

SOOTHE - Dispositivo de terapia dirigida por el usuario, para tratamiento del túnel del carpo

Salguero Javier, Andrés Prias, Ayala Gustavo
{jsalguero, apriasj, gayalaa}@ucentral.edu.co

Resumen—Las amplias jornadas de trabajos manuales, que implican movimientos repetitivos, han desencadenado la tendencia a desarrollar el síndrome del túnel del carpo. Este síndrome se manifiesta con fuertes dolores, entumecimiento y hormigueo, debido a la inflamación y un aumento de presión articular que afecta al nervio mediano. Para mitigar estas manifestaciones se plantea el prototipo funcional expuesto en este documento. Con este dispositivo, el usuario tendrá la posibilidad de acceder fácilmente a un tratamiento eficaz y no invasivo, que consta principalmente de electroestimulación por voltaje, series de estiramientos específicos, los cuales son monitoreados. Además, su correcta ejecución es controlada a través de sensores.”

Palabras clave—Túnel del carpo, electroestimulación, estiramientos, tratamiento.

I. INTRODUCCIÓN

Es fundamental entender el origen del síndrome del Túnel del carpo y cuáles son las causas por las que puede presentarse. Esta afectación es ocasionada por un aumento de presión en el nervio mediano ubicado en la muñeca, se presenta por movimientos repetitivos, posturas incorrectas o por el aumento de fuerza en la compresión del músculo.

El nervio mediano es un nervio mixto conformado por la unión de cordones laterales y mediales del plexo braquial; este a su vez se encuentra rodeado por el ligamento carpiano. A continuación, en la Figura 1, se muestra una descripción anatómica de la mano junto con sus partes.

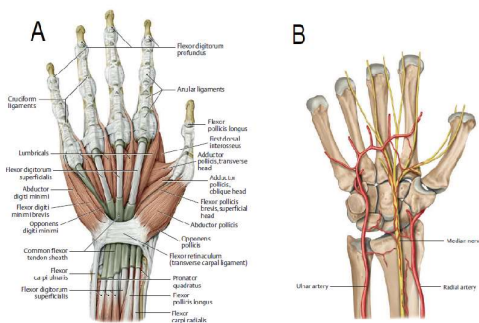


Figura 1. A: Distribución de los músculos de la mano, B: Ubicación del nervio mediano, [1]

En la Figura 2 podemos ver los músculos más importantes de la parte superior de la mano (abductores y flexores) que permiten dos tipos de movimiento:

- Dirección arriba y abajo
- Dirección Lado izquierdo y Lado derecho

Estos movimientos generan un desgaste constante. Para disminuirlo, se presenta el retináculo (*señalado como 1*), encargado de disminuir el impacto que tienen los tendones cuando los músculos se contraen por el movimiento ocasionado en la mano. El nervio mediano (*señalado como 2*), tiende a estar ubicado en la mitad de la muñeca, y los tendones flexores (*señalados como 3*), limitan el rango máximo de movimiento.

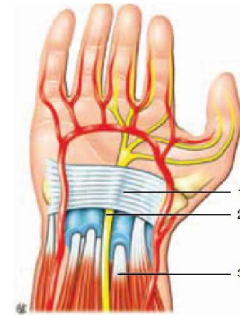


Figura 2. 1. Distribución de retináculo, 2. Nervio mediano y 3. Tendones flexores en la mano, [2]

También es importante tener en cuenta los movimientos generados en los dedos. Aunque sea la parte de la mano más alejada de la zona del nervio mediano, sus movimientos ocasionan una pequeña pero progresiva afectación. Esta depende del tipo de movimiento que se genere en los dedos su frecuencia así como el ángulo del mismo. La Figura 3 muestra los rangos de flexión y movimientos máximos para la mano.

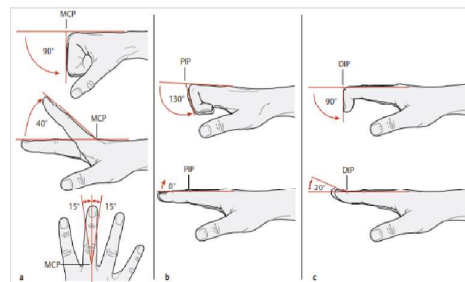


Figura 3. Rangos máximos de movimiento de los dedos, [9]

En la vida cotidiana, los movimientos previamente mencionados operan en conjunto y forman parte de nuestras actividades diarias. Un ejemplo de estas actividades es el trabajo en computadoras, donde es común el uso excesivo de los dedos con el teclado, lo que lleva a movimientos repetitivos de la mano durante periodos prolongados. Por su parte, la interacción con el ratón incrementa la presión negativa en la zona del nervio mediano, llegando incluso al área del antebrazo[2].

En la Figura 4, es posible observar las maneras correctas e incorrectas de sujetar el ratón. También se presentan rangos de movimiento que involucren toda la mano, como se muestra a continuación:

1. Dirección arriba y abajo
2. Dirección Lado izquierdo y Lado derecho
3. Giro 360°

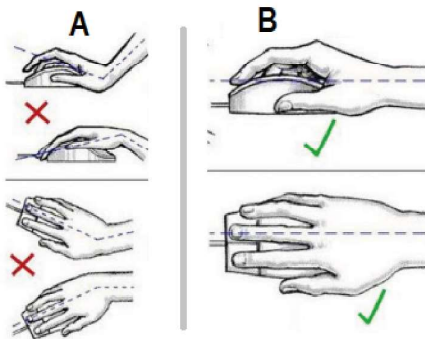


Figura 4. Ubicación de la mano en el ratón en A: Posición incorrecta y B: Posición correcta, [9]

