

Área de Conocimiento de Tecnología de la
Información y Comunicación

Prototipo de equipo de estimulación eléctrica
para pacientes con trastornos músculo
esqueléticos del hospital de rehabilitación Aldo
Chavarría

**Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

Elaborado por:

Br. Brandon Giovanni
Alemán Chavarría
Carnet: 2016-1052U

Br. Anaís Adriela
Hernández Salazar
Carnet: 2016-0293U

Tutor:

MSc. Ing. Cedrick
Dalla Torre

Agradecimientos

A Dios, por haber permitido llegar hasta este punto, por darme sabiduría y entendimiento para poder culminar la carrera.

A mi madre **Grisella Chavarría**, quien, con mucho amor, dedicación, abnegación me ha apoyado desde el inicio de mi vida estudiantil, hasta hacerme un profesional.

A mi padre **Giovanny Alemán**, por apoyarme en cada paso en decisiones importantes de mi vida.

A mi hermana **Jessica Alemán Chavarría**.

A mi compañera de proyecto **Anaís Hernández Salazar**,

A nuestro tutor **Msc. Cedrick Dalla Torre**, por haber confiado en nosotros sobre nuestro proyecto y darnos su apoyo.

A nuestros compañeros de clases, por apoyarnos desde el inicio hasta el final de nuestra carrera.

Brandon Giovanny Alemán Chavarría

A Dios, porque me ha brindado el don de la sabiduría y entendimiento para llevar a cabo este trabajo, por proporcionar esa paciencia y esos ánimos que tanto necesité para recorrer este caminar.

Con todo amor, a mis padres Elvis y Adriana, quienes siempre me han brindado apoyo financiero, emocional y moral, comprendo que no ha sido fácil enfrentar los desafíos de la universidad; sin embargo, sus palabras de aliento y llenas de sabiduría me han dado la fuerza para superar los obstáculos.

A mi tutor Cedrick, por su apoyo y colaboración durante esta investigación, por compartir su tiempo, confianza y orientación.

A mis amigos, por su amistad y apoyo durante nuestro tiempo juntos en la universidad, por esos momentos de diversión y alegría que hemos compartido.

A los fisioterapeutas del Aldo Chavarría, por su disposición, en compartir y brindarnos orientación y asesoramiento para poder realizar el proyecto.

“Detrás de cada triunfador siempre hay padres, amigos, compañeros y diversos colaboradores, gracias a cuyo aliento y cooperación se ha llegado a la meta. Pero por encima del mérito de quienes alientan nuestro esfuerzo diario está la bendición de Dios”. – Dr., Enrique Chaij.

Resumen

Los trastornos músculo esqueléticos son problemas frecuentes de salud que afectan los músculos y tendones; abarcando desde molestias leves hasta lesiones irreversibles e incapacitantes, el diagnóstico se basa en dolor localizado en alguna zona del cuerpo e incluso disminución de movimientos. Para el tratamiento de dolor aparte de suministrar fármacos, en algunos casos se recomiendan las terapias físicas de rehabilitación, aplicando termoterapia y electroestimulación, actualmente en el hospital Aldo Chavarría hay pocas herramientas terapéuticas.

Este trabajo consistió en realizar un estudio de tipo investigativo y descriptivo, con el fin de proponer un diseño de prototipo de un equipo de estimulación eléctrica, para poder usarse en casi cualquier zona del cuerpo y aplicarlo en zonas afectadas con la finalidad de ayudar a los pacientes que tienen o padecen de enfermedades musculares en el hospital de rehabilitación Aldo Chavarría en la ciudad de Managua. El prototipo diseñado es inocuo al paciente, y es controlado por un microcontrolador que regula el suministro de corriente, una interfaz visual muy sencilla en la que se puede observar los datos de manipulación, con una aplicación de escritorio en la que los especialistas logren registrar los datos de interés, con el objetivo de mejorar la calidad de rehabilitación en los pacientes, haciendo uso del dispositivo adecuado y actualizado que cumpla con los requerimientos solicitados por el personal especializado en fisioterapia.

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	I
Resumen.....	III
Tabla de figuras.....	VI
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
General.....	3
Específicos.....	3
3. Justificación.....	4
4. Marco teórico.....	6
4.1. El Sistema músculo esquelético y la electroterapia.....	6
4.2. Trastornos músculo esqueléticos (TME).....	7
4.3. Causas.....	8
4.4. Anatomía músculo esquelética.....	9
4.5. Puntos motores del cuerpo humano.....	10
4.6. Diagnóstico de los TME.....	11
4.7. Electroestimulación.....	11
4.7.1. ¿Cómo funciona la estimulación eléctrica?.....	13
4.7.2. Efectos de la electroterapia.....	14
4.7.3. Aplicación de la electroterapia.....	14
4.8. Electroestimuladores utilizados en fisioterapia.....	15
4.8.1. TENS.....	15
4.8.2. EMS O EEM.....	15
4.8.3. NMES.....	15
4.8.4. FES.....	16
4.9. Clasificación de corrientes y frecuencias en electroterapia.....	16
4.9.1. Según frecuencias.....	17
4.9.2. Según forma de onda.....	17
4.9.3. Impulsos.....	17
5. Diseño metodológico.....	20
5.1. Población y muestra.....	20
5.2. Diseño de investigación.....	20
5.3. Recolección de datos.....	20

5.4.	Requerimientos de diseño	21
5.4.1.	Requerimientos para diseño del prototipo	21
5.4.2.	Evaluación y selección de componentes	26
5.5.	Diseño del prototipo	29
5.5.1.	Software de diseño de la PCB.....	29
5.5.2.	Esquemático.....	30
5.5.3.	Generación de las señales con MCP4725	34
5.5.4.	Programación y conexión.....	40
5.5.5.	Recopilación de datos.....	43
5.5.6.	Diseño de convertidor reductor-elevador.....	44
5.5.7.	Adaptación del sistema de batería.....	50
5.5.8.	Diseño del case del prototipo	51
6.	Análisis y presentación de resultados	53
7.	Conclusiones.....	60
8.	Recomendaciones.....	62
9.	Bibliografía.....	64
10.	Anexos	68

Tabla de figuras

Figura 1. Trastornos Músculo Esqueléticos (TME) [7].....	7
Figura 2. Músculos del cuerpo humano [9].....	9
Figura 3. Puntos motores del cuerpo humano [10].	10
Figura 4. Electroterapia [10].....	12
Figura 5. Tipos de corrientes [13].....	18
Figura 6. Clasificación de las corrientes según su estado y dirección [13].....	19
Figura 7. Circuito integrado MCP4725 [23].....	27
Figura 8. Logotipo de Eagle [24].....	29
Figura 9. Entorno de Eagle.	30
Figura 10. Diagrama esquemático para Arduino.	30
Figura 11. Diagrama esquemático para circuito de potencia 1.	31
Figura 12. Diagrama esquemático para circuito de potencia 2.	32
Figura 13. Diagrama esquemático para circuito de potencia 3.	33
Figura 14. Modelo de onda modo normal [25].	34
Figura 15. Modelo de forma de onda de modulación [25].	36
Figura 16. Modelo de forma de onda modo Burts [25].	37
Figura 17. Modelo de forma de onda modo Trabert [26].	38
Figura 18. Modelo de forma de onda modo Leduc [27].	39
Figura 19. Diagrama de flujo, parte 1.....	41
Figura 20. Diagrama de flujo, parte 2.....	42
Figura 21 Diagrama de conexión.....	43
Figura 22. Estados On y Off de una fuente non-inverting buck boost converter [28].	44
Figura 23. Tarjeta de potencia.	45
Figura 24. Logotipo de SketchUp [30].	51
Figura 25. Vista isométrica del case en SketchUp.....	52
Figura 26. Diagrama de resultado total de pruebas y respuestas.	53
Figura 27. Diagrama de temores en pacientes con TME.	54
Figura 28. Diagrama de aceptación al proyecto.....	54
Figura 29. Diagrama de aceptación y rechazo a un electroestimulador.....	55
Figura 30. Forma de onda normal (40Hz).	55
Figura 31. Forma de onda normal (200Hz).	56
Figura 32. Forma de onda modo modulación (configuración de ancho).....	56
Figura 33. Forma de onda modo modulada (configuración de frecuencia).....	57
Figura 34. Forma de onda modo modulada (completa).	57
Figura 35. Forma de onda Burts (ampliada).....	58
Figura 36. Forma de onda Burts (reducida).	58
Figura 37. Forma de onda Trabert.	59
Figura 38. Forma de onda Leduc.	59

1. Introducción

El uso de la electricidad para conducirla a través del cuerpo humano no es una práctica actual, en la antigüedad se utilizaban anguilas o peces torpedo para el tratamiento de síndromes dolorosos. En la actualidad el uso de agentes físicos que emplean electricidad ha sido de gran apoyo, por lo que, como tratamiento de rehabilitación la electroestimulación ayuda a tratar el dolor en los pacientes. La fisioterapia es un tipo de terapia que permite actuar en el desarrollo y recuperación del cuerpo y su funcionalidad; aunque en ocasiones este proceso es lento, hay maneras de ayudarlos con otras técnicas y equipos cualificados. Una de estas técnicas para conseguir una respuesta motora muscular que se utiliza en fisioterapia, es la electroestimulación.

La electroterapia o electroestimulación consiste en aplicar energía al organismo de diferentes maneras con el fin de producir sobre él reacciones biológicas y fisiológicas, las que son aprovechadas por los distintos tejidos cuando están sometidos a una alteración metabólica [1]. El tratamiento puede ser mediante pulsos eléctricos que provocan contracciones musculares muy similares a las naturales (EMS), o enviar señales al sistema nervioso para bloquear el dolor desde su origen en el cerebro (TENS) [2]. Según las necesidades del paciente, las corrientes eléctricas se aplican a través de diferentes aparatos que cumplen con determinadas finalidades.

Dependiendo del tipo de corriente y forma de onda generada por el equipo, se pueden encontrar diversos efectos; por lo general, las corrientes emiten una señal o la electricidad que se envía por medio de cables, llega a los electrodos y de allí se conduce hasta la piel, llegando al tejido muscular o nervios ubicados en la zona afectada. La electroterapia es un tipo de rehabilitación para tratar lesiones o algunas enfermedades musculo esqueléticas, aunque también es utilizada en el deporte para obtener mejores resultados de recuperación [3]. Para los médicos es difícil conocer con exactitud el origen de algunas enfermedades que provocan problemas en el cuerpo, por lo cual hasta cierto grado del padecimiento se puede tratar por

medio de terapias indicadas por el especialista encargado en esa área, de manera que trate al paciente enfatizando entre ellas la fisioterapia; esta se destaca por su flexibilidad en la manera de aplicar los masajes. Por otro lado, la electroterapia es otra de las alternativas para los afectados, en este caso, calma y previene contracturas musculares, ayudando a generar el tejido dañado, previniendo futuras complicaciones.

La electroterapia es un tipo de tratamiento que consiste en aplicar descargas eléctricas de baja frecuencia por medio de un aparato conocido como Estimulación Eléctrica Nerviosa Transcutánea (TENS); dado este proceso, conlleva a movilizar, tonificar y estimular los músculos de la región afectada; brindando un efecto positivo esa zona, pero no es una opción eficaz para los pacientes en fase grave y no tratados a tiempo. La importancia de estar bajo este tratamiento es que un terapeuta no solo trabaja para corregir las lesiones sino también para prevenirlas, con la electroestimulación a distintas intensidades se obtiene que la musculatura se adapte y trabaje a un ritmo habitual, así como fortalecer los tejidos y evitar presencia de futuras contracturas o cualquier problema que se da en la región afectada del cuerpo. En el hospital Aldo Chavarría, los afectados son normalmente valorados por fisiatras; así que ellos o los fisioterapeutas evalúan si se van a someter a electroterapia. Se les recomienda iniciar este tipo de tratamiento cuando se encuentran en una etapa crónica, aunque en algunos casos se les aplica en etapa grave, dependiendo de su estado y problema físico.

2. Objetivos

General

Diseñar un prototipo de equipo de estimulación eléctrica enfocado en pacientes con trastornos músculo esqueléticos que concurren al hospital de rehabilitación Aldo Chavarría, Managua- Nicaragua.

Específicos

1. Determinar los requerimientos de diseño del dispositivo por medio de la experiencia de especialistas del hospital de rehabilitación Aldo Chavarría.
2. Implementar un sistema para que regule el suministro de corriente y frecuencia, controlado por un microcontrolador.
3. Validar el equipo en pacientes que tengan trastornos músculo esqueléticos con el tratamiento de electroestimulación.
4. Realizar una aplicación de escritorio para los fisioterapeutas, que les permita la generación de reportes de la sesión terapéutica de sus pacientes.

3. Justificación

En la actualidad, en la mayoría de los hospitales del Estado tienen pocos aparatos en la rama de fisioterapia, normalmente se utilizan los TENS (Estimulación Eléctrica Nerviosa Transcutánea); y aproximadamente en cada unidad asistencial se les asigna al menos un aparato por cada tres especialistas. Con el paso de los años, la cantidad de pacientes ha ido aumentando, por lo que en algún momento será necesario tener más un aparato disponible; inclusive cuando se descarguen o dañen, la institución debe estar en la obligación de adquirir un nuevo equipo médico o accesorios para que la terapia sea más efectiva.

En fisioterapia, la electroestimulación es una técnica utilizada para potenciar los músculos, mejorar la circulación, disminuir el dolor y aumentar la fuerza muscular; en el caso de los deportes esta técnica es utilizada para relajar los músculos y mantener la condición física. En ambas situaciones lo común es lograr una contracción muscular.

