el documento de consentimiento informado donde la persona acepta participar de manera informada y voluntaria en el proyecto.

## CAPITULO 4

En este capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos del análisis de las imágenes, las gráficas muestran las comparativas entre las personas con neuropatía periférica en los tres diferentes estadios considerados y las personas sin esta complicación.

Los datos mostrados son energías normalizadas que se calcularon a partir de las intensidades de niveles de gris desde las imágenes de infrarrojo de los pies, y aunque se utilizaron 20 zonas para el cálculo de las mismas, se presentan solo los resultados de aquellas zonas, que en principio mostraron un comportamiento acorde en la mayoría de los participantes en sus diferentes grupos, es decir, zonas que no presentaron una tendencia clara o que mantuvieron una variabilidad muy grande sin mostrar una tendencia fueron descartadas, cabe mencionar que los grupos de personas considerados son: Grupo control personas no diabéticas (Trabajadores y estudiantes de la División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Guanajuato Campus León; Grupo 2 personas con diabetes y neuropatía periférica leve; Grupo 3 personas diabéticas con neuropatía periférica moderada; Grupo 4 personas diabéticas con grado severo en neuropatía periférica.

### RESULTADOS

Los grupos fueron conformados de la siguiente manera:

Grupo control: Personas no diabética apartemente sanas: entre 19-22 años de edad (n=33) y entre 35-45 años (n=5).

Grupos de pacientes diabéticos:

Grupo 2: Neuropatía periférica leve (n=10) rango de edad 45-60

Grupo 3: Neuropatía periférica moderada (n=10) rango de edad 45-70

Grupo 4: Neuropatía periférica severa (n=7) rango de edad 45-75

Después de procesar las secuencias de imágenes, y de haber disminuido y/o eliminado el efecto de la deriva térmica de la cámara de infrarrojo, así como de los efectos de variación de temperatura de la cabina de la cámara, se obtuvieron las energías de cada una de las zonas seleccionadas (20 zonas) y que se consideraron claves para determinar si era factible o no el uso de termografía pulsada en el diagnóstico y caracterización del grado de neuropatía que una persona sufre.

Además de la deriva térmica de la cámara, un problema que se presentó es que la ganancia de la misma se alteró significativamente cuando el pie se saca de la cabina de enfriamiento, este cambio de ganancia afecta la energía, bajando su valor; la forma que se propone para corregir este efecto de la cámara al ver una escena con fondo frío (dentro de la cabina) y luego la misma escena en fondo caliente (fuera de la cabina), es que al no existir ningún argumento físico que soporte este cambio repentino en la energía de la extremidad en general, lo que se hace es promediar la energía en cinco puntos aleatorios de la extremidad, e igualar la energía promedio de la extremidad en la última imagen que se adquiere dentro de la cabina con la primer imagen fuera de la misma, esta igualación se consigue obteniendo la diferencia de energías, esta diferencia junto con la compensación de la deriva térmica de la cámara, se suma a todas las imágenes fuera de la cabina para compensar el bajón de energía causado por el cambio de ganancia de la cámara; con esta compensación se consigue que las gráficas de energía que se presentan no tengan este escalón en la energía a la mitad debido al cambio de pulso térmico aplicado a la extremidad.

Una vez que se obtuvieron las energías desde los niveles de gris de cada zona, se construyó la base de datos para su análisis e interpretación, y así mismo para generar las gráficas correspondientes a los transientes derivados del pulso negativo de calor y del transiente de recuperación energética (o positivo) una vez que se sacó el pie de la cabina de enfriamiento.

En Excel se construyó la base de datos, por grupos, se verificó que no hubiera discrepancias en los datos, es decir, que no se encontraran anomalías inesperadas en el comportamiento de las energías, esto es, discontinuidades anómalas en la energía, que en la mayoría de los casos se debe a movimientos de dedos o de la extremidad completa que la persona hace a lo largo del tiempo que dura la adquisición de las imágenes; este tipo de errores de movimiento en las imágenes debe ser analizado más a detalle para en un futuro lograr la corrección automática de la posición del centro de la zona a extraer la energía aun y cuando la extremidad o parte de ella se haya movido, ya que por ahora la corrección se hace a mano, esto es al detectar un salto inesperado en la energía se revisa que no haya sido por movimiento, y si fue así se revisa cuantas imágenes están involucradas en el movimiento y desde ellas se obtiene a mano la energía de cada una de las 20 zonas; para realizar esto, se



usa un kernel de 3 por 3 pixeles y con el ratón de la computadora se selecciona el centro del área a considerar para obtener su energía. Una vez que ya no se observa movimiento se procede a posicionar de nuevo los centros de cada zona y a obtener las energías de manera automática, esto es muy importante corregirlo ya que imparta fuertemente el comportamiento del transiente de energía que se analiza desde cada zona.

Es importante recordar que la energía de cada zona en cada persona e incluso entre extremidades de la misma persona no son iguales, situación que no es posible controlar externamente ya que los factores principales que causan esto son de carácter interno, como el metabolismo, los bloqueos arteriales y venosos, la presión arterial, el sobre peso, la condición física, entre muchos otros. Esto sumado a que no es posible sincronizar el inicio de la adquisición de las imágenes para cada uno de los participantes, se debe hacer la comparación de los transientes no con la energía obtenida, sino con una normalización primero entre las extremidades de la persona y luego entre todos los participantes del grupo, y finalmente poder comparar entre los diferentes grupos.

Para cada grupo se llenó una hoja de Excel con las 30 lecturas de cada zona (una imagen cada 20 segundos por 10 minutos) correspondientes al transiente negativo y otras 30 lecturas que corresponden al transiente positivo o de recuperación, los datos de cada grupo de personas ya normalizados individualmente se agruparon para obtener promedios, mínimos, máximos, y desviaciones estándar (para sacar el error estadístico).

En la escala horizontal grafica el número de imagen, y la escala vertical indica la energía normalizada a uno.

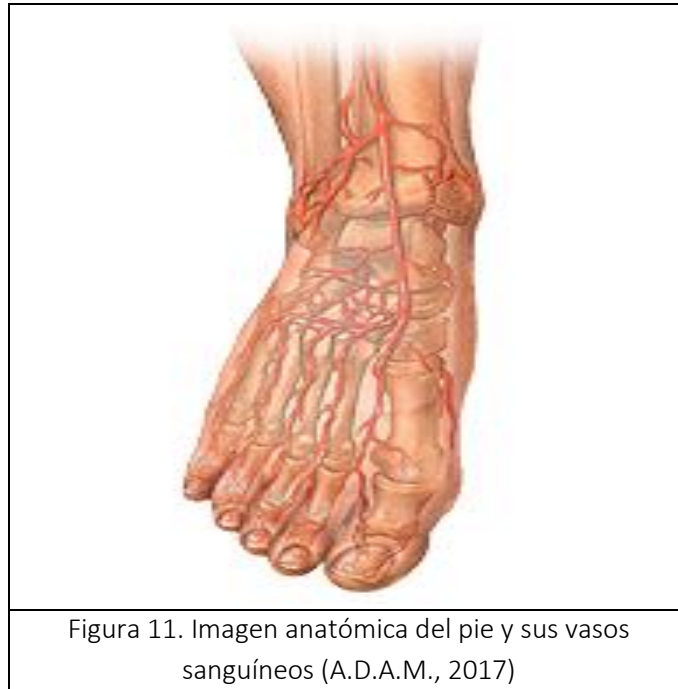


Figura 11. Imagen anatómica del pie y sus vasos sanguíneos (A.D.A.M., 2017)

La Figura 11 muestra una imagen de los vasos sanguíneos y su anatomía, la cual nos sirvió de referencia para seleccionar los puntos importantes.

