

# Plantilla Inteligente Para Pie Diabético

E. López Godínez<sup>1</sup>, C. R. Ibáñez Nangüelú<sup>2</sup>, J. Jara Jiménez<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Estudiante, Universidad politécnica de Chiapas, Suchiapa, México

<sup>2</sup>Docente, Universidad politécnica de Chiapas, Suchiapa, México.

[183185@ib.upchiapas.edu.mx](mailto:183185@ib.upchiapas.edu.mx), [cribn@ib.upchiapas.edu.mx](mailto:cribn@ib.upchiapas.edu.mx), [jjara@ib.upchiapas.edu.mx](mailto:jjara@ib.upchiapas.edu.mx).

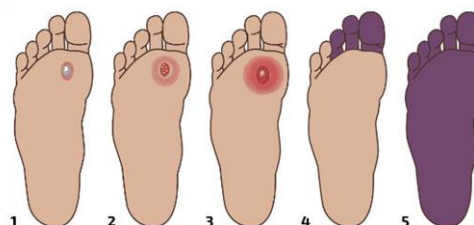
**Abstrac**—Diabetes mellitus is a chronic disease representative of elevated blood glucose or also known as hyperglycemia. One of the consequences of the pathology is the development of Diabetic Neuropathy (DN) which means damage to nerve tissues due to diabetes [2]. One of its consequences of the NP is the loss of sensation, most often it begins affecting the feet and legs, exposing them to develop injuries, ulcers and in severe cases even amputations. This work presents the development of a prototype of an intelligent insole for diabetic foot (PIPD), which is able to monitor the state of the patient's diabetic foot the following parameters: temperature and plantar pressure in real time. Simultaneously monitors blood oxygen saturation (SpO<sub>2</sub>) outside the insole, where the control system is located. The information obtained is visualized through a mobile application that was designed to be intuitive and easy to use. The template was designed to be ergonomic and 3D printed with flexible thermoplastic polyurethane (TPU) material, inside it is located piezoresistive sensors and a thermistor with their respective connections(cables). It is obtained as a result that the user-patient is continuously monitored, the SpO<sub>2</sub> is displayed, the temperature with decimal values so as not to give false measurements, obtain plantar pressure and this is possible to perceive in the HEALTHFOOT app.

**Palabras clave**—Aplicación móvil, ergonómica, monitorización, pie diabético, plantilla, sensores.

## I. INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus es una enfermedad donde el páncreas no produce insulina. La insulina es importante para regular la glucosa, por lo tanto, al no ser controlada se produce la hiperglucemia, como consecuencia se presentan daños en nuestros sistemas y órganos. De acuerdo a datos del INEGI en México, la diabetes es la tercera causa de muerte [1]. Dado que esta enfermedad es crónica, sus repercusiones son de gravedad cuando no es controlada y monitorizada, reflejándose en el daño de los nervios y vasos sanguíneos [2]. Entre las consecuencias de la diabetes mellitus se encuentra la neuropatía diabética (ND), que hace referencia al daño de las conexiones nerviosas. Afecta inicialmente a los miembros inferiores distales, una característica de este padecimiento es generar el deterioro o pérdida de la sensibilidad, avanza gradualmente si no se tiene énfasis en el tratamiento adecuado [3]. La pérdida de la sensibilidad provoca en los pacientes una falta de percepción del dolor, aumentando la posibilidad de desarrollar una herida sin un reconocimiento oportuno y al no ser atendida de manera adecuada, aumenta la posibilidad de

generar úlcera y en casos extremos la pérdida de la extremidad Fig. 1[3].



- Grado 0:** pie de riesgo, piel intacta.  
**Grado 1:** úlcera superficial o que afecta tejido celular subcutáneo.  
**Grado 2:** úlcera profunda que afecta tendón y/o capsula (sin osteomielitis).  
**Grado 3:** úlcera profunda que afecta hueso (con osteomielitis).  
**Grado 4:** gangrena que afecta únicamente dedos (amputación menor).  
**Grado 5:** gangrena que afecta mediopié/antepié (amputación mayor).

Fig. 1. Grado del pie diabético

La plantilla inteligente para pie diabético (PIPD) tiene como objetivo la prevención de úlceras y posibles amputaciones, su funcionalidad radica en monitorizar el pie diabético en un tiempo establecido, para conocer información del estado en que se encuentra. Este trabajo monitoriza tres parámetros fisiológicos; la temperatura, la saturación de oxígeno (SpO<sub>2</sub>) y presión plantar. En la PIPD se monitorizará los siguientes parámetros fisiológicos:

- Temperatura.
- Presión plantar

El sensor de saturación de oxígeno está ubicado de forma externa de la plantilla, por fines de espacio y requiere estar en contacto directo con la piel. Los parámetros obtenidos pueden ser consultados en HEALTHFOOT una aplicación móvil, afable con el usuario para el sistema operativo Android. La comunicación entre PIPD y HEALTHFOOT es establecida mediante la tecnología bluetooth 2.0 + EDR, que permite observar el registro de los parámetros. HEALTHFOOT genera una alerta en caso de aumento de la temperatura, el descenso de la SpO<sub>2</sub> y el cambio de presión significativo de riesgo. Es bidireccional entre el usuario y el paciente permitiendo una comunicación entre ambos. El sistema PIPD - HEALTHFOOT tiene como objetivo aumentar el cuidado y monitorización del pie diabético en tiempo real.

