

UPT

INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y DESARROLLO

Revista Científica



**UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE TULANCINGO**

MEMORIAS

VOL. 1 2018

ISBN: 978-607-95742-1-5

Métodos y técnicas para el diagnóstico y tratamiento de úlceras en pie diabético: revisión

J. Estrada Berni¹, J. A. Delgado Atencio², M. Cunill Rodríguez³, A. Cárdenas Rosales⁴, R. Sánchez Lozada⁵

Resumen—La diabetes mellitus se ha posicionado como una de las enfermedades con mayor índice de crecimiento entre la población mundial; las complicaciones que se derivan de este padecimiento causan daños considerables en la salud, el estado de ánimo y la economía de los pacientes afectados sin contar que el estado también dedica gastos considerables a resolver y atender esta problemática. El pie diabético es una de las complicaciones más alarmantes de este grave problema. En este trabajo presentamos una revisión de los principales métodos y técnicas ópticas (tradicionales y modernos) utilizados para realizar el diagnóstico y tratamiento de este padecimiento.

Palabras Clave. Diabetes, Pie Diabético, Espectroscopia, Hiperspectral, Fluorescencia.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las complicaciones más preocupantes derivada de la diabetes es el pie diabético, el cual la Organización Mundial de la Salud (OMS) define como la ulceración, infección y destrucción de los tejidos del pie. Este padecimiento ha ido en aumento afectando a un número cada vez mayor de pacientes diabéticos en el mundo (aproximadamente 2 millones anualmente). El riesgo latente que presentan los pacientes diabéticos de desarrollar úlceras en las extremidades inferiores, es la principal causa de amputaciones no traumáticas en el mundo [1].

El diagnóstico temprano de la aparición de lesiones de la piel permite tomar las medidas necesarias para evitar que esta complicación derive en una no deseada amputación. Tradicionalmente en el ámbito médico se utilizan métodos y técnicas de exploración, basadas principalmente en la observación de cambios a nivel dérmico o anatómico con resultados poco satisfactorios a nivel de prevención, ya que cuando los cambios son observables el daño muchas veces ya es avanzado. Desde hace algunas décadas las investigaciones realizadas en el campo de la óptica se han orientado también a resolver problemas intrínsecos de la medicina; desarrollando en muchos casos nuevas técnicas y métodos que permiten el diagnóstico precoz de disímiles enfermedades y una evaluación cuantitativa del estado de

salud de varios órganos del cuerpo humano. En este trabajo nos enfocamos a realizar una revisión preliminar de los diferentes métodos ópticos que han sido desarrollados o adaptados para explorar de los tantos órganos que existen uno muy peculiar, la piel humana, y en específico de las lesiones, a las úlceras que aparecen en pacientes con pie diabético en diferentes estudios de las mismas. La revisión se centra en exponer los objetivos, arreglos ópticos y alcances obtenidos por los autores de estos trabajos de investigación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó la búsqueda de diferentes trabajos relacionados al tema de enfoque (evaluación del estado de salud de tejidos de/en los pies del paciente diabético), en primera instancia se obtuvo información valiosa sobre las características generales de la diabetes mellitus así como los factores y circunstancias que dan origen a la misma. También se obtuvo información igualmente importante sobre las técnicas ópticas que en diversos trabajos de investigación se han aplicado para lograr un diagnóstico y tratamiento eficaz del pie diabético. Todo este cúmulo de información se localizó, en diferentes plataformas como lo son: 1) Buscadores académicos (SciElo, Google Scholar), 2) Editoriales Digitales (Elsevier, SPIE, OSA), 4) Redes sociales dedicadas a la difusión de la ciencia (ResearchGate), etc. Una revisión de los diversos trabajos ubicados y analizados se presenta a continuación.

III. DIABETES MELLITUS

La diabetes mellitus es considerada actualmente por la OMS (Organización Mundial de la Salud) como una epidemia, afectando según estimaciones del año 2014 a 422 millones de adultos en todo el mundo y se espera que esta cifra siga en aumento [2].

Esta patología puede definirse como el conjunto de enfermedades metabólicas que se caracteriza por un aumento anormal del nivel de glucosa que se encuentra en la sangre (hiperglucemia) [3]. Esta alteración puede estar relacionada o no con disminución de la producción de insulina.

La cronicidad de esta enfermedad viene acompañada de

^{1,2,3,4} Universidad Politécnica de Tulancingo Calle Ingenierías # 100. Col. Hualpalcabo, Tulancingo, Hidalgo, México. C.P. 43629
e-mail: {juan.estrada,jose.delgado,margarita.cunill,alejandra.cardenas}@upt.edu.mx ⁵Departamento de Investigación y Enseñanza, Hospital General Tulancingo e-mail: hgtulancingo.dptoens@hotmail.com

daño, disfunción e insuficiencia a largo plazo de diferentes órganos particularmente de los ojos, el corazón, los nervios, los riñones, la piel y los vasos sanguíneos. Aun cuando la falta en los niveles de glucosa sanguínea puede controlarse mediante prescripción médica y dieta, estas medidas no han logrado evitar que el paciente diabético desarrolle diversas complicaciones crónicas [3].

3.1 Complicaciones

Sin importar el tipo de diabetes que se padezca, esta puede generar complicaciones severas en diversas partes del organismo aumentando incluso la probabilidad de muerte prematura en el paciente diabético.

Entre las posibles complicaciones se pueden listar las siguientes: ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares, insuficiencia renal, amputación de extremidades inferiores, ceguera y deterioro neurológico, entre otros [2].