De las zonas que se seleccionaron existen algunas que permiten dar un seguimiento de los transientes y que mostraron un comportamiento similar en todos los pacientes, un ejemplo de ello es aquella obtenida en la zona media entre el segundo y tercer dedo, en esta zona se siguió una arteria digital y tal como se esperaba en los pacientes que no sufren de complicaciones vasculares ni nerviosas el comportamiento a través del tiempo es prácticamente constante, esto puede verse en la gráfica de la Figura 12. Sin embargo, en los participantes con complicaciones de neuropatía leve, el comportamiento al final del pulso positivo tendió a incrementar su energía, un ejemplo de ello es posible de ver en la Figura 13. En el caso de los participantes con neuropatía moderada, el comportamiento se observa un poco más marcado a incrementar la energía al final del pulso positivo (Ver Figura 14); y finalmente en personas con neuropatía severa, lo que se puede observar es una gran variabilidad en la energía de la zona. Algo a resaltar es que a medida que la neuropatía avanza el nivel energético en esta zona tiene a estar más bajo comparado con aquellas energías obtenidas desde el grupo control.

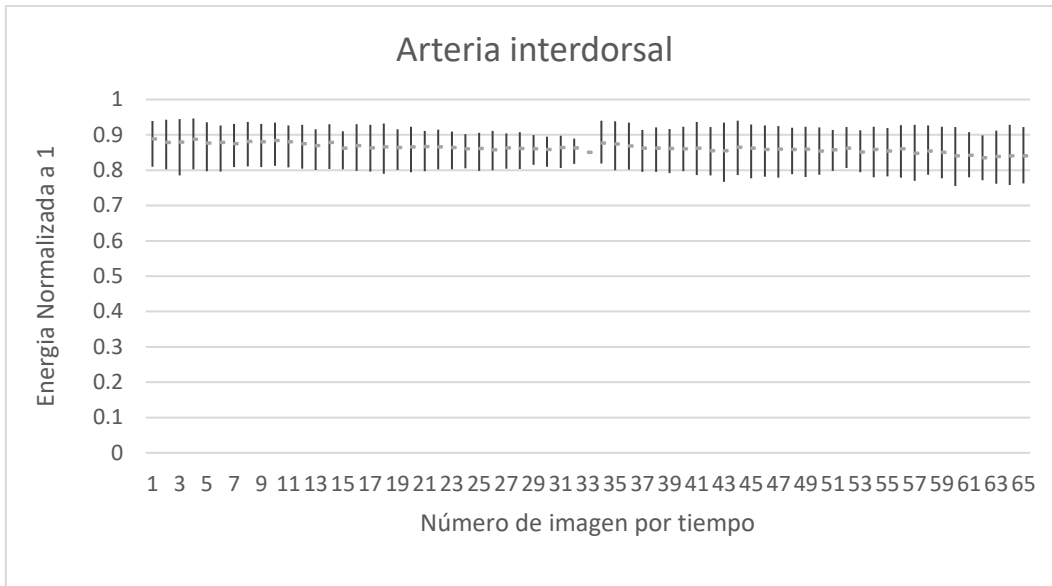


Figura 12. Comportamiento de la energía en la zona de arteria interdorsal grupo control.

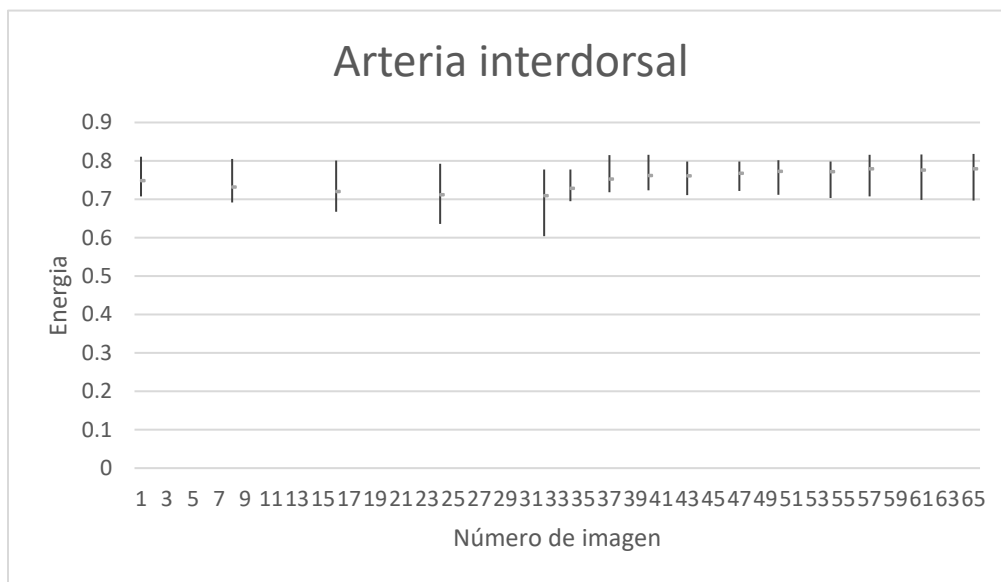


Figura 13. Comportamiento de la energía en la zona de arteria interdorsal grupo con neuropatía leve.

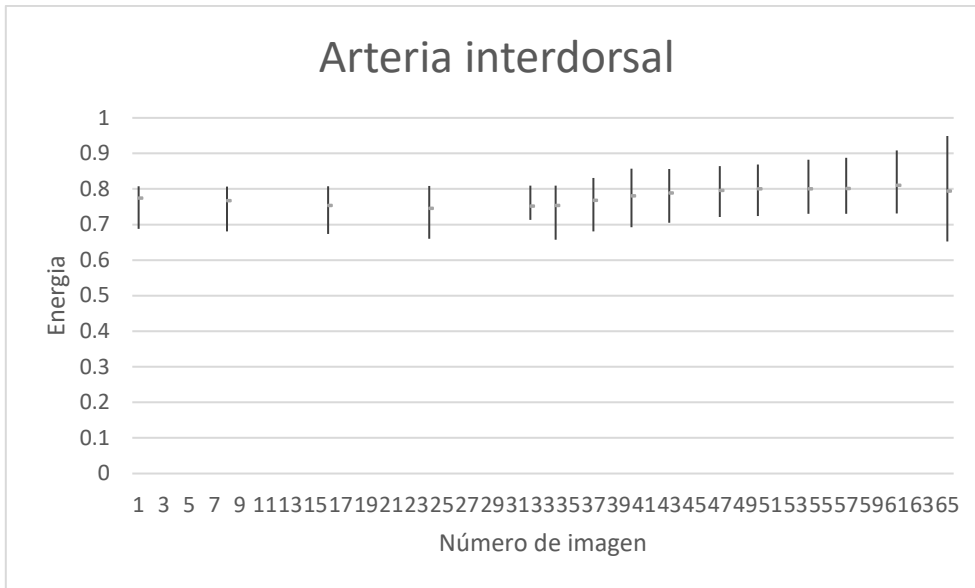


Figura 14. Comportamiento de la energía en la zona de arteria interdorsal grupo con neuropatía moderada.