I-A. Población objetivo y contexto nacional

En un estudio de la Universidad Nacional, se identifica una empresa floricultora en la que su personal, con más de 10 años de vinculación, presenta indicios de túnel del carpo (46,3%). La edad promedio en la que presentan síntomas está entre los 40 y 50 años [3]. En el sector de la salud, las enfermeras que realizan el corte de esparadrapo suelen presentar el síntoma después de 4 o 5 años. En general, se observa una tendencia de presencia del síndrome del túnel del carpo de 0,34 por cada 1000 habitantes en las edades de 20 a 24 años hasta 9,42 por cada 1000 habitantes en las edades de 55 a 59 años. Este estudio diagnóstico fue realizado desde 2009 hasta 2019, encontrando un aumento en las edades de 40 a 44 (de 3,11 en 2009 a 5,34 en 2019 por cada 1000 habitantes), de 45 a 49 (de 3,66 en 2009 a 8,66 en 2019 por cada 1000 habitantes) y de 50 a 54 años (de 5,57 en 2009 a 11,61 en 2019 por cada 1000 habitantes) [4].

Lo anterior es solo un caso de los múltiples que existen en el país. Por este motivo, el Ministerio del Trabajo emite el decreto 1477 del 2014 para actualizar la tabla de enfermedades

laborales de la ley 1562 del 2012, donde definen que el síndrome del túnel carpiano es considerado una enfermedad laboral. Este síndrome es la que más casos presenta para el año 2013, con porcentajes entre el 20 y 40 %, seguido del lumbago con porcentajes entre el 3 y 8 %.

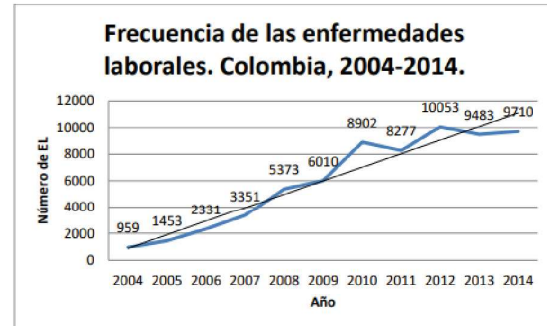


Tabla I
FRECUENCIA DE LA ENFERMEDAD LABORAL EN COLOMBIA ENTRE LOS AÑOS 2004 Y 2014, [5]

I-B. Tratamientos actuales

Una vez se tienen síntomas (leves o fuertes) se pueden realizar las siguientes intervenciones:

■ Tratamiento con férula

El objetivo es tener la muñeca en posición neutra durante la noche y periodos cortos de la actividad laboral.

■ Rehabilitación

Tratamiento en el que se aplican agentes físicos externos con ejercicios específicos (dependen de la gravedad del síntoma presentado)

■ Ejercicios de estiramiento y fortalecimiento

Cuyo objetivo es mejorar la movilidad de la muñeca

■ Electroterapia

De diversos tipos como el ultrasonido, el objetivo es realizar una acción analgésica e anti-inflamatoria

■ Tratamiento farmacológico

Consiste en infiltraciones de corticoides con o sin analgésico local (Inyecciones) o por medio de corrientes eléctricas (iontoforesis) y cuyo objetivo es aliviar síntomas y mejorar la conducción nerviosa

■ Tratamiento Quirúrgico

Puede ser cirugía abierta, en la que se realiza una incisión sobre la zona afectada, o cirugía endoscópica, en la que se realiza un pliegue de flexión en la muñeca y se introduce un instrumento para visualizar la zona afectada y tomar acción correctiva [6].

I-C. Costos por tratamiento

Si bien existen múltiples opciones terapéuticas, estas presentan un costo diferente, debido a las condiciones de

cada individuo se tiene en cuenta la siguiente información:

- Costos directos

Involucran todos los recursos y servicios asociados directamente a la enfermedad, tales como los preventivos, de detección, de diagnóstico, costos sanitarios, no sanitarios y gastos futuros.

- Costos indirectos

Se relaciona con la pérdida de producción o de tiempo productivo asociado a la enfermedad y la discapacidad pertinente para la recuperación [7]. Se puede revisar un consolidado de costos del año 2013, el cual se muestra en la Tabla II:

Costos consolidados por rama del modelo analítico de decisión	Valor en COP
Ferula	\$ 111.570
Ferula mas evento adverso	\$ 126.858
Fisioterapia	\$ 242.880
Ultrasonido	\$ 958.528
Infiltración corticoide	\$ 282.490
Infiltración corticoide mas evento adverso	\$ 297.778
Tratamiento quirúrgico	\$ 931.216
Tratamiento quirúrgico mas evento adverso	\$ 1.539.791

Tabla II
CONSOLIDADO DE COSTOS PARA TRATAMIENTOS TÚNEL DEL CARPO - AÑO 2013, [7]

Las intervenciones anteriormente mencionadas en Latinoamérica han presentado un balance positivo del 94 % de éxito [7], pero si se tienen en cuenta los costos directos e indirectos, el costo final es muy elevado. La mayoría de los usuarios no podría acceder a ellos, teniendo en cuenta que los tiempos de intervención y/o recuperación varían entre los 3, 6 o 12 meses [6].

