

Desarrollo de un dispositivo activo para la rehabilitación del codo

Development of an active device for elbow rehabilitation

Alejandro Collazos Sánchez

alejandro.collazos00@usc.edu.co

Daniela Alejandra Martínez Noguera

daniela.martinez02@usc.edu.co

Leonardo Antonio Bermeo Varón

leonardo.bermeo00@usc.edu.co

Edgar Francisco Arcos

edgar.arcos00@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Bioingeniería

Resumen

Un dispositivo biomecatrónico es un complemento que permite ayudar o contribuir con el buen funcionamiento de alguna parte del cuerpo, y dependiendo de la patología permite recuperar una función perdida. Los dispositivos biomecatrónicos se pueden adaptar para recuperar cierta función y acoplar una variedad de tareas que sirvan para la rehabilitación. Los diseños se realizan para abordar patologías particulares, lo que implica que se debe adquirir más de un dispositivo para atender cualquier patología. Específicamente en las patologías de la epicondilitis y epitrocleitis no hay muchos dispositivos multifuncionales que adopten más de una terapia, además son de uso institucional, lo que podría generar inasistencia al programa de rehabilitación. Así, este trabajo tiene como objetivo desarrollar un dispositivo biomecatrónico que contribuya a la rehabilitación del codo para personas con epicondilitis y epitrocleitis. El Proyecto cuenta con (i) especificaciones preliminares para el desarrollo del dispositivo activo que permita apoyar el proceso de rehabilitación del codo (ii) el diseño 3D de cinco dispositivos activos diferentes que permitan apoyar el proceso de rehabilitación de codo en movilidad, calor y protección, (iii) construcción de un dispositivo activo escogido por medio de una matriz de evaluación de conceptos que permita realizar terapias de rehabilitación de codo a partir de un diseño seleccionado y (iv) evaluación del dispositivo en personas con epicondilitis y epitrocleitis. Los resultados indican que el dispositivo tiene buena recepción con un 80 % de aceptabilidad, un 18 % regular con posibilidad de mejora, y un 2 % de rechazo.

Palabras clave: dispositivo biomecánico, epicondilitis, epitrocleitis, rehabilitación de codo

Abstract

A biomechatronic device is a complement that helps or contributes to the proper functioning of any part of the body, depending on the pathology, to recover a lost function. Biomechatronic devices can be adapted to recover a certain function and a couple different tasks that can be used for rehabilitation. Designs are made to address pathologies, the designs are made to address pathologies, which implies that more than one device must be purchased to treat any pathology. Specifically, in the pathologies of epicondylitis and epitrochleitis, there are not many multifunctional devices that adopt more than one therapy. Besides they are of institutional use, which could generate non-attendance of the rehabilitation program. Thus, this work aims to develop a biomechatronic device that contributes to the rehabilitation of the elbow for people with epicondylitis and epitrochleitis. The Project has (i) preliminary specifications for the development of the active device to support the elbow rehabilitation process (ii) the 3D design of five different active devices that support the elbow rehabilitation process in terms of mobility, heat, and protection, and (iii) the construction of an active device chosen through a concept evaluation matrix, which allows performing elbow rehabilitation therapies from a selected design and (iv) evaluation of the device in people with epicondylitis and epitrochleitis. The results indicate that the device has a good reception with 80% of acceptability, 18% regular with the possibility of improvement, and 2% of rejection.

Keywords: biomechatronic device; epicondylitis; epitrochleitis; elbow rehabilitation

1. INTRODUCCIÓN

El codo es una de las articulaciones más importantes del cuerpo humano debido a que permite el movimiento de los brazos con el objetivo de ejecutar acciones orientados a la funcionalidad de la persona, siendo una de las articulaciones más significativas en el desempeño motor de una persona. Debido a su importancia, el codo esta frecuentemente expuesto a diferentes tipos de lesiones y eventos patológicos, donde la rehabilitación en ocasiones es inadecuada, o no se realiza, o

simplemente para la persona es difícil mantener el codo en reposo, lo que lleva a aumentar el tiempo de recuperación e incluso a empeorar o quedar con algún dolor crónico al hacer algún movimiento (Ciaccia et al., 2019). Adicionalmente, el codo al ser la segunda articulación principal se luxa con mayor frecuencia con una incidencia estimada de 5,2 luxaciones por cada 100.000 personas (Pipicelli y King, 2020). Es así como dispositivos de posicionamiento se han convertido en instrumentos esenciales para patologías de flexor del codo donde se incluye un descanso que la articulación requiera. Estos dispositivos contribuyen en el tratamiento y rehabilitación de un paciente con alguna patología del codo (Martínez y Warthman, 2021).

La rehabilitación del codo juega un papel crucial en el tratamiento de la patología que se presente. Como regla general el codo no debe inmovilizarse durante un período prolongado donde uno de los objetivos principales de la rehabilitación del codo es prevenir esta rigidez. Además, se deben evitar las actividades motoras vigorosas porque son la causa del fracaso en el tratamiento (Herrera et al., 2020), por eso el proceso o tiempo para poder recuperarse de algún tipo de lesión depende de una serie de terapias con el fin de optimizar y ganar gradualmente la independencia física y recuperar las capacidades que tenía originalmente (Verstuyft et al., 2021). Es importante mencionar que se deben incrementar los niveles de condición física en la población para reducir la incidencia de lesiones deportivas, conociendo los factores de riesgo asociados con la misma actividad física (Cruz, 2008), específicamente en las patologías de la epicondilitis y epitrocleititis que son causadas con mayor incidencia.

El cuerpo tiene un sistema de defensa que provoca una respuesta inflamatoria cuando se presenta una lesión, tales como hinchazón, inflamación, restricción de la movilidad y dolor, siendo este el primer paso de la curación (Delgado-Cidranes, 2019). Específicamente en el codo de tenista y de golfista, el cuerpo trata de combatir evocando una respuesta inflamatoria, lo que es totalmente normal. Después de la respuesta inflamatoria el área lesionada necesita suministrar más sangre para proporcionar nutrientes necesarios y el oxígeno para sanar completamente la lesión. Por lo que después de 3 días el calor proporciona más beneficios que el frío en casos de dolor crónico, ya que relaja los músculos, al dilatar los vasos sanguíneos aumenta el suministro de sangre ayudando en la restricción del movimiento del codo y reduciendo el dolor, haciendo que el paciente se sienta mejor o más cómodo al realizar una actividad (Delgado-Cidranes, 2019). Es aquí donde empieza el proceso de rehabilitación en donde (i) el movimiento es indispensable para lograr una buena efectividad del tratamiento, y (ii) la hipertermia mediante el uso de celdas peltier, ofrece la capacidad de controlar la temperatura de manera precisa y con la ventaja de que el calor se genera en una sola cara, lo que protege el dispositivo y permite dirigirlo con mayor precisión hacia los tejidos que requieren ser expuestos a altas temperaturas, llegando incluso hasta los 45 °C y tiene la oportunidad de realizar la terapia mientras que la celda caliente (Yero et al., 2013).

Uno de los dispositivos más usados para rehabilitación y terapias son las órtesis pasivas y activas, donde se debe tener en cuenta la prescripción médica donde se indique el déficit funcional o el motivo de uso, seguir con las normas de uso y estar alerta ante la posible aparición de efectos secundarios (Vargas, 2017).

Con respecto a la hipertermia un dispositivo de fácil acceso, y de bajo mantenimiento es la celda de Peltier que permite por medio de sus dos caras generar frío o calor a través de un semiconductor con capacidad de realizar este tipo de tratamiento de forma controlada (Patterson y Sobral, 2007).

Con base a lo anterior y teniendo en cuenta que estas patologías persisten por varios meses (Mazeres y Mendez, 2018), en este proyecto se realizó el desarrollo de un dispositivo activo de rehabilitación para personas con epicondilitis y epitrocleititis. El desarrollo incluye la concepción de cinco dispositivos, la identificación de terapias que apoyen a la rehabilitación del codo mediante el uso de un dispositivo activo seleccionado, que consta de tres estructuras: (i) la base que brinda estabilidad durante las terapias, (ii) la estructura que se adapta al codo, donde se encuentran las celdas de Peltier generan termoterapia en caso de ser necesaria y (iii) y la estructura que proporciona apoyo al antebrazo y, mediante una cinta elástica, ayuda a reducir la tensión generada por la terapia, lo que permite realizar una terapia segura que no comprometa la recuperación, como complemento activo en el proceso de recuperación.

2. MARCO TEÓRICO

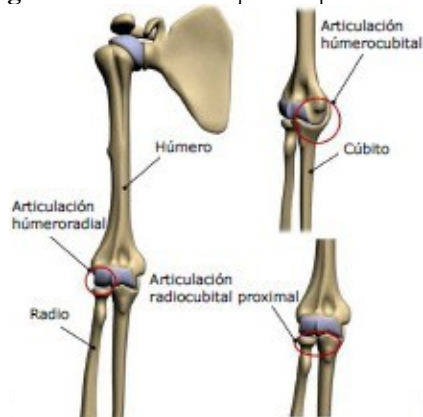
2.1 La ingeniería de la rehabilitación

La ingeniería de rehabilitación es un área que está enfocada en usar la ciencia para el desarrollo de soluciones a los problemas de movilidad o patologías que eviten a las personas tener una vida normal y plena. Por medio de áreas como la biomecánica, se brindan soluciones mediante dispositivos tecnológicos para atender a las personas con discapacidades físicas y cognitivas (Ingeniería de Tejidos y Medicina Regenerativa, 2019). Los dispositivos satisfacen las necesidades de las personas de manera que les permita ya sea disminuir el dolor y o recuperar la movilidad pérdida, permitiendo que las personas mejoren su calidad de vida individual.

2.2 Fisiología del codo

El codo, como se muestra en la Figura 1, es la articulación que conecta el brazo y el antebrazo. La parte superior del brazo está compuesto por el húmero, mientras que el antebrazo está formado por el radio y el cúbito. Las articulaciones permiten el movimiento del codo son la articulación humerocubital, humeroradial y radiocubital proximal (Montenegro-Meza et al., 2013).

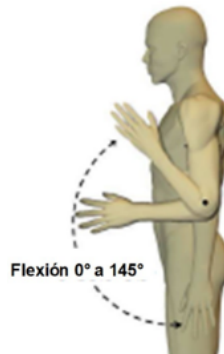
Figura 1. Sistema óseo que compone al codo



Fuente (Montenegro-Meza et al., 2013)

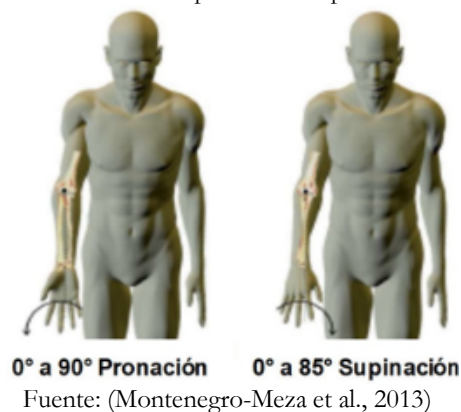
Los movimientos específicos del codo se dividen en la extensión y flexión que tiene un rango de movilidad entre 0° a 140° - 145° como se muestra en la Figura 2 y los movimientos de pronación y supinación, los cuales ocurren cuando se ubica la palma de la mano hacia arriba 0° a 90° (pronación), y posteriormente cuando la palma de la mano se dirige hacia abajo con rango de 0° a 85° (supinación), estos giran sobre su propio eje como se observa en la Figura 3 (Montenegro-Meza et al., 2013).

Figura 2. Movimiento de flexión- extensión en el codo



Fuente: (Montenegro-Meza et al., 2013)

Figura 3. Movimiento de pronación-supinación en el codo



2.3 Epicondilitis

La epicondilitis o codo de tenista, es la enfermedad más común de la articulación del codo. Este es un tipo de tendón crónico causado en la mayoría de los casos por un estiramiento excesivo de los músculos extensores del antebrazo, principalmente relacionado con el trabajo o el deporte. Tiene un perfil ocupacional distinto a otras tendinitis crónicas de las extremidades superiores a las que puede estar asociada. Provoca dolor en la parte externa del codo se irradia al antebrazo, una sensación de pérdida de fuerza en el brazo y, a menudo, es incapacitante. La duración de los síntomas aumenta, generalmente de 6 a 9 meses, aunque puede persistir por más de un año (López y López, 2018).

La fisioterapia a menudo se prescribe como parte del tratamiento de la enfermedad supraclavicular, pero el método de tratamiento más efectivo y la duración del programa aún están en discusión. El método clásico descrito por Nirschem hace varias décadas sigue siendo relevante hoy y tiene como objetivo aumentar gradualmente la fuerza, la resistencia y la capacidad de estiramiento de los músculos del antebrazo con dispositivos adaptados al nivel de requerimientos del paciente. Este método consiste en estirar los extensores de la muñeca flexionando la muñeca, estirando el codo y estirando el antebrazo combinado con ejercicios de fortalecimiento isométricos y concéntricos (Chaustre, 2011).

2.4 Epitrocleitis

La epitrocleitis o codo de golfista, es una enfermedad que afecta a las personas que realizan movimientos de hiperflexión con el codo de forma frecuente y reiterada. Esta es una patología de la unión de los músculos flexores de la mano a la epitroclea (protuberancia ubicada en el interior de la parte distal del húmero). En la mayoría de los casos, la enfermedad es causada por microtraumatismos repetidos por tracción en la articulación de los músculos flexores de la muñeca y la mano. El dolor es causado por la inflamación de la epitroclea y se siente cuando se flexiona el brazo, se extiende el codo o cuando hay movimientos de las manos y dedos (Colegio BIZKAIA, 2011).