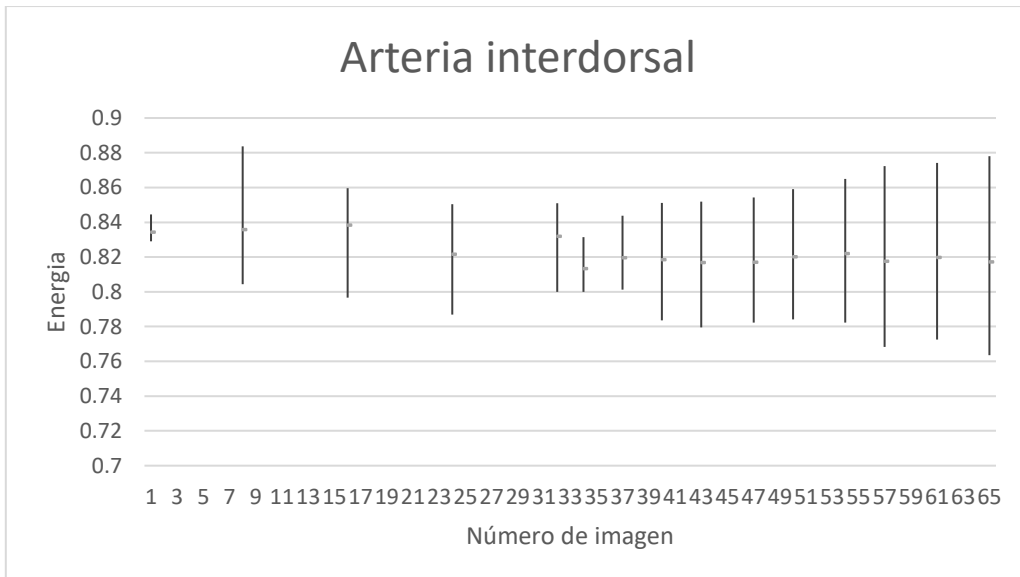


Figura 15. Comportamiento de la energía en la zona de arteria interdorsal grupo con neuropatía severa.

Otra zona que se consideró interesante es aquella situada justo arriba de la arteria del dedo hallux, marcada con el número 5 en la Figura 10. En el grupo control, la energía en promedio tiende a bajar cuando el pie se somete al pulso negativo, y lo que se observa es que aun

después de quitar el pulso negativo el decremento en el promedio de las energías sigue a la baja (ver Figura 16), lamentablemente la gran variabilidad no permite definir correctamente esta aseveración. En el caso de las personas con neuropatía leve. El efecto comienza a revertirse, esto es mientras el pulso negativo está presente, la energía promedio baja, pero cuando el pulso se quita la energía promedio empieza a incrementarse (Figura 17), pero no se puede concluir adecuadamente ya que la variabilidad en las energías es mucha cuando el pulso negativo ya no está presente. Al contrario, sucede en las personas con neuropatía moderada y severa en donde las energías mantienen una gran variabilidad cuando el pulso negativo está presente y cuando este se elimina muestran un comportamiento que pudiera ser utilizado para clasificarlos (Figuras 18 y 19).

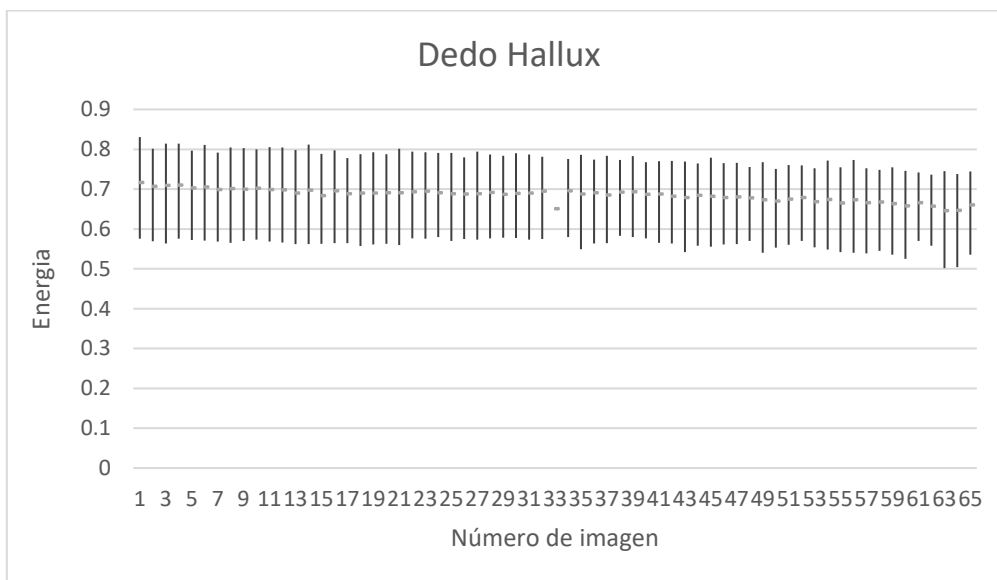


Figura 16. Comportamiento de la energía en la zona de arteria sobre el dedo hallux grupo control.

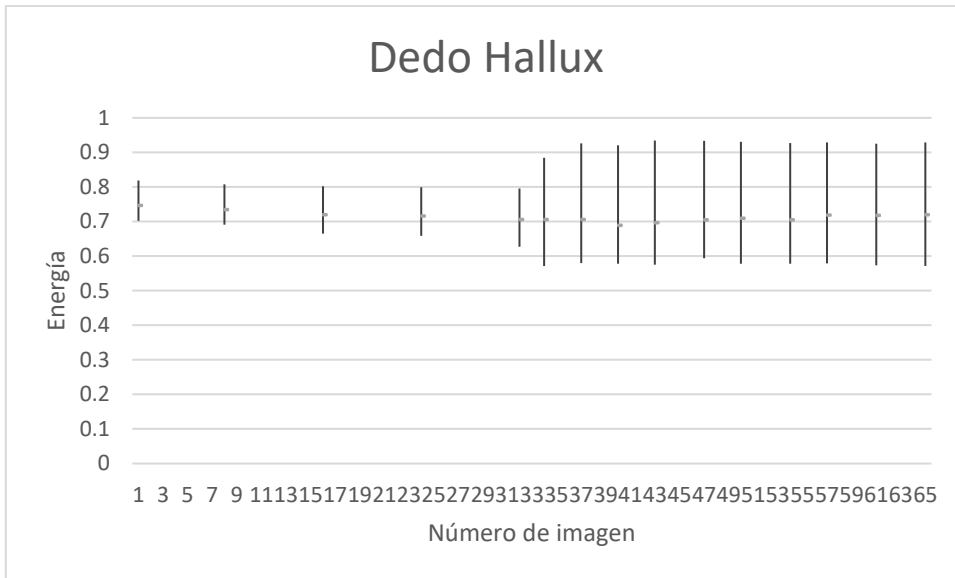


Figura 17. Comportamiento de la energía en la zona de arteria sobre el hallux grupo con neuropatía leve.