Dichas complicaciones pueden clasificarse en tres principales grupos a saber: complicaciones vasculares; de la microvasculatura o de la macrovasculatura y complicaciones no-vasculares. En la tabla 1 se muestra de forma resumida cada una de las complicaciones anteriores y la localización corporal donde se manifiestan así como la forma de afectación local.

Tabla 1. Clasificación de las complicaciones crónicas de la Diabetes Mellitus [4].

Complicaciones Microvasculares	Complicaciones Macrovasculares	Complicaciones No-Vasculares
Nefropatía diabética	Arteriopatía periférica	Oculares: glucoma, Cataratas.
Neuropatía diabética	Enfermedad cerebrovascular	Renales: necrosis papilar renal, infecciones urinarias.
Retinopatía diabética	Cardiopatía isquémica	Cutáneas
	Miocardiópatía diabética	Determinadas formas de neuropatía

Las complicaciones que afectan al pie diabético son tanto microvasculares como macrovasculares afectando localmente de forma severa la zona comprometida en un modo muy particular, de tal forma que merece especial atención y cuidado por parte de los especialistas médicos y personal de asistencia [4].

3.2 Úlceras en pie diabético

Cuando se explora a un diabético se debe prestar especial atención en sus pies con el fin de detectar problemas que en esencia pueden ser agrupados en cuatro grandes grupos: 1) pie neuropático, 2) pie isquémico, 3) pie neu-

roisquémico y 4) úlceras de pie diabético. En el pie neuropático se forman callosidades fácilmente, que con frecuencia son el origen de úlceras indoloras. Dos principales complicaciones se derivan de este problema como lo son la osteoartropatía de Charcot y el edema (hinchazón) neuropático. El pie isquémico, que a consecuencia de falta de circulación arterial adecuada se caracteriza por presentar la piel fría, pudiendo aparecer dolor en reposo y claudicación intermitente (dolor por calambres). Por otra parte, el pie neuroisquémico generalmente desarrolla alteraciones de neuropatía diabética (NPD). Finalmente, las úlceras de pie diabético son esencialmente las complicaciones más usuales tanto del pie neuropático, del pie isquémico y del pie neuroisquémico [4].

Las úlceras diabéticas se caracterizan por ser tórpidas y ser propensas a infección como se muestra en la Figura 1 que describe esquemáticamente la fisiología del pie diabético. En esta figura se aprecia la relación causa-efecto de los cuatro factores principales de la fisiología del pie diabético: la neuropatía y la arteriopatía que conducen a una destruc-

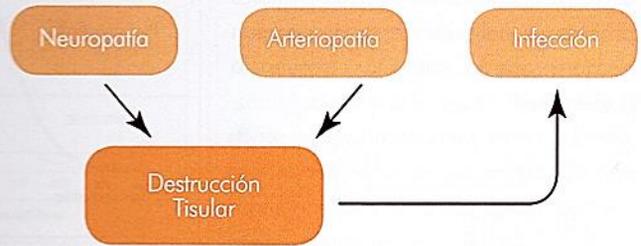


Figura 1. Fisiopatología del pie diabético [6].

ción tisular, fenómeno que a su vez propicia la aparición y desarrollo de infecciones [4]. Expertos han demostrado que de los problemas que se relacionan con el pie diabético un porcentaje entre 49% y 85% pueden ser prevenidos (incluso amputaciones) adoptándose medidas apropiadas como lo son: Buen control de la diabetes, cuidados adecuados del pie y un diagnóstico precoz de úlceras diabéticas [5].

IV. MÉTODOS TRADICIONALES PARA EL DIAGNÓSTICO DE ÚLCERAS EN PIE DIABÉTICO

4.1 Exploración del pie diabético

Una detección temprana de las alteraciones que sufre el pie en pacientes con diabetes es imperante debido a que más de la mitad de los pacientes no presentan síntomas incrementándose así el riesgo de sufrir úlceras, infección y amputación. La recomendación mínima es de una exploración anual en pacientes con riesgo de sufrir pie diabético.

Pasos para la exploración del pie diabético: un primer

paso es realizar la 1) **Anamnesis** que implica la recolección de datos de historial clínico con el objetivo de obtener un diagnóstico, así como la 2) **Inspección/Palpación** donde se exploran (físicamente) las partes del talón, el dorso y la región interdigital [6].

4.2 Inspección/Palpación

Los aspectos a considerar en la inspección/palpación son: Inspección periódica y examen del pie de riesgo.

4.2.1 INSPECCIÓN PERIÓDICA Y EXAMEN DE RIESGO

4.2.1.1 Examen clínico.

Se examina a los pacientes una vez al año al menos para detectar posibles problemas del pie y a pacientes con riesgo probado con más frecuencia (1-6 meses).

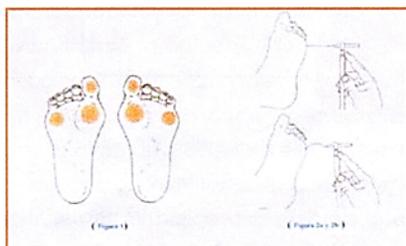


Figura 2. Clasificación de las complicaciones crónicas de la Diabetes Mellitus [4].