2.5 Terapia y Tratamiento

Una órtesis puede ser un dispositivo útil en la rehabilitación del codo el cual puede ser utilizado pre y post operatorio. Existe una diferencia entre las órtesis utilizadas para proteger el codo después de la cirugía y los dispositivos ortopédicos que mejoran la movilidad del codo. Para asegurar la reparación quirúrgica, especialmente en la reconstrucción de tendón/ligamento (Figura 4). Se recomienda la movilización temprana y, dependiendo de las indicaciones, se aconseja a los pacientes que se quiten el aparato ortopédico varias veces al día para poder movilizarse temprano. Cuando se utiliza una férula, esta se retira el día después de la cirugía y se inicia el proceso de la movilidad (Verstuyft et al., 2021).

En el caso de epicondilitis y epitrocleitis, se utilizan órtesis y vendajes para reducir el impacto de la carga en la zona del tendón afectado. Este tipo de órtesis ocupan un tercio del antebrazo, la cual tiene como función absorber y amortiguar la sobrecarga que provocan los movimientos (Mazeres y Mendez, 2018).

Figura 4. Órtesis de codo



Fuente:(Verstuyft et al., 2021)

2.6 La Rehabilitación

La rehabilitación es una causa por la cual la persona se somete a una serie de intervenciones de fisioterapia destinadas a optimizar y ganar gradualmente la independencia física, debido a la pérdida de capacidades y habilidades las cuales se vieron limitadas debido algún accidente o alguna patología. En rehabilitación es común el uso de dispositivos de asistencia, que junto con terapias físicas favorecen los movimientos pasivos y activos del paciente en el miembro o extremidad afectada (Verstuyft et al., 2021).

2.7 La Hipertermia

La hipertermia es una termoterapia que consiste en exponer los tejidos a altas temperatura (hasta 45°C) produciendo una serie de efectos bien conocidos, como: ablandar el colágeno, disminuir el dolor, la rigidez y la inflamación de las articulaciones, reducir la acumulación de líquidos en una zona determinada, eliminar el espasmo muscular, aumentar la irrigación sanguínea, que al aportar nutrientes y oxígeno favorece la curación. La duración de los tratamientos está entre los 5 y los 30 minutos. La idea de usar calor en la curación ha existido durante mucho tiempo, pero inicialmente tenía sus limitaciones. Los dispositivos modernos ofrecen un mayor control y una entrega de calor más precisa. La hipertermia se puede lograr principalmente al exponer los tejidos corporales a altas temperaturas y realizar tratamiento para aliviar principalmente dolor debido a alguna molestia muscular (Yero et al., 2013).

La celda Peltier es un dispositivo (Figura 5) que permite que la corriente eléctrica fluya a través de un semiconductor y cree una diferencia de temperatura en ambos lados. La celda Peltier está compuesta de materiales de tipo P y N en una disposición similar. En el interior contiene elementos semiconductores de alta pureza dispuestos eléctricamente en serie con conductores de cobre. Para aislar los conductores de cobre del calentador, se agrega una placa de cerámica entre ellos que actúa como aislante. Mientras que la mayoría de los portadores de carga, los orificios de los elementos semiconductores P migran hacia el cátodo en cada uno de sus extremos. Esta falta de carga en cada elemento semiconductor cerca de la unión metal-semiconductor provoca una “carga escasa” y, por lo tanto, una disminución de la temperatura en el área circundante. Por otra parte, la compresión o acumulación de medios cerca de la unión metálica del semiconductor en la parte inferior de los elementos semiconductores hace que aumente la temperatura. Este comportamiento indica que, si se invierte la polaridad de potencia, entonces el lado frío se calentará y el lado caliente disminuirá. El uso de estas celdas permite la creación de un nuevo mundo de energía limpia al recuperar energía del efecto Joule de dispositivos ineficientes, diferencias en el transporte de materiales e introducir sistemas de refrigeración baratos y de bajo mantenimiento (Patterson y Sobral, 2007).

2.8 Controlador PID

Un controlador PID (proporcional integral derivativo) es un modelo de control de retroalimentación que usa una utilidad que describe el comportamiento de una salida del sistema en relación con una entrada de referencia. La principal función es hacer que el error de estado estable sea cero. Este controlador se caracteriza por tres parámetros: relativo, que depende del conocimiento actual del sistema, integral, que depende del conocimiento previo del sistema, que determina que el estado estable del error del sistema es cero en el tiempo y la derivada, que realiza el efecto predictivo del Sistema (Bermeo et al., 2021).

Figura 5. Estructura interna de una celda de Peltier



Fuente: (Patterson y Sobral, 2007)

3. ESTADO DEL ARTE

Franco et al. (2021) desarrollaron un dispositivo biomecánico flexible para el miembro superior como se muestra en la Figura 6. El dispositivo permite al paciente prevenir enfermedades asociadas al sedentarismo, y rehabilitación en personas con dificultades de movilidad en el miembro superior, además cuenta con una tecnología que permite potenciar los músculos que contribuyen al movimiento de flexión y extensión del codo mediante un motor DC con batería recargable de 5 V y un brazo hidráulico que permite intercambiar la resistencia a necesidad del usuario dependiendo de su capacidad física. Es un dispositivo ergonómico con engranajes cónicos que acoplan la transmisión del movimiento. El dispositivo a pesar de cumplir con la rehabilitación es muy pesado para sostenerlo por largos períodos de tiempo y no cuenta con termoterapia.

Figura 6. Dispositivo biomecánico



Fuente: (Franco et al., 2021)

Verstuyft et al. (2021) desarrollaron un dispositivo denominado codo ARTROMOT E2 como se presenta en la Figura 7. El dispositivo permite al paciente tener una mejor rehabilitación debido a que cuenta con una tecnología de programación portátil del aumento del rango de movimiento que facilita el estiramiento progresivo estático o arrastramiento dinámico para estirar el codo en flexión o extensión. El dispositivo es ergonómico, versátil y con abrazaderas con resortes hechas a la medida que estiran lentamente, la intensidad puede ser ajustada por el paciente. El dispositivo a pesar de ser de alta tecnología y con diferentes tipos de terapia mecánica (movimiento), no cuenta con terapias de calor o frío y al ser hecho a la medida del paciente, el dispositivo no estará listo en el momento de que el paciente lo necesite.

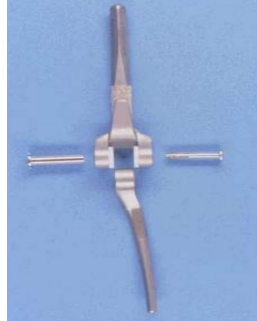
Figura 7. Férula con ARTROMOT E2



Fuente: (Verstuyft et al. (2021)

Antuña y Clavería (2005) desarrollaron un dispositivo invasivo para la Artroplastia de codo como se muestra en la Figura 8. El dispositivo por medio de un mecanismo de bisagra y completamente estrecho permite llevar a cabo la rehabilitación de la variación fisiológica del varo-valgo con la flexión del codo y del componente rotacional normal que ocurre con la flexo-extensión. El dispositivo a pesar de corregir la variación fisiológica del varo-valgo, es un método invasivo que requiere cirugía y hace difícil el acceso.

Figura 8. Dispositivo de artroplastia



Fuente: (Antuña y Clavería, 2005)

Trujillo et al. (2020) desarrollaron un dispositivo terapéutico para el tratamiento del túnel carpiano como se presenta en la Figura 9. El dispositivo se basa en combinar 3 terapias (hipertermia, TENS y vibraciones), lo que permite disminuir los síntomas. El dispositivo cuenta con una base ergonómica acoplada al guante haciendo contacto con la palma de la mano y que permite la fijación de la celda Peltier para producir calor alimentado por un voltaje continuo y por medio de un amplificador operacional conectado como un comparador que evita que la temperatura pase los 40° C. El dispositivo no incluye terapias donde se produzcan movimientos, además de las vibraciones.

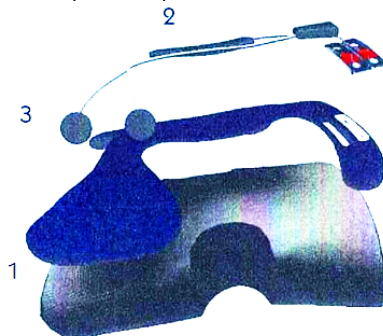
Figura 9. Dispositivo para tratamiento de túnel carpiano



Fuente:(Trujillo et al., 2020)

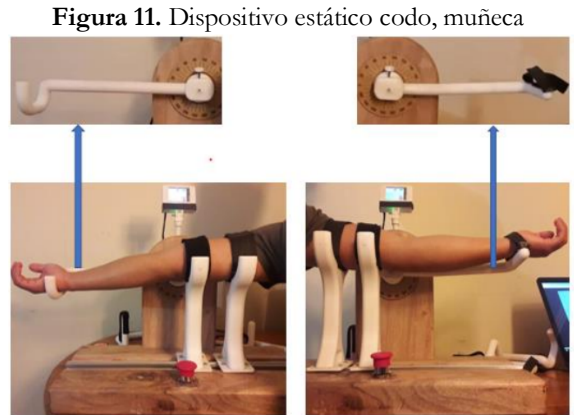
Lueje y Puhmann (2007) desarrollaron un dispositivo para tratamientos kinesiológicos con la capacidad de realizar los tratamientos de termoterapia y electro-analgésia de forma versátil y cómoda. El dispositivo permite al usuario usarlo bajo la ropa y sentirse bien, sin producir exceso de transpiración (Figura 10). El dispositivo cuenta con 3 partes: (1) la contención por medio de la materialidad, (2) materiales electrónicos para generar calor, y (3) material electrónico y electrodos para la flexión y extensión en el momento de que el paciente lo necesite.

Figura 10. Dispositivo para tratamientos kinesiológicos



Fuente: (Lueje y Puhmann, 2007)

Rodríguez et al. (2019) desarrollaron un dispositivo para personas con lesiones por fracturas tratadas quirúrgicamente o por dislocamiento en las articulaciones del codo y muñeca como se muestra en la Figura 11. El dispositivo se adapta al usuario y permite al fisioterapeuta configurar las repeticiones de una actividad. Los movimientos que se realizan son los de flexión-extensión para codo y muñeca, abducción-aducción para la muñeca, en ambos brazos. El dispositivo a pesar de tener la capacidad de movimientos carece de terapias con calor, como también al ser estática y programada requiere un profesional para poder usarla.



Fuente: (Rodríguez et al., 2019)

En la Tabla 1 se realiza un resumen de los trabajos relacionados donde se marcan las terapias que cada uno de ellos incluye.

Tabla 1. Comparación de los equipos para rehabilitación más relevantes

Dispositivo	Termoterapia	Invasivo	Ergonómico	Fácil Manejo	Portátil	Economía
(Rodríguez et al., 2019)	X			X		
(Verstuyft et al., 2021)	X			X	X	X
(Trujillo et al., 2020)	X		X	X	X	
(Franco et al., 2021)			X		X	X
(Antuña y Clavería, 2005):		X				
(Lueje y Puhlmann, 2007)	X		X	X	X	X

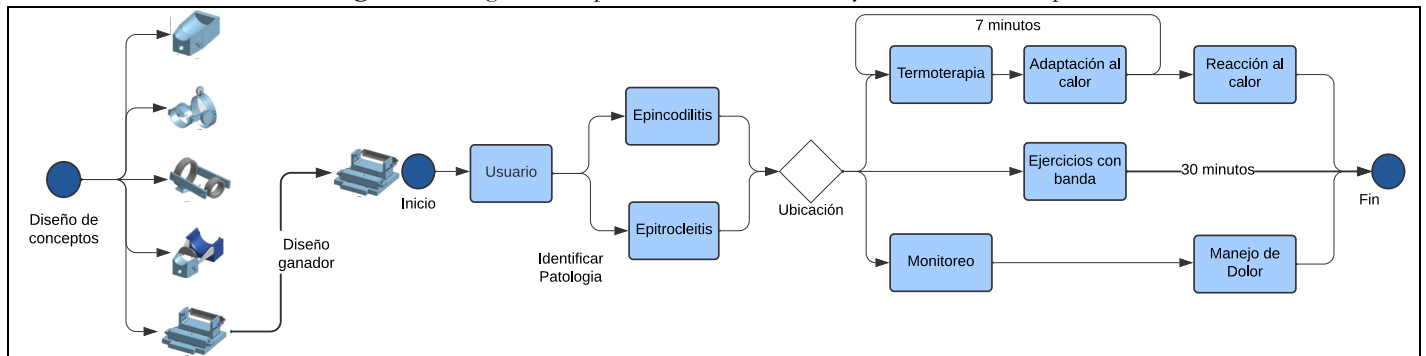
Fuente: Propia.

4. METODOLOGÍA

4.1 Diseño de conceptos

Se realizó una búsqueda de información en diferentes tipos de documentos para analizar los tipos de tecnología y diseño de dispositivos de rehabilitación que hay actualmente en el mercado. Se propusieron 5 diseños en la plataforma Onshape a los que se les realizó una evaluación por medio de la matriz de selección de conceptos donde se identificó el mejor diseño, comparándolo con el diseño propuesto por Verstuyft et al. (2021). Este diseño en particular ha demostrado contar con aspectos importantes, tales como una funcionalidad adecuada para la rehabilitación del codo, calidad y durabilidad destacables a lo largo de todo el proceso de recuperación, y la compatibilidad con otros equipos que permite complementarlo con funciones adicionales según sea necesario. Se realiza un análisis del tipo de fabricación para la construcción del dispositivo. Al considerar todos los aspectos, se ha logrado identificar el diseño más prometedor que cumple con los criterios establecidos. En la Figura 12 se presenta un diagrama de bloques del proceso de construcción y evaluación del dispositivo.

Figura 12. Diagrama del proceso de construcción y evaluación del dispositivo



Fuente: Propia

4.2 Construcción del dispositivo

4.2.1 Mecánico

A partir de la evaluación de la matriz de selección de conceptos, se realiza la evaluación de materiales y tipo de fabricación, luego se realiza la construcción del dispositivo, basado en la antropometría de personas adultas. Adicionalmente, (i) se considera la adición de una tela térmica para la protección de la piel expuesta a la temperatura generada durante la termoterapia y (ii) una banda elástica que permite la realización de las terapias de fortalecimiento.