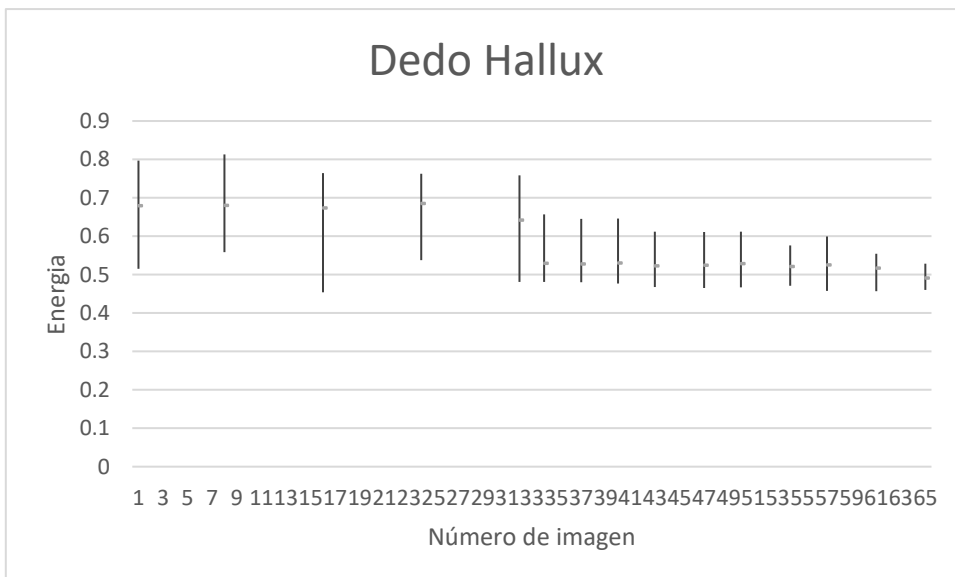


Figura 18. Comportamiento de la energía en la zona de arteria sobre el hallux grupo con neuropatía moderada.

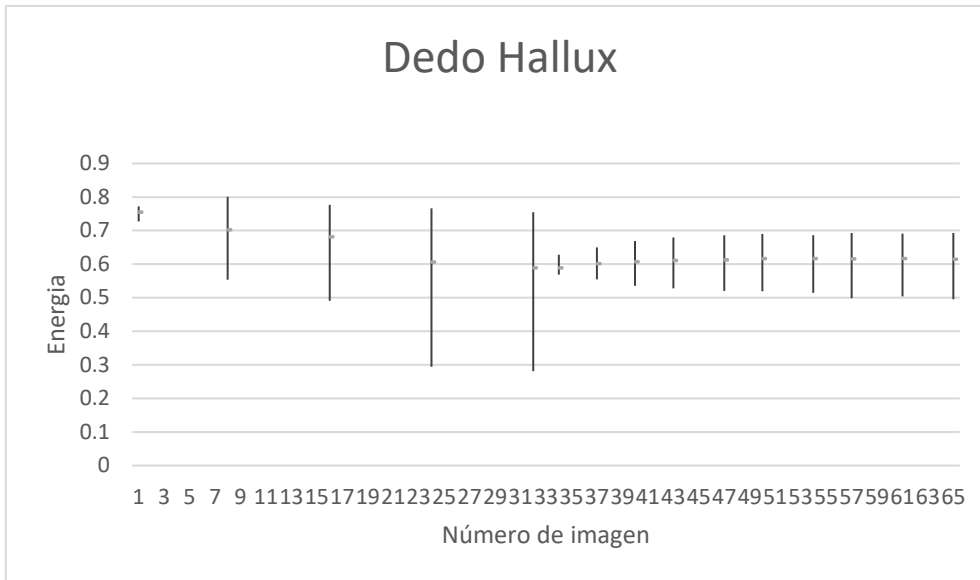


Figura 19. Comportamiento de la energía en la zona de arteria sobre el hallux grupo con neuropatía severa.

Finalmente, otra de las zonas que podría resultar interesante para su uso en la clasificación es la que está marcada en la Figura 10 con el número 7, una de las puntas de los dedos, en este caso la del segundo. En personas sin complicaciones se observa de nuevo el comportamiento de disminuir la energía a medida que pasa el tiempo, incluso cuando el pulso negativo ya no está presente (Figura 20). Pero a medida que la neuropatía avanza la energía presenta un comportamiento al alza una vez que el pulso negativo es retirado (Figuras 21,22,23); lo que pudiera ser un buen indicio para valorar el grado de neuropatía.

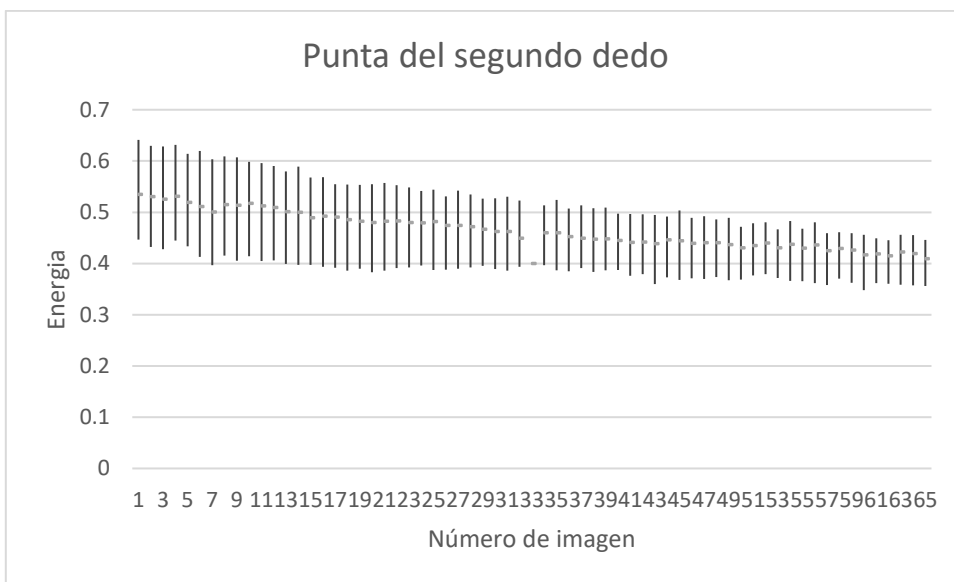


Figura 20. Comportamiento de la energía en la punta del segundo dedo grupo control.

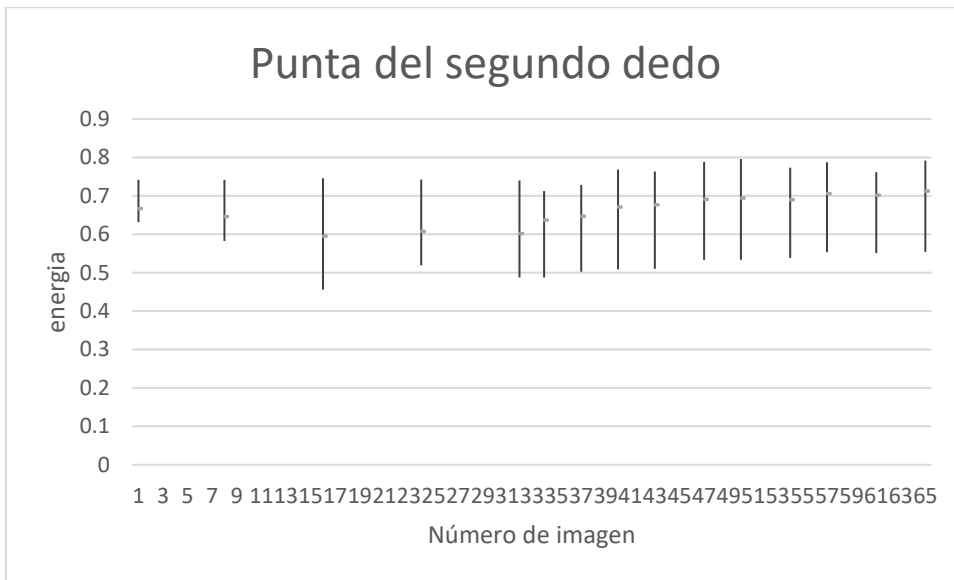


Figura 21. Comportamiento de la energía en la punta del segundo dedo grupo con neuropatía leve.



