

Diseño de prototipo de podoscopio de bajo costo para el diagnóstico de patologías del pie por medio del procesamiento de imágenes

Design of a low cost podoscope prototype for diagnosing foot pathologies through image processing

^aCamilo Andrés Villarraga-Solis ^bDaniel Stiven Valencia-Jiménez, ^cDiego Andrés Campo-Ceballos

-  a. Estudiante Ingeniería Mecatrónica, camilovillarraga@unicomfauca.edu.co, Corporación Universitaria de Comfauca, Popayán, Colombia
 b. Estudiante Ingeniería Mecatrónica, danielvalencia@unicomfauca.edu.co, Corporación Universitaria de Comfauca, Popayán, Colombia
 c. Docente Ingeniería Mecatrónica, dcampo@unicomfauca.edu.co, Corporación Universitaria de Comfauca, Popayán, Colombia

Recibido: Mayo 22 de 2021 **Aceptado:** Agosto 27 de 2021

Forma de citar: C.A. Villarraga-Solis, D.S. Valencia-Jiménez, D.A. Campo-Ceballos, "Diseño de prototipo de podoscopio de bajo costo para el diagnóstico de patologías del pie por medio del procesamiento de imágenes", *Mundo Fesc*, vol 11, no. S2 pp. 207-223, 2021.

Resumen

Las patologías que afectan a los pies pueden ser de diversa índole: articulares, musculares, esqueléticas, ortopédicas, metabólicas, vasculares, neuropáticas, o dérmicas, y todas ellas son relevantes para la vida y el mantenimiento de la independencia. Por ello, conocer la patología que afecta a cada pie constituye un aspecto clave para la salud. En este trabajo se presenta el desarrollo de un podoscopio para analizar la huella plantar y determinar las patologías del pie, ya que estas son uno de los problemas de salud más comunes, aunque algunas pueden deberse a la herencia, muchas provienen del impacto acumulado de una vida de abuso y negligencia, y de hábitos de conducta inapropiados. Se utilizó el diseño mecatrónico secuencial por fases, donde se parte de una investigación bibliográfica, seguido de un diseño Cad/Cam que luego permitió definir los materiales a utilizar; además incluyó el desarrollo del software para el procesamiento de las imágenes capturadas por una cámara web, con la implementación de filtros para minimizar el ruido de la imagen, tales como filtro gaussiano y laplaciano. El dispositivo propuesto permite realizar un análisis estático de la huella, esta muestra la distribución de las fuerzas plantares por medio de imágenes en pseudocolor, tiene la opción de emitir una valoración de la huella, donde se muestra el índice de Hernández Corvo. Como resultado se observan datos sintetizados a partir de un estudio cuantitativo llevado a cabo con 11 pacientes, de ambos sexos, sin restricciones de edad. Para recolectar estos datos se diseñó un cuestionario que permitió obtener información precisa acerca del perfil del paciente y percepción del prototipo en aspectos como seguridad, facilidad de uso y eficacia del mismo, haciendo hincapié en mejoras de seguridad e higiene. La investigación permitió concluir que el prototipo tuvo una aceptación del 95% cuando se realizaron pruebas preliminares con pacientes recurrentes, a partir del análisis de la desviación estándar de las mediciones basadas en el índice de Hernández corvo. En las primeras pruebas prevaleció el diagnóstico de pie normal-cavo.

Palabras clave: — Índice de Hernández Corvo, podoscopio, fuerzas plantares, diseño mecatrónico, salud plantar.

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: dcampo@unicomfauca.edu.co



Abstract

The pathologies that affect the feet can be of diverse nature: articular, muscular, skeletal, orthopedic, metabolic, vascular, neuropathic, or dermal, and all of them are relevant for life and the maintenance of independence. Therefore, knowing the pathology that affects each foot is a key aspect for health. This work presents the develop of a podoscope that allows the analysis of the plantar footprint and determine the pathologies of the foot, since these are one of the most common health problems, although some may be due to heredity, many come from the accumulated impact of a lifetime of abuse and neglect, and inappropriate behavior habits. A mechatronic design approach was used, a concept mapping studies, followed by a Cad/Cam design that then allowed defining the materials to be used; it also included the development of the software for processing the obtained digital images, with the implementation of filters to minimize the image noise, such as Gaussian and Laplacian filter. The proposed device allows a static analysis of the footprint, it shows the distribution of the plantar forces by means of pseudo-color images, it has the option of issuing a valuation of the footprint, where the Hernandez Corvo index is shown. As a result, synthesized data are observed from a quantitative study carried out with 11 patients, of both sexes, without age restrictions. In order to collect this data, a questionnaire was designed to obtain precise information about the patient's profile and perception of the prototype in aspects such as safety, ease of use and efficacy of the same, emphasizing improvements in safety and hygiene. The research allows concluding that the prototype had a 95% acceptance when preliminary tests were made with recurrent patients, from the analysis of the standard deviation of the measurements based on the Hernandez Corvo index. In the first tests, the diagnosis of normal-cavo foot prevailed.

Keywords: Hernandez Corvo index, podoscope, plantar forces, mechatronic design, foot health.

Introducción

El pie es una estructura locomotriz, a su vez es la base de nuestro cuerpo por ser el contacto que se tiene con la superficie de apoyo, en este sentido varios autores lo han estudiado. Así, Viladot expone que “el pie es una estructura tridimensional variable, base del servomecanismo anti gravitatorio y que constituye una pieza fundamental para la posición bipodal y la marcha humana” [1]. Lippert comenta que el pie humano es el resultado de la transformación del pie prensil de los monos en un pie estático de apoyo [2], Hernández Corvo analiza que la funcionalidad del pie humano está claramente influenciado por su estructura, ya que gracias a la forma cupular de la bóveda plantar y sus puntos de apoyo en talón y metatarsianos, es capaz de soportar todo el peso del cuerpo sin hundirse, además la altura del arco longitudinal interno tiene influencia sobre otras estructuras del cuerpo, como la espalda [3]. La bóveda plantar constituye el carácter más distintivo del pie

humano, se puede considerar estructura en un sistema funcional, viscoelástico Merced a sus componentes musculotendinoso y dermoaponeurótico y osteo-ligamentario que le va a conferir su rigidez esencial para soportar las sollicitaciones mecánicas [4]. Existen varias alteraciones de la bóveda plantar, estas se conocen como patologías y son uno de los problemas de salud más comunes, aunque algunas pueden deberse a la herencia, muchas provienen del impacto acumulado de una vida de abuso y negligencia, y de hábitos de conducta inapropiados. Las patologías que afectan a los pies pueden ser de diversa índole: articulares, musculares, esqueléticas, ortopédicas, metabólicas, vasculares, neuropáticas, o dérmicas, y todas ellas son relevantes para la vida y el mantenimiento de la independencia. Por ello, la prevención de ciertos hábitos y estilos de vida que contribuyan a la pérdida de autonomía e independencia funcional, constituye un aspecto clave [5]; entre estas patologías se encuentran: El pie normal, el cual es aquel cuyo ángulo de Moreau-Costa-

Bartani tiene unos valores de 120-130° y el ángulo astragalocalcáneo (ángulo de Kite) de 15-20° en las proyecciones radiográficas de perfil y dorsoplantar, respectivamente. Los arcos longitudinales del pie van decreciendo progresivamente de 18 a 25° para el primer radio hasta 5° para el quinto radio [6].