4.2.2 Electrónico

Se elabora un circuito electrónico con un Arduino Nano que permite controlar la temperatura utilizando el software libre del entorno Arduino, se elaboró un código para el controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID). Este algoritmo permite modificar el punto de referencia por medio de un potenciómetro que va a un Driver L298N1 que conecta 2 celdas de Peltier y un sensor DTH11 para la verificación de la temperatura.

4.2.3 Software

Utilizando el software libre del entorno Arduino, se elaboró un código para control Proporcional, Integral y Derivativo (PID), sobre la temperatura de las celdas Peltier (Anexo 4). El código consta de 4 partes: (i) el control de salida para el controlador, (ii) la lectura del sensor de temperatura, (iii) la lectura del potenciómetro adaptado para ser la perilla de la temperatura deseada, y (iv) el modelo matemático que con los valores PID, calcula el error, la acción integral, derivativa y la salida deseada. Para obtener los datos del controlador, se utilizó el entorno de desarrollo Matlab® el cual permitió obtener una función de transferencia del sistema para luego obtener los parámetros del controlador PID que fueron programado en el Arduino.

4.3 Sujetos de prueba

Se realizaron 50 pruebas divididas en 35 personas que se consideran sanas, 8 personas con molestias de epicondilitis, dos (2) personas diagnosticadas con epicondilitis, 4 personas que tenían molestias de epitrocleitis y una (1) persona diagnosticada con epitrocleitis. El rango de edad de las personas fue de 18 y 30 años y peso de 60 - 90 Kg. Sin tener en cuenta contextura física, el ancho del codo estaba entre 65 mm y 80 mm.

El proyecto está orientado con base en la ley 842 del 2003 que orienta y reglamenta el ejercicio de la ingeniería en lo que respecta al artículo 2, ejercicio de la ingeniería, inciso b, el cual regula los estudios, proyectos, diseñados y procesos de sistema electrónicos y electromecánicos (Min. Educ. Nal, 2003), la resolución 8430 de 1993 en el artículo 2 (Min. Salud, 1993), que indica que las investigaciones que se deseen realizar en humanos deberán contar con la aprobación de un comité de ética, la ley 1581 de 2012 (Min. Comerc. Indus. Turism, 2012), sobre protección de datos personales, y la Norma IEC 60601-1 2013 (ICONTEC, 2013) que establece las corrientes permitidas en cuanto a sus medidas en condiciones normales y las condiciones en las que se empiezan a presentar efectos. Las pruebas y utilización del equipo fueron avalados por el Comité de Ética de la facultad de ingeniería de la universidad Santiago de Cali acta número 013 sesión 003. Adicionalmente, se realizó un consentimiento informado con base en el Artículo 15 de la resolución 8430, donde se especificaron los

objetivos del proyecto, la justificación, los riesgos o molestias inesperadas al paciente, los procedimientos a los que este será sometido, las garantías que este tendrá, entre otros temas importantes que el paciente debe saber (Anexos 2-3).

4.4 Protocolo de medición y tipos de terapia

Las medidas del dispositivo son basadas en información de una calculadora fisiológica que arroja los valores promedios del cuerpo humano (Calcuworld, 2023), donde se indica que el promedio de la fisiología del codo es de 70 mm exceptuando personas con sobre peso o musculatura excesiva.

La temperatura contralada por las celdas de Peltier está entre los 40° y 45° C y el tiempo de los tratamientos está entre los 5 y los 30 minutos. Al aplicar sobre la piel un calor de 40° C (temperatura recomendada) en el área donde se produce el dolor, el cerebro recibe la señal de calor que sustituye a la de dolor. En un plano bioquímico, la celda de Peltier actúa como una pastilla analgésica, pero sin efectos secundarios.

Para comenzar la terapia de rehabilitación del codo deberá seguir los siguientes pasos.

- 1) Ubique el dispositivo en una mesa firme que esté cerca de un tomacorriente.
- 2) Asegurarse de que haya suficiente espacio alrededor de la mesa y proceda a colocar la base del dispositivo en el borde de la mesa.
- 3) Fijar la base del codo y colocar la banda elástica de la base del antebrazo en la zona como se observa en la Figura 13. La banda elástica facilitará los movimientos al momento de realizar las terapias.
- 4) Ubicar la base del antebrazo de manera que el codo quede en la base.
- 5) Asegurar con la tela térmica la parte donde se coloca la celda de Peltier y verificar que el potenciómetro este totalmente girado hacia la izquierda. Una vez las celdas comienzan a calentar se puede variar la temperatura con el potenciómetro hasta donde el paciente considere aceptable.
- 6) Realizar 4 series de los ejercicios explicados en la Figura 14 y 15 dependiendo de la patología que el paciente tenga, esto se debe realizar 2 veces al día durante 1 mes.
- 7) La termoterapia se realiza durante 7 minutos, luego se realiza un reposo de 2 minutos antes de continuar con la otra serie.

ADVERTENCIA hay que tener cuidado con que la celda que no supere los 45° C o podría producir una quemadura.

Figura 13. Ubicación de banda elástica



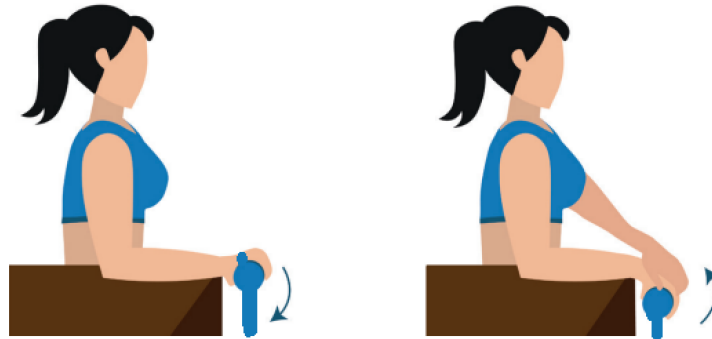
Fuente: Propia

Una vez terminada la termoterapia se procede a complementar con la terapia de fortalecimiento donde en la misma posición se desconecta el dispositivo y se instala la banda elástica. El calor en general sirve para las 2 patologías. Sin embargo, los ejercicios de fortalecimiento son diferentes para cada patología. En las Figuras 14-15 se muestra las terapias de rehabilitación dependiendo de la patología.

En la Figura 14 se observa el fortalecimiento de extensores con banda elástica. Nótese, que se debe colocar el codo flexionado en la base de codo, apoyar el antebrazo en la base del antebrazo con la muñeca al aire y la palma hacia abajo sujetando la banda elástica, el otro extremo debe estar ajustado al pie o con alguna superficie fija. La terapia consiste

entonces en bajar la muñeca lentamente hasta el máximo y luego vuelva a la posición inicial con la ayuda de la otra mano, también en la misma posición y agarre realizar movimientos de pronación y supinación con la misma frecuencia.

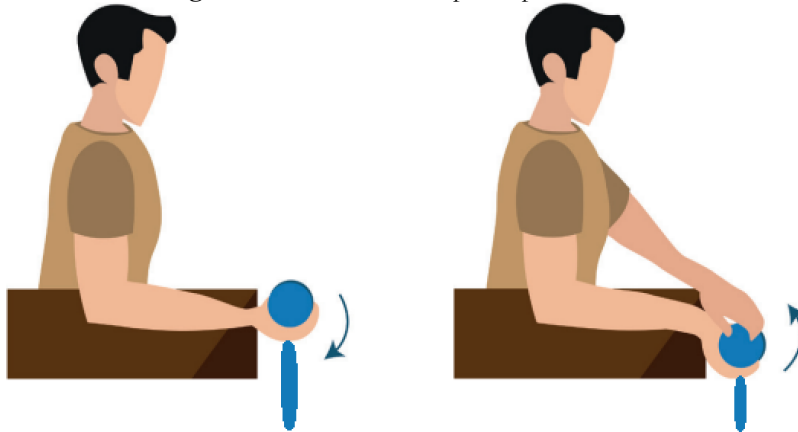
Figura 14. Fortalecimiento para Epicondilitis



Fuente propia

En la Figura 15 se observa el fortalecimiento de flexores con banda elástica. Nótese que se debe colocar el codo flexionado en la base del codo, apoyar el antebrazo en la base del antebrazo con la muñeca al aire y la palma hacia arriba sujetando la banda elástica, el otro extremo debe estar ajustado al pie o con una superficie fija. La terapia consiste en realizar flexión y extensión de la muñeca lentamente y volver a la posición inicial con la ayuda de la otra mano, también en la misma posición y agarre realizar movimientos de pronación y supinación con la misma frecuencia.

Figura 15. Fortalecimiento para Epitrocleitis



Fuente propia

4.5 Encuesta de satisfacción

Se realizó una encuesta para la evaluación del equipo y satisfacción donde se incluyen los siguientes interrogantes Anexo 1):

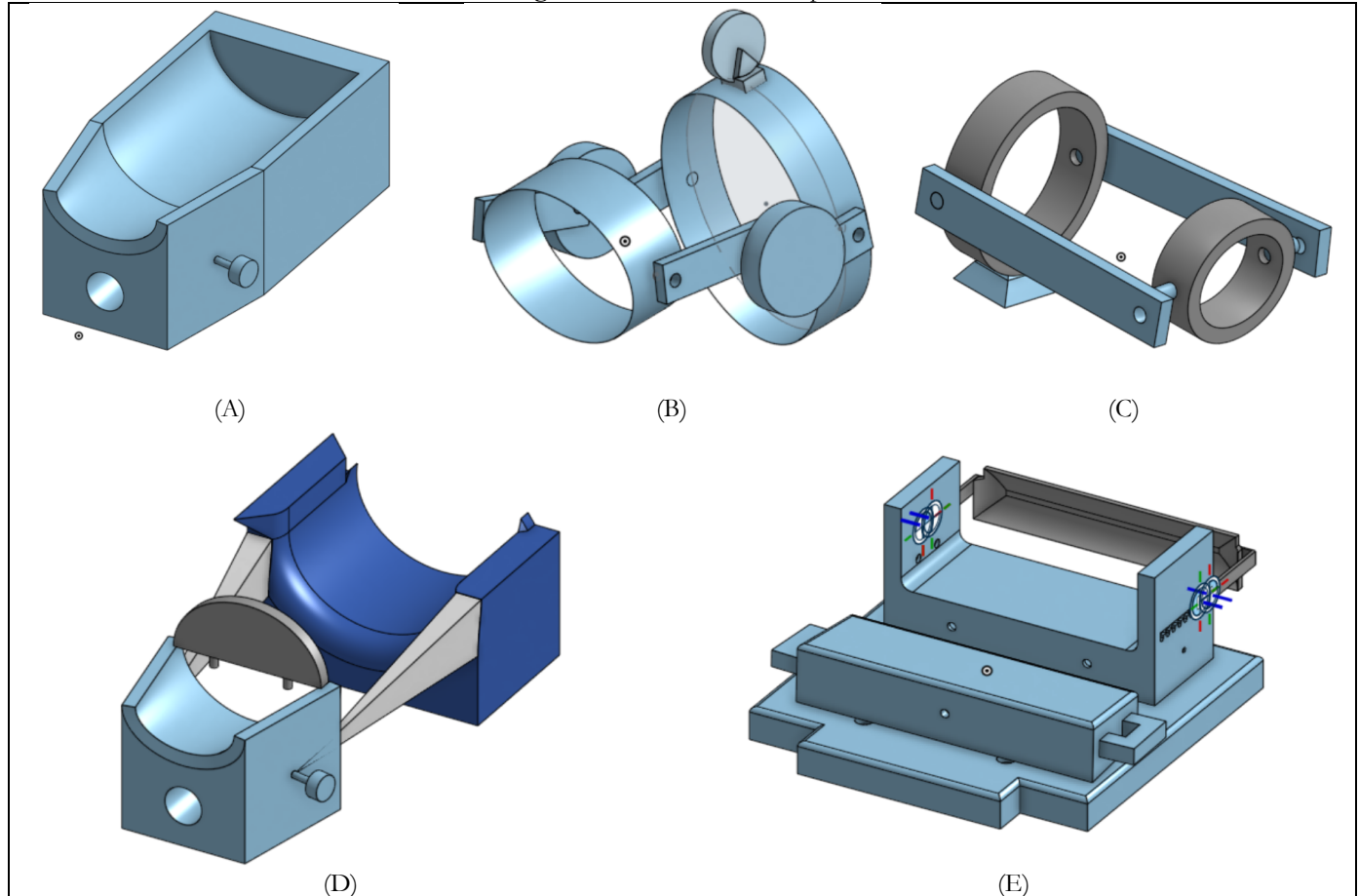
- ¿Está familiarizado con algunos de los siguientes términos: ¿Epicondilitis, epitrocleitis, codo de tenista o codo de golfista?
- ¿El dispositivo es fácil de utilizar?
- ¿Considera usted que el dispositivo es ergonómico?
- ¿Qué terapia cree usted que es más importante para el dolor crónico?
- ¿A continuación, seleccione el criterio que considere más importantes de la evaluación del dispositivo?
- ¿Funcionalidad del dispositivo durante su evaluación?
- ¿Cuál de los siguientes tratamientos considera como efectivo para la rehabilitación del codo?

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Conceptos

En la Figura 16 se muestran los 5 diseños que se realizaron en la plataforma Onshape, a los cuales se les realizó una evaluación de criterios por medio de la matriz de selección conceptos.

Figura 16. Diseños de Conceptos



Fuente: Propia.

En la Tabla 2 se presenta la matriz de selección de conceptos donde se evalúa el fácil manejo, la ergonomía, portabilidad y generación calor. Nótese, que el diseño E (Figura 16) es el concepto con mayor calificación y es se considera para continuar con el desarrollo. Sin embargo, el diseño D también tiene una buena calificación, pero requiere mejoras para constituirse en un diseño adecuado para su desarrollo.