Figura 22. Comportamiento de la energía en la punta del segundo dedo grupo con neuropatía moderada.



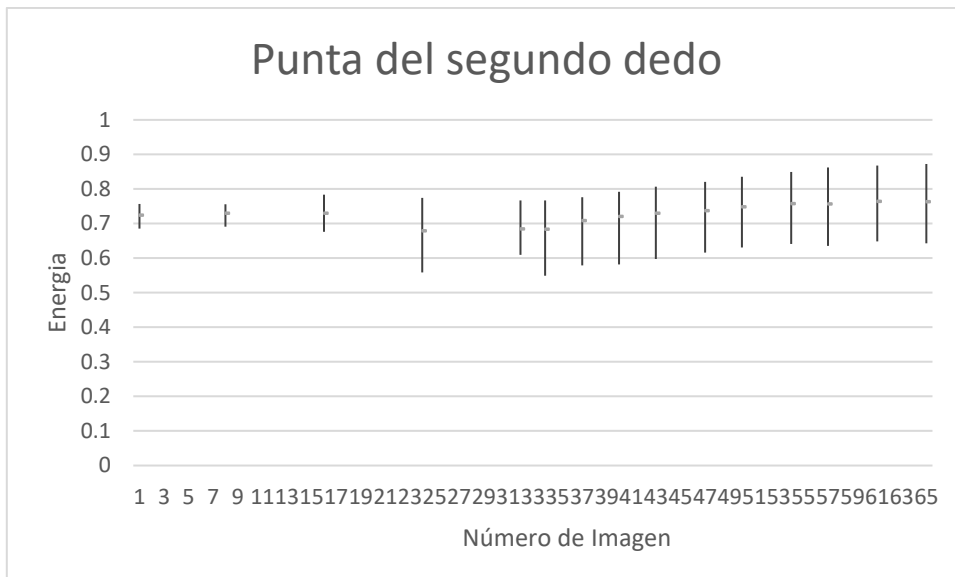


Figura 23. Comportamiento de la energía en la punta del segundo dedo grupo con neuropatía severa.

Basándose únicamente en los parámetros que pudieron ser capturados y analizados con la cámara infrarroja y el programa hecho en MatLab se puede hacer una buena distinción entre pacientes que no tienen complicaciones de pie diabético, y los que si la tienen. Estos resultados indican que la imagen térmica infrarroja avanzada puede ser aplicable como herramienta de diagnóstico para la detección automatizada no invasiva de los signos de la enfermedad del pie diabético. Esto puede aplicarse para la detección precoz y el tratamiento oportuno de las complicaciones del pie diabético, lo que podría contribuir a la prevención de consecuencias más devastadoras.

## CONCLUSIONES

Aunque el estudio se trató de llevar a cabo cuidadosamente hubo varias variables que no pudieron ser controladas, lo que ha tenido una repercusión en los resultados obtenidos. Se observa una gran variabilidad en los resultados de las energías en el tiempo, lo que impide realizar una comparación correcta entre los participantes de los mismos grados de neuropatía, debido a que el control electrónico implementado no logró ser correctamente acoplado al sistema de enfriamiento que se utilizó, lo que causó que el problema inicial de

variación en la temperatura de la cabina a través del tiempo se mantuviera, esto afecto la correcta adquisición de las imágenes, sin embargo, a través del uso de la piedra volcánica, se pudo mejorar y compensar la variabilidad de la energía en el tiempo, ya que la temperatura de la piedra (que no varía considerablemente su emisividad) permite observar estos cambios en la temperatura de la cabina a través del tiempo y compensarlos.

Sin embargo y pese a no lograr un control total de las variables involucradas en el proyecto, el resultado de las pruebas hechas a los voluntarios, en algunas regiones seleccionadas, en donde se les podía dar seguimiento de los transientes con un comportamiento similar entre cada grupo, muestra los diferentes niveles de energía dependiendo del grupo en el que se encuentran, esto es, los pacientes diabéticos con más daño neuropático tienen un nivel de energía más bajo y con poca respuesta a los pulsos de calor al cual fueron sometidos, al contrario del grupo control, donde las respuestas fueron más rápidas y con niveles de energía más altos.

Una de las limitantes más importantes de este trabajo ha sido el procesamiento digital de las imágenes, ya que no fue posible compensar de manera automática los movimientos en las extremidades de las personas de manera automática, esto causo que la adquisición de las energías de las 20 zonas consideradas se realizara de manera manual, y considerando áreas que al final se ha observado fueron demasiado grandes, lo que ha provocado que el cálculo de las energías no refleje de manera fiel el comportamiento específico del área, ya que se ha promediado energía que corresponde a un área mayor. Esto una consideración importante a mejorar en un trabajo a futuro.

Las futuras trayectorias que deberían ser tomadas en cuenta para trabajos futuros son el control de temperatura total dentro y fuera de la cabina, del equipo de refrigeración, selección de personas más excluyente, de los 4 grupos clasificados, todos con un rango de edad y peso parecido, programa de análisis de imagen que tome en cuenta el movimiento continuo ya sea por reflejo o cansancio del pie, y la selección de las áreas a examinar que no sean muy grandes y comprendan los vasos sanguíneos más notables.

## GLOSARIO

<sup>1</sup> Subluxación es un desplazamiento de una articulación por estiramiento de tejidos blandos. Este tipo de trastornos aprisionan nervios, desencadenando múltiples problemas físicos, reduciendo la movilidad articular, pues afectan directamente la biomecánica corporal. Cuando se aprisiona un nervio queda comprometida la funcionalidad articular asociada al mismo. Por tal razón las subluxaciones tienen un efecto dominó en perjuicio de la salud y el bienestar general del individuo.

<sup>2</sup> Stefan-Boltzmann  $\sigma = (5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4})$ : una constante física simbolizada por la letra griega  $\sigma$ , es la constante de proporcionalidad en la ley de Stefan-Boltzmann, donde «la intensidad (física) total irradiada sobre todas las longitudes de onda se incrementa a medida que aumenta la temperatura» de un cuerpo negro que es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura termodinámica.

<sup>3</sup> La constante de Boltzmann ( $k$  o  $k_B$ ) es la constante física que relaciona temperatura absoluta y energía. Se llama así por el físico austriaco Ludwig Boltzmann, quien hizo importantes contribuciones a la teoría de la mecánica estadística, en la que esta constante desempeña un papel fundamental. Su valor es (en SI):  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ .

<sup>4</sup> Hallux es el primer orjejo, primer dedo del pie o dedo grande.

# APENDICES

## APENDICE A

### **CUESTIONARIOS Y CONSENTIMIENTOS PARA LAS PERSONAS VOLUNTARIAS**

Estudio: **Evaluación de uso de termografía para diagnóstico de neuropatía en los dedos de los pies**

El objetivo de este estudio es evaluar el uso de termografía para el diagnóstico de neuropatía en pie diabético por medio de imágenes de Infrarrojo.

La participación en este estudio requiere que el participante se comprometa a cooperar con la prestación de sus pies desnudos para la adquisición de las imágenes de infrarrojo.

Al participante se le pedirá que asista al Departamento de Ciencias Médicas, en al menos dos ocasiones para validar el procedimiento.

El participar en el estudio no garantiza una mejoría en la condición isquémica, enfermedad arterial periférica, neuropatía de los dedos, ni mejorar la condición de pie diabético.