Existe también un pie cavo, el cual tiene un aumento en altitud y amplitud del arco longitudinal. Por ello el retro y antepié están más próximos, y está muy disminuido su borde de apoyo externo. Habitualmente es asintomático, pero puede ocasionar malestar, entorsis de repetición del pie o tobillo y cansancio de los pies; en presencia de un pie cavo se debe pensar en una enfermedad neurológica, por desequilibrio muscular paralítico o espástico. Existen también el pie cavo idiopático, el pie cavo hipertónico en deportistas o bailarinas, el pie cavo congénito (muy raro, en pie zambo residual, artrogriposis) y el secundario a traumatismos (cicatrices retráctiles, fracturas, síndrome compartimental). Las neuropatías hereditarias sensitivo motoras (enfermedad de Charcot-Marie-Tooth) y las atrofas musculares espinales distales son las afecciones neuromusculares que causan con mayor frecuencia un pie cavo, alteración que también se presenta en enfermedades neurológicas de diversa etiología, como la ataxia de Friedreich, la poliomielitis, la parálisis cerebral o las distrofias musculares.

Según su posición en el plano sagital, el pie cavo puede ser anterior, posterior o mixto [7]. Y por último un pie plano, este muestra disminución del arco longitudinal o bóveda plantar y desviación del talón en valgo. El pie plano valgo es fisiológico durante los 2 o 3 primeros años de edad, y con el crecimiento el arco plantar se eleva. No se requiere tratamiento para este pie plano elástico que presentan los niños. Las principales pruebas complementarias de diagnóstico serán las proyecciones radiográficas en carga, en las

que se podrá determinar el aumento del ángulo de Moreau-Costa-Bartani en el perfil y del ángulo de divergencia astragalocalcáneo. El fotopodograma y la observación por podoscopio serán igualmente útiles. El pie plano puede ser de origen congénito o adquirido. Pie plano congénito; es el más frecuente y puede ser flácido o rígido. El pie plano rígido es secundario a alteraciones óseas como las anomalías del escafoides, el astrágalo vertical o las coaliciones tarsianas. Los síntomas clínicos de la coalición tarsiana suelen aparecer en la segunda o tercera décadas de la vida, cuando la coalición se osifica y se vuelve rígida. Al inicio el dolor suele ser lento, vago, pero se agrava con la marcha, sobre todo en terreno irregular y la bipedestación mantenida, y mejora con el reposo. A menudo un traumatismo, incluso leve, es el desencadenante de la sintomatología. Mientras que la coalición tarsiana suele considerarse habitualmente en el diagnóstico diferencial del pie doloroso en los niños y adolescentes, en los adultos esta entidad es poco reconocida y habitualmente se retrasa, incluso en años, su diagnóstico [8].

La frecuencia de los problemas de salud de los pies es alta en muchos países, aunque su análisis ha sido evaluado en pocos estudios. En la actualidad, diferentes estudios afirman que la prevalencia de las enfermedades en el pie aumenta con la edad y que los factores con los que más se relaciona son: la obesidad, la diabetes, la actividad deportiva, las alteraciones vasculares, traumatismos, y sedentarismo [5].

La influencia de las patologías de los pies en la calidad de vida es muy significativa, ya que repercuten negativamente en la salud, siendo fuente de malestar y dolor en el pie en particular y de incomodidad en general, mientras que en la infancia y en los jóvenes los problemas más comunes son los pies planos y dolores en el talón [9].

La medición de la distribución de la presión plantar es útil para el diagnóstico de enfermedades y patologías del pie, en la evaluación de la deformación del pie, el seguimiento de tratamientos protésicos, y la evaluación de plantillas, entre otros [10].

Por esta razón, hoy en día el uso de sistemas para analizar la distribución de la presión plantar en un laboratorio de biomecánica o de análisis del movimiento, ya sea con fines académicos o clínicos, es indispensable. Entre estos sistemas se encuentran los podobarógrafos, que son sistemas ópticos de medida de la presión plantar. Estos equipos fueron desarrollados basándose en una técnica aplicada por primera vez por Chodera en 1957 [11], y durante casi 50 años su diseño y construcción ha ido evolucionando y mejorando, mediante estudios que evalúan el principio físico subyacente, comparan los materiales transductores más utilizados y plantean nuevos métodos de calibración con el fin de eliminar errores producto del material seleccionado. Sin embargo, su desarrollo no se ha estancado, debido a que los podobarógrafos necesitan del procesamiento de imágenes de la planta del pie para obtener resultados, lo cual demanda una alta capacidad de cómputo para poder obtener resultados en un lapso corto [10].

En este sentido se presenta el desarrollo de un prototipo de un podoscopio para el diagnóstico de patologías del pie por medio del procesamiento de imágenes. Se establece una metodología de diseño mecatrónico tanto para el hardware como para el software del podoscopio; en cuanto al software este extrae parámetros morfológicos a partir de la obtención del registro de huella plantar, toma como base el índice de Hernández Corvo por sus características, haciéndolo flexible y versátil para enfrentar la subjetividad frente a un paciente que refiere dolor en el pie o en su sistema biomecánico. La aplicación hace uso de técnicas de segmentación basadas en el color, la detección de borde mediante un operador óptico y la selección de puntos característicos mediante métodos de optimización discreta. A continuación, se muestra la metodología empleada, después los resultados alcanzados y por último las conclusiones a las que se llegaron con la investigación.

Materiales y métodos

De acuerdo a los objetivos planteados, se abordó una metodología general secuencial por fases [12], que se describen a continuación:



Figura 1. Fases metodológicas abordadas en el trabajo

Fase 1: Obtención de información

Mapeo de conceptos y de información sobre lo relacionado con el podoscopio, el pie y sus patologías. Para ello se realizó una revisión de bibliografía existente sobre las patologías del pie y los estudios de las leyes de reflexión y espejos [13].