## II. METODOLOGÍA

### A. Materiales

Etapa de adquisición de herramientas y sensores necesarios para la monitorización del pie diabético, descritos a continuación.

1) *Sensor max30102*: para monitorizar la saturación de oxígeno, es seleccionado por las siguientes características:

- Tamaño reducido (2 cm x 1.5 cm x 0.1cm).
- Compatible con plataforma arduino.
- Filtro de luz exterior (reduce la incertidumbre de medición).
- Protocolo I2C para la transmisión de datos.

2) *Termistor NTC 10KΩ MF11-103*: determina la temperatura con los siguientes parámetros de validación:

- Tolerancia del  $\pm 5\%$ .
- Tiempo constante de 30 segundos.
- Rango de medición de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ .

3) *Cinco sensores piezorresistivos de fuerza (FSR)*: cuatro sensores FSR402 y un sensor FSR406. Seleccionados por las siguientes características:

- Disminución de resistencia a la percepción de presión.
- Vida útil de 1,000,000 presiones.
- Tamaño compacto en plantilla.
- Tolerancia de fuerza de 10 a 100N.
- Peso ligero de 10g.
- Tiempo de registro de información de pisadas de 3 $\mu\text{s}$ .

4) *Módulo de bluetooth HC-05 y HC-06*: Encargado de transmitir la información y cuenta con las siguientes características:

- Dos canales de comunicación: tx (transmisión) y rx (recepción) realizan el intercambio de datos.
- Conexión inalámbrica con alcance de 10 metros.

5) *Software y hardware IDE Arduino*: Compatible con los sensores, lenguaje de alto nivel de programación C. Dada la experiencia previa se hace uso de dos tarjetas arduino:

- Arduino uno y nano.

### B. Métodos

El proceso de desarrollo se describe en las siguientes etapas:

1. Configuración del funcionamiento de cada sensor.
2. Integración de sensores.
3. Fuente de alimentación de energía del sistema.
4. Diseño e impresión de la plantilla.
5. Adaptación de los sensores FSR a la plantilla de forma ergonómica.
6. Diseño de HEALTHFOOT App de plantilla.

1) *Configuración del funcionamiento de cada sensor*: Circuito de saturación de oxígeno utilizando el sensor max30102, configuración en arduino de los parámetros de longitud de onda. La temperatura usé el termistor MF11-103, se obtuvo el valor analógico, se configuró para hacer la conversión de Kelvin a Celsius. Como circuito de protección del sistema se implementó un sensor de presión FSR 402-406, principalmente verificar que obtenga las lecturas analógicas, cambios de resistencia al presionarlos y que trabajarán simultáneamente sin haber un tiempo de espera entre ellos.

Módulo bluetooth HC-05 y HC-06 se configuró para cambiar el nombre a HEALTHFOOT, el cambio de velocidad a 9600 baud rate para la comunicación con el celular y establecerlo como modo esclavo.

2) *Integración de sensores*: En tarjeta arduino uno, se adjuntaron los códigos de temperatura y sensores FSR para trabajar en sincronía obteniendo un solo código, trabajando simultáneamente gracias a una multitarea se establece a que corresponde cada entrada analógica. Para el sensor max30102, el código es extenso ocupa mucha memoria por ello se guarda el código en el arduino nano.

3) *Fuente de alimentación de energía del sistema*: Se implementó con una batería de Litio tipo Li-Po recargable de 3.7V, en conjunto con un módulo de carga con entrada micro conductor universal en serie (USB) de 5V con protección de sobrecarga, un elevador de voltaje dc-dc XL6009e1 y un interruptor general. El módulo de carga tiene 4 pines de salida (b+, b-, out+, out-). La batería se conecta a dos entradas del módulo de carga de batería (b+ y b-). Para salida out- se conecta directo al interruptor, después este entra a la terminal IN del módulo elevador de voltaje y para out+, se conecta directamente en el In+ de módulo elevador de voltaje. En el módulo de carga existen LEDs indicadores de señalización de carga, LED rojo durante la carga de la batería y LED azul para la batería completamente cargada.