El estudio no representa ningún peligro para el bienestar del participante ni tiene ningún efecto colateral, ya que, la técnica utilizada involucra la adquisición de imágenes de infrarrojo, lo cual es no invasivo. El pulso térmico de enfriado se realizará en condiciones controladas en higiene y tampoco representa riesgo alguno.

Los participantes deberán llenar un cuestionario antes de comenzar el estudio.

Los participantes expresaran por escrito su deseo de participar en el estudio.

El investigador se compromete a mantener en todo momento el anonimato del participante.

Los participantes tienen el derecho de retirarse del estudio, sin dar ninguna explicación y no se les hará ninguna pregunta, ni se les obligará a continuar en el estudio.

#### **Consentimiento e información**

Esta ficha es usada para proveer información al participante acerca de la investigación y para documentar por escrito el consentimiento informado, asentamiento del menor y/o permiso parental.

Si la ficha está siendo usada para documentar permiso parental, se debe adjuntar una copia de cualquier cuestionario o encuesta realizada.

Investigadores responsables:

Dr. Carlos Villaseñor Mora e Ing. Gabriela Barrera Díaz

Título del proyecto:

“Evaluación del uso de termografía pulsada para diagnóstico de neuropatías periféricas en el pie diabético”

Estoy solicitando su participación voluntaria en el proyecto. Favor de leer la siguiente información acerca del proyecto. Si le gustaría participar, favor de firmar en el espacio correspondiente.

Propósito del proyecto:

Hacer pruebas en personas con diferentes niveles de neuropatía, para evaluar el uso de termografía pulsada que ayuda a distinguir estos niveles, la valoración de estos niveles, basado en las imágenes adquiridas con la cámara infrarroja.

Si participa se le pedirá que:

Introduzca el pie descubierto en un enfriador con una temperatura aproximada a los -6°C, por 5 min, y después mantenerlo a temperatura ambiente por 45 min.

Tiempo requerido para la participación:

10 minutos

Riesgos potenciales del estudio:

Ninguno

Beneficios:

Apoyo en la investigación de nuevas técnicas de diagnóstico de neuropatía en personas diabéticas. Que con lleva el compromiso de hacer de conocimiento al hospital o institución que nos apoye.

Confidencialidad:

Estrictamente confidencial, en caso de no querer dar tus datos esta investigación, no te obliga ni fuerza a hacerlo.

Participación Voluntaria:

La participación de este estudio es completamente voluntaria. Si decides no participar no habrá alguna consecuencia negativa. Es importante tener en cuenta que, si participas, puedes dejar el estudio en cualquier momento y puedes decidir no responder cualquier pregunta específica.

Al firmar esta ficha manifiesto que he leído y comprendido la información dada y doy mi consentimiento/asentamiento para participar libre y voluntariamente o permiso para que mi hijo participe.

Consentimiento de adulto informado o asentamiento del menor

Firma del participante en la investigación

\_\_\_\_\_

Firma del Permiso parental o el tutor (cuando aplique)

\_\_\_\_\_

FECHA: \_\_\_\_\_

**Cuestionario y consentimiento que deberá ser llenado por el participante.**

**Estudio: Evaluación del uso de termografía pulsada para el diagnóstico de neuropatías en pie diabético**

Nombre del paciente \_\_\_\_\_

Ocupación: \_\_\_\_\_

Fecha de Nacimiento: \_\_\_\_\_

Sexo (M/F): \_\_\_\_ Altura: \_\_\_\_\_ Peso: \_\_\_\_\_ Edad: \_\_\_\_\_

### Antecedentes heredofamiliares (AHF)

Alguien de su familia tiene o ha tenido

- Diabetes
- Cáncer
- Problemas del corazón
- Neuropatías
- Problemas de los riñones
- Hipertensión
- Algún otro padecimiento que considere importante ¿Cuál?
- Ninguna importante

### Antecedentes patológicos

Fuma:  Si  No

Cuantos al día:

De 1-4       de 5-9       de 10 en adelante

Bebe:

Poco       Más o menos       Mucho

Usa drogas:  Si  No

Padece alguna enfermedad:

- Diabetes
- Problemas cardiacos
- Hipertensión
- Problemas renales
- Cáncer
- Algún otro padecimiento importante:

\_\_\_\_\_

Si sufre diabetes indique el tiempo que la padece: \_\_\_\_\_

Ha tenido alguna cirugía  Sí  No

¿De qué? \_\_\_\_\_

Ha tenido fracturas en los pies  Sí  No

¿Está tomando algún medicamento?  Sí  No

En caso afirmativo ¿Cuál? \_\_\_\_\_

¿A qué hora fue su último alimento? \_\_\_\_\_



Hizo alguna actividad física en el día, si es un sí, ¿a qué hora? \_\_\_\_\_

**Para ser llenado por el evaluador**

Observaciones

---

---

---

---

Temp. Corporal:

Temp. Ambiental:

Temp. Del sistema

Temp. Del pie:

---

Nombre y firma del participante

Fecha: \_\_\_\_\_

## APENDICE B

Programa "sensa temperatura con pantalla LCD" basado en un sistema de Arduino

```
#include <LiquidCrystal.h>

//Inicializamos el display con los pines de interfaz
LiquidCrystal lcd (6,5,4,2,8,9);
float temperatura = A3; //variable para la temperatura
float temp1 = A4;
float temp2 = A5;
float tempfinal = A2;
int fan = 3; //pin digital donde conectar el ventilador
/*Creamos un arreglo de 8 bytes
donde haremos el caracter 'o' que necesitamos
*/
byte charGrado[8] = {
  0b01110,
  0b01010,
  0b01110,
  0b00000,
  0b00000,
  0b00000,
  0b00000,
  0b00000
};
void setup(){

  Serial.begin (9600); //inicia comunicacion serial
  lcd.begin(16, 2);

  pinMode(3,OUTPUT);//
}

void loop(){
  //Calcula la temperatura usando como referencia 5v
  temperatura = (5.0 * analogRead(A3)*100.0)/1023.0;
  temp1 = (5.0 * analogRead(A4)*100.0)/1023.0;
  temp2 = (5.0 * analogRead(A5)*100.0)/1023.0;
  tempfinal = (temperatura + temp1 + temp2)/3;

  lcd.setCursor(0,0);
  //Imprimimos el mensaje que esta dentro del parentesis
  lcd.print("La temperatura");
  //Movemos el cursor para escribir en la primer columna, segundo renglon
  lcd.setCursor(0, 1);
```

```
lcd.print("es");
//En esta parte imprimimos la temperatura en el Display
lcd.print(tempfinal);
//Aqui imprimimos el caracter 'o'
lcd.write(byte(0));
lcd.print("C");
//Hacemos un delay para que el display muestre el mensaje
delay(2000);

//Borramos el display
lcd.clear();

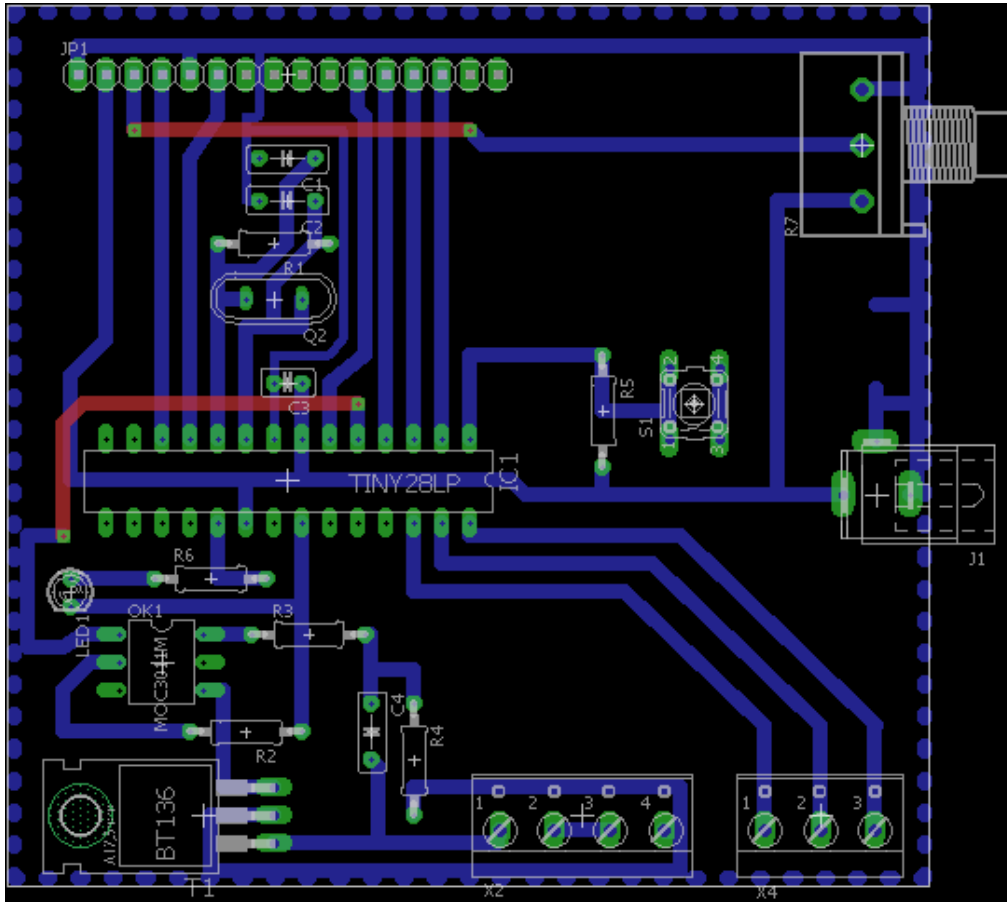
//esto enciende y apaga el ventlador
if (tempfinal > 28){//cambiar numero en funcion de lo que se desee
  analogWrite(3, 255);

}else
analogWrite(3, 0);

delay (2000); //espera 3 segundos para la siguiente medición
}
```