Fase 2: Diseño de prototipo

Diseño y estudios para evaluar cargas y el factor de seguridad de la estructura del prototipo utilizando software de diseño CAD y CAM, como SolidWorks . Para desarrollar esta etapa se llevaron a cabo las siguientes actividades:

Diseño del prototipo a implementar.

Para la elaboración del diseño final se parte primeramente de un boceto a mano alzada, este fue llevado a 3D gracias al software SolidWorks (Es un software propietario CAD para modelado mecánico en 2D y 3D). Se realizaron los diseños preliminares con el fin de tener una guía para satisfacer los requerimientos y funciones del producto final del podoscopio. Dicho diseño condensa los requerimientos iniciales básicos para garantizar el funcionamiento adecuado.

Estudios de cargas y factor de seguridad del prototipo a implementar.

Estudios de cargas y de factor de seguridad a cada una de las piezas críticas del sistema. La plataforma del podoscopio, por ejemplo, tiene como finalidad soportar a la persona para realizar el diagnóstico junto con la estructura que soporta la plataforma. Además de esto, se definió una lista de materiales para cada mecanismo que conforma la plataforma. El estudio de factor de seguridad es el cociente resultante que se da entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real al que se vera sometido [14]. En la figura 2 se aprecia las actividades secuenciales que se tienen en cuenta para esta etapa de diseño y simulación.

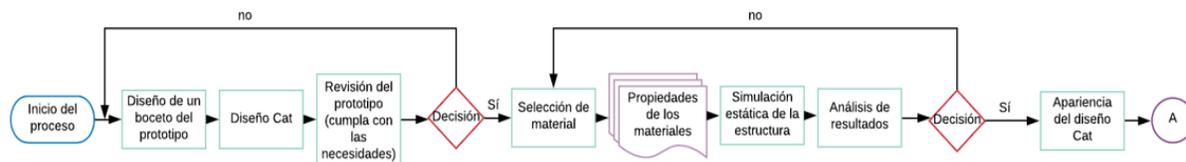


Figura 2. Actividades de diseño y simulación propuesto

Fase 3: Selección y recolección de materiales

En el desarrollo de esta fase, se adquieren el conjunto de elementos que conformaran el podoscopio, a continuación, se mencionan los elementos más indispensables de este proceso.

- Webcam cuyas características son: Sensor de imagen 720p HD pixel, USB 2.0, resolución de imagen fija 1MP, 1280X720, 640X480.
- Fuente modelo S-60-12 de 12V a 5A.
- Luces led (DRL) de aluminio, 17cm a 12v.
- Tubular peinado de 9cm calibre 20 hecho en lámina Cold Rolled o también conocida como AISI 1020 Acero laminado en frio (ver características en la tabla I).
- Vidrio templado laminado con PVB incoloro de 10mm (ver característica en la tabla II)

Tabla I. Propiedades del material

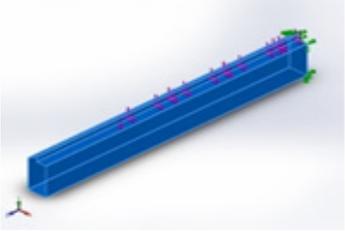
Referencia de modelo	Propiedades	
	Nombre:	AISI 1020 Acero laminado en frío
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal
	Criterio de error predeterminado:	Desconocido
	Límite elástico:	3.5e+08 N/m ²
	Límite de tracción:	4.2e+08 N/m ²
	Módulo elástico:	2.05e+11 N/m ²
	Coefficiente de Poisson:	0.29
	Densidad:	7870 kg/m ³
	Módulo cortante:	8e+10 N/m ²
	Coefficiente de dilatación térmica:	1.2e-05 /Kelvin

Tabla II. Características físicas y mecánicas del vidrio

Característica	Símbolo	Valor numérico y Unidad
Densidad	ρ	2500Kg/m ³
Dureza		6 unidades (escala de Mohs)
Módulo de Young (módulo de elasticidad)	E	7*1010 Pa
Índice de poisson	μ	0.2
Calor específico	c	0.72*10 ³ J/(KG*K)
Coefficiente de dilatación lineal entre 20° y 300°	a	9*10-6K-1
Conductividad térmica	λ	1 W/(m*K)
Índice de refracción medio en el espectro visible (380nm a 780nm)	n	1.5

Fuente: [15].

Fase 4: Construcción del prototipo (Hardware)

A continuación, se presenta las actividades que se realizaron para la parte hardware del dispositivo diseñado. Para ello se tuvieron en cuenta los siguientes puntos.

- Integración-cámara, espejos
- Protocolo – distancia objetivo, iluminación
- Conexión
- Higiene – materiales (vidrio), manta

En la figura 3 se pueden evidenciar las actividades que representa el proceso que se realiza para la construcción del podoscopio, en este se encuentran actividades de vital importancia que tienen como fin cumplir con las características que requiere la elaboración del prototipo. Actividades tales como; cortes, pulido, masillado, impresión 3D, pintura, integración de elementos eléctricos, conexiones, etc.



Figura 3. Diseño del hardware propuesto

Fase 5: Integración del sistema

El software fue desarrollado en un entorno de Python y Qt Designer [16], con las siguientes etapas o módulos; Interfaz gráfica, calibración del sistema, toma de datos, procesamiento de los datos y diagnóstico [17]. A continuación, en la figura 4 se puede identificar la secuencia de las actividades a realizar para la construcción del software de diagnóstico.