4.2.1.2 Exploración neurológica.

Implica la pérdida sensorial que se puede determinar usando ciertas técnicas como son: A) Percepción de la presión que hace uso del Monofilamento de Semmens-Weistein (Figura 2), B) Percepción de la vibración. Utiliza el diapasón de 128 Hz., C) Discriminación. Se realiza pinchando con un alfiler el dorso del pie, sin penetrar en la piel., D) Sensación táctil. Se usa algodón hidrófilo en el dorso del pie, E) Reflejos. Se evalúa el Reflejo del tendón de Aquiles su ausencia indica existencia de neuropatía sin embargo

su ausencia no la descarta [7].



Figura 3. Osteoartropatía autonómica diabética o pie de charcot. Radiografía que revela destrucción ósea [1].

Tabla 2. Exploraciones funcionales hemodinámicas de utilidad de aplicación en el diagnóstico de la isquemia crónica de extremidades [7].

Exploración funcional hemodinámica	Estudios a realizar
Doppler Bi-direccional	Índices tensionales. Curvas de velocimetría. Test de esfuerzo.
Eco-Doppler Modo B	Morfología Vascular
Pletismografía	Curvas de volumen de pulso Test de bloqueo simpático
Oximetría	Tensión transcutánea O ₂ , CO ₂
Termometría	Temperatura cutánea Test de bloqueo simpático
Lasser-Doppler	Circulación cutánea
Capilaroscopia	Morfología y dinámica capilar.

4.2.1.3 Exploración osteoarticular.

Se realiza una **radiografía simple** (Figura 3) para una exploración complementaria basal la cual tiene una especificidad y sensibilidad del 80% y 63% respectivamente en cuanto a la detección de lesiones ósea en los grados 0-1 de la escala de Wagner [7].

4.2.1.4 Exploración vascular. Exploración funcional hemodinámica (EFH Tabla 2).

Aun cuando el elemento vascular no es determinante en el desarrollo del pie diabético, si lo es en la evolución de las úlceras hacia las fases de necrosis y/o

gangrena [7].

V. TÉCNICAS ÓPTICAS PARA EL DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO DE ÚLCERAS EN PIE DIABÉTICO

Aun cuando los métodos tradicionales usados para el diagnóstico de úlceras en pie diabético dan resultados, estos no son óptimos de este modo se hace necesario la búsqueda de nuevos métodos y técnicas más efectivos para la evaluación del estado de salud de tejidos en riesgo. Actualmente en el campo de la óptica se desarrollan investigaciones que tienen por objetivo brindar soporte para realizar un eficaz diagnóstico precoz de tejidos ulcerados en pie diabético. Una revisión de diversos trabajos se muestra a continuación donde indicamos al inicio del desarrollo el propósito del trabajo y posteriormente describimos los aspectos ópticos fundamentales del mismo así como los resultados relevantes alcanzados. Los trabajos se describen en dos secciones diferentes denominadas respectivamente diagnóstico y tratamiento facilitando así la consulta de este artículo de revisión. Además, cada una de las secciones anteriores está dividida en subsecciones cuyo título responde básicamente a la técnica óptica utilizada.

5.1 Diagnóstico

5.1.1 Espectrometría Óptica de Reflexión Difusa

En el trabajo de investigación de Anand et al. [8] se aborda el monitoreo de la úlcera del pie diabético mediante

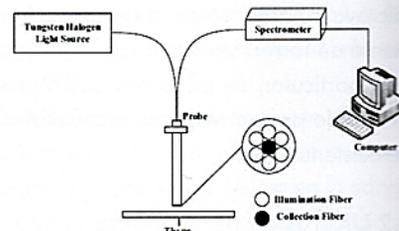


Figura 4. Arreglo experimental que incorpora una fuente de iluminación de luz halógena-tungsteno de banda amplia, una sonda de fibra óptica bifurcada con seis fibras ópticas para propiciar la iluminación y una para recolectar la luz difusa, un espectrómetro CCD, y una computadora personal (PC) para el manejo y control del experimento [8].

el uso de espectroscopia óptica de reflexión difusa (EORD). El objetivo de este estudio fue investigar la relación entre el nivel de oxigenación de los tejidos y el proceso de cicatrización de heridas en los mismos [8].

En dicha investigación los autores miden la intensidad de la luz reflejada a longitudes de ondas específicas (542 nm y 580 nm) relacionadas directamente con los picos de absorción de la oxihemoglobina y la hemoglobina desoxigenada (580 nm y 555 nm), para estimar así la concentración total de hemoglobina (THb) y la saturación de oxígeno de la hemoglobina para sitios sanos y ulcerados de un paciente con padecimiento de pie diabético. La implementación del arreglo espectroscópico utilizado por los autores se muestra en la Figura 4.

Cabe mencionar que la instalación anterior trabaja en una región espectral que comprende el intervalo de 400-800 nm donde queda incluido la mayoría de las bandas de absorción de la hemoglobina en los estados de oxigenación antes mencionados. Los resultados sugieren que el uso de EORD en la exploración de los cambios en la dinámica del oxígeno tisular puede servir como una valiosa herramienta para el monitoreo del proceso de cicatrización de úlceras del pie de diabético. Además, el uso de la espectroscopia de reflexión difusa puede mejorar la calidad del diagnóstico y facilitar una selección apropiada de tratamiento durante el proceso de sanación de la herida durante el manejo clínico de las úlceras del pie diabético. Tajaddini, et al. [9], se enfocan hacia el uso de espectroscopia óptica de fluorescencia (EOF), específicamente a la auto fluorescencia inducida por láser (AFIL), así como a la espectroscopia óptica (EO). El objetivo principal de este estudio fue usar la AFIL como método no invasivo para poder evaluar las propiedades de la piel en el contexto de la formación de úlceras en la superficie plantar del

pie en pacientes diabéticos.