La electroterapia invierte mucho tiempo en estas áreas para tratar de recuperar los músculos que han estado inactivos o les cuesta recobrar su movilidad con apoyo de otros tipos de rehabilitación. Cuando un paciente ve afectada su musculatura le genera alteraciones estéticas, funcionales y hasta psicosociales, por ejemplo: la parálisis facial. Es por esto que se pretende realizar un prototipo de equipo de electroestimulación que ayude en la rehabilitación de personas que tengan problemas o enfermedades musculares, en el hospital de rehabilitación Aldo Chavarría. Usualmente las sesiones de terapia se realizan en puntos médicos con la finalidad de que el paciente sea asistido por el terapeuta, el cual se encarga de supervisar las acciones ejercidas durante un aproximado de 15 a 20 minutos, evitando errores que podría cometer el paciente. Realizar las terapias ya mencionadas presentan inconvenientes; como, por ejemplo, querer atender a cierta cantidad de pacientes en un solo día.

Aunque la terapia física puede ayudar a disminuir dolor y estimular los músculos afectados, recuperando movilidad en los músculos alcanzados a largo plazo, es importante utilizar los avances tecnológicos en la electroterapia, porque agilizan la recuperación y ayudan a obtener mejores resultados; mejorando las condiciones físicas del paciente, contribuyendo de esa manera, con su calidad de vida. Por lo tanto, el presente estudio ofrece un aporte biomédico por medio de la experiencia y apoyo de los especialistas consultados en el hospital Aldo Chavarría.

4. Marco teórico

4.1. El Sistema músculo esquelético y la electroterapia

Nuestro sistema músculo esquelético, está conformado por el esqueleto humano, dando forma al cuerpo; permitiendo así que este se mueva y proteja a nuestros órganos al mismo tiempo, el sistema músculo esquelético está compuesto por la unión de huesos, articulaciones, tendones, ligamentos y músculos, el cual si este sufre lesiones o presenta problemas de alguna patología, podría causar trastornos músculo esqueléticos. Los Trastornos Músculo Esqueléticos o TME ¹ comprenden hasta más de 150 trastornos que afectan a nuestro sistema locomotor, abarcando fracturas, esguinces y distensiones, así como enfermedades crónicas que causan limitaciones de las capacidades funcionales [4].

Según la Agencia Europea para la seguridad y la salud en el trabajo, los trastornos músculo esqueléticos (TME) “son una de las dolencias de origen laboral más habituales”. Afectando principalmente la espalda, cuello, hombros y las extremidades (tanto superiores como inferiores).

Donde las enfermedades musculares son alteraciones o trastornos que pueden generar contracciones musculares. La orden motora viene desde el cerebro, donde el último en sufrir es el propio músculo, esta orden motora se extiende por medio de las neuronas, después por los nervios que interaccionan con el músculo mediante la placa motora, finalmente, el músculo ejecuta las contracciones musculares [5].

Para la Organización Mundial de la Salud (OMS) “Los TME son la principal causa que afectan a 1710 millones de personas en todo el mundo y son la principal causa de discapacidad, siendo el dolor lumbar la causa más frecuente”.

Así que, la estrategia de un tratamiento se basa en enfrentar el problema de acuerdo a las características de cada paciente. La rehabilitación es parte fundamental del tratamiento para el manejo de los TME y debe ser enfrentado por un equipo multidisciplinario para obtener resultados óptimos, la estimulación de los nervios y

¹ **TME:** Trastornos Músculo Esqueléticos

los músculos con electricidad ayuda progresivamente para obtener parte de su recuperación.

4.2. Trastornos músculo esqueléticos (TME)

Los TME son producto de someter el cuerpo a situaciones fuera de confort [6]; por ejemplo, estar en una prolongada exposición de alguna actividad, causando a pacientes lesiones y dolores persistentes, limitándolos de la movilidad y destreza, afectando cualquier zona del cuerpo pero principalmente al aparato locomotor (músculos, tendones, ligamentos, articulaciones) [7].



Figura 1. Trastornos Músculo Esqueléticos (TME) [7]

Como podemos ver en la Figura 1, los trastornos músculo esqueléticos son las dolencias más habituales en problemas de salud que varían desde molestias y dolores leves hasta enfermedades más graves que requieren tratamiento médico, en casos crónicos puede provocar discapacidad en la persona. Según una encuesta hecha en España por medio de condiciones de trabajo, en el 2015, “Los TME siguen siendo los problemas habituales de salud más reportados”, Generalmente estas lesiones se desarrollan a lo largo del tiempo y suelen tener más de una causa, tanto laboral como extra laboral.

4.3. Causas

Según la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo y de acuerdo a la encuesta realizada en España, estos son algunos factores que producen las causas tanto laborales como extra laborales, originándose los TME con el tiempo y a veces sin tener una sola causa, algunos síntomas que producen estos trastornos son: dolor, rigidez, hinchazón, adormecimiento y cosquilleo [8].

- Factores laborales (o riesgos físicos, biomecánicos y psicosociales)
 - Manipulación manual de cargas
 - Movimientos repetitivos
 - Posturas forzadas
 - Entornos fríos de trabajo
 - Trabajo a ritmo elevado (vinculados a riesgos psicosociales tales como un alto nivel de exigencia)

- Factores extra laborales (o individuales)
 - Embarazo
 - Medicamentos
 - Práctica de deportes

4.4. Anatomía músculo esquelética

El cuerpo humano está conformado por aproximadamente 630 tipos de músculos, donde los músculos esqueléticos son los encargados de ejercer las fuerzas principales que mantienen a nuestro esqueleto en permanecer de pie o en movimiento. Nuestros músculos no son todos idénticos ni tienen las mismas funciones.

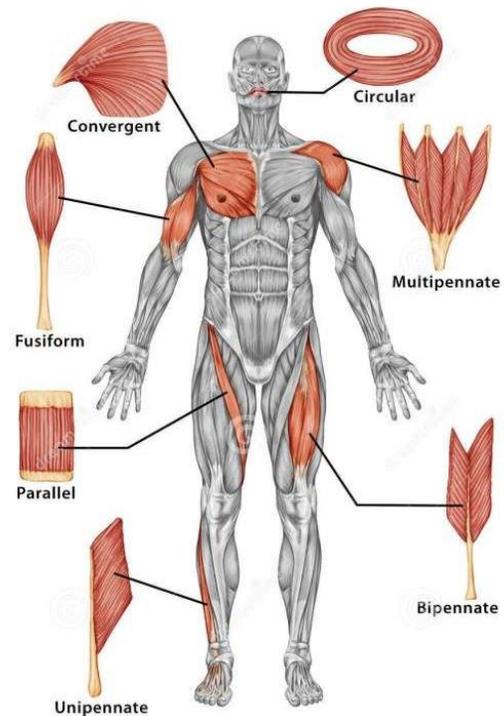


Figura 2. Músculos del cuerpo humano [9].

En la Figura 2, se muestran los músculos del cuerpo humano y como se clasifican según su forma y disposición, su aspecto fisiológico y fibras musculares [9].

- Algunos músculos según sus formas
 - M. plano: músculos con forma de abanico, ejemplo: M. pectoral
 - M. cortos: se caracterizan por su corta longitud, ejemplo: M. faciales
 - Multipenniformes: Surgen de diferentes tendones y presentan una organización compleja, por ejemplo: el deltoides
- Algunos músculos según sus movimientos
 - M. abductores
 - M. aductores
 - M. flexores
 - M. extensores
 - M. supinadores
 - M. pronadores

4.5. Puntos motores del cuerpo humano

Para conseguir mejor respuesta de contracción para tratamiento, se debe buscar la zona lógica, la cual se referencia al punto de inervación, “el tejido muscular está constituido por las fibras musculares, las cuales utilizan energía para generar fuerza y contracción muscular”, así que los puntos motores (Ver Figura 3) son el lugar de penetración de las fibras motoras en el músculo, sobre todo para electroestimular músculos atrofiados. Debido a que en los pacientes se presentan cambios de impedancia o resistencia de los tejidos, cada paciente responde de diferente manera en los distintos lugares de localización.

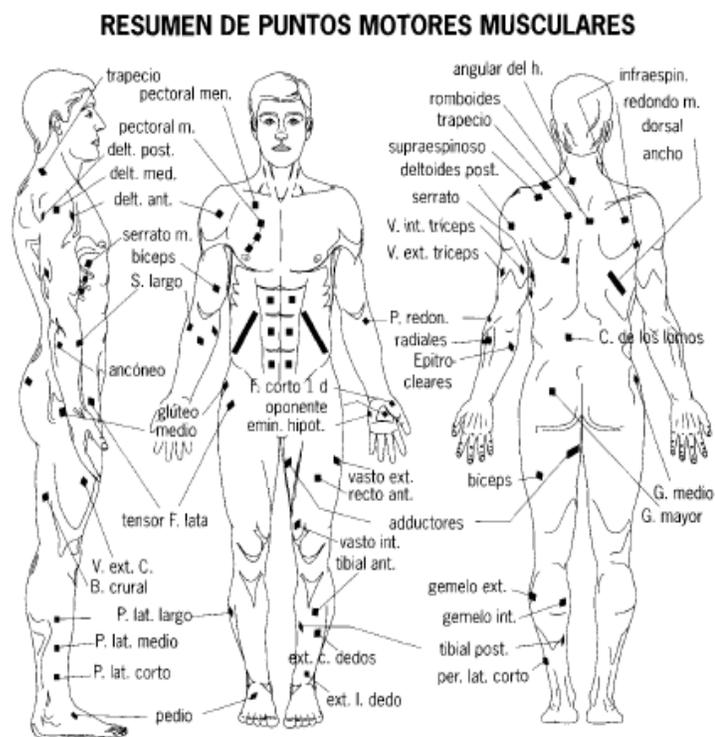


Figura 3. Puntos motores del cuerpo humano [10].

Al colocar un electrodo pequeño este es más selectivo, pero necesita mayor intensidad para conseguir la misma respuesta que otro grande, el grande soporta mejor y consigue mayor eficacia en el trabajo, pero es muy impreciso y puede desencadenar respuestas contrarias.

4.6. Diagnóstico de los TME

En el hospital de rehabilitación Aldo Chavarría, los pacientes primeramente deben pasar consulta con un fisiatra; este es el encargado de evaluar, diagnosticar, medicar y si es necesario, sugerir tratamientos de rehabilitación para la recuperación del paciente. Si un paciente logra obtener tratamientos de rehabilitación, entonces luego pasa con un fisioterapeuta, este es el encargado de realizar evaluaciones funcionales, realizando diagnósticos tanto funcionales como fisioterapéuticos, todo esto dependiendo de su discapacidad; en función de estos requerimientos, el fisioterapeuta elabora un plan de tratamiento y lo ejecuta en un determinado tiempo. Para el caso de considerar el uso de un aparato de estimulación eléctrica, los fisioterapeutas de este hospital valoran la fase en la que llega el paciente, o las condiciones descritas anteriormente, aunque casos especiales en donde los pacientes los necesitan con urgencia para disminuir hinchazones o dolores; entonces el fisiatra lo propone a utilizar desde un principio.

4.7. Electroestimulación

La estimulación eléctrica (E-stim²) es una modalidad o tratamiento dentro de la fisioterapia. Los tratamientos de electroterapia consisten en la aplicación de energía electromagnética al organismo, con el propósito de producir reacciones biológicas y físicas, aprovechando estos cambios para mejorar los tejidos que se encuentran sometidos a una enfermedad o alteraciones metabólicas de las células que componen dichos tejidos [10].

La función principal de la electroterapia es que por medio de la electricidad disminuya el dolor de una determinada zona, utilizando un aparato generador de diferentes tipos de corriente con sus intensidades correspondientes. La electroterapia abarca muchas técnicas de terapia física y aunque existe una controversia respecto a su uso y efectividad, se utiliza ya que estimula el punto motor del músculo y no del nervio [11]. Puede que esta técnica sea inocua, pues si

² **E-Stim:** Electrical stimulation o en español Estimulación Eléctrica, es el uso de un dispositivo que envía pulsos eléctricos suaves a través de la piel.

se aplica de forma insuficiente no se consigue una respuesta terapéutica suficiente y podría implicar pérdida de tiempo, recursos económicos y engaño así mismo y al paciente. Por otro lado, aplicadas en exceso podrían generar respuestas no deseada y hasta quemaduras al paciente [12].

La electroterapia (Ver Figura 4) designa al empleo de la electricidad como medio terapéutico. La electrofisioterapia se refiere a las aplicaciones de corrientes eléctricas y a las de agentes físicos producidos por la electricidad generando ondas mecánicas y electromagnéticas [13]. Se consideran solo las corrientes eléctricas que se aplican de manera directa sobre los tejidos y en especial la electroestimulación por sus propiedades analgésicas y excitomotorias.

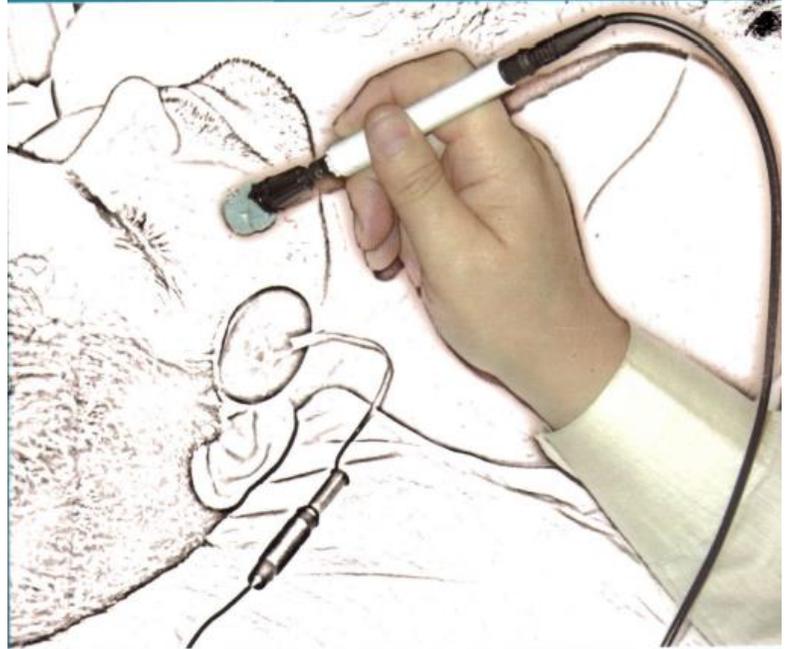


Figura 4. Electroterapia [10].