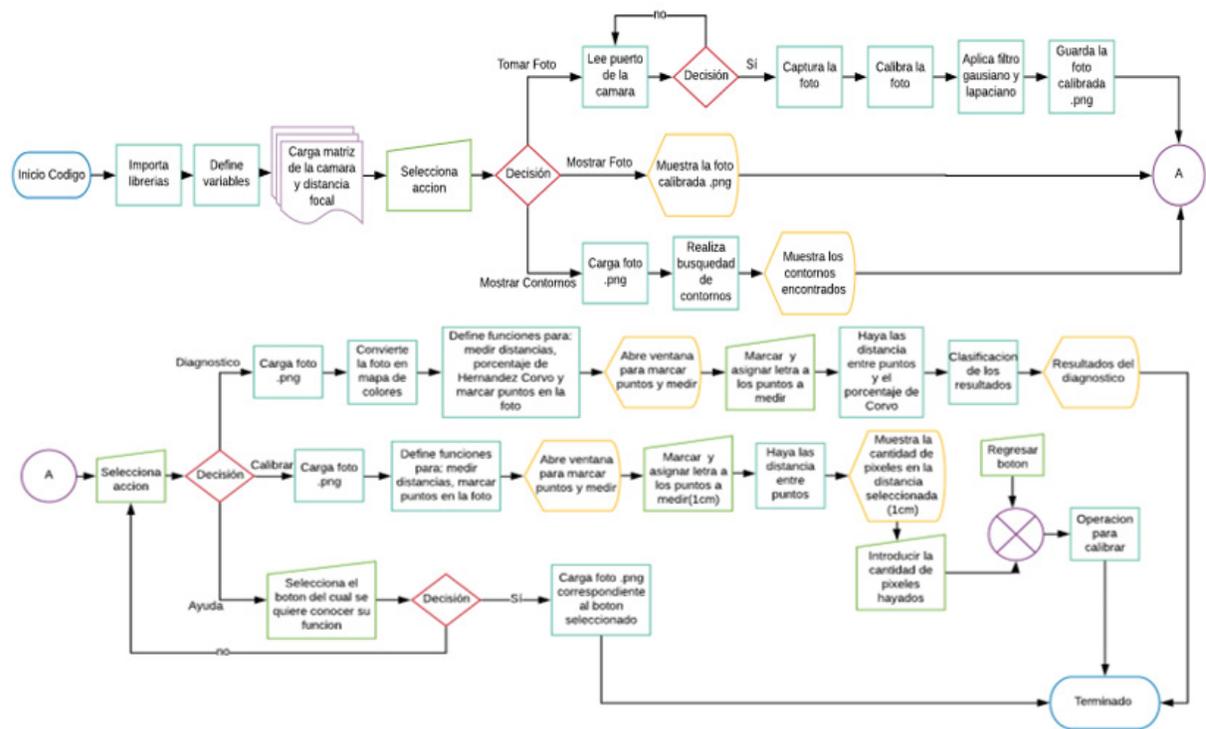


Figura 4. Diseño del software propuesto

El software cuenta con 3 etapas fundamentales que hacen posible el diagnóstico de las patologías plantares de las personas, estas son:

Calibración del sistema.

Calibración óptica de la WebCam incorporada al prototipo. Prover un ambiente controlado en la captura de las imágenes, eliminando aberraciones ópticas y haciendo posible una homogeneidad entre las fotos que sean capturadas por dicha cámara [18].

Procesamiento de las capturas.

Homogeneidad y normalización de imágenes: Aplicar filtros a las imágenes que se capturen por la cámara del sistema [19]. Se traslada la imagen ya calibrada a una escala de grises, buscando poder aplicar un filtro gaussiano y laplaciano sobre ella. El filtro gaussiano aplica un suavizado a la imagen y da una reducción del ruido, dicho filtro se ve expresado con la siguiente función de opencv y una máscara de 5x5, como se muestra en la siguiente ecuación 1.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

El filtro laplaciano fue usado para resaltar los bordes de la imagen, para facilitar el reconocimiento de estos. Se ve expresado con la función matemática mostrada en la ecuación 2 y una máscara de 5x5.

$$Mo(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \left(1 - \frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ -1 & -2 & 16 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La librería opencv internamente ejecuta las funciones de cada filtro y se puede obtener como resultado una imagen con contornos más pronunciados y menos ruido en la misma. Matemáticamente es una convolución en dos dimensiones donde se opera la matriz de la imagen original por la máscara de cada filtro, siguiendo la siguiente ecuación matemática número 3 de convolución 2D:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 f(i, j)h(x - i, y - j) \quad (3)$$

Diagnóstico

El código del software de diagnóstico incluyó el método de Hernández Corvo, para la clasificación de las patologías de planta de pie. Este método consiste en realizar algunos trazos en la huella plantar [20], en las prominencias más internas junto a las externas del pie, buscando con esto obtener los puntos de inicio y fin donde será medido el metatarso de la huella plantar (X) y el arco externo del medio pie (Y). Hernández Corvo plantea una relación donde están conexas las dos distancias anteriormente mencionadas, como resultado se obtiene un porcentaje el cual es clasificado a la patología del pie, según el índice Hernández Corvo Hc. En la ecuación 5, se observa la relación o índice de Hernández Corvo.

$$\%Hc = \frac{X-Y}{X} * 100 \quad (4)$$

El diagnóstico de las patologías de la huella plantar se realizó por usuarios no entrenados que establecen los puntos de interés en la huella plantar de acuerdo a las indicaciones del protocolo Hernández Corvo. La tabla que relaciona los valores obtenidos mediante esta técnica se puede observar en la tabla III.

Tabla III. Escala del protocolo Hernández corvo

%Hc	Tipo de pie
0-34	Plano
35-39	Plano-normal
40-54	Normal
55-59	Normal -Cavo
60-74	Cavo
75-84	Cavo Fuerte
85-100	Cavo Extremo

Fuente; [21].

Para hacer posible el diagnóstico además del índice de Hernández Corvo también se necesita de incorporar al código una ecuación característica para hallar la distancia entre dos puntos, dicha ecuación se ve expresada de la siguiente manera en la ecuación 5:

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5)$$

donde; donde x , y son las coordenadas de los puntos, dados en pixeles.

Fase 6: Validación

En esta fase se validó el prototipo de manera funcional. Como instrumentos de medición se usaron encuestas a profesionales, dicho proceso se realizó de la siguiente manera:

- ***Encuestas:*** Las cuales miden el nivel de aceptación por parte de los usuarios, mediante evaluaciones específicas tales como: facilidad de uso, higiene, seguridad, viabilidad clínica; a partir de ello se realiza un diagrama de barras para hacer un análisis de estadística inferencial, el cual permite obtener conclusiones útiles para hacer deducciones sobre la totalidad, basándose en la información de la muestra.
- ***Estudio de error:*** Este ayuda a indicar el error estimado o la incertidumbre para dar una idea general de cuán precisa es una medición. Dicho estudio se realizó a la toma de 20 datos de las huellas plantares de dos pacientes, es decir para un total de 40 datos, esto por motivos del virus COVID-19 que se presenta actualmente, el cual impidió una evaluación a los 11 pacientes. Estas gráficas son un perfil de seguimiento a las medidas de Hernández Corvo.
- ***Se realiza una prueba de funcionamiento:*** donde el usuario interactúa con la interfaz, esto con el fin de analizar si las mediciones que ha tomado el paciente se encuentran en los rangos del índice de Hernández Corvo, de este modo comprobar de los usuarios pueden hacer uso adecuado de la interfaz y dar un diagnóstico correcto.
- ***Validación fisioterapeutas:*** Finalmente se realizaron pruebas, diagnósticos y encuestas con dos profesionales de la salud, específicamente de fisioterapia siendo evaluados en temas como: facilidad de uso, higiene del dispositivo, área útil, seguridad que brinda la plataforma a los usuarios, ergonomía y nivel de viabilidad clínica; con el fin de obtener las evaluaciones de validación del prototipo de podoscopio. El acompañamiento

fue hecho por profesoras de la fundación Universitaria María Cano de la sede Popayán.