I-D. Dispositivos y sus aplicaciones enfocadas al Túnel del carpo

Después de entender la opinión de los usuarios, se comprobaron productos que se encuentran en el mercado, ya sean de uso comercial o prototipos especializados que dieron una propuesta para solución del problema, los mas interesantes encontrados son:

- Rehabilitación del síndrome del túnel carpiano Mediante Force Feedback

Proyecto desarrollado en Ecuador, donde se realiza un sistema que junta dispositivos hápticos (encargados del estudio del sentido del tacto) y aplicación con entorno gráfico 3D para realizar ejercicios terapéuticos acordes a la necesidad del usuario [8].

- Dispositivo electrónico para prevenir el Síndrome del Túnel del carpo

Proyecto de grado de estudiantes de la Universidad Central en el que desarrollan un mouse pad encargado de identificar movimientos correctos o incorrectos del usuario y generar

una alerta. Este dispositivo actúa de manera educativa.[9].

Después de validar los proyectos, se realizó un estudio de mercado y se encontró que existen productos de alto y bajo costo, cuya finalidad es **tratar el síntoma del Túnel del carpo y/o inconvenientes afines a la muñeca**. Cada fabricante opta por una intervención no invasiva de manera diferente, procurando, en su mayor medida, manejar un enfoque generalizado, con el fin de no limitar un grupo de personas. Teniendo esto en cuenta, los productos más populares son:

- Ratón ergonómico

Se popularizó debido a su estética y está pensado para disminuir de manera considerable los rangos de movimientos de la muñeca. Es una excelente opción para las personas que hacen uso continuo del computador. Este tipo de ratón se enfoca en modificar la posición de la muñeca; cambia la ubicación de los botones y el usuario debe acostumbrarse a ellos. La Figura 5 muestra las diferencias en la colocación de la mano utilizando un ratón convencional y un ratón ergonómico.

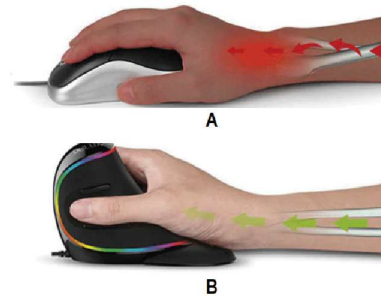


Figura 5. Ratón ergonómico en A: posición incorrecta y B: posición correcta - Tipo 1 [10]



Figura 6. Ratón ergonómico - Tipo 2, Tomada por los autores [16]

La Figura 6 muestra otra topología de ratón ergonómico, a diferencia del anterior, no cambia la posición de la mano, sino

el funcionamiento usual; el ratón mostrado a continuación realiza el movimiento del cursor por medio de una esfera (en este caso de color azul) que se mueve únicamente con el pulgar, esto obliga a que el usuario no tenga la necesidad de mover el ratón para que funcione efectivamente.

Este ratón requiere una curva de aprendizaje mayor, debido a la costumbre del usuario al ratón estándar, en donde es debe mover el conjunto completo del Ratón para desplazar el puntero.

■ Guantes de compresión

Igual que en el caso anterior, existen muchos tipos de guantes o mangas de compresión, su función es inmovilizar de manera parcial la muñeca limitando sus movimientos, lo que evita realizar posturas inadecuadas. Las mas populares son las que ocasionan un presión leve en la zona, permitiendo un mejor flujo de sangre y restringiendo el rango de movimiento de la misma mano; pensado para Túnel del carpo y artrosis.



Figura 7. Guante de compresión [11]

■ Férula

La férula es un dispositivo encargado de limitar el movimiento del antebrazo y la muñeca, siendo la opción no invasiva más popular. Su principal objetivo es restringir los movimientos inadecuados de la mano para generar un descanso en la zona afectada. Normalmente, se utiliza antes de considerar una intervención quirúrgica. La férula convencional para el túnel del carpo es corta y está elaborada en un material moldeable que permite un movimiento de la articulación de 10 a 20°. Esto le permite al usuario continuar con las actividades comunes sin ocasionar limitaciones.

Debido a la popularidad de las férulas, se han presentado variantes de este producto conservando la principal virtud, que es la restricción del rango de movimiento, pero innovando con alguna nueva característica. Un ejemplo de esto es el caso de la Férula U-mano, que incorpora una sujeción mediante velcros para una fácil instalación, así como un cambio en la posición de los dedos con el objetivo de disminuir el volumen que ocupan los músculos flexores de los dedos hacia la zona afectada, reduciendo el impacto directo que ocasionan.



Figura 8. Férula convencional para Túnel del carpo, [12]

La Figura 8 muestra una férula convencional para el tratamiento del túnel del carpo, esta es la forma mas común para el diseño de férulas. La Figura 9 muestra una férula de tipo U-mano.

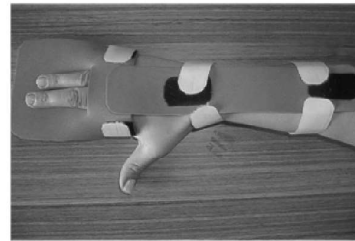


Figura 9. Férula U-mano para el tunel del carpio, [12]

■ Deltahub Carpio 2.0

Existen opciones como el pad mouse con una base en gel para descansar la muñeca. Aunque se piensa que su finalidad es generar un entorno cómodo, este no es el caso. Con el tiempo, pierde su firmeza y puede ocasionar una mala posición en la muñeca. Para garantizar un mejor uso del gel, se debe mantener una posición estática, lo que limita las actividades que se pueden realizar. Por ese motivo, se creó el Deltahub Carpio 2.0, que consiste en un reposamuñecas de plástico. Este ofrece una posición ergonómica de la mano y permite movimientos laterales sin limitar su funcionamiento. La Figura 10 muestra la interacción mano-dispositivo con un Deltahub Carpio 2.0



Figura 10. DeltaHub carpio 2.0 en uso, [13]

I-E. Encuestas y entrevistas

Tomando en consideración lo anterior, el proyecto se aborda utilizando la metodología del Design Thinking. Se inicia con la empatía hacia posibles usuarios, realizando entrevistas a personal capacitado y también a personas sin conocimiento especializado sobre la enfermedad, pero que podrían llegar a desarrollar el síndrome.