Tabla 2. Matriz de selección de conceptos

Criterios de selección	Diseño A	Diseño B	Diseño C	Referencia (Verstuyft et al., 2021)	Diseño D	Diseño E
Fácil manejo	+	+	-	0	+	+
Ergonómico	-	0	-	0	+	+
Portabilidad	-	+	-	0	-	+
Generar calor	+	-	+	0	+	+
Ajuste de presión en antebrazo	-	0	0	0	+	+
Suma +	2	2	1	0	4	5
Suma 0	0	2	1	5	0	0
Suma -	3	1	3	0	1	0
Evaluación neta	-1	1	-2	0	3	5
Lugar	5	3	6	4	2	1

Fuente: Propia.

Una vez realizada la evaluación de conceptos, en la Tabla 3 se observa el resultado de evaluación del tipo de fabricación para la construcción. Como se puede observar se selecciona la impresión 3D como método de fabricación debido a su puntuación final de 5.

Tabla 3. Matriz selección de método de fabricación.

Método	Costo	Desperdicio de material	Tiempo	Accesibilidad a la tecnología	Diseño escogido	Total
Impresión	+	+	+	+	+	5
Compresor	-	-	-	-	+	-3
Inyección	-	+	-	-	+	-1
Soplado	-	+	-	-	-	-3

Fuente: Propia

A continuación, se realiza el análisis de los materiales utilizados en el diseño específicamente en los filamentos de la impresora 3D disponibles, como el ácido poliláctico (PLA) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) se comparan sus características en la Tabla 4, y se determina que el material más indicado para el diseño es el PLA. Esto se debe principalmente a su alta resistencia de tracción y que al imprimirlo se obtienen mejores acabados. Además, el PLA es un compuesto derivado de recursos renovables, como el almidón de maíz de caña, lo que lo hace biocompatible.

Tabla 4. El PLA y el ABS

Necesidad	ABS	PLA
Resistencia a la tracción	27 MPa	37 MPa
Alargamiento	3,5%	6%
Módulo de flexión	2,1 a 7,6 Gpa	4 GPa
Densidad	1,0 a 1,4 g/cm ³	1,3 g/cm ³
Punto de fusión	N/A (amorfo)	173°C
Biodegradable	No	Sí, bajo las condiciones correctas
Temperatura de transición del vidrio	105°C	60°C
Productos comunes	Lego, Carcasas electrónicas	Copas, Bolsas de plástico, cubiertos

Fuente: (Delacruz, 2019)

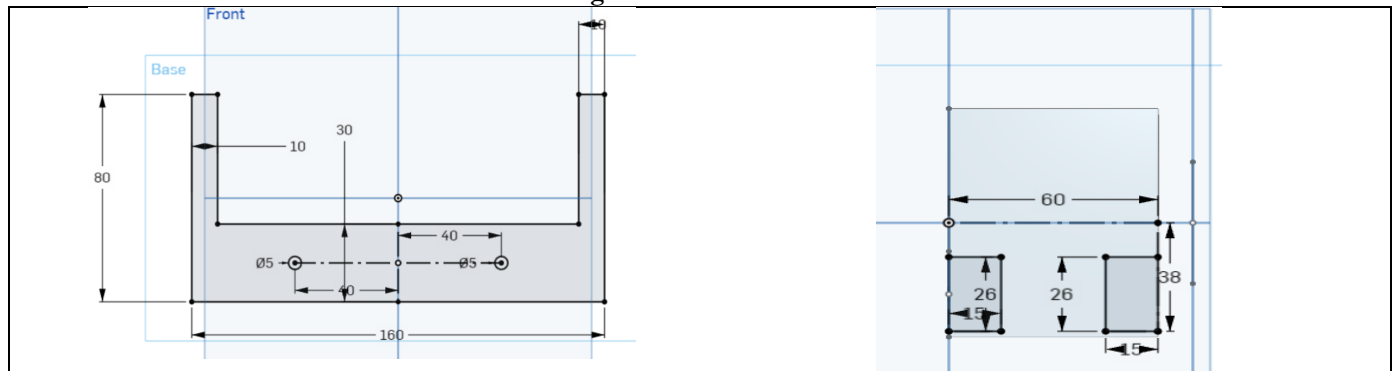
5.2 Dispositivo para tratamiento de patologías de codo

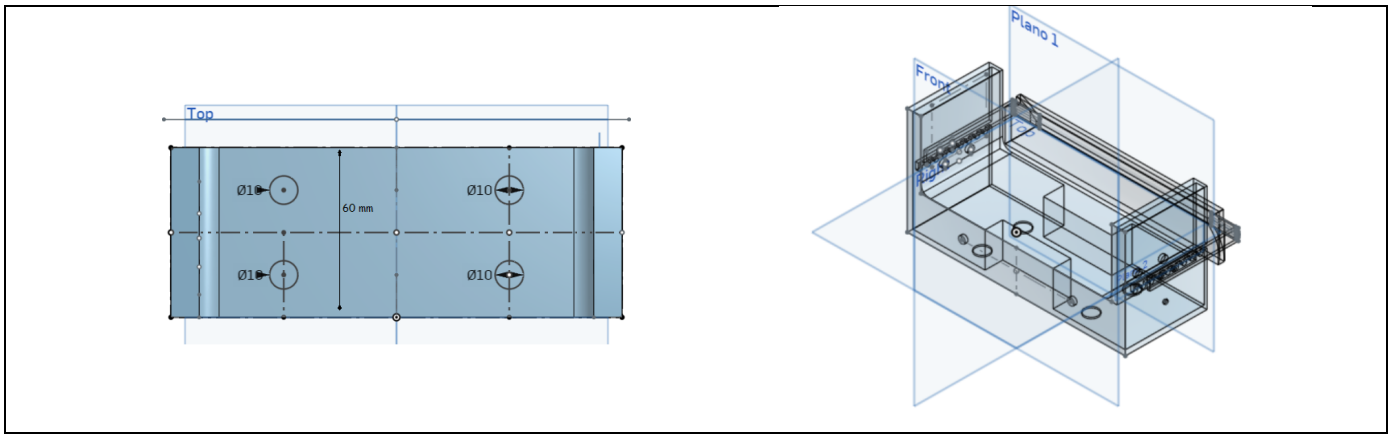
Una vez determinados el material, el tipo de fabricación y el diseño a ser construido, se construyó el dispositivo incluyendo sistemas mecánicos, electrónicos y de software.

5.2.1 Diseño Mecánico

Se construyó el diseño E en 3 piezas (base codo, base antebrazo, base del dispositivo) con filamento de ácido poli láctico (PLA). En la Figura 17 se muestra la pieza que corresponde a la base del codo. Esta pieza es rectangular con una longitud de 160 mm de los cuales se utilizan 10 mm en cada extremo para ubicar el espacio donde va el cableado de las celdas de Peltier y el ajuste manual para ubicar el codo. Por lo que quedan 140 mm donde reposa el codo para la realización de terapias de rehabilitación. Aparte, cuenta con un espacio interno de 40 mm donde se ubica el circuito electrónico. En inferior tiene unos espacios donde se ubican los acoples redondos que posteriormente se pueden ajustar a la pieza de la base.

Figura 17. Base del codo.

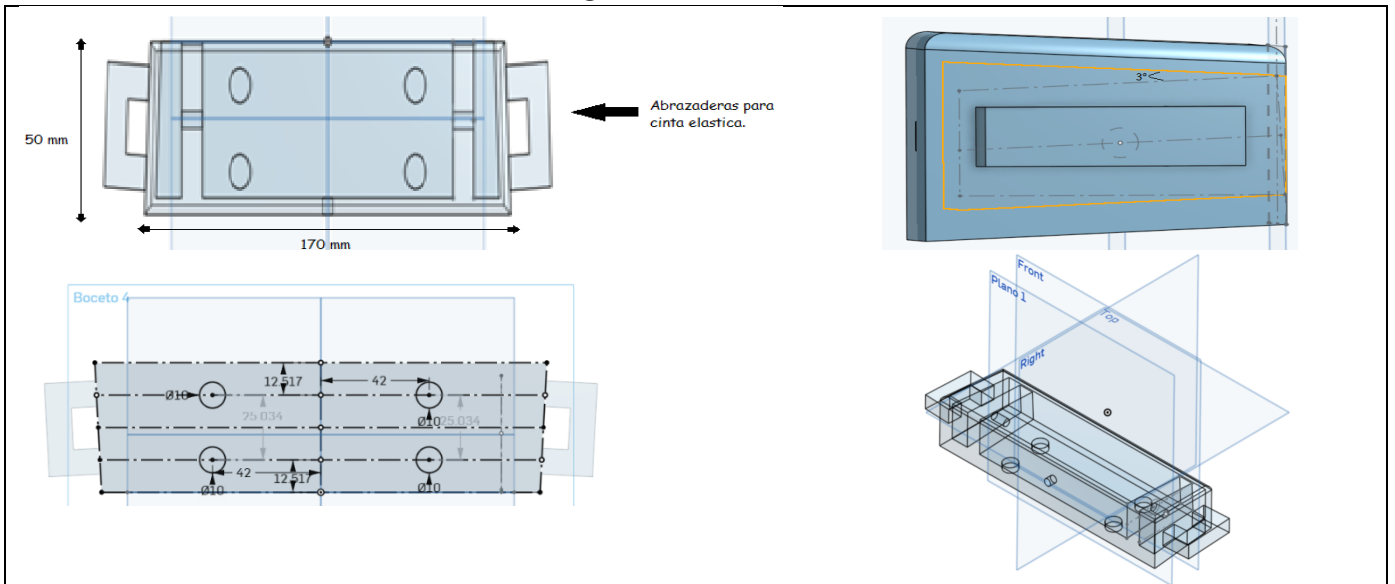




Fuente: propia

En la Figura 18 se muestra la pieza que corresponde a la base del antebrazo. El diseño de esta pieza cuenta con una inclinación de 3 grados que permite que el antebrazo quede levantado y facilite los movimientos de la terapia. Cuenta con 2 abrazaderas para acoplar una cinta elástica flexible de neopreno de 20 centímetros que estira hasta 25 centímetros (Figura 19). La cinta proporciona la presión necesaria para facilitar la realización de las terapias. Cuenta en la base con unos espacios circulares de 10 mm de diámetro para los acoples que van en la pieza de la base y así evitar movimientos que impidan realizar correctamente la terapia.

Figura 18. Base del antebrazo



Fuente: propia

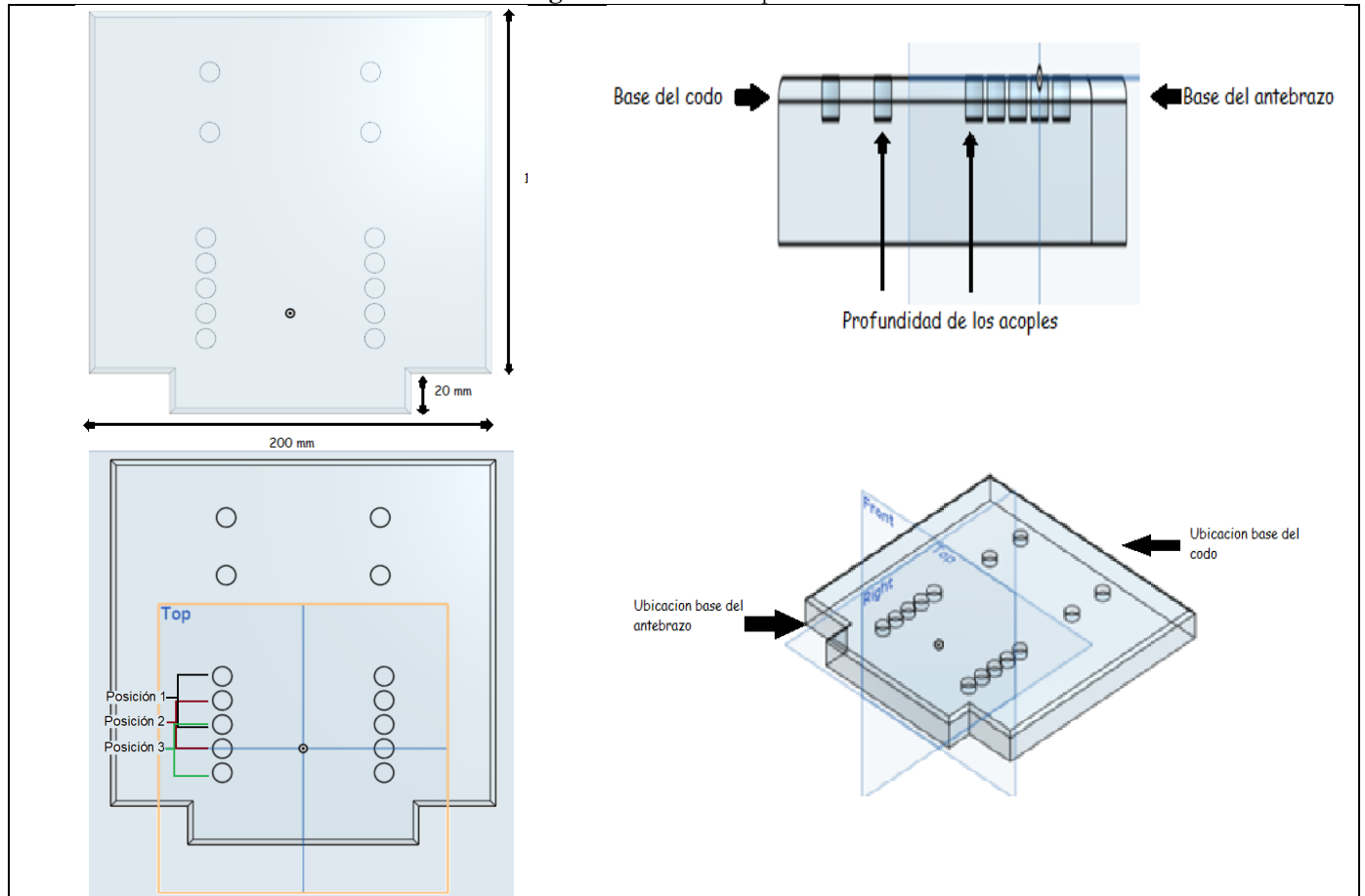
Figura 19. Cinta elástica ajustable.