Fase 7: Producto

Finalmente, en esta fase se realizó la presentación del prototipo, sus instrucciones de uso y limitaciones para tenerlas presentes en eventuales versiones futuras.

Resultados y análisis

Diseño CAD final

Después de una serie de modificaciones a diseños preliminares se tiene como resultado final un diseño cuyo objetivo es cumplir todas las necesidades que diseños anteriores no suplieron. Para este diseño se mejora el posicionamiento de la cámara, como también el del espejo y el de la plataforma de captura. Estos dos se encuentran a 90 grados uno del otro, buscando facilitar la reflexión de la imagen plasmada en el vidrio reflejada en el espejo y de este a la cámara. A continuación, en la figura 4 se evidencia de izquierda a derecha la evolución de los diseños, estando en la derecha el diseño final.

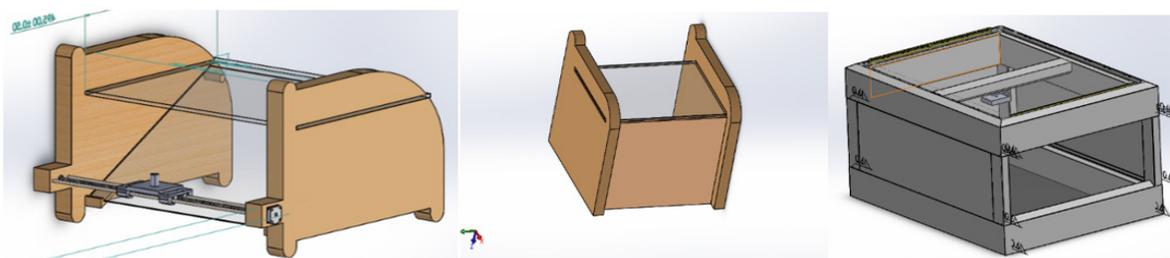


Figura 4. Diseños estructurales del podoscopio propuesto

Simulaciones CAD

A continuación, se muestra los resultados que se obtienen al realizar un estudio de cargas estático. Donde se enfoca en el desplazamiento del material al ser sometido a 1471N y el factor de seguridad de la ubicación de este. Las simulaciones se desarrollan en el software SolidWorks y son realizadas a las dos piezas más críticas del sistema que corresponden al tubular peinazo y al vidrio templado laminado.

Simulación 1: Tubular peinazo o AISI 1020 Acero laminado en frío

Como resultado de esta simulación se tiene un desplazamiento máximo de $1.90179e^{-05}$ m, al estar sometido el material a una fuerza de 1471N equivalente a 150kg. De esta manera se concluye que el material puede soportar sin ningún problema dicho peso. Por otro lado al realizar el estudio de seguridad se tiene como resultado un factor de seguridad de un valor mínimo de 26, el cual garantiza que la ubicación del tubo es segura (los dos estudios se ven en la figura 5, donde el de la izquierda corresponde al desplazamiento y el de la derecha al factor de seguridad).

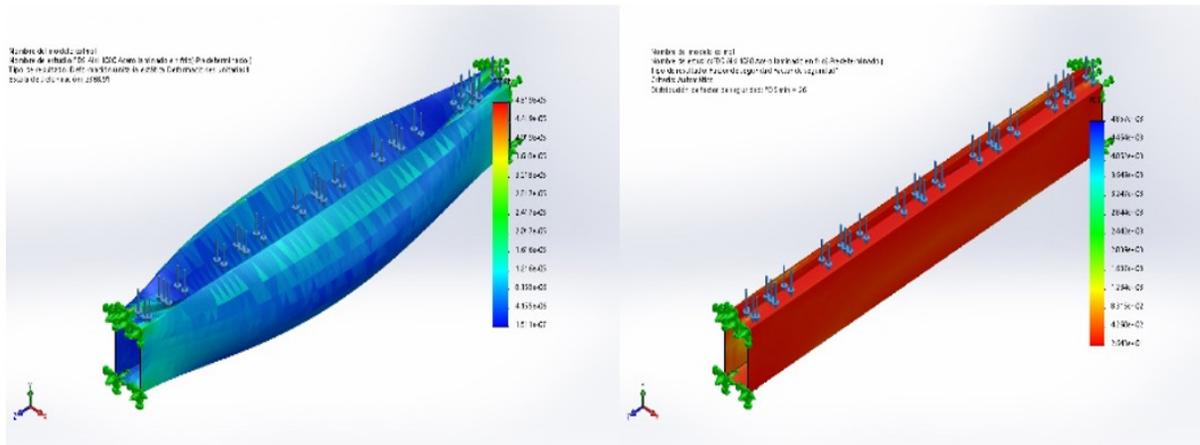


Figura 5. Resultados de simulaciones tubular peinado[Elaboración propia].

Simulación 2: Vidrio templado laminado con PVB incoloro de 10mm

Apartir de la simulacion, se tiene como resultado que el desplazamiento maximo del vidrio templado laminado es de $9.19709e^{-05}m$, aplicado a una fuerza de 150kg. Dicha deformacion nos garantiza que el vidrio al ser sometido a esta fuerza, tendra un buen comportamiento, evitando la ruptura y a su vez garantizando un ambiente seguro para el usuario.

La simulacion del factor de seguridad arroja un valor minimo de 3.1, el cual garantiza que la ubicacion del vidrio es segura. los dos estudios se ven en la figura 6, donde el de la izquierda corresponde al desplazamiento y el de la derecha al factor de seguridad).