■ Validación con personal no capacitado

La validación se lleva a cabo mediante un formulario con más de 60 respuestas, donde se prioriza tener un público variado en términos de edades, tipos de trabajo y conocimiento sobre el síndrome del túnel del carpo. Con esto, se pueden concluir los siguientes puntos:

1. Más del 60 % de los encuestados identifican el síndrome del túnel del carpo.
2. Más del 68 % de los encuestados conocen a un amigo o familiar que presenta algún tipo de molestia en la zona de la muñeca.
3. Más del 63 % de los encuestados tienen una idea de cómo realizar ejercicios de estiramiento para la zona afectada.

Esto nos permite implementar un proceso de intervención no invasiva por medio de estiramientos asistidos, debido a que los movimientos les son familiares (así no los realicen frecuentemente) y permitirán realizar mas rápidamente el ejercicio adecuado sin perder mucho tiempo.

Por otra parte, se confirma que el mayor inconveniente con las personas es su disposición para realizar una pausa activa. Más del 92 % confirma realizar pausas activas, pero no le dedican el mismo tiempo a esta actividad. El 38 % dedica un promedio de 1 a 3 minutos, y el 48 % un promedio de 3 a 5 minutos. Este tiempo es muy corto, lo que respalda la teoría de que la mayor causa de la presencia del Síndrome del Túnel del Carpo es la falta de disposición para estiramientos adecuados.

Afortunadamente, se cuenta con el interés de más del 96 % de los encuestados para el uso de un dispositivo que les apoye mediante imágenes o vídeos en la realización del estiramiento de manera adecuada. Además, más del 95 % de los encuestados muestran interés en el uso de electroestimulación, un método popular utilizado en terapias para el túnel del carpo, y un grupo importante de más del 67 % de los encuestados desea contar con asesoría para su uso.

■ Entrevista con personal capacitado

Aunque se dispone de conocimientos teóricos obtenidos mediante la investigación realizada para este proyecto, es esencial contar con la opinión de personal capacitado y con experiencia. Esto permitirá validar, corregir errores y prestar atención a aspectos que no fueron contemplados inicialmente.

El enfoque principal en esta entrevista fue la cantidad de personas que presentan síntomas en el campo de la enfermería, donde el corte de esparadrapo se destaca como la principal causa de dolencia en la muñeca. Además, se exploraron las predisposiciones por enfermedades que facilitan la presencia del túnel carpiano.

Lo más destacado es el interés mostrado en el proyecto, especialmente dada la escasez de productos disponibles para este tipo de intervención no invasiva. Lamentablemente, nos encontramos en un entorno donde, a pesar de identificarse las causas, no se fomenta el uso de herramientas ergonómicas para el bienestar físico. Es bien conocido que a nivel médico se prioriza la intervención correctiva sobre la preventiva. Aunque en los últimos años, a través de ARL, se ha promovido, en ocasiones de manera obligatoria, el cuidado personal desde todos los ámbitos, como posturas, pausas activas y, por supuesto, enfermedades laborales, dentro de las cuales se contempla el síndrome del túnel carpiano.

Como recomendación, se solicita prestar especial atención al electroestimulador, considerando las condiciones de uso y las limitaciones físicas que presentan los usuarios. Aspectos como enfermedades cardíacas, dispositivos médicos implantados, ubicación de los electrodos en zonas no autorizadas, entre otros, pueden impedir que algunos usuarios opten por este tipo de procesos.

I-F. Objetivos del proyecto

Ahora que se tiene mas claro el síndrome del túnel carpiano se decide diseñar e implementar un prototipo funcional de terapia para el síndrome del túnel del carpo, con el fin de brindar apoyo en el tratamiento de los usuarios afectados de manera sencilla y autónoma que cumpla con las siguientes características:

1. Implementar un sistema de electroestimulación con diferentes rutinas y de libre elección por el paciente.
2. Monitorizar la correcta ejecución de ejercicios de estiramiento para llevar a cabo un eficiente fortalecimiento; articular y muscular.
3. Desarrollar una aplicación móvil como interfaz de control y guía del prototipo

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Con la información recolectada se da inicio al desarrollo del prototipo, este se divide en etapas:

- Etapa de sensado de los ángulos de movimiento de la mano, con el fin de asegurar que los estiramientos se realicen de manera adecuada.
- Etapa de electro estimulación, para disminución del dolor, y desinflamación articular y muscular.
- Etapa de creación del aplicativo móvil, para control y retroalimentación de las etapas anteriores



- Etapa de creación de PCB o circuito impreso
- Fabricación del encapsulado del prototipo o encerramiento.

II-A. Etapa de sensado de ángulos de movimiento

El objetivo de esta etapa monitorear a tiempo real la ubicación de la mano y que cumpla con las siguientes características:

1. Un sistema que no sea invasivo, para garantizar que el usuario final no presente alguna afectación (incomodidad o dolor)

2. Costo del sistema de sensado

3. Portabilidad del sistema

Por lo anterior el sensor escogido es un acelerómetro, el escogido para este proyecto es el MPU6050.