# APENDICE C

PCB de circuito para sensor la temperatura



## APENDICE D

Programa en Matlab para hacer la comparación de cuerpo negro y piedra basados en intensidades de energía.

```
clear all
clc
listado = dir('C:\Users\Gabriela\Documents\MATLAB\Referencias2\*.png');
%el formato de imagen puede ser modificado.
gb = imread('piedra2_0.png'); %al ser muestras diferentes se pueden
cambiar los nombres para la comparación de cada par de imagenes
%seleccion del punto de interes
uiwait(msgbox('Selecciona el area del cuerpo negro','Recorta'));
[Ib,rectb] = imcrop(gb);
close
Icrgrb = Ib;
[o,p] = size(Ib);

uiwait(msgbox('Selecciona el area de la piedra','Recorta'));
[Ii,recti] = imcrop(gb); % abre la imagen de referencia y selecciona el
grano
close
Icrgri =Ii;
[q,r] = size(Ii);

for k = 200:1173
    nim = num2str(k-1);
    name_file = listado(k).name; %Obtiene el nombre de los archivos
    I1 = imread(['piedra2_',nim, '.png']); %Lee imagenes
    [I1pi] = imcrop(I1,rectb); %obtiene los puntos de interes para cada
imagen
    %I1grpi = rgb2gray(I1pi); %saca un arreglo con las intensidades
del punto de interes
    E=sum(sum((double(I1pi)).^2))/((numel(I1pi))*(65535^2)); % obtiene
la energia de dicho punto
    vec(k)=E; %crea un vector que guarde las energias
    %T(k) = vec(k)/(sig^4);
    a = mean(vec); %encontramos el maximo que ne este particular caso
es la energia con la fuente incluida
    vecc(k)= ((a)-vec(k))/a; %hacemos un vector con la reflectividad y
un valor de cero que corresponde a la comparacion de la imagen consigo
misma

end

for k = 200:1173
    nim = num2str(k-1);
    name_file = listado(k).name; %Obtiene el nombre de los archivos
    I2 = imread(['piedra2_',nim, '.png']); %Lee imagenes
    [I2pi] = imcrop(I2,recti); %obtiene los puntos de interes para cada
imagen
    %I1grpi = rgb2gray(I1pi); %saca un arreglo con las intensidades
del punto de interes
    E1=sum(sum((double(I2pi)).^2))/((numel(I2pi))*(65535^2)); %
obtiene la energia de dicho punto
    vecl(k)=E1; %crea un vector que guarde las energias
```

```
%T(k) = vec(k)/(sig^4);  
a1 = mean(vec1); %encontramos el maximo que ne este particular  
caso es la energia con la fuente incluida  
vecc2(k)= ((a1)-vec1(k))/a1; %hacemos un vector con la  
reflectividad y un valor de cero que corresponde a la comparacion de la  
imagen consigo misma  
  
end  
  
subplot(2,1,1);plot(vec);  
subplot(2,1,2);plot(vec1);
```

## APENDICE E

Programa principal en donde se analizan las imágenes de los pies tomadas con cámara infrarroja

```
clc;
clear all;
close all;
% listado = dir('C:\Users\Gabriela\Documents\MATLAB\compara'); %el
formato de imagen puede ser modificado.
ref = imread('izq_0.png'); % imagen de referencia
numptchar = inputdlg('Indica de puntos de interes:', 'Puntos de
Interes', [1 30]);
numptos = str2num(numptchar{:});
for j = 1:numptos
uiwait(msgbox('Selecciona el area de interes', 'Recorta'));
[nointeresaIM, rep(j, 1:4)] = imcrop(ref);
close
end
uiwait(msgbox('Selecciona el black body', 'Recorta'));
[rocaIM, del] = imcrop(ref);
close
y= sum(sum(double(rocaIM)))/(numel(rocaIM));
num = 803
% for k = 1:(length(listado)-num)
for k=1:num+1
nim = num2str(k-1);
I1 = imread(['izq_', nim, '.png']);
imarock = imcrop(I1, del);
u = sum(sum(double(imarock)))/(numel(imarock));
difer = y-u;
I1= I1+difer;
for n = 1:numptos
I1crbrb = imcrop(I1, rep(n, :)); %los dos puntos es para obtener
todos los datos de columna o renglon,
close
P=sum(sum(double(I1crbrb)))/(numel(I1crbrb));
%
E=sum(sum((double(I1crbrb)).^2))/((numel(I1crbrb))*(65535^2));
vec(k, n)=P;

end
end

xlswrite('pies.xlsx', vec, 'gaby', 'A1');

%plot(vec);
```