Fuente Propia

En la Figura 20 se muestra la pieza de la base del dispositivo que se utiliza para ensamblar las partes descritas en las Figuras 16-17. Esta pieza es fundamental para conectar la base codo y el antebrazo. La base del codo está diseñada para mantenerse en una posición estática solo tiene una posición ya que este debe estar estático para no interrumpir durante la terapia de rehabilitación. Por otro lado, la parte donde se acopla la base del antebrazo puede variar en 3 posiciones diferentes. Esto se debe a que la posición del antebrazo es dependiente a la anatomía y necesidades individuales del paciente, para proporcionar mayor estabilidad, la base del antebrazo cuenta con 2 soporte que ajusta el antebrazo.

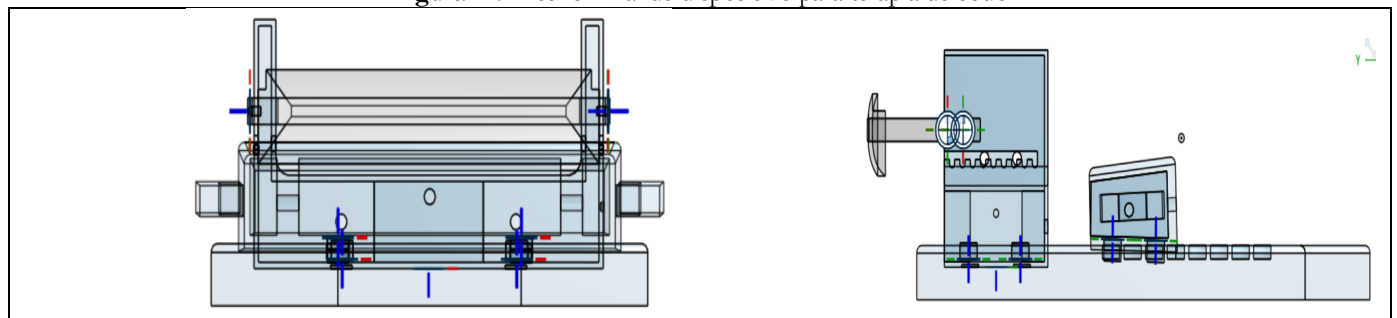
Figura 20. Base del dispositivo

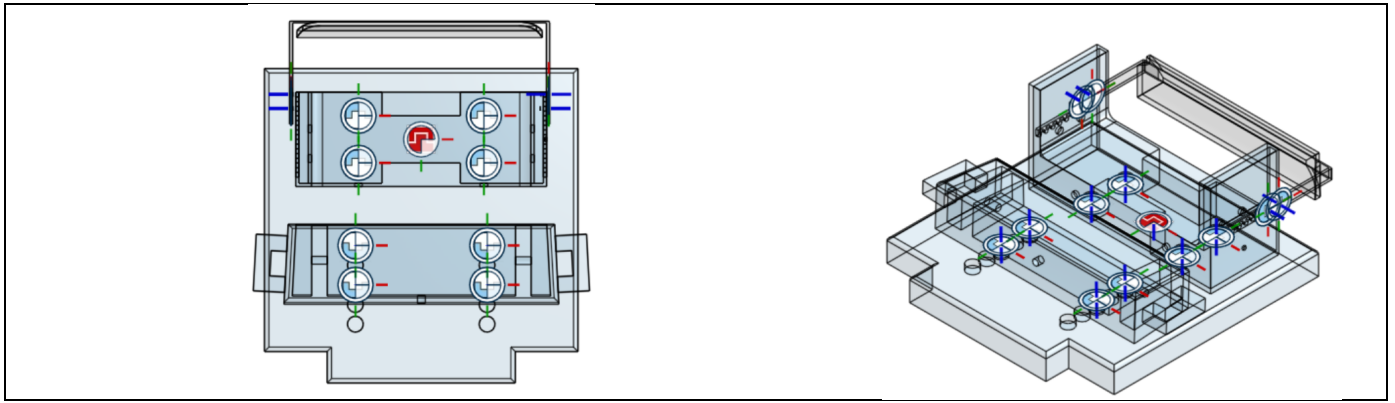


Fuente: propia

En la Figura 21 se presenta el diseño completo de las tres piezas ensambladas descritas en la Figuras 16, 17, 19 donde se realizaron las terapias de rehabilitación para las patologías de epicondilitis y epitrocleitis.

Figura 21. Diseño Final de dispositivo para terapia de codo





Fuente: propia

En la Figura 22 se puede apreciar la ubicación de las celdas peltier donde se ve como pueden ser ubicada con precisión en el punto específico donde se requiere la aplicación de calor. Además, estas celdas son aseguradas al paciente mediante el uso de la tela térmica sobre el paciente. La ubicación precisa de las celdas de peltier y su fijación con la tela térmica demuestran un enfoque cuidadoso para brindar un tratamiento efectivo y seguro de hipertermia en los tejidos específicos que lo requieren.

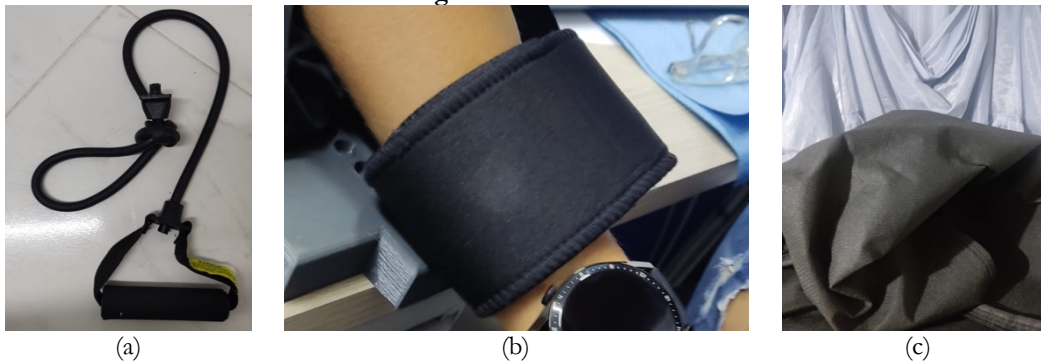
Figura 22. Celdas de Peltier



Fuente: Propia.

En la Figura 23 se presentan los accesorios los cuales son un complemento de ayuda para la terapia de rehabilitación. En la Figura 23 (a) se observa la banda elástica de goma de látex 100% natural de una longitud de 20 centímetros y se puede estirar hasta los 30 centímetros, lo que implica un coeficiente elástico de 1,5. Este coeficiente elástico indica el límite el cual la banda es capaz de aplicar la fuerza necesaria para llevar a cabo las terapias de rehabilitación. Cabe resaltar que la elección del nivel de resistencia o elasticidad adecuada dependerá de la condición del paciente sin embargo esta cinta puede ser graduada depende del agarre de la base, la banda elástica proporciona la resistencia adecuada para realizar los ejercicios y movimientos requeridos durante las terapias, contribuyendo así al proceso de recuperación, rehabilitación y con la facilidad de adaptarse a cualquier persona. En la Figura 23 (b) se observa la banda de neopreno portátil de 30 centímetros para colocarse en el antebrazo al finalizar la terapia. Su objetivo es garantizar que los tendones no se sobrecarguen durante las actividades de la vida diaria, y en la Figura 23 (c) se observa la tela térmica de 20 x 25 centímetros utilizada para la protección de la piel durante la terapia con temperatura alta.

Figura 23. Accesorios.



(a)

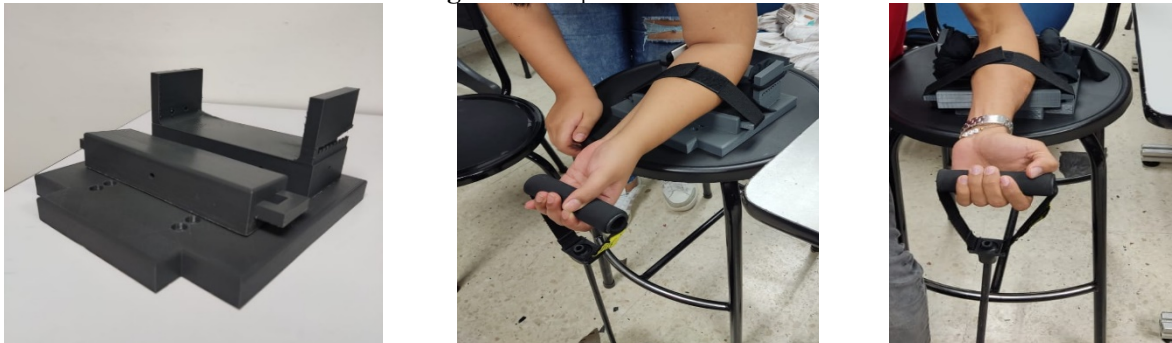
(b)

(c)

Fuente: Propia

En la Figura 24 se observa el dispositivo final y la forma de cómo se acomoda el paciente, para ambas patologías.

Figura 24. Dispositivo en uso.



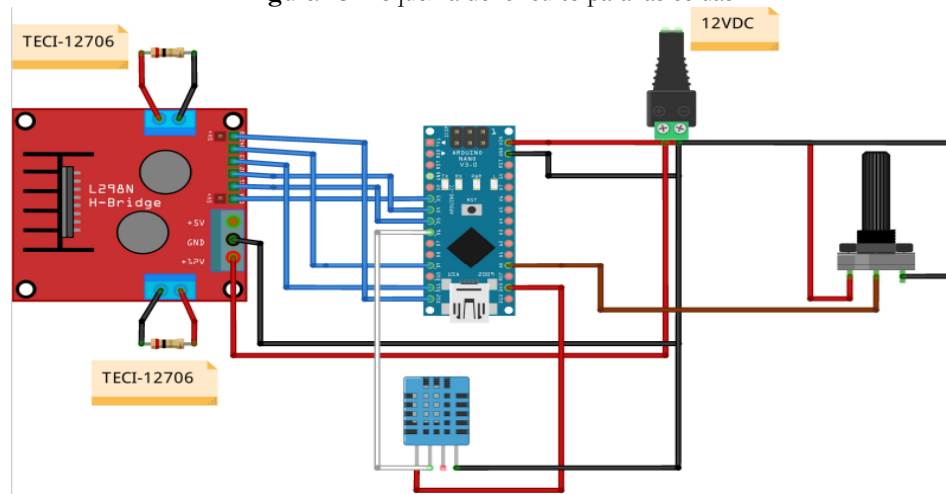
Fuente propia

5.2.2 Diseño Electrónico

El diseño electrónico consta de una placa de Arduino Nano, dos celdas Peltier y para realizar el control de temperatura del sistema se utiliza el sensor DTH11. En la Figura 25 se muestra el esquema del circuito donde se implementaron los parámetros del controlador PID por medio de programación. Una vez implementado el circuito se realiza un proceso de calentamiento de las celdas Peltier con una referencia de 40° C, se recolectan los datos de temperatura de entrada y salida proveniente del comportamiento de la celda en tiempo real. Los datos se utilizan luego para obtener la función de transferencia del sistema en el entorno Matlab por medio de la función *ident* en la Ec. (1) se representa la función de transferencia del sistema. Seguidamente, se utiliza la función PID tuner que sintoniza los parámetros proporcional, integral y derivativo. Con la ayuda de Simulink se comprobaron los parámetros del controlador PID los cuales fueron P = 1, I = 1 y D = 0. Nótese, que en el controlador no es necesaria la acción derivativa para el proceso de control.

$$\frac{4,25^{-5}}{s + 17,08^{-5}} \quad (1)$$

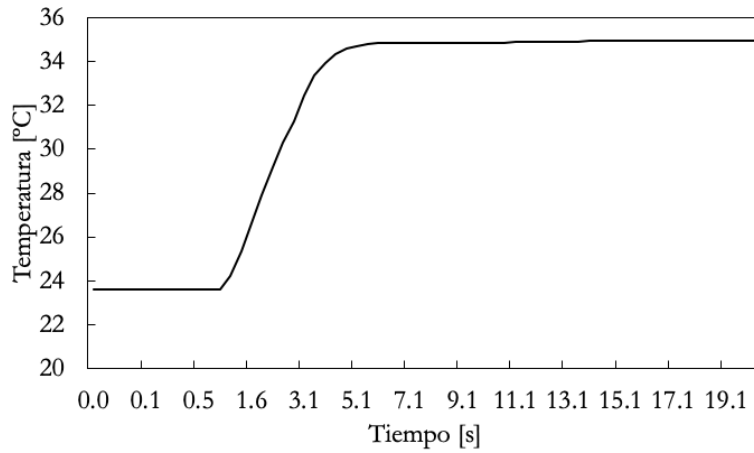
Figura 25. Esquema del circuito para las celdas



Fuente: Propia.

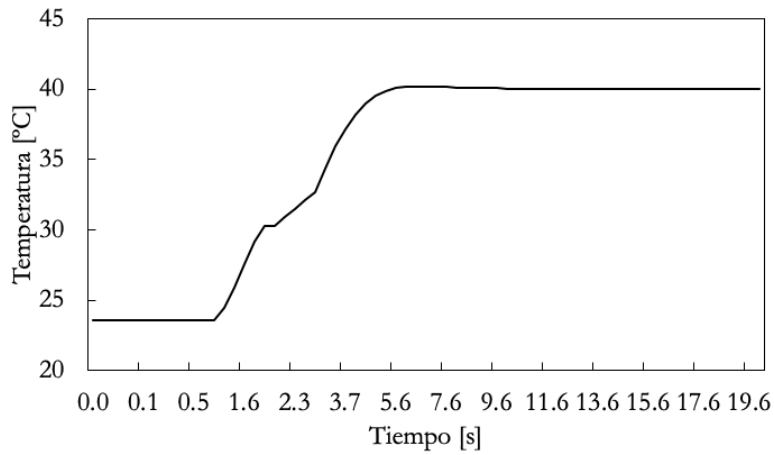
En la Figuras 26-28 se observan el comportamiento de la temperatura de las celdas Peltier en el momento de realizar la termoterapia para las temperaturas de referencia de 35, 41 y 42 °C (umbral de soporte individual), para tres personas diferentes. Nótese que la temperatura se alcanza en aproximadamente 6 segundos y esta se mantiene en la temperatura deseada, validando el controlador PID implementado y efectuando la termoterapia.