▪ Funcionamiento del sensor

Este sensor es una unidad de medición inercial IMU (Inertial Measurement Unit) con 6 grados de libertad, donde 3 grados corresponden al acelerómetro, que determina la ubicación en el plano X, Y, Z, y los otros 3 grados pertenecen al giroscopio, encargado de medir los 3 tipos de giros posibles, como se muestra en la Figura 11.

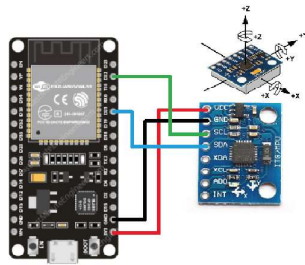


Figura 11. Conexión al sensor y rangos de movimiento, Tomada por los autores [16]

El sensor utiliza un protocolo de comunicación I2C, lo que nos permite enviar datos entre nuestro dispositivo maestro (tarjeta de desarrollo ESP32) y nuestro dispositivo esclavo (sensor MPU6050). Gracias a este protocolo de comunicación, podemos realizar la conexión de múltiples sensores a un solo puerto, lo que nos permite expandir la cantidad de sensores conectados al mismo puerto. [14].

Se procede a realizar la conexión del sensor al controlador ESP32 mediante una protoboard. Se añade un módulo de visualización con pantalla OLED, únicamente para la validación de datos (que no estará presente en el prototipo final). Este se utiliza para monitorear y caracterizar los ángulos de movimiento una vez se realiza el estiramiento de manera correcta. La Figura 12 muestra la prueba de funcionamiento del montaje utilizado para la caracterización de los ángulos límite de movimiento.

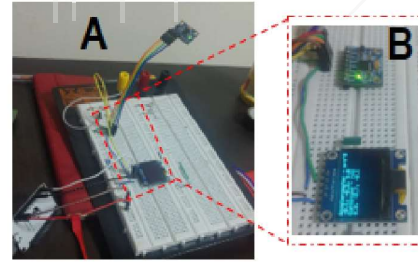


Figura 12. Prueba de funcionamiento en protoboard, A: Conexión en protoboard, B: Visualización de medición en pantalla. Tomada por los autores [16]

▪ Primer diseño (no final) para pruebas de posición.

En el momento en que se valida el funcionamiento del sensor en la protoboard, se procede con la creación de un prototipo funcional para validar la lectura del sensor sobre la mano. Para este punto, se diseña una PCB con el sensor y el display OLED. Se utiliza un LED para validar visualmente el tiempo de respuesta del sensor cuando supera el umbral establecido. La Figura 13 muestra la implementación del primer prototipo con las etapas de sensado y visualización de datos.

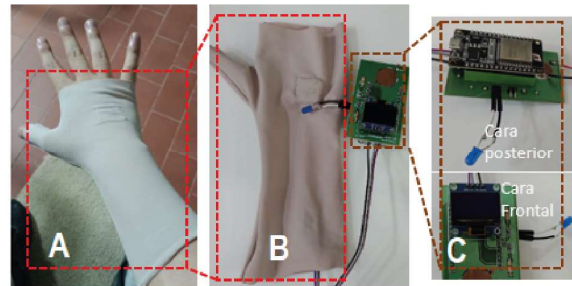


Figura 13. Diseño de prototipo, A: Prototipo de guante, B: primer prototipo, C: circuito impreso, Tomada por los autores [16]

Con esta etapa completa, se confirma que no se requieren más acelerómetros, ya que el que se tiene cuenta con una buena precisión. A continuación, se procede a la comunicación con la aplicación en el celular, la cual se explicará más adelante.

II-B. Etapa de electro estimulación

La electroestimulación muscular es una de las múltiples terapias físicas que existen, recomendadas **como complemento de la terapia de rehabilitación**. Consiste en enviar impulsos eléctricos de manera controlada en la zona afectada y tiene como objetivo contraer los músculos, principalmente los que se encuentran en la zona afectada, generando una disminución del dolor [15].



Esta característica cumple con las condiciones del proyecto; por ese motivo, se procede a validar la posibilidad de realizar un electroestimulador que cumpla con las siguientes condiciones:

1. No depende de conexión eléctrica, esto para encontrar aislado y se disminuya la posibilidad de error.
 2. Sistema portátil y móvil.
 3. Compatible con el sistema ya creado en la etapa de sensado, con el fin de integrar todo en un mismo dispositivo.
- Se opta por un electroestimulador de voltaje, generando una señal bifásica por medio de pulsos generada por la ESP32 e integrada por un puente H.

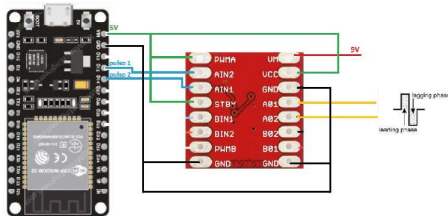


Figura 14. Primer esquema de conexión (no final), Tomada por los autores [16]

- Generación de 2 pulsos monofásicos (desfasados uno de otro) desde la tarjeta de desarrollo ESP32.

El objetivo de esta señal es generar un pulso positivo y, después de un tiempo (en milisegundos), generar el pulso negativo. Seguido de esto, se da un tiempo de espera X antes de volver a generar el pulso. De esta manera, garantizamos tener control sobre la intensidad de la señal generada y la frecuencia del pulso. Al obtener la señal esperada, se conecta un motor DC a la salida del puente H para visualizar la señal bifásica generada (en el motor se vería como un cambio de giro) y funciona correctamente. Con esta prueba finalizada, se procede a la conexión de electrodos a una persona para validar la sensación generada. La Figura 14 muestra el esquema de conexión entre la placa de desarrollo ESP32 y un módulo de puente H.