En tanto, bajo el punto de vista eléctrico y magnético, el cuerpo es considerado un conductor de segundo orden ya que los iones que se encuentran en disoluciones y dispersiones coloidales, transmiten la energía aplicada por medio de los tejidos, la mayor o menor conductividad va a depender de la cantidad de agua disolvente y sus solutos, los cuales serán fundamentales de la energía eléctrica para el organismo.

La electroestimulación es una de las terapias más importantes no solo porque estimula a nivel nervioso; sino también a nivel muscular, aunque hay que tener en cuenta que, si su aplicación se hace a manera errada, puede provocar quemaduras o simplemente dejar una lesión permanente al paciente. Por esta razón, es

importante no solo conocer la electroterapia, sino también conocer de manera regular la región afectada en el paciente y así contribuir con aplicaciones óptimas las mejores condiciones de vida que pueda llevar día a día la persona, es decir, sin causar daño mayor. La recuperación del paciente dependerá del tipo de lesión, edad, nutrición y estado metabólico de la persona.

4.7.1. ¿Cómo funciona la estimulación eléctrica?

Para fisioterapia se pueden aplicar diversos tipos de impulsos eléctricos con el fin de conseguir una contracción de la musculatura a tratar, con una amplia variación en la frecuencia y en amplitud. Se le llama electroestimulador al equipo que se utiliza para provocar los efectos señalados.

La electroterapia en términos eléctricos funciona utilizando corriente directa o alterna, si y solamente si se debe aplicar una corriente eléctrica directamente al músculo para estimularlo. Por medio de la electricidad, se facilita la comunicación entre las neuronas y el músculo; sin embargo, las frecuencias se encuentran en desorden. Por consiguiente, es importante regularla con acciones externas, con la electroterapia se puede producir el tipo de corriente necesaria, alcanzando un rango suficiente para llegar a los músculos y nervios. El nervio es capaz de conducir la señal sobre la unión del músculo y el nervio, resultando la liberación del dolor. Los estímulos eléctricos cuando alcanzan suficiente amplitud tienen la capacidad de producir un potencial de acción muscular, el nervio conduce la señal y en la placa motora se desencadena una descarga que produce una contracción [14].

La conductividad depende del mayor o menor contenido de agua como disolvente y sus solutos, los cuales son conductores fundamentales de la energía eléctrica por el organismo [10]. La energía eléctrica se desplaza por el organismo en forma de electrones asociados a iones que se mueven por la fuerza electromotriz aplicada, con electrodos procedentes de una fuente de energía externa; o bien, por las cargas internas del organismo

4.7.2. Efectos de la electroterapia

Para el proceso de rehabilitación con electroestimulación, los beneficios que se destacan son los siguientes.

- Efecto calmante: La electroterapia produce un efecto analgésico, en donde la zona inflamada o dolida se localiza, se produce este efecto contribuyendo a combatir el dolor al estimular los nervios y músculos afectados.
- Efecto antiinflamatorio: En este caso la electroestimulación alivia y previene contracturas musculares; es una combinación con la vasodilatación pasiva para recuperar el tejido dañado.
- Reestructuración: Reactivación del bombeo muscular, equilibrando la zona y mejorando la circulación en la misma.
- Efecto térmico: Se produce calor en los tejidos debido al efecto Joule [15].

4.7.3. Aplicación de la electroterapia

La electroterapia es un campo que abarca el tratamiento de las enfermedades del sistema neuromuscular ³ utilizando diferentes corrientes de diferentes frecuencias, intensidades y hasta formas de ondas, aplicada para complementar la rehabilitación de los pacientes o como técnica individual, estas son algunas afecciones que pueden ser tratadas con sesiones de electroterapia [16] :

- Atrofia muscular por inmovilización.
- Codo de tenista.
- Dolor agudo o crónico en articulaciones.
- Mala circulación de retorno.
- Necesidad de potencia muscular.
- Parálisis facial.
- Síndrome del túnel carpiano.
- Zonas inflamadas del cuerpo.

³ **Sistema neuromuscular:** Es aquel que está compuesto por el sistema nervioso (neurona) y el sistema músculo esquelético (fibras musculares)

4.8. Electroestimuladores utilizados en fisioterapia

Los electroestimuladores tipo TENS (Estimulación Eléctrica Nerviosa Transcutánea) y EMS (Electro Estimulación Muscular) se suelen confundir, o a veces se utilizan cualquiera de los mencionados para un mismo trabajo, por la misma razón de tener poco material en los hospitales, ambos tienen un papel útil para la tonificación muscular, “son de baja frecuencia y de alto voltaje por sus pulsos tan cortos”; sin embargo, no son lo mismo y cada sistema tiene características y funcionalidades diferentes.

4.8.1. TENS

El TENS es un aparato portátil, normalmente empleado para analgesia. Estos aparatos incluyen características de diversas prestaciones y programas, con la finalidad de personalizar el tratamiento; gracias a su flexible configuración un programa se puede establecer de manera adecuada a las condiciones del paciente. En cambio, el EMS se utiliza mucho en la estimulación del torrente sanguíneo, relajar y reducir la rigidez de las articulaciones, en otras palabras, se dedica al trabajo neuromuscular de fibra sana.

4.8.2. EMS O EEM

El sistema EMS utiliza una carga eléctrica para generar contracción en el músculo, los impulsos que genera se cargan en las fibras del músculo; a diferencia de los sistemas TENS, están diseñados para trabajar el nervio a partir de impulsos eléctricos a través de la piel, reduciendo o eliminando el dolor si es de origen nervioso, que por razones médicas puede ser crónico o eventual.

4.8.3. NMES

La Electro Estimulación Neuro Muscular, es otro tipo de electroestimulación, destinado a fortalecer la musculatura, mantener y aumentar la masa y fuerza muscular. Un claro ejemplo donde se puede emplear este artefacto es para las rehabilitaciones de personas que han sufrido de Stroke (derrame cerebral). Este tipo

de estimulación también se aplica asociada al entrenamiento de fuerzas en atletas; sin embargo, los efectos de la NMES sobre el crecimiento muscular aún no están claros y no hay suficientes estudios en humanos, las señales o frecuencias anabólicas que se utilizan son de alta y baja frecuencia [17].

4.8.4. FES

La Estimulación Eléctrica Funcional es una de las más complejas de las electroestimulaciones, no solo mantiene y fortalece la musculatura afectada, sino que también genera movimientos funcionales como, por ejemplo: caminar [18]. El objetivo es estimular los nervios por medio de corrientes eléctricas, mediante electrodos para causar una contracción muscular, esto simula un movimiento funcional en las extremidades deterioradas. Gracias a su complejidad y su sistema RehaMove el FES permite entrenar los músculos incluso cuando se haya perdido parcial o totalmente su control voluntario.

4.9. Clasificación de corrientes y frecuencias en electroterapia

Es importante tomar en cuenta que, en la electrofisioterapia, al aplicar corrientes eléctricas, estas se aplican directamente sobre los tejidos, especialmente en electroestimulación. Gracias a sus propiedades analgésicas y excitomotrices, la electroestimulación aporta alivio en el dolor y facilita el movimiento [13].

La aplicación de las corrientes será de manera transcutánea, situando sobre la piel los electrodos. Aquí se debe ser precavido, ya que, cada persona y su patología presentan cualidades y condiciones propias en sus reacciones ante estas corrientes, dependiendo de factores como:

- Psicológicos: miedo a la electricidad.
- Morfológicos: zonas necesarias de la piel adecuadas para la aplicación.
- Experiencia del paciente: número de sesiones recibidas.
- Humedad de la piel: sudorosa, grasienta, seca.
- Estado de la piel: rugosa, degenerada, herida.

- Pérdida de sensibilidad: denervaciones.
- Zona de aplicación: grandes masas de grasa, tuberosidades óseas.

Por lo que el paciente se debe hacer sentir bien e introducirlo en un ambiente tranquilo para que confíe en el terapeuta; así como en la técnica que le aplicará. Todos los pacientes tienen derecho de saber lo que van a experimentar, dándoles a conocer que en casos de sentir molestias o algo inusual lo comuniquen, para tomar medidas mediante lo que sienta durante la sesión de aplicación, sobre todo si es la primera sesión.

Por otro lado, el terapeuta debe estar atento en todo momento a las observaciones que se hacen sobre el estado de la zona donde se aplique el tratamiento.

4.9.1. Según frecuencias

En fisioterapia se utilizan corrientes del espectro electromagnético llamadas radiaciones no ionizantes [10].

- Baja frecuencia: de 0 a 1,000 Hz.
- Media frecuencia: de 1,000 a 500,000 Hz.
- Alta frecuencia: de 500,000 Hz hasta el límite entre las ultravioletas tipo B y C.

4.9.2. Según forma de onda

La corriente eléctrica se puede presentar en estado constante o variable; así como también de manera unidireccional o bidireccional, las propiedades y riesgos de esta varían de forma considerable según su estado y dirección [13].

- Flujo constante y mantenida la polaridad (galvánica o corriente continua).
- Flujo interrumpido y mantenida la polaridad (interrumpidas galvánicas).
- Flujo constante e invertida la polaridad.
- Flujo interrumpido e invertida la polaridad (interrumpidas alternas).

4.9.3. Impulsos

Los pulsos de las formas de ondas se pueden generar de diferentes formas, dependiendo de la aplicación. Al tipo de impulso se le valora otros parámetros, como, por ejemplo:

- Amplitud: Altura máxima del impulso.
- Subida: Crecimiento progresivo, lineal o exponencial.
- Mantenimiento: Este valor debe coincidir con la amplitud del impulso.
- Bajada: llamada también caída, puede ser lineal, exponencial o parábola invertida.

Combinando las frecuencias, duración e intensidad, se obtienen tres tipos principales de corrientes de electroestimulación [13].

- BF BI (baja frecuencia, baja intensidad): 50-100 Hz, analgésica con duración de impulso menor o igual a 0.1 ms.
- MBF IE (muy baja frecuencia, intensidad elevada): 2-8 Hz, excitomotriz por sacudidas elementales con una duración de 0.1-0.6 ms.
Analgésica por liberación de endorfinas con una duración del impulso de 0.2-2 ms.
- BF IT (baja frecuencia, intensidad suficiente): 20-80 Hz, excitomotriz tetanizante, con duración de impulso de 0.1-0.6 ms.

Estos tres tipos de corrientes se ajustan a los parámetros fundamentales de los impulsos (inicio, duración, dirección y frecuencia), y pueden mejorarse con modulaciones que les conceden propiedades complementarias, con el objetivo de aumentar su eficacia.

Parámetros	Tipos de corriente	Propiedades	Indicaciones
BF BI Baja frecuencia 50-100 Hz Baja intensidad		Analgésica por gate control (duración del impulso: $\leq 0,1$ mseg)	Dolores localizados
TBF IE Muy baja frecuencia 2-8 Hz Intensidad elevada		Analgésica por liberación de endorfinas (duración del impulso: 0,2-2 mseg) Excitomotriz por sacudidas elementales (duración del impulso: 0,1-0,6 mseg)	Dolores difusos Reacción muscular
BF IT Baja frecuencia 20-80 Hz Intensidad suficiente para tetanizar		Excitomotriz tetanizante (duración del impulso: 0,1-0,6 mseg)	Amiotrofias Fortalecimiento muscular

Figura 5. Tipos de corrientes [13].

Estado	Dirección	Corriente	Propiedades Indicaciones	Ventajas Inconvenientes
Estado constante		Continua o galvánica 	Baño galvánico: tratamiento de la hiperhidrosis	Electrólisis: riesgo de quemaduras químicas Interés restringido por el protocolo riguroso: intensidad y duración limitadas
Estado variable	Unidireccional	Impulsos aislados 	Electrodiagnóstico y electroestimulación del músculo desnervado	Contraindicación: piezas metálicas incorporadas Sensación de desagrado: irritación galvánica
	Bidireccional	Baja frecuencia: <150 Hz Muy baja frecuencia: <10 Hz 	Electroestimulación analgésica y excitomotriz	Inocuidad Eficacia Indicaciones ampliadas Sensación de bienestar

dlr

Figura 6. Clasificación de las corrientes según su estado y dirección [13].

5. Diseño metodológico

La metodología de este trabajo es de tipo investigación, ya que se realizó un estudio de los requerimientos y técnicas necesarias, propuestas por los especialistas de fisioterapia del hospital Aldo Chavarría, para ser empleadas en la implementación del equipo de electroestimulación.

5.1. Población y muestra

La población de este estudio, fueron los pacientes que acuden al hospital Aldo Chavarría, como son demasiados casos, se escogieron al menos 15 pacientes que tienen TME en diferentes zonas del cuerpo, a estos pacientes se les realizó una encuesta para poder comprobar el nivel de satisfacción que sienten al usar un electroestimulador en su programa de rehabilitación.

5.2. Diseño de investigación

El diseño de este estudio fue de tipo experimental, porque se analizó el comportamiento y reacciones que provocan las diferentes formas de ondas, además se tomó en cuenta la opinión de los fisioterapeutas, con el fin de darle un correcto uso al equipo.

5.3. Recolección de datos

Para la recolección de datos que se realizó en esta investigación, se programaron visitas al hospital Aldo Chavarría, donde se realizaron observaciones y preguntas a los fisioterapeutas y pacientes, con el fin de recolectar datos para la construcción del equipo.

Primero se realizaron observaciones de cómo los fisioterapeutas preparan a los pacientes, antes de utilizar un equipo electroestimulador (TENS en este caso) en alguna determinada zona del cuerpo, luego se realizaron preguntas e incluso se tomaron en cuenta opiniones personales de los fisioterapeutas para así poder determinar los requerimientos de lo que necesitan en un electroestimulador.

Como siguiente paso para la recolección de datos, se realizó encuesta a los pacientes, para comprobar el uso efectivo del electroestimulador cuando actúa sobre una zona afectada del cuerpo.

La tercera forma de recopilar datos, fue a través de observaciones, acerca de cómo reaccionan los pacientes al utilizar el equipo de electroestimulación. Luego de haber recogido toda esa información primordial, se procedió a trabajar en la programación y el diseño del equipo electroestimulador.