Figura 26. Temperatura de referencia de 35 °C



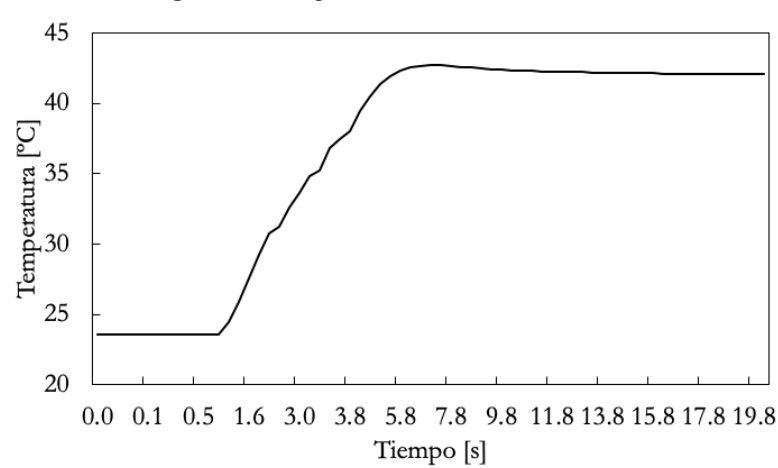
Fuente: Propia

Figura 27. Temperatura de referencia de 41 °C



Fuente: Propia

Figura 28. Temperatura de referencia de 42 °C



Fuente: Propia

5.2.3 Resultados de las Pruebas

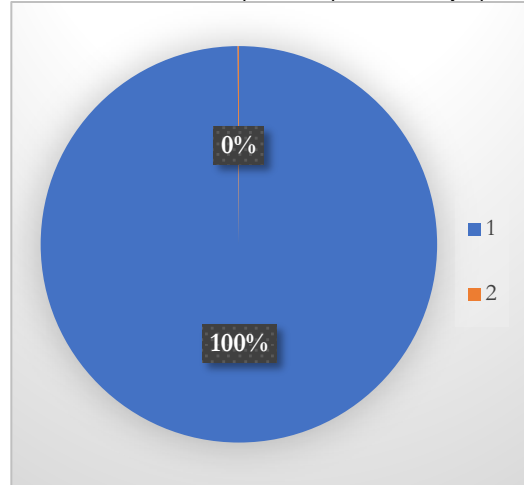
Mediante una encuesta a 50 participantes se evaluó el desempeño del dispositivo planteando las siguientes preguntas:

1. ¿Está familiarizado con algunos de los siguientes términos: ¿Epicondilitis, epitrocleitis, codo de tenista o codo de golfista?

1. Si
2. No

En Figura 29 se observa que el 100% de las personas a las cuales se les realizó las pruebas, sí conocen a cerca de las patologías de epitrocleitis y epicondilitis. Estos resultados son importantes toda vez que a las personas que se les realizó la prueba tienen conocimiento de las patologías y los posibles tratamientos para su recuperación.

Figura 29. Conoce las terapias de epicondilitis y epitrocleitis



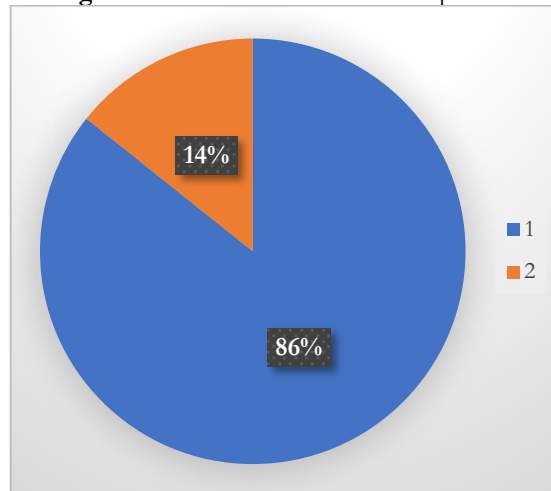
Fuente: propia

2 ¿El dispositivo es fácil de utilizar?

1. Si
2. No

En la Figura 30 se observa que el 86% indicaron que el dispositivo es de fácil acceso al momento de realizar la terapia y que lo consideran innovador para realizar una rehabilitación. El 14% indicó que es complejo el manejo del dispositivo al utilizarlo. Esto indica que en alto porcentaje el dispositivo permite una facilidad en el momento de realizar la terapia, lo que podría en determinados casos utilizar el dispositivo sin ayuda de un profesional.

Figura 30. Facilidad en el uso del dispositivo



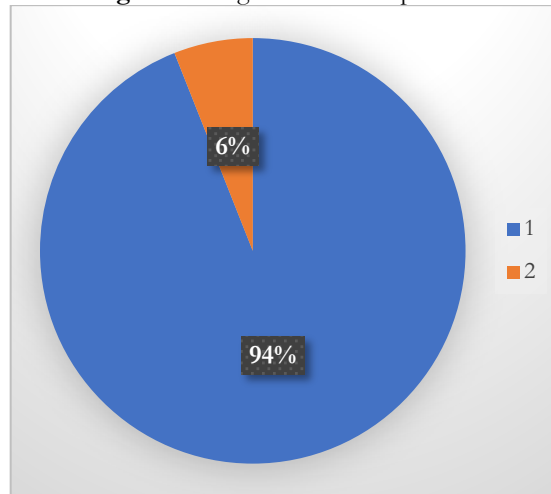
Fuente Propia

3 ¿Considera usted que el dispositivo es ergonómico?

1. Si
2. No

En la Figura 31 se observa que el 94 % de los usuarios les pareció que el dispositivo es ergonómico para realizar la rehabilitación en cualquier momento y lugar que se desee. El 6% indicaron que el diseño es innovador. A pesar de que en términos de ergonomía el resultado es bastante alto, se deben tener en cuenta factores para mejorar su desempeño.

Figura 31. Ergonomía del dispositivo



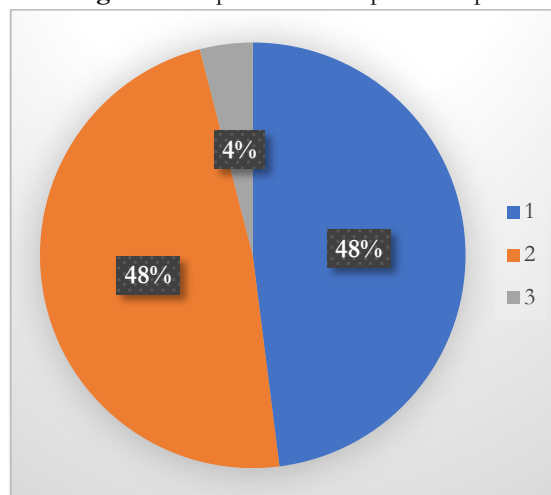
Fuente propia

4 ¿Qué terapia cree usted que es más importante para el dolor crónico?

1. Frio
2. Calor
3. Ninguna

En la Figura 32 se observa que el 48% de los usuarios indican que el frio es uno de los aspectos más importantes en la rehabilitación, el otro 48% indican que el calor es más importante. El 4% manifestaron que se deben considerar otros aspectos para tratar el dolor crónico. Estos resultados indican que ambas terapias, calor y frio son importantes en el proceso de rehabilitación.

Figura 32 Importancia del tipo de terapia



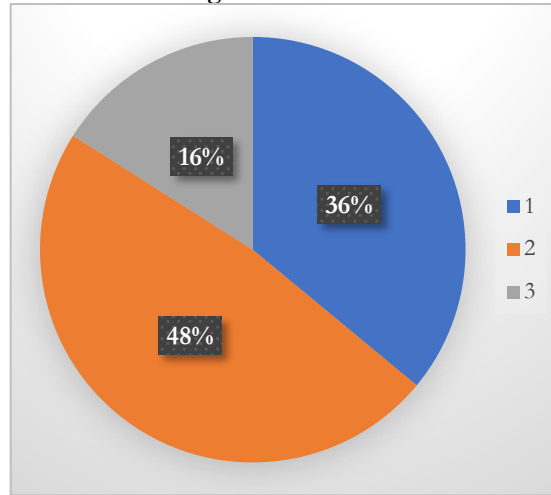
Fuente: propia

5 ¿A continuación, seleccione el criterio que considere más importantes de la evaluación del dispositivo?

1. Tamaño
2. Innovador
3. Seguridad

En la Figura 33 se observa que el 36% de las personas consideraron que el tamaño es un factor importante que tiene el dispositivo al momento de realizar las terapias. El 48% indican que el diseño del dispositivo es innovador y el 16% indican que al colocar el codo no presentan problemas de inestabilidad dando seguridad. Este resultado indica que el dispositivo tuvo un gran impacto en cuestiones de innovación al igual que el tamaño, el cual puede mejorar con un continuo desarrollo del dispositivo. Con respecto a la seguridad las personas no lo consideran importante, esto puede deberse a que el dispositivo es seguro para procesos de rehabilitación.

Figura 33. Criterios

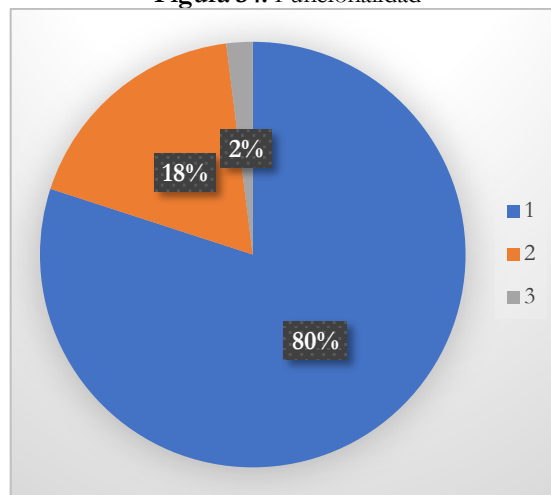


6 ¿Funcionalidad del dispositivo durante su evaluación?

1. Bueno
2. Regular
3. Malo

En la Figura 34 se observa que el 80% de las personas indicaron que el dispositivo es bueno al momento de realizar la terapia, el 18% manifestaron que es regular debido a algunos aspectos en la estructura como cableados que se debieron mejorar y solo el 2% indicaron que es malo porque no les pareció adecuado para las terapias. Si bien el 80% es un porcentaje alto en cuanto a la funcionalidad, es importante tener en cuenta la evaluación del 20% restante y que el dispositivo debe ser 100% funcional.

Figura 34. Funcionalidad

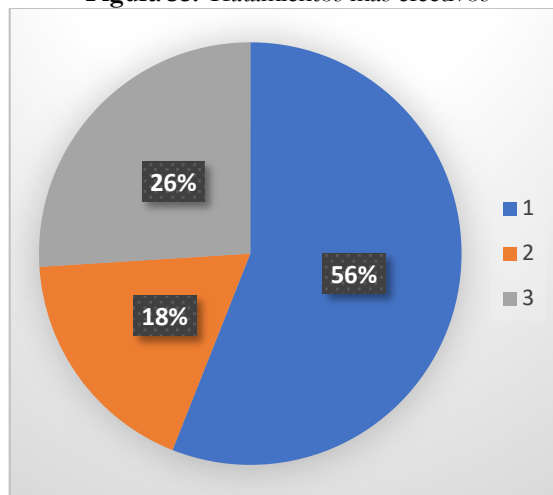


7 ¿Cuál de los siguientes tratamientos considera como efectivo para la rehabilitación del codo?

1. Termoterapia (Calor y frío)
2. Medicamentos antiinflamatorios
3. Terapias de movimiento

En la Figura 35 se observa que el 56% de las personas consideraron más efectivo el tratamiento por termoterapia (calor y frío). El 18% considera que los medicamentos antiinflamatorios son los más efectivos para la rehabilitación del codo. El 26% indicaron que las terapias de movimiento articuladas son las más efectivas para la rehabilitación del codo. Estos indicadores permiten establecer la importancia del dispositivo, toda vez que sumadas las terapias térmicas con movimiento arrojan un 82% de preferencia por los tratamientos de este tipo, sobre un 18 % correspondiente al uso de medicamentos.

Figura 35. Tratamientos más efectivos



Fuente propia

Una vez analizado el comportamiento de la encuesta de la totalidad de los pacientes, se analizaron de forma independiente los pacientes con el diagnóstico de epicondilitis y epitrocleitis, los resultados indican que el 87 % de la personas manifiestan que el dispositivo es de fácil uso, el 87 % consideran el dispositivo ergonómico, el 100 % manifiesta que la terapia más importante es el calor, el 93% consideran que la innovación es lo más importante, el 93 % consideran que el dispositivo funcionalmente es bueno en el momento de realizar la terapia y el 100% consideran que la termoterapia es el tratamiento más efectivo para la rehabilitación. Estos resultados evidencian que el dispositivo de rehabilitación del codo es adecuado en cuanto su comodidad, fácil manipulación, innovación y que puede ser usado en cualquier lugar, analizando que el dispositivo no quema la piel ni genera molestias, dolor o daños a la integridad del paciente, sino que es un dispositivo seguro y confiable para el uso de rehabilitación activa.

El dispositivo para rehabilitación del codo ofrece una solución, práctica y conveniente para los pacientes al permitir llevar a cabo su terapia en comodidad de su hogar. Esta modalidad domiciliaria tiene numerosas ventajas, entre las que se destacan el ahorro de tiempo y gastos de desplazamiento ya que el paciente no necesita trasladarse a una clínica o centro de rehabilitación, también promueve la obtención de un nivel funcional y físico por parte del paciente. Al brindar la oportunidad de llevar a cabo su rehabilitación en un entorno familiar, esto facilita la adopción de un estilo de vida más práctico. Para realizar las terapias en el anexo 3 se proporciona una descripción detallada de las recomendaciones, cuidados y el correcto uso del dispositivo de rehabilitación. Estas pautas resultan esenciales para garantizar una manipulación segura y efectiva del dispositivo durante las terapias en el hogar.