En este trabajo los investigadores como parte del método utilizado se hizo incidir radiación electromagnética proveniente de un láser (zona ultravioleta, $\lambda = 337$ nm) en tres sitios del pie de cada voluntario sujeto a la investigación para inducir fluorescencia en el tejido de interés. Se utilizó un láser de colorantes de nitrógeno bombeado (Laser Science VSL-337ND) para excitación, el espectro de auto fluorescencia se recolectó mediante una sonda de fibra óptica que consistió de seis fibras colectoras de señal alrededor de una única fibra de excitación cubierta por una punta de vidrio plano. Posteriormente se calculó el área bajo

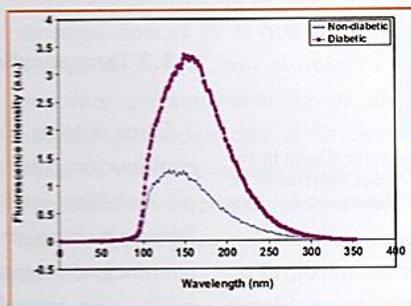


Figura 5. Espectro de AFIL típico normalizado de hallux de un sujeto diabético comparado con el de un sujeto sano [9].

la curva espectral (ABCE) Figura 5, el valor de este parámetro fue significativamente mayor para los sujetos diabéticos que para los sanos.

Los resultados muestran una disminución del ABCE antes de la formación de úlcera lo que demuestra su potencial como un indicador de cambios en los tejidos que preceden a la ulceración en el pie diabético.

5.1.2 Imágenes Hiperespectrales y Multiespectrales

El trabajo que realizaron Yudowsky, et al. [10] evalúa el riesgo de desarrollar úlceras en el pie de diabético mediante la técnica de oximetría de tejido hiperespectral.

El objetivo de este estudio fue deter-

minar mediante el uso de imágenes hiperespectrales la concentración de hemoglobina y la saturación de oxígeno a partir del espectro de reflexión difusa del tejido, espectro que está presente para cada pixel del hipercubo de imágenes hiperespectrales. Con la determinación de estos parámetros se buscó predecir el riesgo de formación de úlcera en pie diabético con apoyo del sistema de adquisición de imágenes hiperespectrales OxyVu que se muestra en la Figura 6.

Se examinaron los datos de oximetría de tejido (retrospectivamente) de 21 sitios afectados por ulceración para desarrollar un índice de predicción.

A continuación, se implementó un algoritmo de procesamiento de imágenes basado en este índice.

Los resultados mostraron que este algoritmo es capaz de predecir el tejido en riesgo de ulceración con una sensibilidad y especificidad del 95 % y el 80%, respectivamente, para las imágenes tomadas, en promedio, 58 días antes de que el daño tisular sea evidente a simple vista [10].

Por su parte Grenman et al. [11] Investigan si el aporte de oxígeno y metabolismo muscular de la extremidad inferior (pie) son factores de riesgo en la enfermedad de pie diabético.

El propósito de este estudio fue utilizar la técnica de imágenes hiperespectrales médicas (IHM) para medir el suministro de oxígeno, y la extracción de oxígeno del tejido de la piel sobre la base de las mediciones pixel por pixel de la oxihemoglobina (HbO₂) y desoxihemoglobina (Hb), con mediciones de flujo doppler láser para evaluar los cambios en la microcirculación del pie y el antebrazo de pacientes con diabetes con o sin neuropatía periférica.

Para esta evaluación, se midió la puntuación de síntomas de neuropatía, la discapacidad neuropática, puntuación y umbral de percepción de vibración con biotesiométero (Biomedical Instru-

ments Newbury, OH, USA.), también se midió el umbral de percepción de la presión cutánea con los monofilamentos de Semmes-Weinstein.

Las imágenes médicas hiperespectrales (IMHS) fueron obtenidas mediante el sistema Hypermed Visible (HyperMed Inc, Watertown, MA, USA).

Los resultados indican que la saturación de hemoglobina se redujo en la piel de pacientes con diabetes, y que este deterioro se acentuó en presencia de neuropatía en el pie diabético. Adicionalmente, las reservas de energía de los músculos del pie se reducen en presencia de diabetes, lo que sugiere que la microcirculación podría ser una razón importante para ésta diferencia [11].

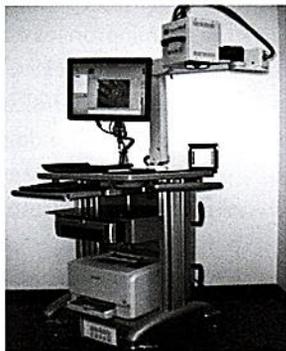


Figura 6. Sistema de adquisición de imágenes hiperespectrales (OxyVu by HyperMed) formado por: 1 fuente de iluminación de siete diodos emisores de luz de banda amplia en el visible, 1 película polarizadora, 1 filtro espectral, 1 lente de enfoque y 1 cámara CCD [10].

Un estudio adicional es el que realizaron Jolivot, et al. [12] donde el objetivo principal fue desarrollar un sistema de adquisición de imágenes multispectrales incorporando al sistema una nueva cámara multispectral desarrollada específicamente para aplicaciones de dermatología y cosmetología, que proporciona imágenes de reflexión en diferentes longitudes de onda, cubriendo el rango visible (400-720) y el infrarrojo cercano (700-1000 nm). Se acopla con un algoritmo basado en la red neuronal para la reconstrucción del cubo de reflectancia de los datos cutáneos.