5.4. Requerimientos de diseño

En este capítulo se detallan los requerimientos que se utilizaron para el diseño y desarrollo del prototipo, posteriormente se explica el progreso que se llevó a cabo para la construcción de este prototipo.

5.4.1. Requerimientos para diseño del prototipo

Se realizaron preguntas a algunos fisioterapeutas del hospital de rehabilitación Aldo Chavarría, donde se llegó a recopilar numerosos requerimientos para realizar el prototipo de equipo de estimulación eléctrica, con el propósito de mejorar e implementar este equipo mencionado. A continuación, los parámetros fundamentales:

- Interruptor de encendido/ apagado.
- Cumplir con las normas de seguridad establecida.
- Caja protegida contra derivaciones y asilada del paciente.
- Selector del tipo de corriente.
- Regulador de intensidad.
- Medidor de intensidad.

Esto conlleva a que, para cumplir con requerimientos técnicos que se deben tomar en cuenta al menos algunos de estos conceptos necesarios para que brinden soluciones positivas a la hora de implementarlo en el equipo.

Cabe destacar que estos requerimientos coinciden con lo que recomendaron los fisioterapeutas, y lo que está escrito en el libro de Electroterapia en fisioterapia, según José María Rodríguez.

Ley de Ohm

Esta Ley es fundamental en la electricidad y la electrónica, establece relaciones entre los distintos parámetros eléctricos mediante una ecuación.

$$V = I \times R \quad [1]$$

Potencia

En este caso se emplea para medir la velocidad con que se produce la transformación de energía en otra; es decir, la conversión de electricidad en calor, esto con el fin de saber que, si a un paciente se le ha aplicado calor y manifiesta dolor o quemazón, significa que hay exceso de calor o demasiada potencia [10].

$$W = V \times I \text{ o bien } J = W \times t \quad [2]$$

Trabajo

Si se multiplica la potencia por un determinado tiempo (en segundos), se obtiene el trabajo.

La diferencia entre potencia y trabajo es, mientras la potencia determina la capacidad para realizar un determinado trabajo, en el trabajo se mide lo conseguido y sus parámetros [10].

$$V = I \times R; \text{ siendo } W = I \times R, \text{ donde} \quad [3]$$

$$J = I^2 \times R \times t$$

Calor

Según la ley de Joule el calor es el paso de una corriente eléctrica a partir de determinada intensidad y a su vez el conductor presentando resistencia, generando calor en la materia. La fórmula de trabajo realizado en los tejidos vivos se expresa según a fórmula de Joule [10].

$$C = K \times R \times I^2 \times t \quad [4]$$

Donde; k= 0.24, es una constante de conversión de julios a calorías; R es la resistencia del conductor, I es la intensidad al cuadrado; y t es el tiempo en segundos que está produciendo la transformación de energía en calorías.

Dosis o densidad de energía

En baja frecuencia la dosis se define como la intensidad proporcional a las circunstancias y parámetro que se aplican en una sesión de tratamiento [10]. En electroterapia se aplican diversas energías, dependiendo de la superficie corporal, con electrodos de distintos tamaños y con mayor o menor duración de la sesión. La intensidad propuesta va a depender de factores o circunstancias como:

- Tiempo de duración de la sesión
- Sensibilidad del paciente
- Grado de reacción de la piel del paciente
- Sistema de trabajo del equipo (tensión constante o intensidad constante)
- Estado de humedad de la piel y humedad del electrodo (resistencia)
- Tamaño del electrodo (resistencia)

En términos matemáticos está determinado por la siguiente expresión:

$$J = W \times t \quad [2]$$

Donde:

$$Dosis = \frac{[J (cm^2)] \times [S(cm^2)]}{W \times t} \quad [5]$$

Cabe destacar que esta fórmula sólo se aplica para casos en los que se trabaja con frecuencia alta, para frecuencia baja simplemente se aplica por tanteo; es decir, se le pregunta al paciente hasta donde es capaz de tolerar y dejar al equipo funcionando con ese límite.

Impedancia

Hay ocasiones que la piel presenta una resistencia al paso de la corriente eléctrica (especialmente para la galvánica). En este caso, significa que, si la materia no presenta ningún componente de resistencia inductiva, ni capacitativa, el rendimiento y transformación en potencia es del 100%.

$$Z = \frac{V}{I} \quad [6]$$

La impedancia del cuerpo humano está influenciada por las condiciones de humedad de la piel y características fisiológicas del individuo, a su vez de la superficie de contacto (este juega un papel importante), ya que a menor superficie hay menor resistencia y a mayor superficie, mayor resistencia. Con una piel seca y saludable, esta podría brindar hasta unos 1,000 Ohm para voltajes bajos (menos de 100 V), en dado caso que la piel está húmeda, su resistencia baja [19].

Conductividad

La conductividad es la capacidad de transferir calor o carga eléctrica, en este caso, es la facilidad que se da en la materia al circular por ella corriente, lo contrario a la resistividad.

El cuerpo humano conduce electricidad porque el mismo consta de agua ionizada, lo que lo permite ser un excelente conductor gracias a que contienen líquidos como sangre, linfa, etc. [10]. Para que exista la posibilidad de circulación de corriente eléctrica, es necesario que nuestro cuerpo (circuito) esté cerrado, o pueda cerrarse o exista una diferencia de potencial mayor que cero.

Resistividad

La resistencia de los tejidos humanos al paso de una corriente es variable, la resistencia eléctrica del cuerpo establece un valor máximo en 3,000 Ohm y el mínimo en 500 Ohm, esto dependiendo de las características de la piel [20]. La resistividad, es la dificultad que se da en la materia que circulan por ella corriente. En el caso de los electrodos usados en electroterapia de baja y media frecuencia manifiestan una determinada resistencia que depende de ciertos factores:

- La materia que lo componga
- Grado de humedad
- Presión ejercida sobre la piel
- Tamaño del electrodo

La resistencia y el tamaño del electrodo se relacionan con la dosis, por lo que se debe controlar la intensidad y el voltaje para evitar los riesgos de quemar al paciente. Su relación es la siguiente:

- A menor tamaño, mayor resistencia
- A mayor tamaño, menor resistencia

$$R = \frac{V}{I}$$

[7]

5.4.2. Evaluación y selección de componentes

Para la construcción del prototipo de este dispositivo, se evaluaron los componentes que se utilizaron en el diseño del prototipo del equipo.

Primero se seleccionó el microprocesador, el encargado en cumplir con las funciones primordiales del prototipo estimulador eléctrico. Aquí se tomó en cuenta su tamaño, al ser pequeño no hay necesidad de fabricar un prototipo grande; el costo, porque este prototipo necesita ser accesible para las instituciones Estatales de la salud; disponibilidad, esto porque si se requiere trabajar con algo original para que su durabilidad y rendimiento sea mejor, a veces se deben traer de fuera, lo que su precio incrementa.

En este se seleccionó el Arduino UNO [21], debido a que cumple con la mayoría de características que se piden en los requisitos, además es más común y está disponible en el mercado en todo momento. Aunque el NodeMCU presenta también las mismas ventajas, se descartó por no ser muy estable; es decir, presenta problemas con algunas de sus funciones, por lo que podría afectar a nuestro equipo.

El siguiente componente que se evaluó fue un DAC [22], capaz de generar las señales principales, para luego a través del microcontrolador mandar a llamarlas y así facilitar la programación del equipo. Al igual que el microcontrolador, se tomó en cuenta su precio, tamaño y disponibilidad en el mercado.

	Tamaño (pequeño)	Costo (bajo)	Disponibilidad
DAC MCP4725	✓	✓	✓
PMI DAC06	✓	x	x

El módulo DAC lleva ventaja porque es de 12 bits, además este dispositivo permite obtener una señal analógica desde un procesador digital (en este caso, Arduino UNO) y es un componente ideal para proyectos que requieren la generación de una señal analógica en lugar de una PWM. El MCP4725 [23] es controlado por I2C, por lo que es sencillo de realizar su lectura y dispone de dos posibles direcciones, también incorpora una memoria EEPROM, permitiendo mantener el nivel de tensión, incluso después de un corte de alimentación.

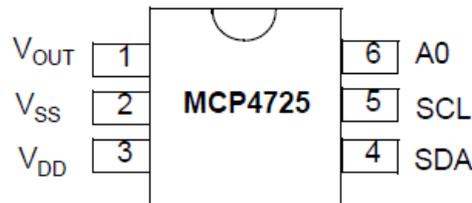


Figura 7. Circuito integrado MCP4725 [23].

Para calcular el bit menos significativo de este DAC sería de la siguiente manera:

$$LSB = \frac{V_{REF}}{2^n} = \frac{(V_{Full\ scale} - V_{Zero\ scale})}{2^n - 1} \quad [7]$$

Donde: $v_{REF} = v_{DD}$ y $n = 12$, todos estos datos son del MCP4725. Por lo tanto:

$$LSB = \frac{(5V - 0.02)}{2^{12} - 1} = 1.21\text{ mV}$$

Teniendo en cuenta el funcionamiento del DAC, en el código final se asignan números correspondiente al bit de resolución (ver programación en anexos), lo que para un ejemplo de un caso que tenga 15V correspondiente al programa, su resultado en la programación es este:

$$V_{out} = \frac{(V_{REF} \times D_n)}{4096} \quad [8]$$

$$V_{out} = \frac{(5V \times 1601)}{4096} = 1.95V$$

Donde $v_{REF} = v_{DD}$ del MCP4735 y D_n está asignado en la programación (ver anexos).

Este 1.95V se obtiene midiendo la salida física del MCP4725.

Por ende, este pequeño módulo es ideal para el proyecto, ya que nos permite generar la forma de onda de una manera bastante sencilla. El MCP4725 tiene seis pines; A0, que es un pin de selección de bit de dirección externo y puede vincularse a VDD (5V) o bien, GND (Tierra) del Arduino; SDA, el pin correspondiente a la interfaz I2C, este es usado para leer o escribir los registros del DAC y datos de la EEPROM.

Para visualizar los datos, se utilizó una pantalla táctil capacitiva (PCAP), siendo la nitidez y brillantez las ventajas que más sobresalen en este componente, a parte que brinda una mejor experiencia hombre-máquina y tienen una buena durabilidad. Al mismo tiempo, esta pantalla está conectada con una Raspberry Pi 3, que en este caso se comunica con el Arduino UNO, todo esto trabaja en conjunto para poder hacer la interacción con la máquina y manipular dichas formas de ondas con sus respectivos rangos, dependiendo de cada paciente conectado a la salida (electrodos).

Otro material importante fue la elección de materiales como los electrodos, en este caso se utilizan electrodos adhesivos porque están asignados para terapias tipo TENS y EMS, además que tienen la ventaja que incluyen gel incorporado, son reutilizables siempre y cuando se mantenga una adecuada conservación y son capaces de liberar los pulsos eléctricos de diversas frecuencias para diferentes fines.

5.5. Diseño del prototipo

5.5.1. Software de diseño de la PCB

Para hacer el diseño de la placa (PCB) se utilizó el programa Eagle; sin embargo, aunque este no es un software Open-Source, se escogió, ya que este está destinado a la automatización del diseño electrónico (EDA) que permite los diseñadores de placas de circuito impreso (PCB) hacer conexiones de los diagramas esquemáticos sin problemas, además, cuenta con un auto enrutamiento opcional de las PCB y cuenta con una amplia biblioteca de componentes.



Figura 8. Logotipo de Eagle [24].

En el editor de esquemas, se puede buscar y seleccionar todos los componentes de la biblioteca, allí mismo se obtiene una verificación de la regla eléctrica para comprobar que todas las conexiones estén bien. Una de las ventajas de este software es que, al trabajar el esquema y el diseño, estos se sincronizan correctamente, de modo que, si se cambia algo en el esquema/diseño, se realizarán los mismos cambios en el diseño/esquemático.

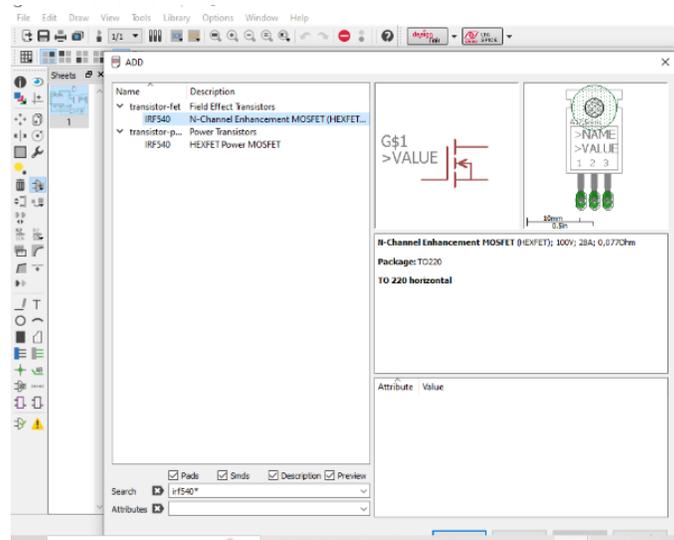


Figura 9. Entorno de Eagle.

5.5.2. Esquemático

En este apartado se muestran los diagramas que se diseñaron, en donde se pueden apreciar las conexiones de cada uno de los esquemáticos, en total se hicieron dos. En las siguientes figuras se detallan los componentes que lleva cada uno de estos esquemas.

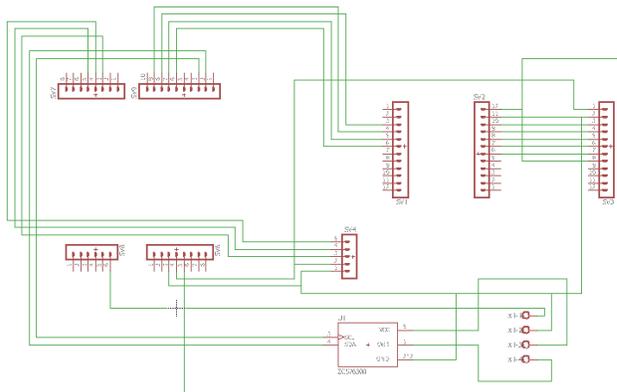


Figura 10. Diagrama esquemático para Arduino.