4) *Diseño e impresión de la plantilla*: Proceso de diseño y modelado 3D en SolidWorks de la plantilla, diseñada en dos partes: base y superior. Se utilizó líneas y spline de estilo, obteniendo puntos, que permite la flexibilidad de curvaturas a las líneas Fig. 2

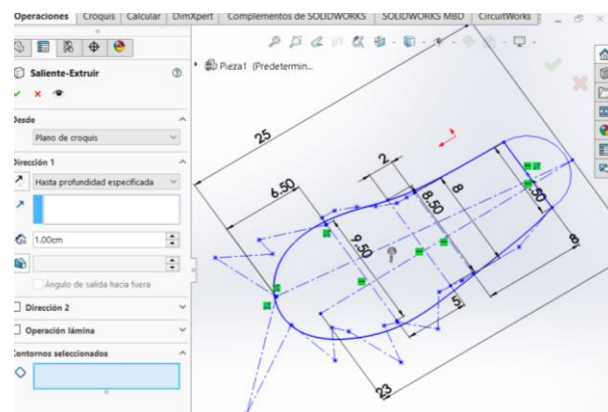


Fig. 2 Diseño de la plantilla en SolidWorks.

Con la herramienta extruir/saliente/base de relleno o solidez a la plantilla, cuenta con un grosor de medida de 3mm, de largo cuenta con una medida de 25cm, esta es la base de nuestra plantilla, añadiendo un espacio para el termistor Fig. 3.

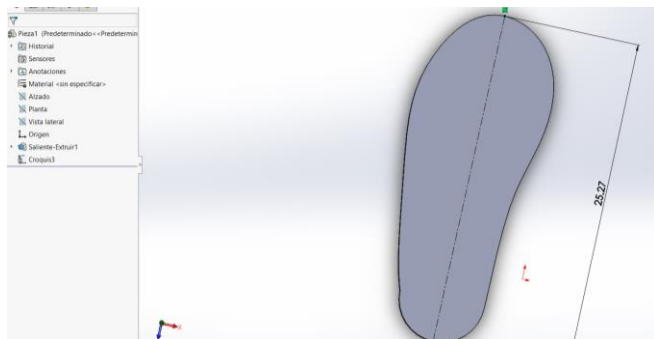


Fig. 3 Base de la plantilla en 3

Realizada la base, fue guía para realizar la parte superior, donde este cuenta con una abertura donde saldrán los cables Fig. 4, y un espacio vacío donde se coloca el termistor y cables que están en la base Fig. 5.



Fig. 4. Parte superior de plantilla en 3D

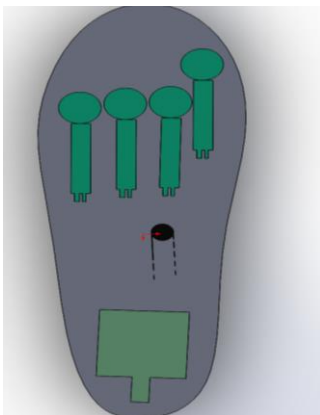


Fig. 5. Base de la PIPD en SolidWorks.

El material seleccionado para imprimir la plantilla es un filamento flexible denominado poliuretano termoplástico (TPU). Se diseñó en 3D una caja como accesorio para el sensor max30102 que garantiza la correcta monitorización de la saturación de oxígeno en la arteria peronea.

5) *Adaptación de los sensores FSR a la plantilla de forma ergonómica:* Se adaptaron los sensores en puntos estratégicos donde tenemos mayor presión plantar, y el termistor en la parte central de la plantilla para obtener la temperatura del pie. Los cables fueron acomodados, soldados y alineados. Un cable fue para alimentar cuatro sensores, después a cada sensor se le adapta cables independientes que irán al arduino, un solo sensor por ser más distante, tiene dos cables de salida. En total tenemos en la salida un total de 8 cables.

6) *Diseño HEALTHFOOT App de plantilla:* Creada en el programa de MIT app inventor, por las siguientes características:

- Modo gráfico
- Dinámica de bloques.
- Orientada al desarrollo de aplicaciones
- Permite visualizar parámetros en tiempo real (temperatura, saturación de oxígeno y de presión).

MIT inventor permite programar alertas de lesiones, aumento o descenso de la temperatura. La conexión vía bluetooth 2.0 + DER entre la aplicación y el módulo permite una conexión de comunicación de los parámetros en tiempo real. Incluí una imagen con las zonas del pie para que el paciente visualice de manera intuitiva lo que se registra. De igual forma se diseñó el apartado de bluetooth mediante el cual el usuario puede conectarse haciendo clic. El botón “cerrar”, cierra inmediatamente la aplicación y desconecta los módulos de bluetooth.