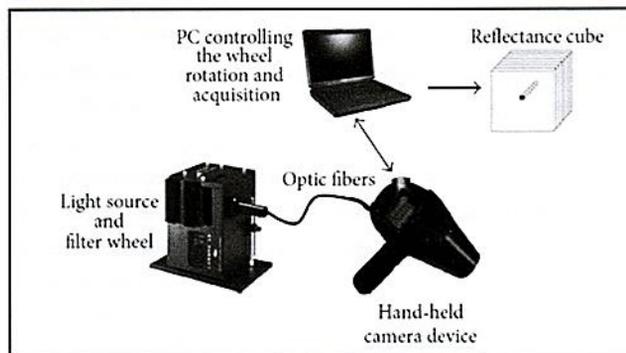


Figura 7. Sistema de imágenes multispectrales. El sistema se divide en dos partes principales: dispositivo de iluminación que comprende la fuente de luz y el revolver de filtros así como un dispositivo de mano con una cámara. El sistema es controlado por un ordenador portátil y los cubos de reflectancia de salida [12].

Es importante mencionar que el análisis del cubo de reflexión se realizó en un algoritmo que se basa en el modelo de transporte radiativo de Kubelka-Munk.

El arreglo experimental o sistema de adquisición de imágenes multispectral para este estudio es llamado ASCLEPIOS, y se muestra en la Figura 7.

La técnica permite medir cuantitativamente al tejido cutáneo y recupera cinco mapas de parámetros de la piel: la concentración de melanina, espesor de la epidermis / dermis, concentración de hemoglobina y la hemoglobina oxigenada.

Los resultados recuperados de los participantes sanos por el algoritmo se encuentran en buena concordancia con datos de la literatura. La utilidad de la técnica desarrollada fue probada en dos experimentos: un estudio clínico basado en lesiones de vitiligo y melasma en la piel y un experimento de oxigenación en la piel (isquemia inducida) con participantes sanos donde los tejidos sanos en condiciones normales se registran así como cuándo temporalmente se induce isquemia en ellos [12].

5.1.3 Termografía Infrarroja

Otros autores como Chanjuan Liu, et al. [13], hicieron su contribución para el diagnóstico de las complicaciones del pie diabético mediante el uso de la técnica de termografía infrarroja. El objetivo principal de este estudio fue obtener la diferencia de temperatura entre las áreas correspondientes en los pies contralaterales (pie izquierdo y pie derecho) y mediante un análisis asimétrico determinar si estas regiones

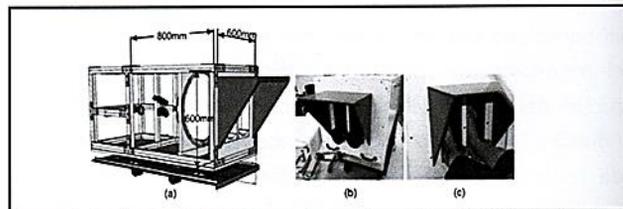


Figura 8. La disposición experimental para la exploración del pie: (a) el esquema de la disposición experimental con dos cámaras instaladas, que son la cámara térmica (superior, IR FLIR SC305) y la cámara RGB (inferior, Canon EOS 40D), b) La apariencia del conjunto experimental y (c) posicionamiento

de los pies, presentan una diferencia de temperatura más elevada que un umbral establecido, hecho que de resultar cierto, supondría que una de las dos áreas asociadas se encuentra en riesgo de ulceración. El prototipo para este estudio se muestra en la Figura 8.

Con este estudio se obtuvieron los siguientes resultados: Tomando 2,2 ° C como umbral para la identificación de riesgos, 35 de 37 úlceras del pie diabético se detectaron con éxito (95%). Las dos úlceras restantes eran pequeñas (~ 5 × 5 mm²), una de las cuales sólo se encontró después del desbridamiento de callo abundante.

El análisis mostró que a pesar de los obstáculos debido a la presencia de errores como son: 1) la segmentación, 2) la forma y el tamaño de los pies (debido a deformidades y amputaciones menores); se pueden encontrar puntos correspondientes en los dos pies independientemente de las formas y tamaños de los pies, por lo tanto se pudo obtener la diferencia de temperatura entre los pies izquierdo y derecho. Con la ayuda del procesamiento de imágenes y análisis de patrones necesarios, se logró la detección de complicaciones en el pie diabético [13].

5.1.4 Sistemas de Sensores Ópticos

Mackey et al. [14] desarrollaron su trabajo con la implementación de un dispositivo de apoyo para la evaluación de tejidos en riesgo, en la base de sensores ópticos. El objetivo primordial de esta investigación fue desarrollar un sistema del tipo plataforma que permita medir parámetros de tensión tridimensionales (es decir, presión y patrones de cizallamiento) en la superficie plantar e identificar áreas de preocupación. El prototipo experimental se muestra gráficamente en la Figura 9.