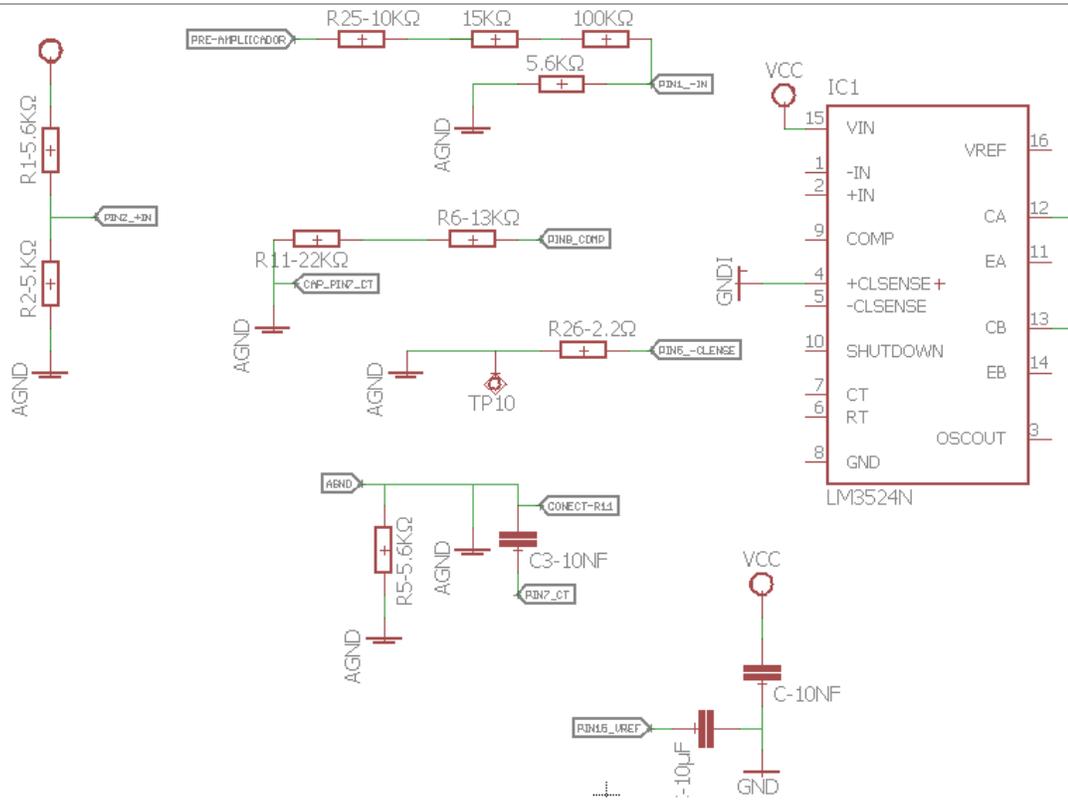


Figura 11. Diagrama esquemático para circuito de potencia 1.

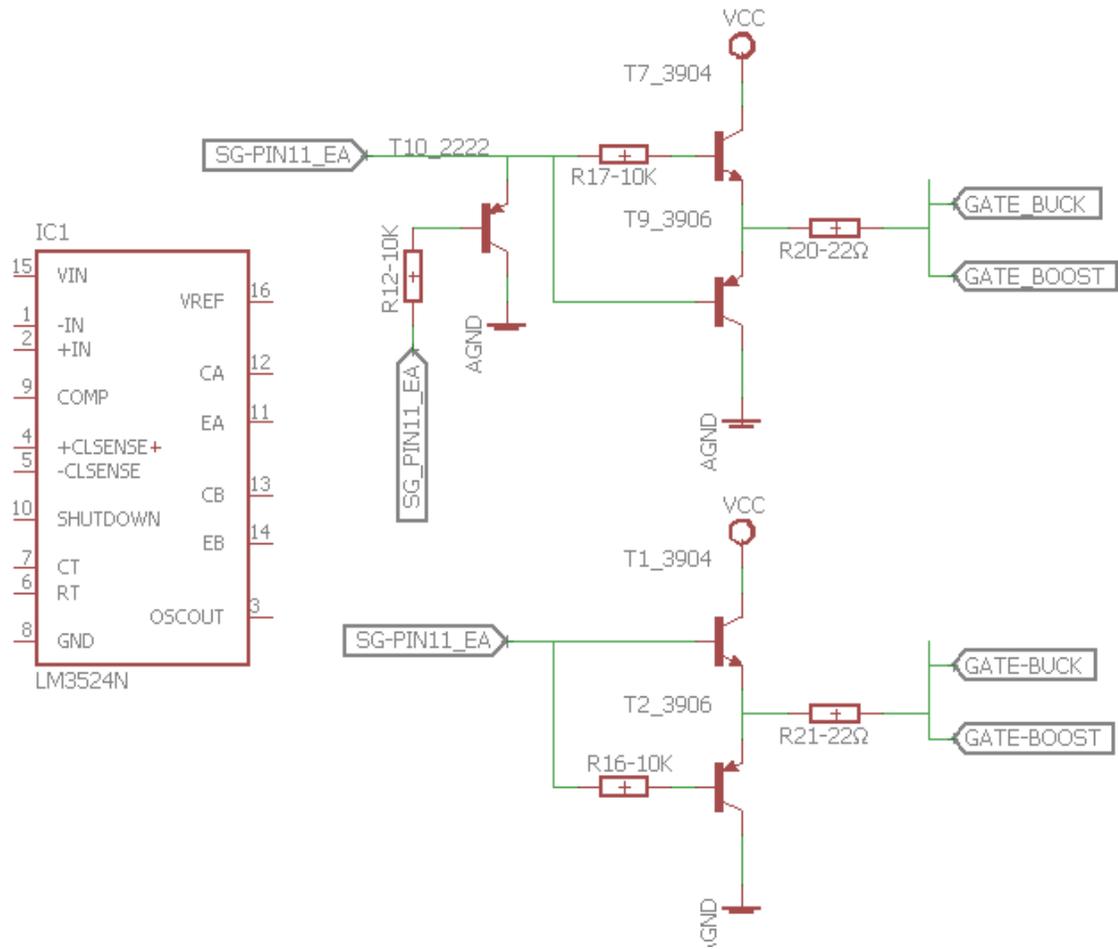


Figura 12. Diagrama esquemático para circuito de potencia 2.

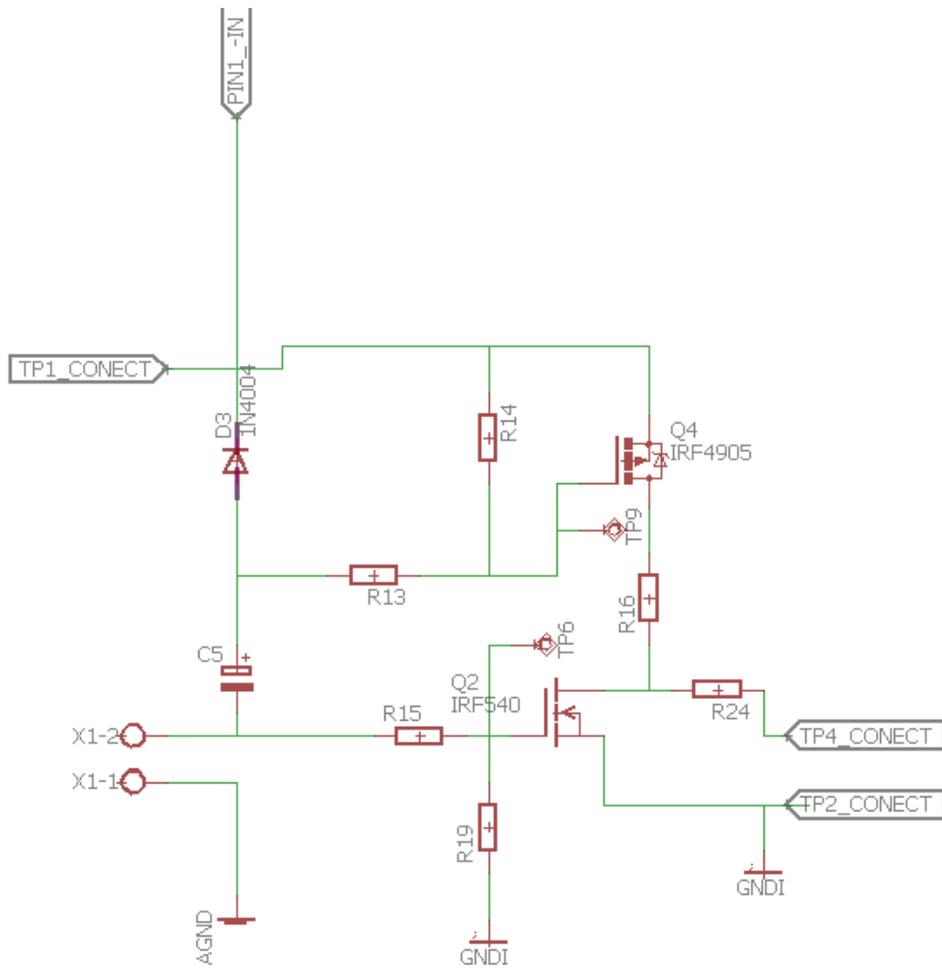


Figura 13. Diagrama esquemático para circuito de potencia 3.

5.5.3. Generación de las señales con MCP4725

Dependiendo de la aplicación del equipo electroestimulador, los pulsos de las formas de ondas pueden variar. En este caso, gracias a las investigaciones realizadas en el hospital Aldo Chavarría y la opinión tomada en cuenta de los fisioterapeutas, se agregaron algunas formas de ondas que comúnmente conocen o recomendaron para plasmarlas en el prototipo de estimulación eléctrica (Ver programación en anexos).

Este equipo utiliza ondas cuadradas, ya que en baja y media frecuencia actúan a mayor profundidad, por lo que son muy efectivas en la estimulación de fibras motoras⁴. Además, la onda cuadrada es una de las más comunes, es una onda estándar y se usa principalmente por ser manipulable fácilmente. Se utilizan para la recuperación muscular con agradable sensación; es decir, no generan sensación de corriente. Para la programación de estas formas de onda con el MCP4725 se necesitó utilizar el preescaler TIMER2, y dependiendo de la forma de onda con sus características correspondientes (definidos en los manuales y libros de apoyo) los cálculos y modos de formas de ondas que se agregaron al equipo son las siguientes:

- **Modo Normal:** Conocido también como modo convencional, donde la frecuencia de pulso y el ancho son regulables, generando una estimulación continua. Ofrece a los especialistas un control completo sobre todos los diferentes parámetros del equipo.

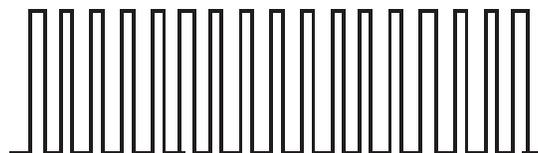


Figura 14. Modelo de onda modo normal [25].

⁴ **Fibra motora:** Fibra nerviosa que transmite impulsos motores.

En este caso se inició programando esta forma de onda, ya que es la más básica y comprensible de todas, cuenta con el control completo de todos los parámetros sugeridos del equipo. A partir de esta referencia, se tomaron en cuenta algunos parámetros de la misma para poder programar las demás.

$$T = \frac{1}{F} \quad [9]$$

Donde F= frecuencia de la señal

$$T_s = \frac{1}{40\text{Hz}} * 2 = 12.5\text{ms}$$

Para encontrar el valor del preescaler, se escoge el entero superior, dado por la siguiente fórmula:

$$n = \text{Log}_2 = \frac{(F_A * T_s)}{R} \quad [10]$$

$$n = \text{Log}_2 = \frac{(16\text{MHz})(12.5\text{ms})}{2^8} = 9.60 \approx 10$$

$$\text{Entonces } P=2^n=2^{10}$$

Calculando la frecuencia del preescaler:

$$F_p = \frac{(F_A)}{P} \quad [11]$$

$$F_p = \frac{(16\text{MHz})}{2^{10}} = 15625\text{Hz}$$

Buscando el valor del timer:

$$\text{Timer} = (T_s \times F_A) \quad [12]$$

$$\text{Timer} = (12.5\text{ms} \times 15625) = 195.31$$

- Modulación: En este modo, la frecuencia de pulso va desde los 60-250Hz, con una regulación de un ancho de pulso entre 50-300uS; son totalmente regulables. Es una combinación de la frecuencia de pulso y la modulación del ancho del pulso. El modo modulado intenta evitar la acomodación del nervio cambiando continuamente la intensidad del tratamiento.

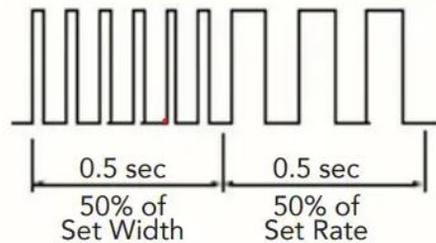


Figura 15. Modelo de forma de onda de modulación [25].

Este modo cumple con un 50% de frecuencia de pulso y 50% de modulación del ancho de pulso, en la programación se calculó cuatro tiempos, dos en alto y dos en bajo, se cumple que para la frecuencia esta debe ser el doble a comparación del ancho de pulso.

- Burts (Tren de ráfagas): Comúnmente conocida como tipo Burts o trenes de onda, es una mezcla de la forma normal y técnicas de acupuntura. Este modo es utilizado en baja frecuencia con trenes de impulsos y constado de una ráfaga de 7-10 trenes de impulsos, ha de utilizarse con una frecuencia fija de 100Hz. Indicado para lesiones con las que un paciente lleva más tiempo o crónicas, no producen una analgesia inmediata pero la sensación es de mayor duración.

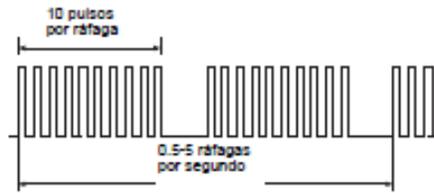


Figura 16. Modelo de forma de onda modo Burts [25].