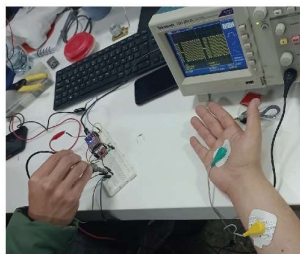


Figura 15. Prueba de electro estimulador en protoboard, Tomada por los autores [16]

Después de una prueba de funcionamiento, como se evidencia en la figura 15, se detecta un fallo en el diseño.

Aunque se logra producir una sensación leve (después de aumentar la alimentación del puente H por encima de 10V), no es suficiente para generar el efecto terapéutico deseado. El puente H con el que se realizó la prueba solo soporta un máximo de 15V, lo cual es insuficiente para el objetivo. Por esta razón, se procede con un cambio en el circuito, integrando ahora un elevador de voltaje para poder generar una electroestimulación acorde a lo que se busca en este prototipo. La Figura 16 muestra el nuevo diagrama esquemático con la implementación de un elevador de voltaje.

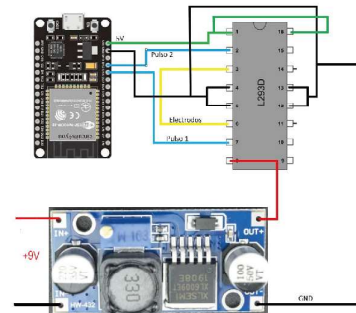


Figura 16. Segundo esquema de conexión para electroestimulador, Tomada por los autores [16]

II-C. Creación de aplicativo

Se desarrolla una aplicación móvil utilizando el framework de desarrollo MIT App Inventor. Esta es una plataforma de desarrollo lowcode de alto nivel que permite desarrollar aplicaciones para dispositivos Android mediante herramientas visuales y gráficas. Se decide utilizar este framework, ya que es gratuito y de código abierto, lo que facilita la accesibilidad y colaboración en el proceso de creación de la aplicación. Además, su enfoque de desarrollo visual simplifica la implementación de funciones y características, acelerando así el tiempo de desarrollo y permitiendo una mayor flexibilidad en la personalización de la aplicación según las necesidades específicas del proyecto.

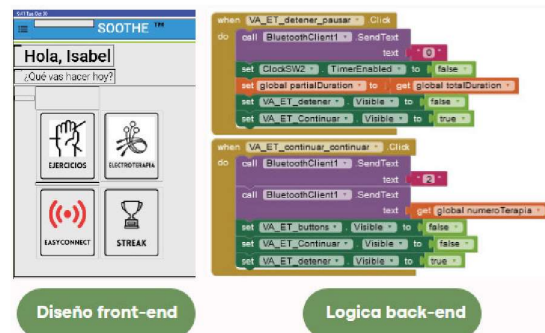


Figura 17. Visualización Diseño Front-end y Logica Back-end en el diseño del aplicativo, Tomada por los autores [16]

Con lo anterior y los circuitos ya definidos se plantean los siguientes pasos para el funcionamiento del aplicativo:

1. Conexión vía Bluetooth de aplicativo a prototipo.
2. Inicio de ejercicios para estiramiento.
3. Inicio de electroterapia.



Figura 18. Pantalla de inicio del Aplicativo, Tomada por los autores [16]

Con esta presentación se cumplen las condiciones sugeridas, con dos adicionales. El primero es la conexión directa con el dispositivo mediante el botón **EASYCONNECT**, el cual realiza la conexión de manera automática, evitando que el usuario tenga que realizar pasos adicionales. El segundo es que maneja un registro de ejecuciones finalizadas en el botón **STREAK**. El objetivo de esta opción es "gamificar" la aplicación para incentivar el uso constante del prototipo. El diseño final de la pantalla de inicio de la aplicación es el mostrado en la Figura 18:

■ Ejemplo de ejecución del prototipo desde la aplicación

Con el fin de generar uniformidad en el uso del prototipo, se sigue el mismo proceso para la puesta en marcha tanto en los estiramientos como en la electroestimulación. Sin embargo, cambian detalles que corresponden a la naturaleza de cada ejercicio. Las Figuras 19 y 20 muestran el flujo de pantallas para la realización de ejercicios de estiramiento y electroterapias, según corresponda.

■ Prueba de Electroestimulación:

1. Seleccionar el tipo de rutina que se va a realizar.
2. Confirmar la instrucción dada en el aplicativo de ubicación del electrodo en la posición indicada.
3. Seleccionar el botón **Comenzar** para iniciar la terapia, cuando se ingresa en ella se tendrá un cronómetro con el tiempo de ejecución, en caso que se desee cancelar la terapia por incomodidad del paciente, se cuenta con un botón llamado **Regresar**, el cual cuando lo oprima cancelará la actividad.

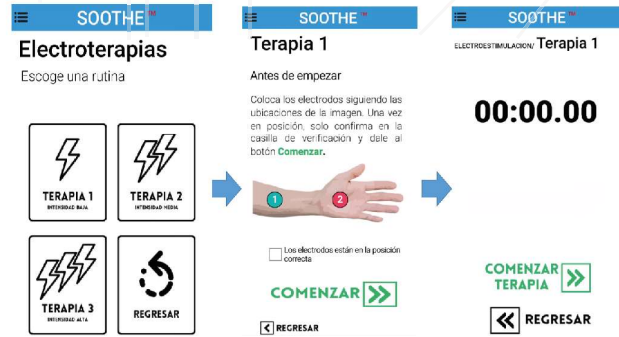


Figura 19. Paso a paso uso del aplicativo - Electro estimulación, Tomada por los autores [16]



Figura 20. Paso a paso uso del aplicativo - censado de la mano, Tomada por los autores [16]

2. Prueba de censado

Para el caso del censado de la mano, se sigue el mismo procedimiento explicado en la etapa anterior, con la diferencia de que el cronómetro se pone en marcha solo si la ubicación de la mano es la indicada en el diagrama. En caso de que no sea así, este cronómetro se detendrá y no enviará ningún tipo de confirmación.