### III. RESULTADOS

La PIPD Fig. 7 obtiene los datos por medio de los sensores y En HEALTHFOOT se observan los parámetros de temperatura, saturación de oxígeno en porcentaje y la presión ejercida en las zonas con mayor riesgo o cambios significativos Fig. 6. Estos parámetros nos sirven para monitorizar al paciente en tiempo real, dado a que con la temperatura podemos tener signos (cuando este aumenta) de un daño temprano, una inflamación o una herida. La saturación de oxígeno para el avance de la neuropatía diabética, las mediciones de presión. El paciente es quien utiliza estos parámetros para llevar un seguimiento adecuado del pie. Las mediciones como la temperatura cuentan con valores decimales para ver los mínimos incrementos para hacerlo más exacto, el margen de error se encuentra dentro del  $\pm 5\%$ . Para la SpO2 las mediciones arrojan un porcentaje de 100% a 60%, es necesario no moverse mucho porque esto marca errores en la medición y los resultados de la presión detectan el cambio de presión ejercida en los sensores. La presión obtenida en el talón es mayor que otras zonas, haciéndola acreditada a mayor riesgo.



Fig. 6. Aplicación HEALTHFOOT.



Fig. 7. Plantilla inteligente para pie diabético.

#### IV. DISCUSIÓN

La PIPD es un sistema de monitorización funcional para conocer el estado del pie diabético en tiempo real, sin embargo, no predice el avance del tratamiento de la diabetes. En base a los resultados, la presión plantar ubicada en puntos de mayor presión, sigue siendo limitada, para obtener mayor información es necesario evaluar con más sensores piezorresistivos. La temperatura es un indicador importante, obtener resultados decimales, y no enteros permite evitar datos falsos. El sistema de control contiene una batería recargable, ellos están unidos en una sola caja. La caja tiene una estructura de poder sujetarse en el tobillo permitiendo libertad en su uso diario. El limitante podría ser los cables, pues no tiene la capacidad de ser elástico.

#### V. CONCLUSIONES

Los resultados fueron los esperados, referente a la funcionalidad del dispositivo, sin embargo, el sistema

de control fue más complejo en tamaño, pues se esperaba que fuera pequeño, es decir utilizar un solo arduino y un solo bluetooth, sin embargo, por la memoria que ocupa el código del sensor max30102 y uso de todos los pines analógicos del Arduino uno, se hace el uso del Arduino nano y otro módulo de bluetooth. El primer diseño de la aplicación no era intuitivo. Esta nueva versión tiene un aspecto amigable y fácil de usar. En los aprendizajes obtenidos hago énfasis en programar la función de multitareas y la función millis, para no saturar de datos obtenidos. También a diseñar la plantilla y la app HEALTHFOOT desde 0, aprendí a utilizar herramientas de SolidWorks como spline por estilo. En el diseño de la aplicación desde hacer las conexiones por diagrama de bloque, su diseño intuitivo, envío de la información y ordenar los datos obtenidos. Las mejoras de la plantilla, es incluir más sensores para ampliar la obtención de las zonas, utilizar componentes electrónicos más pequeños para disminuir el tamaño de la caja, utilizar nanotecnología para evitar cableado incómodo.

#### RECONOCIMIENTO

El autor E. López agradece a la Sra. Martha Elena Godínez Pérez y Manuel de Jesús López Godínez por permitirme seguir adelante con mis estudios, por el apoyo económico.

El autor E. López agradece a Pablo Rafael Pascual Paredes por el apoyo moral, el tiempo para resolver dudas y poder terminar con este proyecto.

El autor E. López agradece al médico Pablo Enrique Pascual Domínguez por el tiempo y la amable asesoría para resolver dudas relacionadas al proyecto.

El autor E. López agradece a los asesores, ingeniero Jorge Jara Jiménez y Christian Roberto Ibáñez Nangüelú.

#### REFERENCIAS

- [1] INEGI. (2021). Características de las defunciones registradas en México durante enero a agosto de 2020. México: comunicado de prensa núm. 61/21.
- [2] Organización Mundial de la Salud (2021). Diabetes. Available: <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/diabetes> [Último acceso 20-06-2021].
- [3] Foot Health Facts, «Neuropatía Diabética Periférica,» Available: <https://www.foothealthfacts.org/conditions/diabetic-peripheral-neuropathy?lang=es-MX>. [Último acceso: 08 03 2021]. En línea].
- [4] D. Pérez, Infecciones en el pie diabético. Mon Act Soc Esp Med Cir Pie Tobillo. 2018; 10:45 9. DOI: 10.24129/j.mact.1001.fs1805008.[Online].
- [5] E. Chicharro, I. Portabales, L. Ramírez & E. Torrent, "Monitorización de la temperatura del pie como herramienta en la neuropatía diabética" Revista Internacional de Ciencias Podológicas, vol. 10, no. 1, 9-16. 2016, [http://dx.doi.org/10.5209/rev\\_RICP.2016.v10.n1.51057](http://dx.doi.org/10.5209/rev_RICP.2016.v10.n1.51057).