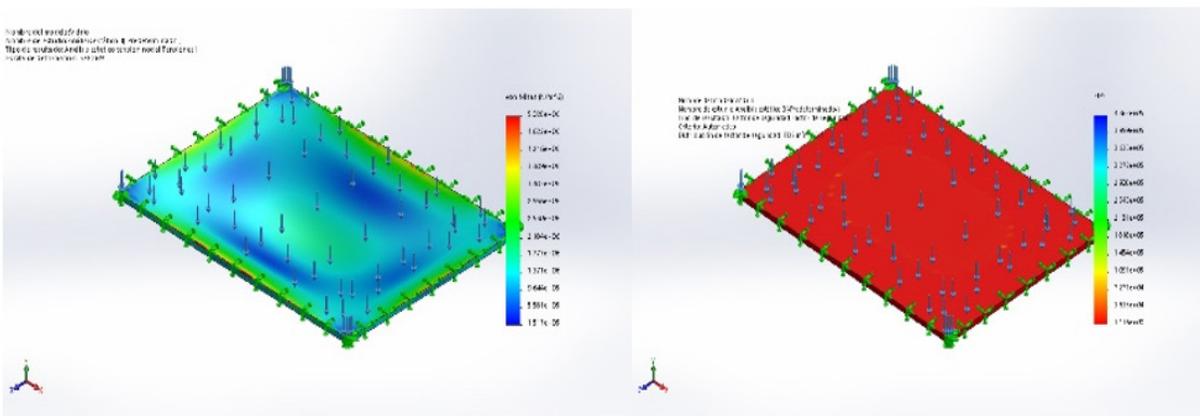


Figura 6. Resultados de simulaciones vidrio templado laminado

Construccion del prototipo

Como resultado se obtuvo una estructura en acero laminado en frio con medidas de 58 cm de largo por 44 cm de ancho y 33 cm de alto. Este prototipo cuenta con una resistencia a la flexión superior a los 150 kg en carga, evidenciado en la simulación de fuerzas estáticas y factor de seguridad. La plataforma cuenta con un vidrio templado laminado de 10mm que certifica, si por algún motivo llega a la ruptura y se encuentra en uso por un beneficiario este no se desplomará hasta el piso, evitando con esto accidentes trágicos. Esta plataforma brinda un área útil de captura de $655.35cm^2$ que equivale a $0.065535m^2$.

Dicha área está sujeta al foco y el zoom digital con el que cuenta la Web Cam, si se desea expandir el tamaño de esta área solo bastará con cambiar la cámara.

La distancia objetivo con la que cuenta el prototipo es de 18 cm, esto se refiere al trayecto que existe entre la cámara y el espejo, siendo esta medida la correcta para poder capturar las imágenes sin ningún problema. Finalmente se tiene como resultado que el uso de una manta negra, garantiza que la imagen tomada para diagnóstico tenga la normalización y homogeneidad en la intensidad de luz suministradas por las tiras leds y la gran reducción de luz externa provenientes del sol o alguna luz artificial, para efectos de verificar lo anteriormente mencionado se realiza un histograma a las capturas con el uso de dicha manta (los resultados de esta etapa se muestran en la Figura 7).



Figura 7. Prototipo de podoscopio

Diseño del software

Se obtuvo como resultado en esta etapa una interfaz gráfica intuitiva con la que los usuarios podrán realizar las capturas de la huella plantar, identificar los contornos de la huella y realizar el diagnóstico de las patologías plantares. Agregado a esto se pensó en un botón de ayuda para el usuario, donde podrá conocer las características de cada y función de cada módulo, con el que cuenta la interfaz y finalmente un botón de calibración para el sistema, es de aclarar que dicha calibración solo será necesaria realizarla cuando el prototipo sea movido de un lugar a otro o cuando alguno de sus elementos sean reemplazados. A continuación, se muestra en la figura 8 el resultado de la interfaz gráfica.



Figura 8. Resultados del diagnóstico

Validación

Análisis de barras de error y perfil de seguimiento para las medidas del índice de Hernández Corvo de acuerdo con la metodología, se proyectaron dos pruebas para identificar el error en la medición para el diagnóstico con pacientes en entorno controlado de iluminación, posición y repetición de 20 medidas. Después de realizar las pruebas de diagnóstico con el podoscopio diseñado y construido en este proyecto, se diagnosticó un pie cavo para el paciente 1, con un promedio de 64,67 en el índice de Hernández Corvo y una desviación estándar de 3,21, lo que indica que el sistema para el paciente 1, ratifica el diagnóstico en el rango definido para su patología, establecido entre 60 y 74 para pie cavo. Además de esto se analiza en la figura 9 una gráfica o perfil de seguimiento a las medidas del índice de Hernández Corvo para cada paciente.

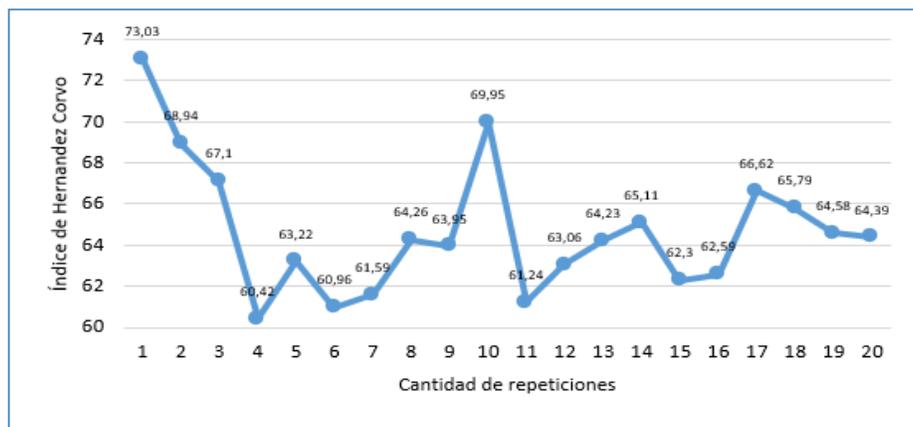


Figura 9. Perfil de seguimiento de las pruebas – paciente 1

Al realizar las pruebas de diagnóstico con el podoscopio, se diagnosticó al paciente de prueba 2, con la patología de pie cavo fuerte, con un promedio de 75,42 en el índice de Hernández Corvo y una desviación estándar de 1,074, lo que indica que el sistema para el usuario 2, ratifica el diagnóstico en el rango definido para su patología, establecido entre 75 y 84 para pie cavo fuerte. En la figura 10 se muestra el perfil de seguimiento de las medidas tomadas y relacionadas con el índice de Hernández Corvo.