II-D. Creación de PCB

Con los circuitos validados previamente en protoboard y confirmando su conectividad con el aplicativo, se incluye una fase de alimentación para el circuito regulada a 5V, es muy importante por la necesidad de uso de un elevador de voltaje en la etapa de electro estimulación, el circuito baquelado es el siguiente:

El diseño de la PCB se realiza con el programa EASYEDA, principalmente por la posibilidad de envío directo a la fábrica de impresión en China. Las conexiones en las capas se realizan de la siguiente manera:

■ Conexiones en capa inferior

En esta capa se realiza la conexión de la fuente de alimentación del circuito (incluido el elevador de voltaje), la

comunicación con el sensor MPU6050 y el envío de señal desde la tarjeta de desarrollo ESP32 hacia el puente H L293D. Para esta conexión, se selecciona un tamaño de pista de 0.25 mm para una corriente de 300 mA. Toda la capa se encuentra aterrizada a GND. La Figura 21 muestra el diseño de la capa inferior de la placa impresa para los componentes electrónicos.

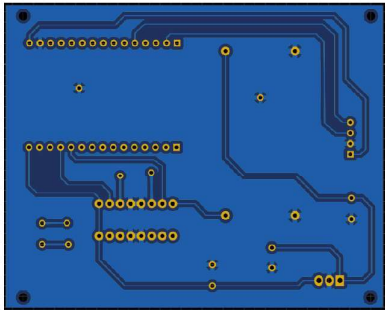


Figura 21. Baquelado capa inferior, Tomada por los autores [16]

■ Conexiones en capa superior

En esta capa se realiza la conexión de los electrodos. Debido al consumo que puede presentar, se selecciona un tamaño de pista de 0.5 mm para una corriente de 700 mA. Toda la capa se encuentra aterrizada a GND. La Figura 22 muestra el diseño de la capa superior de la placa impresa para los componentes electrónicos.

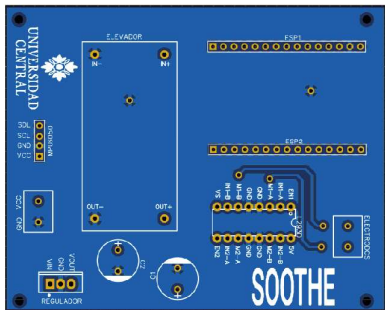


Figura 22. Baquelado capa superior, Tomada por los autores [16]

Con esta PCB tenemos las características mostradas en la Tabla III.

PCB prototipo SOOTHE					
Dimensiones		Puntos de medicion Votaje DC		Puntos de medicion AC	
Ancho	91.05 mm	VCC	9V	IN1-A	Pulso cuadrado generado por ESP32
		VCC MPU6050	3V		
		VIN	9V		
Alto	15.7 mm	Vout	5V	IN1-B	Pulso cuadrado desfasado generad por ESP32
		EN1	5V		
Profundo	72.89 mm	VS	32 V	Electrodos (Debe conectarse Resistencia de 1K)	Señal integrada y amplificada VPP: 32V
		IN+	9V		
		Out+	32V		

Tabla III
CARACTERÍSTICAS DE PCB, TOMADA POR LOS AUTORES [16]

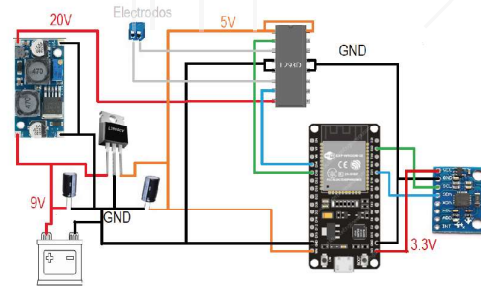


Figura 23. Esquema de conexión del circuito, Tomada por los autores [16]

II-E. Creación de Estructura

Esta es la etapa final del proyecto, se considera un encerramiento pequeño que sea cómodo de manipular y transportar como se ve en la Figura 24. Se utiliza material acrílico para esta etapa de prototipado del diseño exterior final.



Figura 24. Encerramiento, A: Parte externa B: Parte interna, Tomada por los autores [16]

El diseño estructural se divide en parte externa y parte interna.

■ Parte Externa

Cuenta en la parte superior con una tapa removible que permite la visualización interna del encerramiento. En la parte frontal, dispone de un interruptor de encendido, encargado de energizar el sistema interno, un conector USB para el sensado de la mano y un Jack 3.5 para la conexión de los electrodos. Se decide usar un conector distinto para evitar errores de conexión por parte del usuario.

■ Parte Interna

La distribución interna de componentes se realiza en 2 niveles. El nivel inferior alberga la batería de alimentación del circuito, la cual tiene un recinto interno con las dimensiones de la batería. En el nivel medio, se coloca la PCB, que será sujeta por 4 tornillos que la mantendrán elevada.