Tomada de la señal modo normal, la señal en este programa tiene 7 ráfagas a 100Hz:

Utilizando la Ecuación [9], se calcula el periodo de esta señal, con una frecuencia fija de 100Hz:

$$T = \frac{1}{100\text{Hz}} = 2.5\text{ms}$$

Obteniendo el periodo de la señal, hay que buscar el preescaler, con la Ecuación [10]:

$$n = \text{Log}_2 = \frac{(16\text{MHz} * 2.5\text{ms})}{2^8} = 7.28 \approx 10$$

$$\text{Entonces } P=2^n=2^{10}$$

Calculando la frecuencia del preescaler con la Ecuación [11]:

$$T = \frac{16\text{MHz}}{2^{10}} = 15625\text{Hz}$$

Una vez teniendo estos datos, se busca el valor del timer, con la Ecuación [12]. Con este dato se va a crear la señal en la programación:

$$F_p = (12.5\text{ms} * 15625\text{Hz}) \approx 40$$

- Trabert: Esta corriente se destaca por la desaparición casi inmediata del dolor que puede producirse después de un tratamiento, la frecuencia de pulso se mantiene entre los 142-143 Hz (para el caso de demostrar la frecuencia con el osciloscopio) con un tiempo de impulso de 2ms y 5ms de reposo. Esta corriente es usada para tratar la sacroilitis crónica⁵, dicha corriente estimula el flujo sanguíneo, aunque es fuertemente analgésica, no es una corriente de fortalecimiento muscular. Si bien no es muy frecuente el uso de esta corriente, fue sugerida y solicitada por los especialistas.

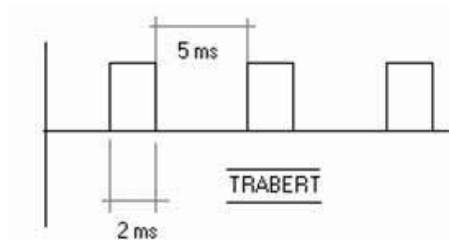


Figura 17. Modelo de forma de onda modo Trabert [26].

Como Trabert es una señal no simétrica, se calcula directamente el preescaler, con la Ecuación [10]:

$$n = \text{Log}_2 = \frac{(16\text{MHz} \cdot 2\text{ms})}{2^8} = 6.965 \approx 7$$

$$\text{Entonces } P = 2^n = 2^7$$

Calculando la frecuencia del preescaler con la Ecuación [11]:

$$T = \frac{16\text{MHz}}{2^7} = 125000\text{Hz}$$

⁵ **Sacroilitis crónica:** Inflamación de una o ambas articulaciones sacroilíacas (ubicadas en la zona donde se conectan la parte baja de la columna vertebral y la pelvis) causando dolor de glúteos o en la parte inferior de la espalda.

Una vez teniendo estos datos, se busca el valor del timer, con la Ecuación [12]. Con este dato se va a crear la señal en la programación:

$$F_p = (2\text{ms} \times 125000\text{Hz}) = 250$$

- Leduc: Es una corriente analgésica, con una intensidad elevada progresivamente y mantenida, el paciente siente un cosquilleo intenso, pero nunca dolor o contractura muscular. El intervalo es 10 veces más que el impulso; es decir que tiene pulsos de 1ms de duración y se interrumpen durante 10ms. Este tipo de corriente se utiliza para tratar los procesos inflamatorios superficiales, úlceras cutáneas, edemas venosos y linfáticos; esto se da por falta de circulación de retorno.



Figura 18. Modelo de forma de onda modo Leduc [27].

Leduc es una señal no simétrica, por esta razón hay que buscar el preescaler, con la Ecuación [10]:

$$n = \text{Log}_2 = \frac{(16\text{MHz} \times 1\text{ms})}{2^8} = 5.965 \approx 6$$

$$\text{Entonces } P = 2^n = 2^6$$

Calculando la frecuencia del preescaler con la Ecuación [11]:

$$T = \frac{16\text{MHz}}{2^6} = 250000\text{Hz}$$

Una vez teniendo estos datos, se busca el valor del timer, con la Ecuación [12]. Con este dato se va a crear la señal en la programación:

$$F_p = (1\text{ms} \times 250000\text{Hz}) \approx 250$$

5.5.4. Programación y conexión

En este apartado se utilizó un Arduino UNO, cuya función fue programarlo en conjunto con el módulo del MCP4725. Resultó cómodo utilizar el Arduino UNO, ya que posee las librerías necesarias para la comunicación entre todos los módulos que se necesitaban utilizar. También se consideró por su IDE, ya que es bastante práctico y sencillo. En este caso, se utilizó para desarrollar el menú de selección de las distintas opciones que se necesitaban para hacer funcionar el prototipo.

La programación se dividió en fases para trabajar de manera cómoda y con mejor organización, contemplando la primera etapa como la creación de las formas de onda (Ver en anexos), que luego se mandaría a llamar por medio del menú principal. La segunda etapa fue programar adecuar las variables principales en la interfaz gráfica para crear los menús y submenús, una vez sumadas estas dos etapas se procedió a agregar el arreglo de las señales que fueron programadas con el DAC, con sus respectivas formas de ondas configuradas y acopladas al menú programado. En las figuras 19 y 20 se puede apreciar cómo funciona el programa.

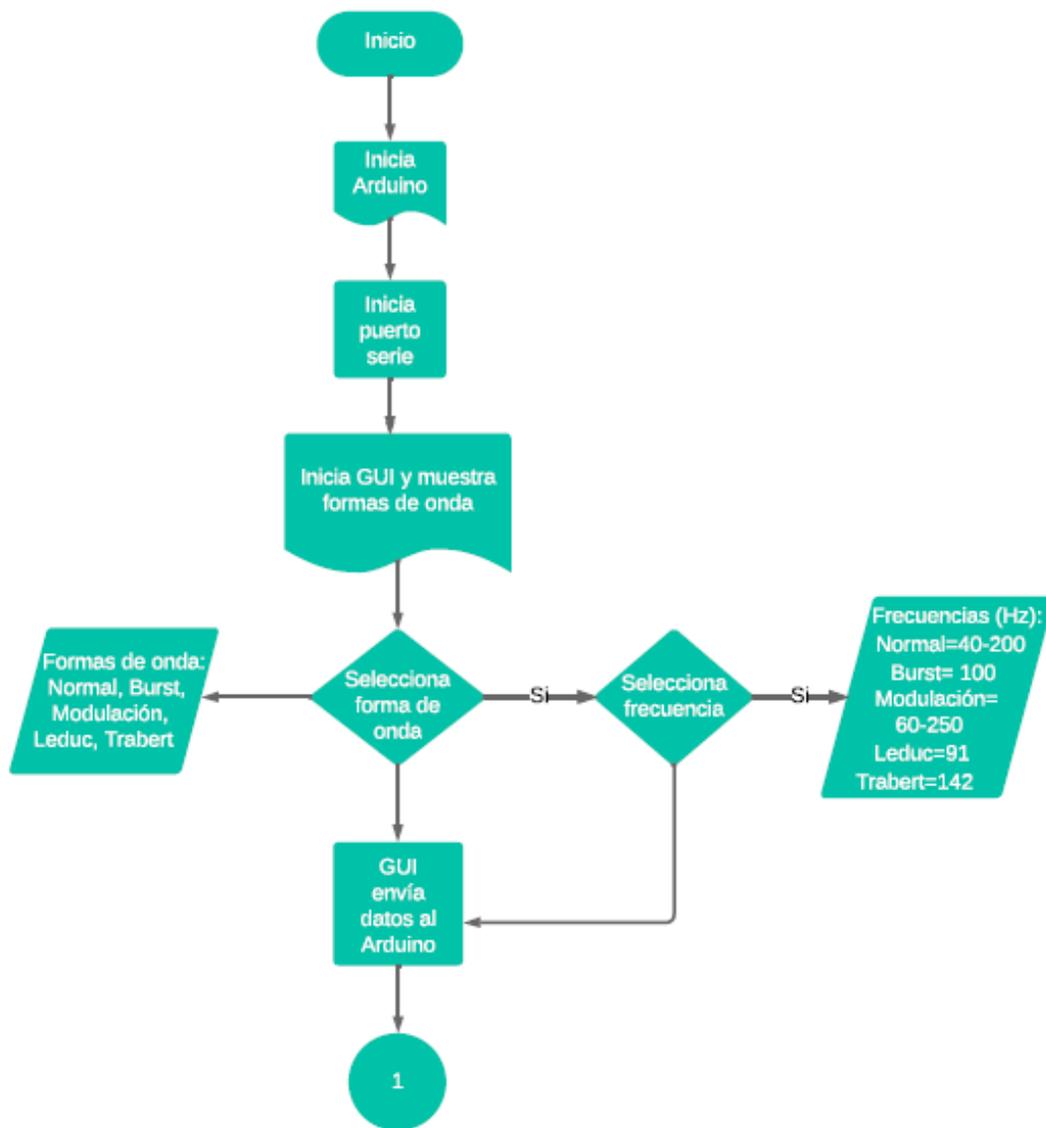


Figura 19. Diagrama de flujo, parte 1.

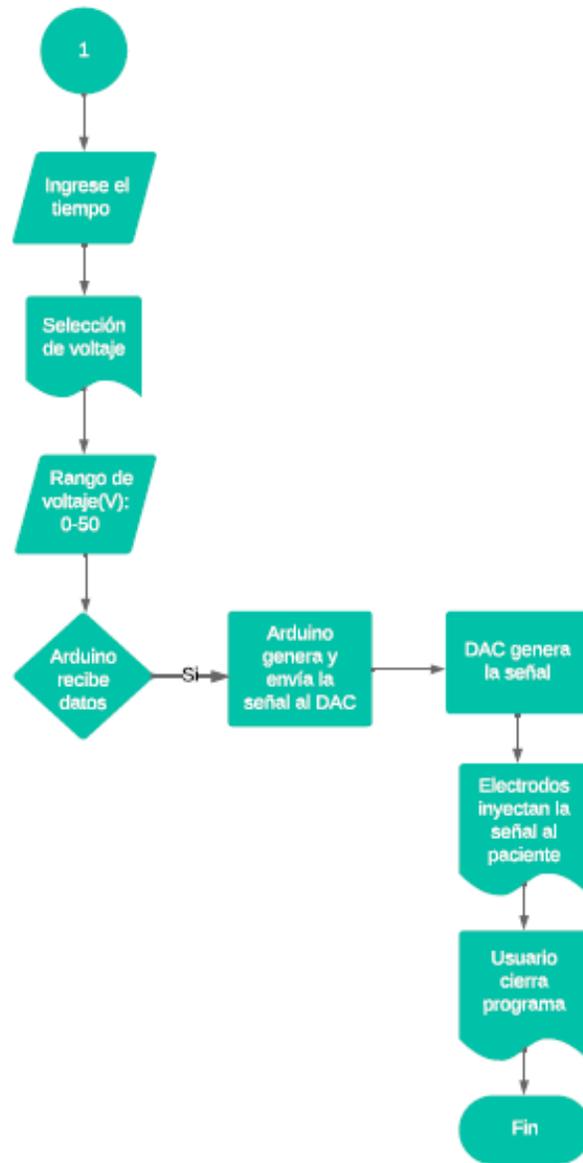


Figura 20. Diagrama de flujo, parte 2.

Cuando la programación de la tarjeta del equipo resultó funcional, se conectó con la tarjeta de potencia; al mismo tiempo, gracias a la entrada serial del Arduino, se hizo la adaptación de la comunicación entre el Arduino y la PC, dejando como resultado poder observar y manipular estos datos en una pantalla por medio de una aplicación de escritorio para un mejor control y apreciación.

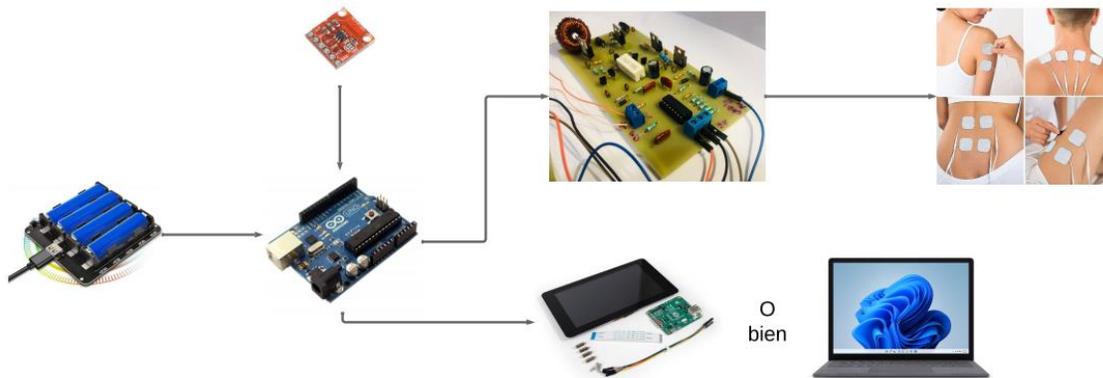


Figura 21 Diagrama de conexión.

La figura 21 representa la conexión en general, desde la batería hasta los electrodos, entre el Arduino UNO y la Raspberry Pi 3 hay una comunicación que facilita la manipulación de los datos, además de poderlos apreciar por medio de una pantalla, como otra opción se puede considerar el uso de una laptop o una PC, en lugar de la Raspberry.

5.5.5. Recopilación de datos

Un centro médico tiene registros médicos, estos contienen información sobre diagnósticos, resultados, etc. Obtener un historial con la información registrada de un paciente es de gran utilidad, ya sea para realizar un análisis sobre el historial de su enfermedad o simplemente tener acceso en cualquier momento. Es por eso que se sugirió añadir un apartado donde se puedan observar los datos y que los fisioterapeutas puedan registrarlos, esta configuración de recopilación de datos se ha dejado de manera visual, por si desean tomar notas para algún historial.