Con respecto a los dispositivos mostrados en la Tabla 1, se destaca que el dispositivo construido en este trabajo permite realizar multifuncionalidad. Toda vez que es posible realizar terapias para codo de tenista y de golfista, además de realizar termoterapia de forma simultanea. Estas características en ninguno de los casos esta implementada, pero si la mencionan con ayuda de otros dispositivos. El dispositivo de Verstuyft et al. (2021) sirve como referencia en este artículo, su enfoque se limita principalmente a la estabilidad y protección del codo. Esto demuestra una brecha en el mercado de dispositivos de rehabilitación para epicondilitis y epitrocleitis, siendo su principal limitación su falta de multifuncionalidad, esto puede

resultar inconveniente y poco práctico para los pacientes, que debe ocurrir a diferentes herramientas y aparatos para abordar distintos aspectos de su rehabilitación, la cual ha sido abordado de manera efectiva por el dispositivo mencionado en este artículo.

Otro aspecto importante por considerar es la portabilidad y facilidad de uso de este dispositivo. A diferencia de los dispositivos mencionados en la Tabla 1, la mayoría requieren de un entorno clínico o especializado para su uso, este nuevo dispositivo puede utilizarse en cualquier momento y lugar, permitiendo llevar una terapia de rehabilitación de manera regular y consistente.

El dispositivo de rehabilitación del codo desarrollado en este artículo se destaca como una solución innovadora y completa. Al combinar las mejores características de los dispositivos mencionados, ofreciendo una terapia multifuncional, efectiva y de fácil acceso. Esto proporciona a los pacientes una mayor oportunidad de lograr una recuperación exitosa y mejorar su calidad de vida sin duda, este dispositivo representa un avance significativo en el campo de la rehabilitación del codo en patologías específicas de epicondilitis y epitrocleitis, abriendo nuevas posibilidades para un tratamiento más completo y conveniente.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se realizó el diseño y construcción de un dispositivo de rehabilitación de codo para personas con epicondilitis y epitrocleitis. El dispositivo permite el movimiento de pronación, supinación, flexión y extensión de la muñeca con el objetivo de realizar terapias de rehabilitación, dirigido a un grupo de individuos sanos y con patologías de epicondilitis y epitrocleitis, personas adultas de un rango de edad entre 20 y 40 años donde se generaron pruebas satisfactorias. El dispositivo es de fácil manejo, ergonómico, genera calor y tiene para ajustar la presión en el antebrazo. Además, indicaron que el diseño es innovador y si realizarían las terapias con este dispositivo, lo indica que es posible que este dispositivo sea de uso doméstico en el proceso de recuperación de pacientes con patologías del codo, brindando una solución a dos de los problemas por los cuales las personas no terminan las terapias en Colombia, sin afectar a las entidades prestadoras del servicio de salud, por motivo, del seguimiento y control que se debe realizar el individuo que vaya a realizar la terapia para observar si hay avances o retrocesos en la recuperación de fuerza y flexibilidad de la articulación.

El dispositivo multifuncional cuenta con múltiples variables que lo hacen práctico y versátil, estas variables son el calor que por medio del potenciómetro se puede controlar, la ergonomía dando comodidad al paciente ya que se puede graduar dependiendo de la contextura del paciente, es portátil ya que es un equipo de un material ligero, desarmable y fácil de transportar.

Los resultados tienen importantes implicaciones en el campo de la rehabilitación, al ofrecer una alternativa práctica y eficaz que contribuye a mejorar la calidad de vida de los pacientes con lesiones o afecciones en el codo específicamente en epicondilitis y epitrocleitis ya que, al realizar la terapia en el hogar, se busca brindar al individuo un nivel adecuado de funcionalidad, la posibilidad de realizar la rehabilitación del codo de manera ágil y flexible en su propio entorno.

Como trabajos futuros se propone la programación de terapias predeterminadas dependiendo de las patologías como por ejemplo recuperación de fracturas, lesiones de la muñeca, tendinitis y lesiones con dolor crónico en el codo. Se sugiere cambiar la encuesta que permita establecer una mejor valoración del dispositivo en las siguientes etapas de pruebas, por ejemplo, con preguntas que incluyan la escala de Likert e incluir otros interrogantes, porcentaje de mejora de fuerza y movimiento. Finalmente, es recomendable realizar un estudio a largo plazo del uso del dispositivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigaciones (DGI) de la Universidad Santiago de Cali, y al proyecto de investigación No. 819-621119-421.

REFERENCIAS

Antuña, S., y Clavería, J. (2005). Biomecánica del codo y sus implicaciones en el diseño de recambios articulares. *Biomecánica*, 12(2), 35–39.

- Bermeo, L.A., Alvarez, J.G., y Mantila, W.M. (2021). Comparación del desempeño de un controlador PID sobre el proceso de nivel usando un controlador lógico programable y un sistema embebido Comparison of the performance of PID controller on level process using programmable logic controller and embedded systems. *Ingeniere, Revista chilena de ingeniería*. 29(4), 622-632&
- Calcuword (2023). Retrieved November 26, 2022, from <https://es.calcuworld.com/salud/calculadora-de-complexion-corporal/>.
- Chaustre, D. A. (2011). Epicondilitis lateral: conceptos de actualidad. Revisión de tema Lateral Epicondylitis: current concepts. Review. *Rev. Fac. Med*, 74(1), 74–81.
- Ciaccia, M., Benavides, P., Mosquera, W., y Terán, D. (2019). *Prototipo Rehabilitador Pasivo de Codo para Asistencia en Actividades de Fisioterapia*.
https://www.researchgate.net/publication/353690421_Prototipo_Rehabilitador_Pasivo_De_Codo_Para_Assistenci_a_En_Actividades_De_Fisioterapia
- Colegio oficial de BIZKAIA. (2011). Epicondilitis y epitrocleítis. Revisión. *Farmacia profesional*, 25 (6).
<https://www.elsevier.es/es-revista-farmacia-profesional-3-pdf-X0213932411435678>
- Cruz, J. R. A. (2008). Lesiones deportivas en competición en atletas veteranos. *Apunts. Medicina de l'Esport*, 43(159), 113–117. [https://doi.org/10.1016/S1886-6581\(08\)70086-0](https://doi.org/10.1016/S1886-6581(08)70086-0)
- Delacruz, D. (2019). PLA vs ABS. La comparativa definitiva 2020. Bitfab. <https://bitfab.io/es/blog/plavs-abs/>
- Delgado-Cidranes, E. (2019). *¿Es el calor o el frío mejor para el codo de tenista?* Lesiones de Brazo y Codo. <https://dolor-drdelgadocidranes.com/es-mejor-el-calor-o-el-frio-para-el-codo-de-tenista/>
- Ferrer, Ó. M., y Méndez Galeano, M. C. (2018). Cómo realizar un vendaje funcional sencillo para la epicondilitis. *FMC - Formación Médica Continuada En Atención Primaria*, 25(10), 585–587. <https://doi.org/10.1016/J.FMC.2018.02.009>
- Franco, S., Tovar, J., Arcos, E., y Bermeo, L. (2021). Desarrollo de un dispositivo biomecánico adaptable al miembro superior humano para potenciación de ejercicios funcionales de acondicionamiento físico. *Revista SEXTANTE*, 25, 12–18. <https://doi.org/10.54606/SEXTANTE2021.V25.02>
- Herrera, C., Medina, E., Martínez-Iranzo, Ú., Pitarch, S., Bermejo, I., Andrade, X., López, J., y Vera, D. (2020). *NedCodo/IBV, haciendo fácil y objetiva la valoración biomecánica del codo*. www.biomecanicamente.org/revista/item/1900-rb67-rap-ned-codo-ibv.html?tmpl=component&print=1
- ICONTEC. (2013). Norma Técnica NTC-IEC Colombiana 60601-1-1. Equipos Electromédicos. Bogotá: Normas Técnicas Colombianas. <https://1library.co/document/yjkgwemq-norma-tecnica-ntc-ieccolombiana.html#:~:text=Esta%20norma%20es%20una%20Norma%20Colateral%20de%20la,especifican%20requisitos%20generales%20para%20la%20seguridad%20aplicables%20a%3a>
- López, R., y López, E. (2018). Epicondilitis lateral. Manejo terapéutico. *Revista Española de Artroscopia y Cirugía Articular*, 25(2). <https://doi.org/10.24129/J.REACA.25263.FS1711059>
- Lueje, M. V., y Puhlmann, M. I. (2007). *Dispositivo para tratamientos kinesiológicos* [Universidad Andrés Bello]. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/21547>
- Martínez, A., y Warthman, R. (2021). Elbow extension drop out cast/orthosis. *Burns Open*, 5(4), 136–139. <https://doi.org/10.1016/J.BURNSO.2021.08.044>
- Min. Comerc. Indus. Turism (2012). *Ley estatutaria 1581 de 2012*, El Congreso de Colombia. https://www.defensoria.gov.co/public/Normograma%202013_html/Normas/Ley_1581_2012.pdf
- Min. Educ. Nal. (14 de 10 de 2003). Ministerio de educación Nacional: código ético profesional en ingeniería Ley No. 842. Bogotá, Cundinamarca, Colombia. <https://www.mineducacion.gov.co/portal/normativa/Leyes/105031:Ley-0842-de-October-9-de-2003>
- Min. Salud. (4 de 10 de 1993). Ministerio de Salud. Resolución No. 8430. Normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en Salud. Bogotá, Cundinamarca, Colombia. <https://minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE1993.pdf>
- Montenegro-Meza, M. A., Lugo-Villeda, M. A., Nuñez-Nalda, J. V, Gonzalez-Trigueros, R. K., y Zaldivar-Colado, U. (2013). *Análisis y diseño de un prototipo virtual de tipo exoesqueleto para rehabilitación de codo*. (tesis de pregrado) Universidad de Colima, Manzanillo, Colima. <https://1library.co/document/yen8474y-analisis-y-diseno-de-un-prototipo-virtual-de-tipo-exoesqueleto-para-rehabilitacion-de-codo.html>
- Patterson, G., y Sobral, M. (2007). *Efecto peltier*. Recuperado de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://materias.df.uba.ar/labo4aa2014c1/files/2012/07/Efecto-Peltier.pdf
- Pipicelli, J. G., y King, G. J. W. (2020). Rehabilitation of Elbow Instability. In *Hand Clinics*. 29(4), 511–522). <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2020.07.003>

- Rodríguez, C. J., García, C. F., & Bueno, F. L. (2019). *Sistema Servo-Mecánico Para La Rehabilitación De Codo Y Muñeca* [Universidad Politécnica salencia sede cuenca]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17384/1/UPS-CT008299.pdf>
- Trujillo, E., Hoyos, U. E., Bermeo, L. A., y Ochoa, V. (2020). *Desarrollo de dispositivo para realizar terapia simultánea por medio de hipertermia, TENS y vibración para el tratamiento del túnel carpiano* [Universidad Santiago de Cali]. <https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/4727/DESARROLLO%20DE%20DISPOSITIVO.pdf?sequence=3>
- Vargas Negrín, F. (2017). Indicaciones de las órtesis en atención primaria. *FMC - Formación Médica Continuada En Atención Primaria*, 24(8), 465–478. <https://doi.org/10.1016/J.FMC.2017.02.010>
- Verstuyft, L., Caekebeke, P., y Van Riet, R. (2021). Postoperative rehabilitation in elbow surgery. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 20, 101479. <https://doi.org/10.1016/J.JCOT.2021.101479>
- Yero, D. D., González, F. G., y Raizer, A. (2013). Hipertermia Electromagnética para el Tratamiento del Cáncer. *IFMBE Proceedings*, 33 IFMBE, 33–36. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21198-0_9

ANEXO 1. ENCUESTA

1. Encuesta

Nombre del encuestador: _____

Cedula de Ciudadanía: _____

Nombre del encuestado: N° de encuesta: _____

Presentación del encuestador

Buenos días/tardes,

Nos dirigimos a usted con el fin de conocer su experiencia al momento de finalizar la terapia de rehabilitación, con el dispositivo activo para la rehabilitación de codo de uso portátil.

Cuyas características son: fácil manejo, ergonómico, portabilidad, generar calor, ajuste de presión en antebrazo, está conformado por dos celdas de peltier forradas en una tela térmica que evita el contacto directo de las celdas con la piel, cuenta con un brazaletes para ajustar en el antebrazo y una cinta elástica para realizar las terapias de rehabilitación.

El cual permite realizar el movimiento de pronación-supinación y flexión extensión de la muñeca, permitiendo rehabilitar la movilidad y recuperar la fuerza de esta articulación de una forma segura en la vivienda del individuo.

Estamos interesados en conocer su opinión, por favor, ¿podría contestar el siguiente cuestionario? La información que nos suministre será de ayuda para conocer el porcentaje de conformidad y cumplimiento del dispositivo de rehabilitación, esta encuesta dura alrededor de 3 minutos, por favor sea lo más sincero posible, de esta forma nos permite realizar futuras mejoras. Gracias.

Por favor, ¿sería tan amable de decirme si sufre o a sufrido de alguna patología del codo?

Perfil del encuestado

Edad: Sexo: Peso:

Valoración de conformidad del dispositivo para la rehabilitación del codo.

1. ¿Está familiarizado con algunos de los siguientes términos?: Epicondilitis, epitrocleitis, codo de tenista o codo de golfista

1. Si

2. No

2. ¿El dispositivo es fácil de utilizar?

1. Si

2. No

3. ¿Considera usted que el dispositivo es ergonómico?

1. Si

2. No

4. ¿Qué terapia cree usted que es más importante para el dolor crónico?