## BIBLIOGRAFIA

- A.D.A.M. (15 de ABRIL de 2017). *Hola doctor*. Obtenido de <https://holadoctor.com/es/enfermedades-y-condiciones/circulaci%C3%B3n-de-la-sangre-diab%C3%A9tica-en-el-pie>
- AG, T. (octubre de 2012). *We measure it. testo*. Obtenido de <https://www.testo.com.ar/camaras-termograficas/>
- Antonio Martínez-Conde Fernández, J. C. (2002). NEUROPATIA DIABETICA. *Hosp. Gral Dr. M. Gea Gonzalez*, 5(1 y 2), 7-23.
- B.B.Lahiri, S. T. (2012). Medical Applications of infrared termography. *elsevier*.
- Barreto, A. G. (2008). Radiación de un Cuerpo Negro, ley de emision de Planck, una breve introducción. *Instituto de Astronomía, UNAM*.
- C. Villaseñor-Mora, F. S.-M.-C. (2009). An indirect skin emissivity measurement in the infrared thermal range through reflection of a CO2 laser beam. *REVISTA MEXICANA DE FISICA*, 387-392.
- DIABETES, F. I. (2015.). *diabetes en Mexico* (Vol. 7° edición). IDF Diabetes Atlas,.
- distancia, C. p. (2016). *cide@d*. Obtenido de <http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/2esobiologia/2quincena2/pdf/quincena2.pdf>
- Domingo, A. M. (2011). *transmision de calor*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- Ebersalud, R. (2007). *Complicaciones de la Diabetes*. Madrid.
- ejemplos, E. d. (2017). *ejemplos*. Obtenido de <http://www.ejemplos.co/10-ejemplos-de-conduccion-conveccion-y-radiacion/>
- Gámiz, J. L. (2007). La diabetes mellitus entendida como una enfermedad cardiovascular de origen metabólico . *Servicio de Cardiología. Hospital Universitario Ramón y Cajal. Madrid. España.*, 7:12H-19H .
- Garcia, A. F. (diciembre de 2010). *curso interactivo de fisica en internet*. Obtenido de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>
- Guadalupe Castro, G. L. (2009). Guía clínica basada en evidencia para el manejo del pie diabético. *Medicina Interna de Mexico*, 481-526.



- Hackforth, H. L. (1960). *Infrared Radiation*. New York, Toronto, Londres: Mc Graw- Hill book Company, Inc.
- Health, N. I. (2011). Neuropatías diabéticas: el daño de los nervios en personas con diabetes. *U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES* .
- Herman WH, P.-B. R. (2012). Use of the Michigan Neuropathy Screening Instrument as a measure of distal symmetrical peripheral neuropathy in Type 1 diabetes: results from the Diabetes Control and Complications Trial. *Diabetic Medicine*, 29(7), 937-944.
- Herman WH, P.-B. R. (s.f.). Herman WH, Pop-Busui R, Braffett BH, Martin CL, Cleary PA, Albers JW, et al. Use of the Michigan Neuropathy Screening Instrument as a measure of distal symmetrical peripheral neuropathy in Type 1 diabetes: results from the Diabetes Control and Complicatio.
- J.P, H. (1998). *Transferencia de calor*. Mc. Graw Hill.
- Jirkovska, A. (2001). Care of patients with the diabetic foot syndrome based on an international consensus. *Czech*, 230-233.
- Lijo, J. M. (2007). *Manual de Refrigeracion*. Barcelona: Reverte.
- National Institute for Clinical Excellence (NICE), N. C. (2004). Type 2 Diabetes. Prevention and Management of Foot Problems. *Clinical guideline 10*, 104.
- Rogelio Soto Ayala, S. E. (agosto de 2009). Radiacion de cuerpo negro. (UNAM, Ed.) *NATURALIS*.
- Santiago Burbano de Ercilla, C. G. (2003). *Fisica General*. TEBAR.
- Secretaria de Salud. (marzzo-abril 2015 de 2015). Acciones contra la obesidad y la diabetes. *boletin epidemiologico*.
- William L. Wolfe, G. J. (1978). *The infrared handbook*.
- Y.Fujiwara, T. I. (2000). Thermographic measurement of skin temperature recovery time of extremities in patients with type 2 diabetes mellitus. *Endocrinology & diabetes*, 463-469.



**Asunto:** Carta aval de sinodal

León, Gto., Noviembre 11, 2017

**Dr. David Yves Ghislain Delepine**  
**Director**  
**División de Ciencias e Ingenierías**

**Estimado Dr Ghislain Delepine:**

Por medio de la presente hago constar que he revisado la tesis titulada: "**Evaluación del uso de termografía pulsada para diagnóstico de neuropatía en pie diabético**" que para obtener el grado de Maestra en Ciencias Aplicadas presenta la Ing. **Gabriela Barrera Díaz**.

En dicho trabajo se presenta el estudio de la factibilidad del uso de termografía pulsada para el diagnóstico de la condición de pie diabético, de tal manera que se contribuya a mejorar la calidad de vida de los pacientes diabéticos. Este tipo de estudio es muy interesante debido a que detalla la forma en que se construyó un equipo de refrigeración, el protocolo para la adquisición y el análisis de las imágenes utilizado para el procesamiento de imágenes.

Le comunico que he discutido cuidadosamente dicha tesis con el sustentante, a quien le he hecho llegar mis comentarios y correcciones. Le expreso además que en lo general me parece un buen trabajo por lo que avalo su presentación.

Sin otro particular por el momento, aprovecho para reiterarle las seguridades de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Miguel Ángel Vallejo Hernández", written over a horizontal line.

**DR. MIGUEL ÁNGEL VALLEJO HERNÁNDEZ**  
**PROFESOR INVESTIGADOR**  
**Sinodal**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FÍSICA,**  
**DIVISION DE CIENCIAS E INGENIERÍAS, CAMPUS LEÓN**

Calle del Comercio 103, Zona Centro del Comercio, C.P. 37450 León, Gto., México. Tel. (477) 788 5400. Fax: (477) 788 5400 ext. 8449. <http://www.fisica.univ.guanajuato.mx>



UNIVERSIDAD  
DE GUANAJUATO

León, Gto. a 1 de Noviembre de 2017

Dr. David Yves Ghislain Delepine  
Director  
División Ciencias e Ingenierías

Estimado Dr. Delepine:

Por el presente me permito hacer de su conocimiento que he revisado el trabajo de tesis del Ing. Gabriel Barrera Díaz, titulado: **“Evaluación del uso de termografía pulsada para diagnóstico de neuropatía en pie diabético”**, y considero que cumple con los criterios de originalidad y calidad para obtener el grado de Maestra en Ciencias Aplicadas.

Sin otro particular me despido de usted, aprovechando la oportunidad la enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Dra. Ma. Eugenia Garay Sevilla  
Profesor Investigador titular “C”  
Departamento de Ciencias Médicas



Asunto: aprobación de trabajo de tesis  
León, Gto., a 13 de noviembre de 2017

**DR. DAVID DELEPINE**  
**DIRECTOR DE LA**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍAS**  
**CAMPUS LEÓN**  
**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO**

Respetable Dr. Delepine:

En mi carácter de revisor del trabajo de tesis de licenciatura presentado por la alumna **Gabriela Barrera Díaz**, para optar por el grado de maestra en Ciencias Aplicadas y cuyo título es:

***EVALUACIÓN DEL USO DE TERMOGRAFÍA PULSADA PARA DIAGNÓSTICO DE NEUROPATÍA EN PIE DIABÉTICO***

me permito comunicarle que considero que dicha tesis reúne los requisitos y méritos suficientes para poder continuar con sus trámites de solicitud de examen de grado.

Agradezco mucho su atención y aprovecho para enviarle un saludo cordial.

ATENTAMENTE  
"LA VERDAD OS HARÁ LIBRES"

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la de Víctor Hugo Hernández González.

DR. VÍCTOR HUGO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ  
PROFESOR INVESTIGADOR