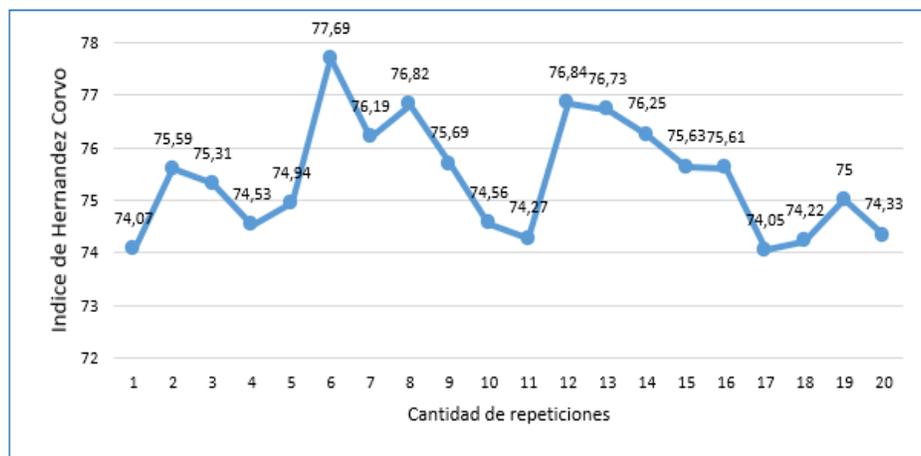


Figura 10. Perfil de seguimiento de las pruebas – paciente 2

Nivel de aceptación del prototipo por parte de los usuarios

Se desarrolló un esquema de validación del prototipo con 11 pacientes, teniendo en cuenta como herramienta de medición una encuesta para calcular el nivel de aceptación y experiencia con aspectos relevantes de hardware, software, seguridad, higiene, facilidad de uso, funcionalidad, calidad, confiabilidad y asequibilidad, en una escala de 1 a 5.

Los resultados generales de las encuestas se presentan en la tabla III, acompañado de su respectivo diagrama de barras en la figura 11. Correspondientes al promedio de solo 11 pacientes que accedieron a participar de los estudios, por los problemas derivados de la infección por COVID-19.

Tabla III. Nivel de aceptación del podoscopio, medido con el instrumento de la encuesta de experiencia de usuario, con 11 participantes voluntarios.

Preguntas	Promedio de las 11 encuestas
¿Cuál cree que es la facilidad de uso del programa de diagnóstico?	5
¿Cómo califica usted el posicionamiento de los pies sobre la plataforma del podoscopio?	4,64
¿Qué le parece el nivel de seguridad percibido al usar la plataforma?	4,55
¿Desde su perspectiva como califica usted la higiene del equipo?	4,82
¿Cuál cree que es el nivel de funcionalidad del prototipo, cree que efectivamente se puede realizar un diagnóstico confiable?	5
¿Cómo percibe los acabados y materiales implementados en el prototipo?	4,82
Califique la confianza generada por el equipo durante la etapa de funcionamiento	4,73
¿Considera usted que el prototipo diseñado es asequible a los profesionales de fisioterapia?	5
Pacientes que realizaron evaluación	11
Promedio de la evaluación	4,77
Desviación Estándar	0,22

De acuerdo a los resultados de la tabla III, se determina que la experiencia de usuario tiene un nivel de aceptación de 4,77 de 5, que corresponde al 95,4%. Este último valor representa un grado de confianza de las mediciones en relación a la experiencia de cada participante.

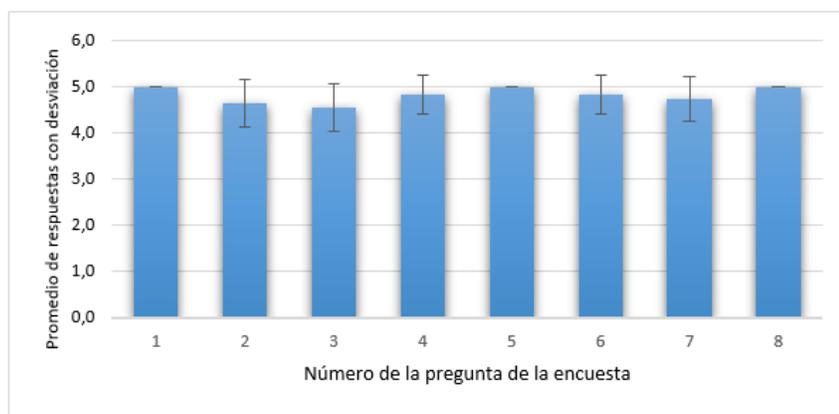


Figura 11. Histograma de percepción de uso de los usuarios frente a las preguntas de la Tabla III

Finalmente se realizaron pruebas, diagnósticos y encuestas con dos profesionales de la salud, específicamente de fisioterapia, con el fin de obtener las evaluaciones de validación del prototipo de podoscopio. El acompañamiento fue hecho por profesoras de la Fundación Universitaria María Cano de la sede Popayán.

En la tabla IV, se observa en detalle la percepción y evaluación de las profesionales de la salud en fisioterapia, en cuanto al desempeño del prototipo y su interfaz.

Tabla IV. Evaluación para el podoscopio por profesionales de la salud FUMC-Fisioterapia Popayán

Preguntas	Fisioterapeuta 1	Fisioterapeuta 2
¿Considera intuitivo y fácil el uso del programa para realizar el diagnóstico?	5	5
¿Qué clasificación general da a los componentes implementados en el podoscopio?	5	3
¿Cómo califica el manejo de la higiene con el dispositivo al realizar diagnóstico a los usuarios?	1	5
¿Cómo califica las dimensiones del área útil (área de captura) con la que cuenta el prototipo?	5	4
¿Clasifique la seguridad que brinda la plataforma de posicionamiento a los usuarios?	1	4
¿Califique el equipo respecto a su ergonomía?	5	5
¿Qué clasificación da usted al uso y funcionamiento del equipo?	5	4
¿A qué nivel considera que el prototipo se rige al índice de Hernández Corvo para realizar los diagnósticos?	5	4
¿Cómo califica usted la viabilidad clínica del equipo?	5	4
Promedio de la evaluación	4,11	4,22

Las preguntas con mayor puntaje fueron la 1,6,7,8 y 9. Y las más bajas la 3 y 5. Nuevamente higiene y ahora también la seguridad.

En este sentido, la verificación de seguridad requiere de proponer la adición de protocolo de medición en espacios adecuados a la altura de la plataforma de medición. Todo esto deberá estar adecuado a los aditamentos de las normas de seguridad del paciente, y se propone para trabajos futuros, y así poder garantizar seguridad y accesibilidad a todos los pacientes al subir al podoscopio. Para realizar un análisis más detallado e integrado de las dos profesionales en fisioterapia, se realizó un histograma con sus respectivas barras de error a cada resultado, esto se presentan en la figura 12.