Como aplicación de escritorio y desarrollo de la interfaz gráfica de escritorio se utilizó Tkinter con Python, la ventaja de una aplicación escritorio es que, hay acceso a los datos sin necesidad de internet y suele ser más económico.

5.5.6. Diseño de convertidor reductor-elevador

Un convertidor buck-boost o reductor-elevador, es un convertidor DC-DC, tiene una magnitud de voltaje de salida que puede ser mayor o menor que el voltaje de entrada, es una fuente parecida a la del step-up (convertidor elevador) y el step-down (convertidor reductor). Cuando un convertidor reductor se combina con un convertidor elevador, el voltaje de salida suele tener la misma polaridad que la entrada y puede ser más bajo o más alto que la entrada, tal convertidor reductor-elevador no inversor puede usar un solo inductor que se usa tanto para el modo de inductor reductor como para el modo inductor elevador. La operación de este circuito se entiende mejor en términos de renuencia del inductor para permitir un cambio rápido en la corriente.

El principio de funcionamiento de este convertidor es que, durante el estado On, la fuente de entrada de voltaje está directamente conectada al inductor (L), por lo que se almacena la energía en L, dando paso al condensador que proporciona corriente a la carga de salida, durante el estado off, el inductor está conectado a la carga de salida y el condensador, por lo que la energía de transferencia de L a C y R [28] .

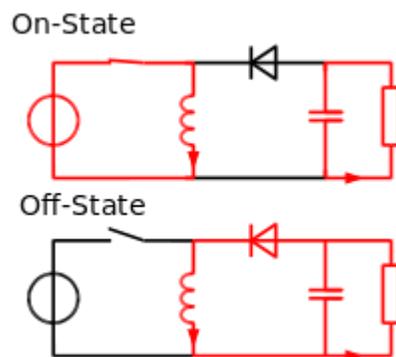


Figura 22. Estados On y Off de una fuente non-inverting buck boost converter [28].

La idea de implementar esta fuente DC-DC es porque en cierta parte del circuito nos encontramos con problemas de potencia debido a la diferencia de voltaje que emite el Arduino (5V), así que para un correcto funcionamiento y poder estimular diferentes zonas del cuerpo se necesita elevar el voltaje al menos hasta 50V.

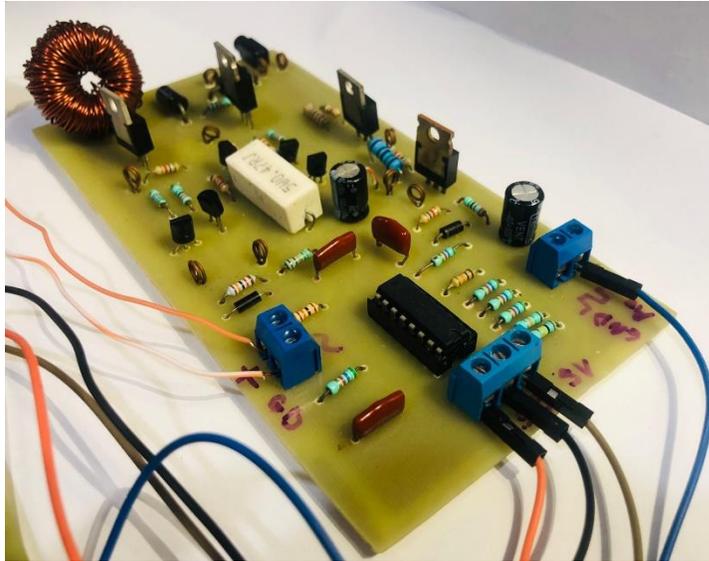


Figura 23. Tarjeta de potencia.

En la etapa de la frecuencia se utilizó un SG3524, donde su oscilación puede ser desde 130Hz-722Khz, esta se calcula de la siguiente manera:

$$F = \frac{1.30}{R_T C_T} \quad [12]$$

$$F = \frac{1.30}{(5K6\Omega)(10nF)} = 26kHz$$

En este caso, el oscilador del SG no está en la frecuencia audible (20Khz), por lo que lleva ventaja de no percibir molestias sonoras del equipo.

Compensación

$$F = \frac{1.30}{RC} \quad [13]$$

$$F = \frac{1.30}{(35K\Omega)(147nF)} = 147kHz$$

Límite de corriente

$$I_o(\max) = \frac{1}{R_s} \left(200mV + \frac{V_o R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad [14]$$

$$I_o(\max) = \frac{1}{0.47\Omega} \left(200mV + \frac{50V * 2.2\Omega}{10K\Omega + 2.2\Omega} \right) = 0.448A$$

$$I_{oS} = \frac{200mV}{R_s} \quad [15]$$

$$I_{oS} = \frac{200mV}{0.47\Omega} = 0.425A$$

El límite de corriente protege al circuito hasta un rango máximo de 50V, la ventaja de esta etapa es que brinda protección al circuito de accidentes externos como: cables dañados o que haya algún roce entre las almohadillas (electrodos).

Retroalimentación

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DAC} \quad [16]$$

$$V_o = \frac{5K6\Omega}{5K6\Omega + 5K6\Omega} \times 5V = 2.568V$$

En esta fuente reductor-elevador hay una configuración push-pull [29], donde los transistores MOSFET se alternan entre sí para lograr la amplificación deseada, esto significa que a medida que se empuja la señal de entrada, los transistores se vuelven activos a fin de generar la señal de salida (50V). Los datos principales que se tenían para realizar los cálculos eran los siguientes:

$V_{outmax}=50V$, $V_{outmin}=5V$, $V_{in}=12V$, $I_{out}=100mA$ $\eta = 0.9$ (eficiencia estimada).

Para el Duty Cycle:

$$D_{buck} = \frac{V_{outmin}}{V_{in} \times \eta} \quad [17]$$

$$D_{buck} = \frac{5V}{12V \times 0.9} = 0.462$$

$$D_{boost} = 1 - \frac{V_{in} \times \eta}{V_{outmin}} \quad [18]$$

$$D_{boost} = 1 - \frac{12V \times 0.9}{5V} = 0.784$$

Selección del inductor:

Se conocen los valores principales, también $F_{sw}=26KHz$, esto viene del SG3524, demostrada en la ecuación [12], K , es el rizado relativo del inductor a la salida de la corriente, un buen inductor está entre el 20% al 40%.

Inductor modo buck

$$L > \frac{V_{out} \times (V_{in} - V_{out})}{K_{ind} \times F_{sw} \times V_{in} \times I_{out}} \quad [19]$$

$$L > \frac{5V \times (12V - 5V)}{0.3 \times 26 \text{KHz} \times 12V \times 100 \text{mA}} = 3.74 \text{mH}$$

Inductor modo boost

$$L > \frac{V_{out} + (V_{in} - V_{out})}{K_{ind} \times F_{sw} \times V_{in} \times I_{out}} \quad [19]$$

$$L > \frac{(V_{in})^2 (V_{in} - V_{out})}{K_{ind} \times F_{sw} \times (V_{out})^2 \times I_{out}} = 2.80 \text{mH}$$

En este caso se seleccionó el cálculo con el mayor inductor para mejores resultados. Se usó un inductor tipo toroide, tipo T-90, con una permeabilidad magnética de 75μ .

Calculando la corriente máxima para ambos modos:

ΔI_{max} es la corriente de rizado a través del inductor.

I_{maxout} es la corriente máxima entregable a través del inductor por el convertidor.

I_{lim} es el límite de corriente por el convertido, obtenido en la ecuación [14].

Modo buck: En este caso se empieza buscando ΔI_{max} con la ecuación [21], ya que I_{swmax} depende de esta.

$$I_{swmax} = \frac{\Delta I_{max}}{2} + I_{out} \quad [20]$$

$$\Delta I_{max} = \frac{(V_{in} - V_{out}) \times D_{buck}}{F_{sw} \times L} \quad [21]$$

$$I_{maxout} = I_{lim} - \frac{\Delta I_{max}}{2} \quad [22]$$

$$\Delta I_{\max} = \frac{(12V-5V) \times 0.462}{26\text{KHz} \times 3.74\text{mH}} = 33.25\text{mA}$$

Una vez se obtiene Δ_{\max} , con la ecuación [20] se busca la siguiente

$$I_{\text{swmax}} = \frac{448\text{mA}}{2} + 100\text{mA} = 324\text{mA}$$

Por último, en este modo buck, para verificar cuanto puede entregar la corriente máxima, I_{maxout} debe ser mayor que I_{out} . Se puede comprobar con la ecuación [22].

$$I_{\text{maxout}} = 448\text{mA} - \frac{33.25\text{mA}}{2} = 431.37\text{mA}$$

Modo boost.

$$I_{\text{swmax}} = \frac{\Delta I_{\max}}{2} + \frac{I_{\text{out}}}{1-D_{\text{boost}}} \quad [23]$$

$$\Delta I_{\max} = \frac{V_{\text{in}} + D_{\text{boost}}}{F_{\text{sw}} \times L} \quad [24]$$

$$I_{\text{maxout}} = \left[I_{\text{lim}} - \frac{\Delta I_{\max}}{2} \right] \times (1 - D_{\text{boost}}) \quad [25]$$

Modo boost: En este caso se empieza buscando Δ_{\max} con la ecuación [24], ya que I_{swmax} depende de esta.

$$\Delta I_{\max} = \frac{12V + 0.784}{26\text{KHz} \times 3.74\text{mH}} = 131.46\text{mA}$$

Una vez se obtiene Δ_{\max} , con la ecuación [23] se busca la siguiente:

$$I_{\text{swmax}} = \frac{131.46\text{mA}}{2} + \frac{100\text{mA}}{1-0.784} = 528.69\text{mA}$$

Por último, en este modo boost, para verificar cuanto puede entregar la corriente máxima, $I_{\max\text{out}}$ debe ser mayor que I_{out} . Se puede comprobar con la ecuación [25].

$$I_{\max\text{out}} = \left[448\text{mA} - \frac{131.46}{2}\right] \times (1 - 0.784) = 82.57\text{mA}$$

Voltaje de salida

Está definida en los cálculos del SG3524, por la ecuación [16].

Selección del capacitor

Definido en la hoja de datos, se utiliza un capacitor de 10nF, 16V.

El requisito en esta fuente es que se necesitan los MOSFET con una carga de puerta muy baja para que cambien suficientemente rápido, de lo contrario, el tiempo de subida/ bajada será muy lento, provocando más demanda de consumo del equipo.

5.5.7. Adaptación del sistema de batería

Los equipos médicos deben ser seguros, sobre todo los equipos que deben conectarse al cuerpo humano para realizar su función, por lo que es importante tener en cuenta la seguridad eléctrica, este control de seguridad depende del diseño e integración de las fuentes de alimentación en los equipos médicos.

La importancia del sistema de puesta a tierra en un hospital es esencial no solo para proteger los equipos, sino también la vida del paciente y operadores involucrados en su manipulación. Gracias a los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de equipos médicos cada vez más sofisticados, lo que implica comprometerse a mejorar la seguridad de los pacientes y dispositivos; así como mejorar o buscar alternativas de las puestas a tierra.

Una batería como respaldo, puede ayudar a enfrentar situaciones de alto riesgo como: cortes de energía, traslados de pacientes, cortocircuitos, etc. Así que un sistema de batería se puede aprovechar para almacenar la electricidad para un uso

posterior. Teniendo en cuenta los datos de las baterías que se utilizan para el dispositivo, el cálculo queda de la siguiente manera:

Capacidad de la batería=2600mAh

Consumo del dispositivo=25mA

Amperio hora de la batería=3.4Ah

Carga en vatios=2.5W (usando la forma de onda normal, es la que más consume)

$$\text{Duración}_{\text{bat}} = \frac{\text{Capacidad}_{\text{bat}}}{\text{Consumo del dispositivo}} \times 0.7 \quad [26]$$

$$\text{Duración}_{\text{bat}} = \frac{2600\text{mAh}}{25\text{mA}} \times 0.7 = 72.8 \text{ horas}$$

Esto quiere decir que el dispositivo se debe cargar al menos cada tres días.

5.5.8. Diseño del case del prototipo

Las diferentes piezas que conforman el prototipo del equipo, fueron diseñadas en SketchUp, un programa de diseño y modelado 3D, donde este software ofrece utilidades o herramientas necesarias para realizar el modelo del case. El diseño del case se consideró en que fuera lo más compacto posible.



Figura 24. Logotipo de SketchUp [30].

El modelo de este prototipo fue inspirado en los dispositivos ya existentes en el mercado, combinado también con dispositivos que existieron años atrás, tomándose en cuenta por su comodidad y estructura robusta. Para poder ensamblar todas las piezas del case del prototipo se diseñaron 2 piezas, la caja (contiene las tarjetas de los circuitos funcionales) y la tapa (para cerrar la caja).

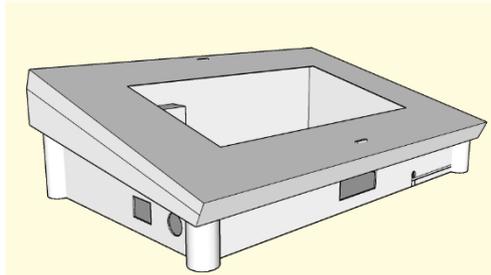


Figura 25. Vista isométrica del case en SketchUp.

“Un correcto prototipado 3D te ayuda a que tu producto, herramienta o idea sea lo más perfecto a prueba y errores desde el inicio”. Tridi

El prototipo se compone de una pantalla táctil capacitiva, donde en esta se visualiza la interfaz gráfica, que en su mismo diseño lleva botones, sliders y temporizador capaces de manipular los rangos de voltaje, frecuencia, formas de onda, etc. Ya que no todos los pacientes son capaces de soportar el mismo rango de cada uno de estos datos mencionados; asimismo, controlar el tiempo de la sesión, por lo que no todos los pacientes llegan en la misma fase de gravedad causada por una TME, por ende, dependiendo de estos parámetros, a cada paciente se le da un determinado tiempo de la sesión.