Los resultados experimentales han



Figura 9. Dispositivo óptico: sección de entrada (inferior izq.) que incluye: láser, lente colimadora en la carcasa, polarizador lineal, modulador electroóptico de frecuencia variable, acoplador de fibra y fibra óptica de mantenimiento de la polarización; (superior derec.) prototipo completo de 12 elementos del conjunto de sensores de tensión de pie y conjunto del cable del detector [14].

demostrado que un enfoque óptico puede proporcionar una clara imá-

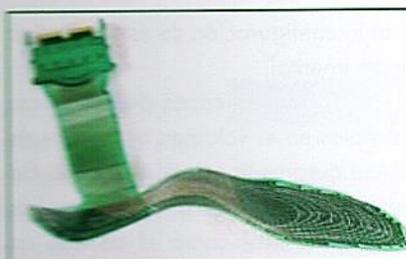


Figura 10. Sistema de medición de la presión y la distribución de la fuerza F-scan (Tekscan Bosoton, MA) bajo los pies con sensor de papel delgado que se coloca en los zapatos [16].

cación de cizallamiento y presión de 50 a 400 kPa con una respuesta de frecuencia de 100 Hz., una medición precisa de tensión de 100 Pa y una resolución espacial de 8,0 mm permitiendo identificar las áreas en riesgo de ulceración [14].

Un segundo trabajo en el ámbito de sensores ópticos es el que realizaron Ledoux et al. [15] con el objetivo de examinar prospectivamente (es decir analizar y estudiar con el fin de explorar o prever una eventualidad) la relación entre la presión plantar máxima (PPM) específica del sitio y el riesgo de úlcera.

Investigadores han informado previamente sobre la relación entre la úlcera de pie diabético y una elevada presión sin embargo la localización específica de la presión no se ha estudiado. Mediante el uso de la plantilla F-scan (Tekscan, Boston, MA., Figura 10) las presiones de 591 participantes en la investigación (todos diabéticos), se midieron en 8 áreas como son: talón, parte lateral media del pie, primer metatarsal, segundo a través de cuarto metatarsal, quinto metatarsal, hallux, y otros dedos del pie.

Se evaluó la relación entre la incidencia de úlcera plantar en el pie y PPM. Los resultados fueron los siguientes: durante el seguimiento (2.4 años), 47 sujetos desarrollaron úlceras plantares (10 talones, 12 metatarsales, 19 hallux, 6 otros). La PPM media global fue mayor para los sujetos con úlcera (219 frente a 194 kPa), pero la relación fue

diferente según el sitio (los metatarsianos con úlceras tenían mayor presión, mientras que lo contrario era cierto para el hallux y el talón) [15].

5.1.5 Imágenes de Fluorescencia

Para el desarrollo de este trabajo de investigación Yichao, et al. [17]



Figura 11. Dispositivo de imágenes de auto fluorescencia PRODIGI (Detección óptico portátil en tiempo real, identificación y orientación para la Intervención) [17].

recurrieron a la técnica de imágenes de fluorescencia para desarrollar un novedoso prototipo de mano, portátil para la adquisición de imágenes de fluorescencia de alta resolución en tiempo real llamado PRODIGI (Figura 11). Este dispositivo permite la visualización de bacterias patógenas y tejido en las heridas sin contacto directo. El dispositivo recoge las señales de auto fluorescencia, las cuales se producen intrínsecamente por diferentes componentes tisulares y bacterias que son excitadas por luz azul-violeta que emite el dispositivo. Se presenta el uso clínico de este dispositivo de adquisición de imágenes para la detección de superficie con alto nivel bacterial y la infección local subclínica en un paciente asintomático de 50 años de edad, con una no-cicatrización de las úlceras del pie diabético. Con su capacidad asistencial, PRODIGI ayudó al desbridamiento de la herida, ayudó al muestreo "dirigido" de la carga biológica subcutánea (basada

en la fluorescencia bacteriana). Para cultivos de laboratorio estándar e informó la necesidad de administración rápida de tratamiento antibiótico. PRODIGI puede ser utilizado al momento de la evaluación inicial de la herida y posteriormente para controlar objetivamente la carga bacteriana, incluso durante el curso del tratamiento. Además, las imágenes de fluorescencia pueden ser utilizadas para determinar objetivamente la respuesta de una herida al tratamiento. Además, ofrece una nueva forma de apoyo a los médicos para el análisis del estado de salud de tejidos ulcerados en los pacientes diabéticos [17].

5.1.6 Tomografía Óptica

En este trabajo Khalil et al. [18] implementan un novedoso sistema de adquisición de imágenes vascular basado en tomografía óptica (VOTI por sus siglas en inglés), como una modalidad de formación de imágenes. El propósito primario de esta investigación fue desarrollar un dispositivo capaz de detectar las concentraciones de hemoglobina en el tejido.

VOTI no es invasivo, es no ionizante, y no requiere la inyección de contraste. Esta tecnología se aplica al diagnóstico de la enfermedad arterial periférica (PAD) dentro de las extremidades inferiores de los pacientes diabéticos con arterias calcificadas. Esto podría ser de beneficio sustancial ya que estos pacientes sufren de comorbilidades (dos o más trastornos que ocurren en la misma persona) como la incompresibilidad arterial (los tejidos que componen la pared vascular contienen cantidades importantes de agua, entre el 70 % y el 80% en peso, es habitual considerar el material como la mayoría de los materiales blandos) lo que complica el diagnóstico y seguimiento. En la Figura 12 se observa de manera grá-

fica la configuración de este prototipo experimental.

VOTI ha sido capaz de cuantificar cambios en el volumen de sangre en el pie durante la oclusión de corte del muslo y dar salida a los parámetros de diagnóstico, como el cambio en la concentración de hemoglobina, lo que permite evaluar la perfusión del pie. Además, VOTI fue capaz de proporcionar los lugares de regiones menores de perfusión (medida del volumen de sangre que fluye a través de los capilares en un tejido) dentro del pie y la evaluación de la gravedad de la enfermedad arterial, incluso en pacientes diabéticos con arterias calcificadas, que tradicionalmente son difíciles de diagnosticar [18].