■ Dimensiones

El prototipo estructural cuenta con las siguiente dimensiones:

Alto	8 cm
Largo	10 cm
Ancho	7 cm

III. RESULTADOS

Para realizar la comprobación práctica del prototipo, se llevaron a cabo pruebas periódicas durante una semana de uso. Esto se hizo con la participación de una voluntaria previamente diagnosticada con el Síndrome del túnel del carpo por profesionales en el área. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

- Se logra identificar que los movimientos de estiramiento son ejecutados de manera correcta progresivamente. Con el transcurso de los días, el paciente aumenta la complejidad y/o intensidad de las rutinas, así como sus repeticiones, lo que se refleja en una adaptación al sistema y un progreso evidente.
- La voluntaria manifiesta que utilizar el dispositivo es intuitivo y no requiere un aprendizaje o adaptación compleja. Además, expresa un interés oportuno en continuar utilizando el dispositivo e incluirlo en su rutina diaria, pudiendo transportarlo sin inconvenientes.
- El dispositivo no sustituye los procedimientos realizados por un especialista.

IV. CONCLUSIONES

- Para el desarrollo del dispositivo en serie, es necesario realizar el diseño electrónico de los circuitos para eliminar los módulos utilizados en el prototipo y, de esta forma, reducir los costos asociados y el tamaño del circuito.
- Es fundamental el uso progresivo del dispositivo para obtener resultados notables. Al no utilizarlo de manera periódica, los resultados causarían menos impacto en el bienestar y los efectos de la enfermedad.
- La inclusión de seguimiento de utilización fomenta el interés del usuario y lo incentiva a utilizarlo de manera continua.
- la implementación exitosa de Design Thinking en el desarrollo de dispositivos biomédicos puede resultar en soluciones más efectivas, centradas en el usuario y adaptadas a las complejidades del entorno médico, mejorando la calidad de atención y la experiencia del paciente.

V. REFERENCIAS

- [1] L. L. Almejo, «Síndrome del túnel del carpo», vol. 10, n.o 1, 2014.
- [2] B. Hirt, H. Seyhan, M. Wagner, y R. Zumhasch, *Hand and wrist anatomy and biomechanics a comprehensive guide*. Stuttgart; New York Thieme, 2017.
- [3] A. Hernández D. Wilder y M. E. Orjuela R., «Factores laborales y extralaborales de floricultores con Síndrome del Túnel del Carpo: cundinamarca-Colombia 2013», *Med. Segur. Trab.*, vol. 62, n.o 244, pp. 199-211, sep. 2016.

[4] D.H Diana Carolina, « Síndrome Túnel Del Carpo, Síndrome Manguito Rotador, Lumbago, Trastornos Discos Lumbares Con Radiculopatía», ene. 2019.

[5] Y. L. Vargas, «Perfil de salud laboral en Colombia a partir del análisis y caracterización de la enfermedad laboral reportada en el Sistema General de Riesgos Laborales. Periodo 2004 – 2014», Universidad nacional de colombia. Accedido: 02 de Noviembre de 2023.

[6] J. Fores, M. M. Dalmau, N. M. Villanueva, R. V. Sauquet, «Tratamiento del Síndrome del Túnel Carpiano — Hospital Clínic Barcelona», <https://www.clinicbarcelona.org/asistencia/enfermedades/sindrome-del-tunel-carpiano/tratamiento>, jul 2018.

[7] F. P. Sanchez «Evaluacion de la costo efectividad de los tratamientos del síndrome del tunel del carpo en la poblacion trabajadora» 2014.

[8] V. H. Andaluz, C. Bustamante D., M. Silva S., M. Escudero V., y P. J. Salazar, «Carpal Tunnel Syndrome Rehabilitation Through Force Feedback», *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, n.o 9, pp. 2467-2472, sep. 2018

[9] J. A. C. Abril y J. F. B. Leiton, «DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA LA PREVENCIÓN DEL SÍNDROME DEL TÚNEL CARPIANO PARA PERSONAS QUE UTILIZAN EN EXCESO EL MOUSE», 2018.

[10] «Mouse Alámbrico Vertical Ergonómico rgb», Xhobbies. Accedido: 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://xhobbies.co/products/mouse-alambrico-vertical-ergonomico-rgb>

[11] «Guantes Compresión Túnel Carpiano Artritis Dedos Libres. Accedido: 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-964154904-guantes-compresion-tunel-carpiano-artritis-dedos-libres-JM>

[12] C. A. Urbina, «Efectividad de la férula U-Mano en el tratamiento del síndrome del túnel del carpo», *Rev. Colomb. Rehabil.*, vol. 6, n.o 1, pp. 39-48, oct. 2007, doi: 10.30788/RevColReh.v6.n1.2007.94.

[13] «Carpio 2.0 - Reposamuñecas ergonómico – DeltaHub». Accedido: 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://deltahub.io/products/carpio-2>

[14] «Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio», *Naylamp Mechatronics - Perú*. Accedido: 28 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/blog/45-tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html>

[15] «Beneficios de la electroestimulación muscular en el campo fisioterapéutico (TENS) y en el desarrollo muscular (EMS)», *Colegio Oficial de Fisioterapeutas de Navarra*. Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.cofn.net/es/beneficios-de-la-electroestimulacion-muscular-en-el-campo-fisioterapeutico-tens-y-en-el-del-desarrollo-muscular-ems>

[16] J. Salguero, A. Prias, G. Ayala, SOOTHE - Dispositivo de terapia dirigida por el usuario para tratamiento del t unel del carpo, 2023.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo se desarrolló dentro del curso Desarrollo de Dispositivos Biomédicos usando pensamiento de Diseño 2023-2, del Programa de Ingeniería Electronica, Universidad Central, Bogotá, Colombia.