1. Frio

2. Calor

3. Ninguna

5. ¿A continuación, seleccione el criterio que considere más importantes de la evaluación del dispositivo?

1. Tamaño

2. Colocación

3. Seguridad

6. ¿Funcionalidad del dispositivo durante su evaluación?

1. Bueno

2. Malo

3. Regular

7. ¿Cuál de los siguientes tratamientos considera como efectivo para la rehabilitación del codo?

1. Termoterapia (calor y frio)
 2. Medicamentos antiinflamatorios
 3. Terapias de movimiento
- Muchas gracias por contestar la encuesta

Individuo	Preguntas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	2	2	1	3
3	1	1	1	1	2	1	1
4	1	1	2	2	2	1	1
5	1	2	1	3	2	2	3
6	1	1	1	1	2	1	1
7	1	2	1	1	3	1	2
8	1	1	1	2	1	1	1
9	1	1	1	1	2	1	3
10	1	2	1	2	2	2	1
11	1	1	1	1	2	1	1
12	1	1	1	2	1	1	1
13	1	1	1	2	2	1	3
14	1	1	1	1	2	2	2
15	1	1	2	1	1	1	1
16	1	1	1	1	2	1	1
17	1	1	1	2	2	1	1
18	1	1	1	1	1	1	2
19	1	1	1	2	3	1	1
20	1	1	1	1	2	1	1
21	1	2	1	1	1	1	1
22	1	1	1	2	2	1	2
23	1	1	2	1	1	2	1
24	1	1	1	2	1	1	1
25	1	1	1	2	1	1	3
26	1	1	1	2	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	3
28	1	1	1	2	1	2	1
29	1	2	1	1	1	1	1
30	1	1	1	2	1	1	1
31	1	1	1	1	2	1	3
32	1	1	1	2	2	1	2
33	1	1	1	2	1	1	1
34	1	1	1	1	1	1	3
35	1	2	1	1	2	1	1
36	1	1	1	3	2	1	2
37	1	1	1	1	3	1	3
38	1	1	1	2	3	2	1
39	1	1	1	2	3	1	2
40	1	1	1	2	3	1	3
41	1	1	1	2	3	1	3
42	1	1	1	2	3	3	1

43	1	1	1	2	1	1	1
44	1	1	1	2	2	1	1
45	1	1	1	1	2	1	3
46	1	1	1	1	2	1	1
47	1	2	1	1	2	1	1
48	1	1	1	2	2	2	3
49	1	1	1	1	2	2	2
50	1	1	1	1	1	1	2

**ANEXO 2. Consentimiento UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI PROGRAMA DE BIOINGENIERÍA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ELECTRÓNICA, INDUSTRIAL Y AMBIENTAL – GIEIAM
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:**

Diseño de un dispositivo de uso domiciliario para rehabilitación en personas con pérdida de capacidad motora en miembros superiores

FORMATO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA LA PARTICIPACIÓN EN PROTOCOLOS DE INVESTIGACIÓN

El Proyecto de investigación Desarrollo de un dispositivo activo para rehabilitación de codo en personas con epicondilitis y epitrocleitis tiene el objetivo general: Desarrollar un dispositivo de rehabilitación del codo para personas con epicondilitis y epitrocleitis. El Equipo de investigación está constituido por profesores y estudiantes de la Universidad Santiago de Cali, los cuales llevarán a cabo aplicación de cuestionario de entrevista inicial, evaluación de los participantes y observaciones de sesiones de intervención. Para lo anterior, el Equipo de investigación solicita al participante, autorizar a integrantes del Equipo la aplicación de cuestionarios, observaciones y registros (fotográficos, video y audio) del desempeño en la realización de actividades de intervención para la investigación. Se aclara que se trata de un trabajo estrictamente académico, que los datos se manejarán de manera confidencial, se dará retroalimentación de la información a la institución y a las personas participantes, y sus familiares. Los resultados se utilizarán con fines académicos (informes de investigación, material educativo, artículos y presentaciones en eventos científicos).

Se aclara que se trata de un trabajo estrictamente académico, que los datos se manejarán de manera confidencial, se dará retroalimentación de la información a la institución y a las personas participantes, y sus familiares. Los resultados se utilizarán con fines académicos (informes de investigación, material educativo, artículos y presentaciones en eventos científicos).

Lugar donde se realizará el estudio:

Las actividades de recolección de datos: entrevistas, evaluaciones, observaciones e intervenciones se llevarán a cabo en la Universidad Santiago de Cali.

Procedimiento en las intervenciones:

Entrevista inicial: La entrevista inicial está dirigida al participante, se indaga información general, como se ocasiono su patología, y su forma de estilo de vida con la disminución de la función motora.

Evaluación del participante: La evaluación del participante consiste en obtener información acerca de su resistencia, sensibilidad y de agarre, esto por medio de movimientos de forma activa y pasiva como son: flexión, extensión, pronación y supinación

Se realizará un control en el cual cada sesión de terapia se documenta la evolución del paciente, antes de cada sesión se realizará una encuesta donde se evidencia si el individuo nota mejoría o no en sus ejercicios, así como la adaptación que ha tenido con el dispositivo de rehabilitación.

En cada sesión se hará:

Parte 1: evaluación inicial, se analiza el estado anatómico del individuo para observar si hay reacciones negativas en la piel, como alergias o lesiones por fricción, se realizan ejercicios de estiramiento para evitar futuras lesiones y se observara la flexibilidad del individuo.

Parte 2: Se realiza dos series de ejercicios de pronación y supinación con 5 repeticiones cada uno, y con un intervalo de descanso de 10 minutos, si el individuo reacciona satisfactoriamente se analizará la idea de ir incrementando el número de series y de usar la banda elástica.

Beneficios:

Los beneficios que recibirá la persona participante o su familia serán de tipo académico por medio de un informe final del proyecto y del aporte de ideas en la búsqueda de soluciones para optimizar la prestación de servicios en la evaluación temprana de alteraciones en caso de que se evidencie.

El dato obtenido por cada participante permite la caracterización de parámetros que serán usados como referencia en futuras investigaciones sobre diseños de dispositivos de rehabilitación del codo.

Riesgos asociados en la investigación:

Los procedimientos y actividades previstos para la entrevista, evaluación y observación de desempeño del participante no representarán riesgos biológicos, psicológicos ni morales.

El diseño del dispositivo será implementado teniendo en cuentas la norma IEC 60601 para equipos tipo B y BF, generando un nivel de riesgo mínimo y un nivel de seguridad prioritario para los participantes.

Antes de empezar una terapia de rehabilitación se esteriliza el dispositivo y se verificara su funcionamiento, evitando así, riesgos biológicos y fisiológicos para el participante.

Confidencialidad:

- La participación e información que aporten los profesionales en salud y los familiares se utilizarán para fines académicos y los datos personales de los usuarios se mantendrán bajo confidencialidad.

Consideraciones generales y aclaraciones:

- La decisión de participar en la investigación es completamente voluntaria.
- No habrá ninguna consecuencia desfavorable para usted, en caso de no aceptar la invitación.
- Los representantes legales del participante pueden interrumpir y retirarse del procedimiento de la prueba en el momento que lo desee, aun cuando el investigador responsable no se lo solicite, y sin el compromiso de informar las razones de su decisión, la cual será respetada en su integridad.
- No tendrá que hacer gasto alguno durante el estudio.
- No recibirá pago por su participación.
- La información que se obtiene durante el desarrollo de las pruebas se mantendrá con estricta confidencialidad por el grupo de investigadores.
- Si considera que no hay dudas ni preguntas acerca de su participación, puede, si así lo desea, firmar la Carta de Consentimiento Informado que forma parte de este documento.

Si en algún momento tiene alguna pregunta relacionada con la investigación o su participación, puede contactarse con el director del proyecto Investigador Leonardo Antonio Bermeo Varón, e-mail leonardo.bermeo00@usc.edu.co, teléfono: 3014904333 o con el estudiante Alejandro Collazos e-mail Alejandro.collazos00@usc.edu.co, teléfono 3172849927, todos en condiciones de atender sus inquietudes o comentarios.

Usted recibirá una copia del presente consentimiento informado. Autorización para uso de los datos obtenidos en esta investigación.

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA PARTICIPAR EN PROTOCOLOS DE INVESTIGACIÓN

Yo, _____ identificada(o) con cedula de ciudadanía _____, he leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria. He sido informado y entiendo que los datos obtenidos en el estudio pueden ser publicados o difundidos con fines científicos.

Recibiré una copia firmada y fechada de esta forma de consentimiento.

Firma
CC

Fecha

Testigo 1
CC

Fecha

Testigo 2
CC

Fecha

COMPROMISOS DEL INVESTIGADOR

He explicado al Sr(a). _____; la naturaleza y los propósitos de la investigación; le he explicado acerca de los riesgos y beneficios que implica su participación. He contestado a las preguntas en la medida de lo posible y he preguntado si tiene alguna duda. Acepto que he leído y conozco la normatividad correspondiente para realizar investigación con seres humanos y me apego a ella. Una vez concluida la sesión de preguntas y respuestas, se procedió a firmar el presente documento.

ANEXO 3. RECOMENDACIONES

Recomendaciones sobre el dispositivo para rehabilitación de codo

El dispositivo tiene partes electrónicas por lo cual se debe tener en cuentas las siguientes medidas de seguridad:

- No dejar al alcance de niños sin supervisión de un adulto.
- No consuma bebidas ni comidas cerca del equipo.
- Antes de realizar la terapia proceda hacer ejercicios de estiramientos.
- No sé sobre esfuerce.
- No cambiar partes del dispositivo

Mantenimiento

- Con jabón neutro humedezca una compresa y limpie la parte externa sin manipular su sistema integrado y preferiblemente retire las celdas de peltier
- No rociar agentes corrosivos o no mencionados para la limpieza

Ventajas:

- El dispositivo de rehabilitación facilita y ayuda al movimiento de aducción-abducción del miembro superior.
- Bajo costo de ejecución
- Diseño fácil de manejar y su mantenimiento es básico.
- Repuestos de fácil acceso.
- Diseño liviano y portátil.
- La persona puede hacer terapia desde su casa siguiendo las recomendaciones médicas.
- No se genera gastos adicionales por traslados a establecimientos especializados.

Desventajas:

- Cuando el brazo realice un movimiento de aducción-abducción sin una base fija que sostenga el hombro, esto puede generar una fuerza a causa de la gravedad que puede ocasionar problemas como sobre esfuerzo del motor, esto puede causar que el dispositivo sufra recalentamiento o fracturar una pieza del dispositivo.

En la programación de Arduino, se utilizó la librería AccelStepper para el control del motor paso a paso.

ANEXO 4. PROGRAMACIÓN

Programación creada con el microcontrolador Arduino Nano. En la programación de Arduino, se utilizó la librería liquidCrystal_I2C.h para la pantalla, luego, se determinó las entradas y salidas del sistema, en el void setup se definió el potenciómetro para el control de la temperatura de las celdas de peltier, se evalúa el estado del PID, el estado actual debe diferir del estado anteriores, si es así, el driver procederá a realizar el control de la temperatura.

```

/*#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
*/
#include <DHT.h>
#define DHTPIN 6
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
//int raw_pot; // almacenar el valor del potenciómetro
int duty; // ciclo util de la PWM
unsigned long t_actual;
long t_previo = 0;
int intervalo = 500;
  int IN1 = 5; // Pin digital para IN3
  int IN2 = 4; // Pin digital para IN4
  int ENA = 3; // Pin digital con PWM para ENB
double C_n;
double W_n;
double P_n;
double Q_n;
double P_n_1 =0;
double y_n;
int Kp = 50;
int Ki = 50;
int Kd = 20;
double T = 1;
double u_n_1 = 0;
double u_n_2 = 0;
double y_n_1 = 0;
double y_n_2 = 0;
double u_n = 1;
double e_n_1 = 0;
float e_n;
int ref = A0; //final de carrera
float referencia;
int tempd;
int tempde;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  /*
  lcd.begin(16,2);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);

```

```

lcd.print("Control Temperatura");
*/
dht.begin();
pinMode (ENA, OUTPUT); // Pin digital 3 como salida
pinMode (IN1, OUTPUT); // Pin digital 5 como salida
pinMode (IN2, OUTPUT); // Pin digital 4 como salida
digitalWrite (IN1, HIGH);
digitalWrite (IN2, LOW);
}
void loop() {
  t_actual = millis();
  if (t_actual - t_previo >= intervalo) {
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();
    float f = dht.readTemperature(true);
    if (isnan(h) || isnan(t) || isnan(f)) {
      Serial.println("Error obteniendo los datos del sensor DHT11");
      return;
    }
    float hic = dht.computeHeatIndex(t, h, false);
    tempd = analogRead(ref);
    tempde = map(tempd, 0, 1023, 36, 45); // mapeo el valor de la lectura al rango 0-255
    referencia = t;
    y_n = tempde;
    e_n = y_n - referencia;
    W_n = Kp*e_n;
    P_n = Ki*T*e_n + P_n_1;
    Q_n = (Kd/T)*(e_n - e_n_1);
    C_n = u_n + W_n + P_n + Q_n;
    if (C_n >= 100.0) //Saturación de la acción de control 'C_n' en un tope máximo y mínimo
      C_n = 100.0;
    if (C_n <= 0.0)
      C_n = 0.0;
    u_n = C_n;
    u_n_2 = u_n_1;
    u_n_1 = u_n;
    y_n_2 = y_n_1;
    y_n_1 = y_n;
    // %Actualización dato de la acción integral
    P_n_1 = P_n;
    // %Actualización dato de la acción derivativa
    e_n_1 = e_n;
    analogWrite(ENA,map(C_n, 0,100, 0,255));
    Serial.println("Temperatura_celda,temperatura_deseada");
    Serial.print(t);
    Serial.print(",");
    Serial.println(y_n);
    /*
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print ("T.celda: ");

```

```
lcd.print (t);  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print ("T.prog: ");  
lcd.print (tempde);  
*/  
t_previo = t_actual;
```