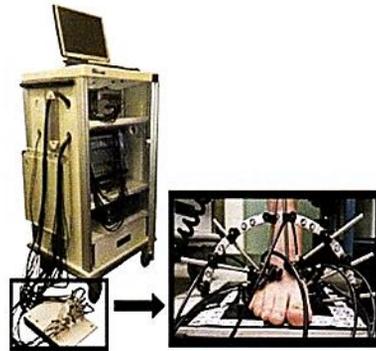


Figura 12. Sistema VOTI (tomografía óptica vascular) con su sonda de medición en forma de sandalia proporciona imágenes de las secciones transversales de las concentraciones de hemoglobina en el pie [18].

5.2 Tratamiento

A continuación nos enfocamos a describir de forma solo representativa la existencia de trabajos de investigación dedicados a la propuesta de varias técnicas terapéuticas para el tratamiento de las úlceras producidas en el pie diabético. Estas técnicas se basan en el uso de la radiación óptica en particular y del espectro electro-magnético en forma general.

5.2.1 Radiación Led

Almeida Nunes, et al. [19] emplearon



Figura 13. Prototipo experimental conformado por: 1 plantilla de latex natural, 1 fuente de iluminación (dispositivo con una matriz de LEDs rojos, con longitud de onda entre 635 y 640 nm, 1 molde hecho de alginato y agua [19].

como fuentes de luz para realizar a los LEDs. En su trabajo implementan y prueban un sistema novedoso para inducir la curación de las úlceras del pie diabético. Se desarrollaron los dispositivos electro-ópticos y basados en látex, se realizó una prueba de cuatro semanas en un grupo control (GC) de cinco úlceras y un grupo experimental (GE) de ocho úlceras. El GC se trató con un método estándar, basado en un vendaje de espuma liberador de plata, y el GE se trató con el sistema bajo ensayo. Para cada úlcera, se ha calculado un índice para cuantificar el porcentaje de recuperación de la úlcera, denominado CRU (%); Una CRU (%) = 0% significa que no hay cicatrización, y una CRU (%) = 100% significa curación total. El Arreglo experimental se puede observar en la Figura 13.

Hubo aumentos estadísticamente significativos de CRU (%) de 51,8% ($p = 0,022$), para el GC, y de 78,4% ($p < 0,001$), para el GE. El aumento en el GE fue mayor que el aumento en



Figura 14. Fotosensibilizantes (azul de metileno o azul de toluidina). Una fuente de iluminación blanca de halógeno FR100 con rango espectral entre 400 y 725 nm, 1 arreglo de LEDs (GDE Genesis Devices Equipment Ind.) [20].

el GG, y la diferencia fue estadísticamente significativa ($p < 0,001$). Los resultados mostraron que el método propuesto tenía, para estos conjuntos particulares de úlceras, velocidades de cicatrización más rápidas, que pueda ser considerado para aplicaciones clínicas extensas [19].

5.2.2 Terapia Fotodinámica

Siguiendo la línea de investigación en el tratamiento de las úlceras ya existentes en el pie diabético el estudio de Joao Paulo T. et al. [20] hace su contribución desarrollando un método basado en la técnica de Terapia Fotodinámica (TFD). El propósito de esta investigación fue la de realizar un estudio clínico para probar que la TFD es un método eficaz para evitar la amputación del pie diabético infectado. Esta técnica es una modalidad de tratamiento que utiliza la luz para generar especies reactivas de oxígeno en el sitio de interés, que pueden causar la muerte celular de las células no normales y bacterias.

La TFD puede ser utilizado para el tratamiento de varias enfermedades, incluyendo infecciones en los pies que no responden bien a la terapia antibiótica. Existen varias características de la TFD que la hacen potencialmente ideal para tratar los pies diabéticos: el fotosensibilizador no es tóxico en la oscuridad, pero después de la iluminación se convierte en un agente antimicrobiano muy eficaz con uso tópico, y puede regenerar huesos pequeños, como las falanges. En la Figura 14 se observa la aplicación de esta metodología.

Durante esta investigación se desarrolló un protocolo TFD de bajo costo y se aplicó a 18 pacientes con osteomielitis, clasificados como Grado 3 en la escala de Wagner. Se aplicó el método aplicando el fotosensibilizante y posteriormente se hizo incidir luz en la zona afectada. Los resultados muestran que sólo uno de estos pacientes sufrió amputación. Al menos dos de ellos fueron curados de cepas de bacterias resistentes sin tratamiento antibiótico por vía intravenosa. En el grupo control de 16 pacientes, todos ellos terminaron sufriendo amputación. La tasa de amputación en el grupo TFD fue 0,029 veces la tasa en el grupo control y la diferencia es claramente estadísticamente significativa ($p = 0,002$) [20].

VI. CONCLUSIONES

La revisión hecha de los diferentes trabajos ya existentes sobre las técnicas ópticas utilizadas para la evaluación del estado de salud de tejidos alterados en los pacientes diabéticos, ha permitido ampliar nuestra visión sobre el campo de aplicación de dichas técnicas; impulsando así la búsqueda de nuevos y diferentes enfoques que permitan el desarrollo de metodologías que proporcionen diagnósticos de las alteraciones en la piel de pacientes diabéticos, con mayor calidad y precisión.