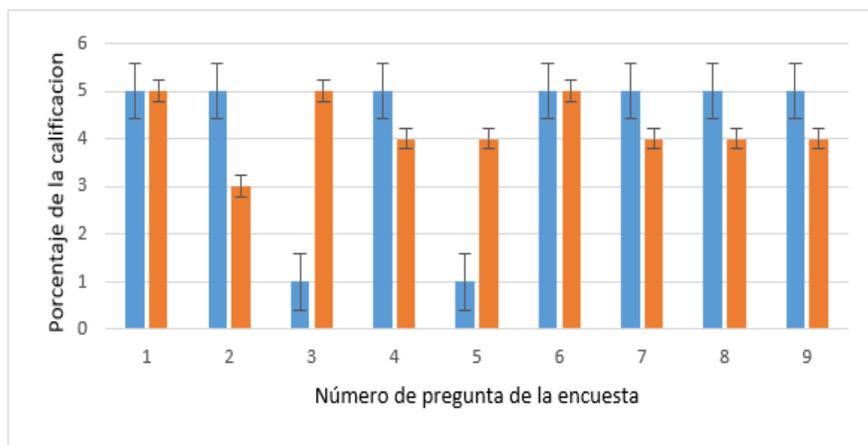


Figura 12. Histograma de los resultados de validación funcional del prototipo.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El área útil del prototipo de podoscopio fue de $655,35 \text{ cm}^2 \pm 1 \text{ cm}^2$ y se relaciona con la apertura focal de la cámara instalada y su distancia focal respectiva, que sirve de factor de diseño, en este caso, para realizar los procesos de calibración y captura de la información en forma digital, normalizados con el algoritmo de procesamiento de imágenes diseñado para tal fin.
- El prototipo tuvo una aceptación del 95% cuando se realizaron pruebas preliminares con pacientes recurrentes, a partir del análisis de la desviación estándar de las mediciones basadas en el índice de Hernández Corvo. En las primeras pruebas prevaleció el diagnóstico de pie normal-cavo.
- La herramienta CAD SolidWorks, permite mejorar el diseño portable y su capacidad máxima de 150 kg, realizando un análisis de las propiedades físicas del material para lograr un diseño físico que cumple con los requerimientos propuestos para la construcción del prototipo.

Referencias

- [1] D. Berdejo-del-Fresno, A. Lara, E. Martínez-López y J. y L. S. Cachón, "Alteraciones de la huella plantar en función de la actividad física realizada", *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, vol. 13, n° 49, pp. 19-39, 2013
- [2] H. Lippert, *Anatomía - Estructura y Morfología del Cuerpo Humano*, 4 Ed, Madrid: Marban Libros, 2001
- [3] S. León, S. Calero y E. Chávez, *Morfología funcional y biomecánica deportiva*, Sangolquí: Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2016
- [4] L. Llano, "La bóveda plantar", *Revista Española de Cirugía Osteoarticular*, n° 128, pp. 67-77, 1987
- [5] D. López, R. García, F. Tajés y L. López. "Análisis del Perfil y Estilo de Vida de las personas", *Revista Internacional de Ciencias Podológicas*, vol. 4, n° 2, pp. 49-58, 2010
- [6] M. Larrosa y S. Mas. "Alteraciones de la bóveda plantar", *Revista Española de Reumatología*, vol. 30, n° 9, pp. 489-498, 2003
- [7] J. Gonzales y J. Pi, *Pie cavo. Diez lecciones sobre patología*, Barcelona: Ediciones Toray S.A., 1981
- [8] R. Viladot y J. Aláez, *"Pie plano". Diez lecciones sobre patología del pie*, Barcelona: Ediciones Toray, 1981
- [9] G. Spraul y G. Koenning. "A descriptive study of foot problems in children with juvenile rheumatoid arthritis (JRA)". *Arthritis Care Res*, vol. 7, n° 3, pp. 144-150, 1994
- [10] D. Andrés, A. Torres, J. Ramírez, L. García y N. Álvarez. "Descripción de un sistema para la medición de las presiones plantares por medio del procesamiento de imágenes: Fase I", *Revista EIA*, n° 6, pp. 43-55, 2006
- [11] J. Chodera, "Examination methods of standing man", *F. U. Czechoslovakian Academy of Sciences*, vol. 1 de 21-3, 1957
- [12] G. P. M. "Procedimientos de diseño en

- mecatrónica", *Ingeniería Investigación y Tecnología.*, vol. XII, n° 1, pp. 209-222, 2011
- [13] A. Ortiz-Acevedo, O. Mata-Mendez y J. Avenda. "Ley de reflexión para espejos planos en movimiento relativista", *Revista Mexicana de física*, vol. 53, n° 2, pp. 134-142, 2007
- [14] B. N. R. Domínguez, "Calidad de la atención de salud. Error médico y seguridad del paciente", *Revista cubana de salud pública*, vol. 31, no. 3, pp. 239-24, 2005
- [15] R. Claramunt, S. Postigo, R. Perera, A. Pacios y A. Huerta, "Seguridad ante impacto humano de acristalamientos en edificaciones", *IX CONGRESO NACIONAL DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE SÓLIDOS*. p. 286, 2005
- [16] A. Jiménez, M. Prieto y A. Ramírez. "Enseñanza del Procesamiento de Imágenes en Ingeniería usando Phyton", *VAEP-RITA*, vol. 3, n° 4, pp. 179-186, 2015
- [17] M. I. . Vidal. "Desarrollo de una Herramienta Multimedia para la Enseñanza de la Programación Orientada a Objetos", *Revista I+T+C*, vol. 1, n.º 7, pp. 45–50, dic. 2013
- [18] S. E. . Nope, J. . Santos Victor, H. . Loaiza, y E. . Caicedo, "Modelo bio-inspirado para el reconocimiento de gestos usando primitivas de movimiento en visión artificial", *Revista I+T+C*, vol. 1, n.º 4, pp. 6–14, dic. 2010
- [19] S. Mallick, "applyColorMap for pseudocoloring in OpenCV (C++ / Python)", 20 Julio 2015. [En línea]. Available: [https://www.learnopencv.com/](https://www.learnopencv.com/applycolormap-for-pseudocoloring-in-opencv-c-python/)
- [20] J. Carreño y P. Cabrera. "Diseño e implementación de un sistema de análisis de las presiones plantares en estática basado en procesamiento de imágenes". Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014
- [21] L. Luengas, M. Díaz y J. Gonzáles. "Determinación de tipo de pie mediante el procesamiento de imágenes", *Ingenium*, vol. 17, n° 34, pp. 147-161, 2016