REFERENCIAS

- [1] Abdón Toledo, et. al., "Pie Diabético: De la fisiopatología a la clínica", Diabetes Internacional, Volumen I, Nº 3. Año 2009.
- [2] OMS(Organización Mundial de la Salud), "Informe Mundial Sobre La Diabetes", Resumen de Orientación, World Health Organization 2016, WHO/NMH/NVI/16.3, www.who.int/diabetes/globalreport
- [3] Arana-Conejo V., et. al., "Fisiopatología de las complicaciones vasculares del pie diabético", Gaceta Médica de México, Volumen 139, Número 3, Mayo-Junio 2003.
- [4] López de la Torre M., "LA DIABETES MELLITUS COMPLICACIONES", Apuntes de Diabetes Mellitus, www.martinedocrino.com.
- [5] Bakker K., et. al., "El año del pie diabético", Atención Sanitaria, Diabetes Voice, Abril 2005, Volumen 50 Número 1.
- [6] Fernández Bezanilla B., "Síndrome del pie Diabético", 4º Grado de enfermería, Escuela Universitaria de Enfermería "Casa Salud Valdecilla", Año 2014.

- [7] Mompeán Oliva F, et. al., "Diagnóstico y Tratamiento del pie diabético, úlceras por presión y úlceras venosas", Documentos clínicos de interés, Servicio de Cirugía General, Hospital Universitario Virgen Macarena y Área, Servicio Andaluz de Salud, CONSEJERÍA DE SALUD.
- [8] Suresh Anand, et. al., "Diffuse reflectance spectroscopy for monitoring diabetic foot ulcer – A pilot study", Biomedical Engineering Group, Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600036, India, & 2013ElsevierLtd.
- [9] Tajaddini A., et.al., "Laser-induced autofluorescence (LIAF) as a method for assessing skin stiffness preceding diabetic ulcer formation", *Journal of Biomechanics*, www.elsevier.com/locate/jbiomech, www.JBiomech.com, 13 October 2006.
- [10] Dmitry Yudowsky, et. al., "Assessing diabetic foot ulcer development risk with hyperspectral tissue oximetry", *Journal of Biomedical Optics* 16(2), 026009 (February 2011).
- [11] Grenman L. R., "Early changes in skin microcirculation and muscle metabolism of diabetic foot", Article in *The Lancet*, November 2005, DOI: 10.1016/S01406736(05)67696-9, Source: PubMed, <https://www.researchgate.net/publication/7477571>.
- [12] Jolivot R., "Skin Parameter Map Retrieval from a Dedicated Multispectral Imaging System Applied to Dermatology/Cosmetology", Hindawi Publishing Corporation, *International Journal of Biomedical Imaging*, Volume 2013, Article ID 978289, 15 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/978289>.
- [13] Chanjuan Liu, et. al., "Automatic detection of diabetic foot complications with infrared thermography by asymmetric analysis", *Journal of Biomedical Optics* 20(2), 026003 (February 2015).
- [14] Mackey R. J., "Simultaneous shear and pressure sensor array for assessing pressure and shear at foot/ground interface", *Journal of Biomechanics* 39 (2006) 2893–2897, 3 October 2005, www.elsevier.com/locate/jbiomech, www.JBiomech.com.
- [15] . Ledoux W. R., "Diabetic foot ulcer incidence in relation to plantar pressure magnitude and measurement location", *Journal of Diabetes and Its Complications* 27 (2013) 621–626, 4 September 2013, WWW.JDCJOURNAL.COM
- [16] Tekscan,"F-scan: In Shoe Analysis System", MDL-F-Scan-Datasheet.pdf, <https://www.tekscan.com/productssolutions/systems/f-scan-system>
- [17] Wu Y. C., "Handheld fluorescence imaging device detects subclinical wound infection in an asymptomatic patient with chronic diabetic foot ulcer: a case report", ORIGINAL ARTICLE, *International Wound Journal* ISSN 1742-4801.
- [18] Khalil M.A., "Detection of Peripheral Arterial Disease Within the Foot Using Vascular Optical Tomographic Imaging: A Clinical Pilot Study", *Eur J Vasc Endovasc Surg* (2015) 49, 83e89, 2014 European Society for Vascular Surgery, Published by Elsevier Ltd. All rights reserved, Article history: Received 7 May 2014, Accepted 14 October 2014, Available online 20 November 2014.
- [19] De Almeida Nunes G. A. M., et.al., "A system for treatment of diabetic foot ulcers using led irradiation and natural latex", *Research On Biomedical Engineering*, rbejournal.org, Volume 32, Number 1, p. 3-13, 2016, Original Article, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2446-4740.0744>.
- [20] Tardivo J. P., "A clinical trial testing the efficacy of PDT in preventing amputation in diabetic patients", *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* (2014) 11, 342–350, 9 May 2014, www.sciencedirect.com, [journal homepage: www.elsevier.com/locate/pdpdt](http://journalhomepage.com/elsevier.com/locate/pdpdt).



OFERTA EDUCATIVA

UPT



POSGRADOS

MAESTRÍAS

1. Automatización y Control
2. Computación Óptica
3. Contribuciones Fiscales
4. Desarrollo de Software
5. Dirección de Organizaciones
6. Energías Renovables
7. Optimización de Procesos

DOCTORADO

1. Optomecatrónica
2. Ciencias de la Gestión Administrativa



Calle Ingenierías #100
Col. Huapalcalco,
Tulancingo, Hgo.

(775) 75 5 82 02
ext. 1301

@UPTulancingo1

@UPTulancingo

@UPTulancingo

/UPTTULANCINGO

www.upt.edu.mx

¡ÚNETE!