El case del prototipo, también lleva un conector DC en su salida tipo barril, para conectar el par de electrodos con sus respectivas almohadillas, una salida de alimentación tipo barril, para cargar las baterías del dispositivo y un módulo indicador de carga, para así observar la carga de las baterías.

6. Análisis y presentación de resultados

Para que tanto los pacientes como los fisioterapeutas pudieran responder y tuvieran una idea de la función del equipo, se les mostró un diseño y se les explicó que el prototipo funciona de manera similar al TENS que utilizan en ese hospital, pero que se le ha añadido más formas de ondas y su diseño es más diferentes a las usuales cajitas que ellos suelen ver, también se les mencionó que se podían mostrar los datos más comunes a través de una aplicación de escritorio para luego tomarlos en cuenta y así generar reportes, esto último una opción que quedaría de manera optativa para los fisioterapeutas, ya que fue pensada para los casos de los pacientes que han frecuentado el hospital al menos dos veces, para determinar el tamaño muestral necesario, se realizó 2 tipos de encuestas.

- 1) Pacientes con trastornos musculares. Estos están divididos en 2 secciones.
 - 1.1) Pacientes que con una o más sesiones con dispositivo de electromedicina (TENS), utilizados en las terapias cotidianas.
 - 1.2) Pacientes que serán sometidos a terapias con dispositivo de electromedicina (TENS).
- 2) Personas con o sin trastornos musculares voluntarios a realizar pruebas con prototipo realizado por estudiantes, de manera experimental.

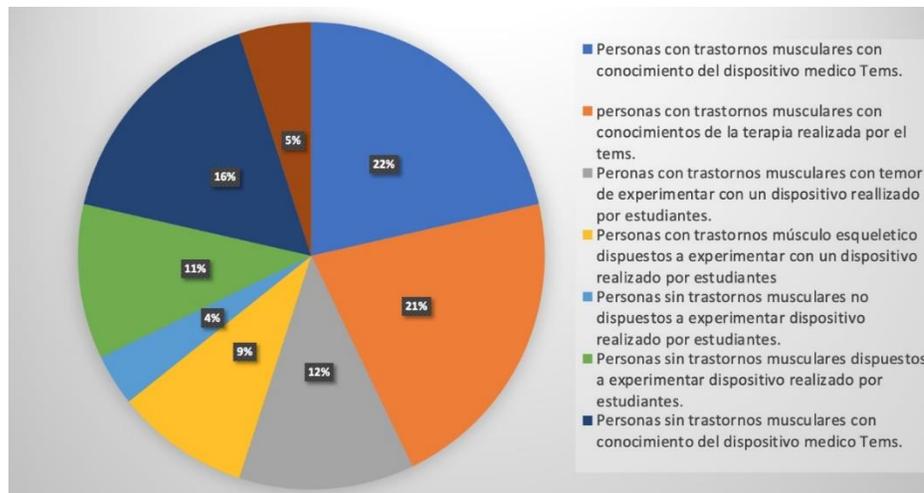


Figura 26. Diagrama de resultado total de pruebas y respuestas.

- Tipos de temores que predominó en personas con trastornos músculo esqueléticos.

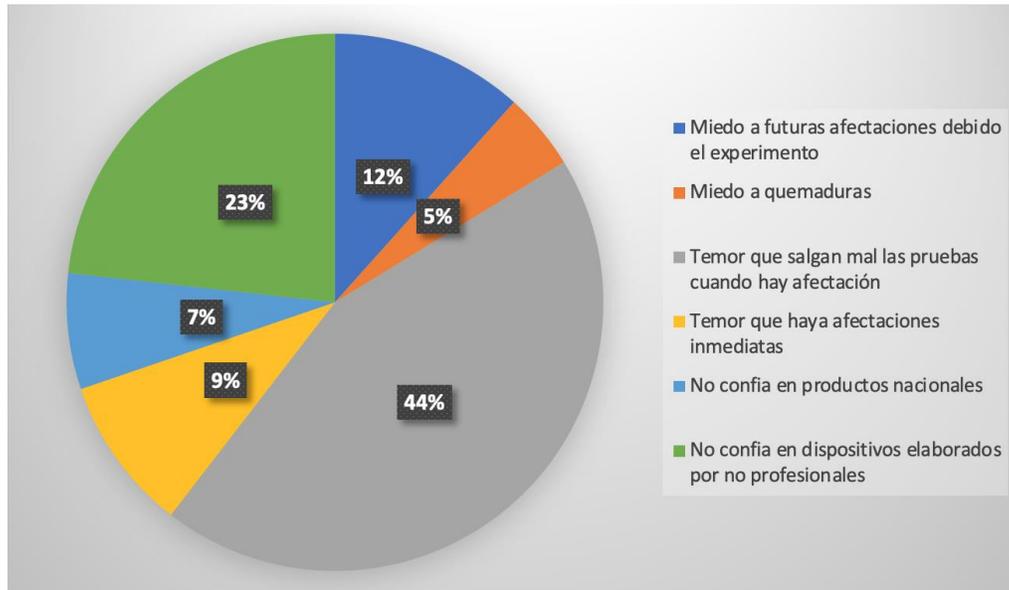


Figura 27. Diagrama de temores en pacientes con TME.

- Personas con aceptación al proyecto y dispuestas a hacer pruebas y experimentación de terapias.

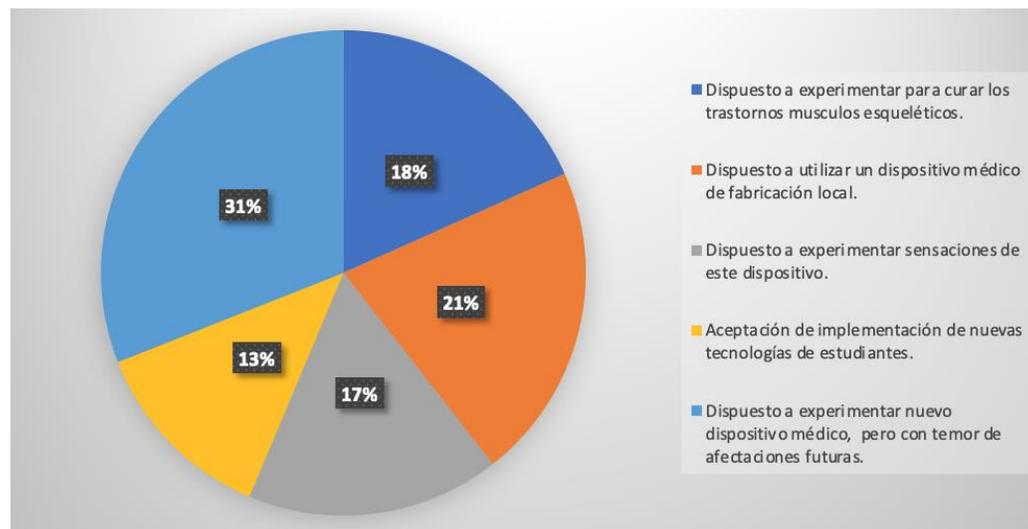


Figura 28. Diagrama de aceptación al proyecto.

- Total, de aceptación y no aceptación

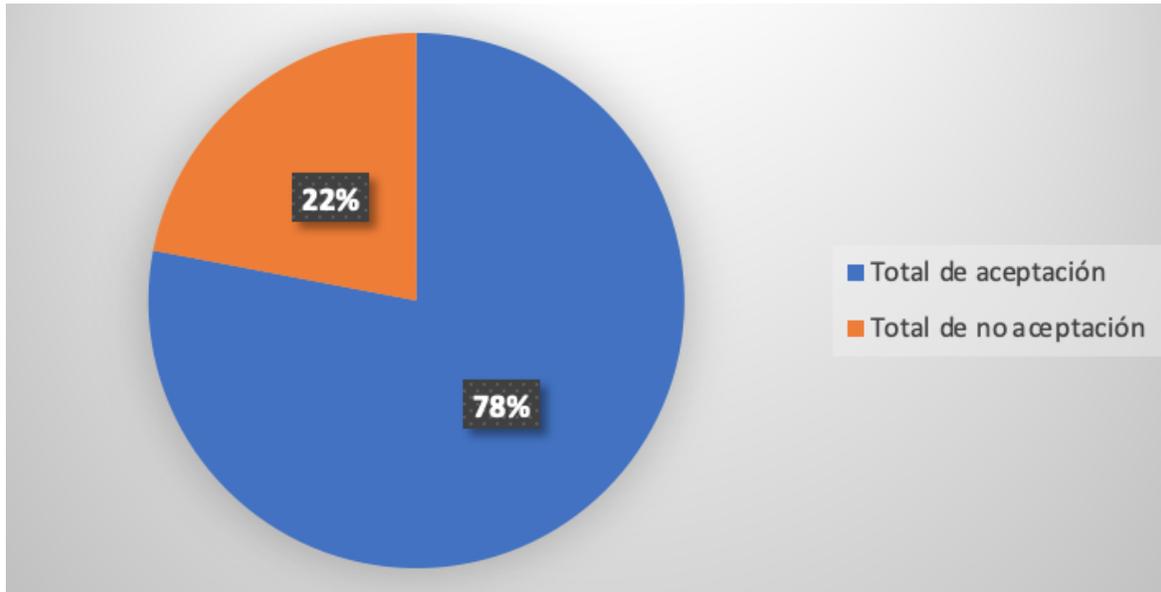


Figura 29. Diagrama de aceptación y rechazo a un electroestimulador.

El prototipo de estimulación eléctrica lleva cinco tipos de formas de ondas programadas desde Arduino, estas son las siguientes (detalladas anteriormente en el punto 6.3):

- Forma de onda modo normal en 40 y 200 Hz respectivamente



Figura 30. Forma de onda normal (40Hz).



Figura 31. Forma de onda normal (200Hz).

- Forma de onda modo modulación. Configuración de ancho, configuración de frecuencia, y completa, para una mejor apreciación.

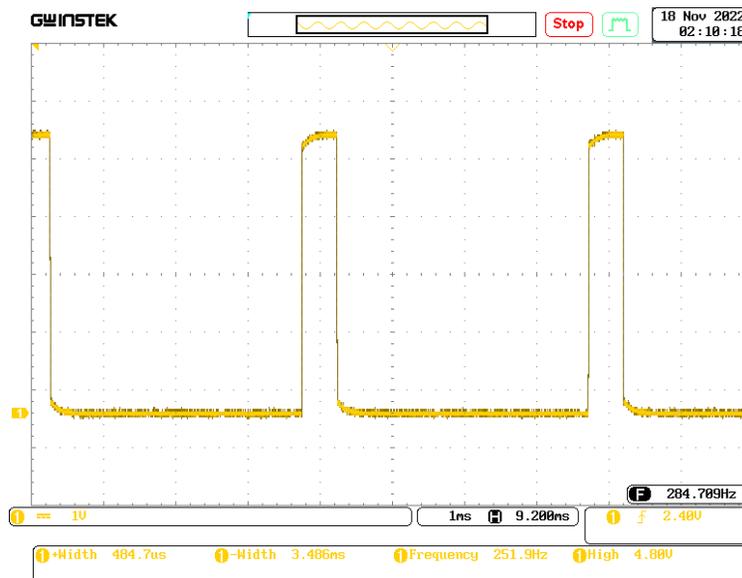


Figura 32. Forma de onda modo modulación (configuración de ancho).

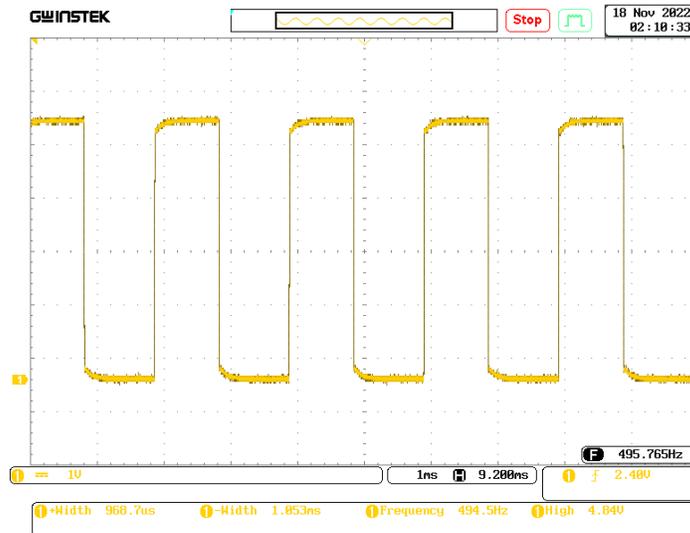


Figura 33. Forma de onda modo modulada (configuración de frecuencia).



Figura 34. Forma de onda modo modulada (completa).

- Forma de onda modo Bursts (ráfaga) ampliada y reducida. Para una mejor apreciación.

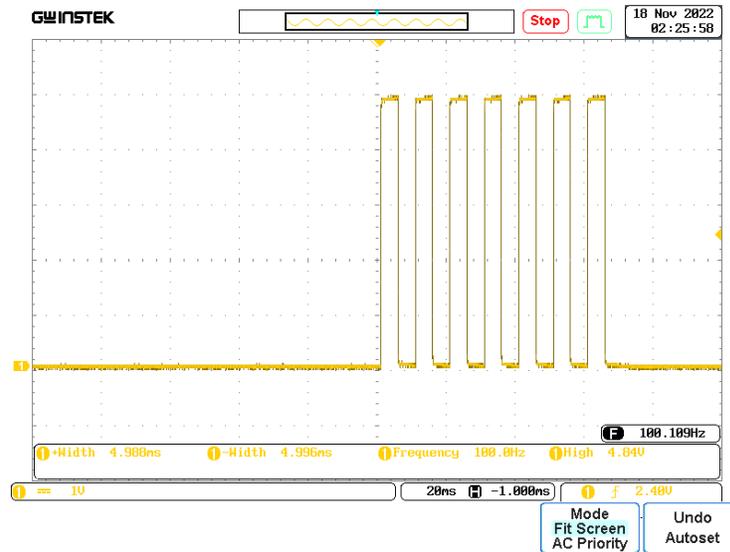


Figura 35. Forma de onda Burts (ampliada).

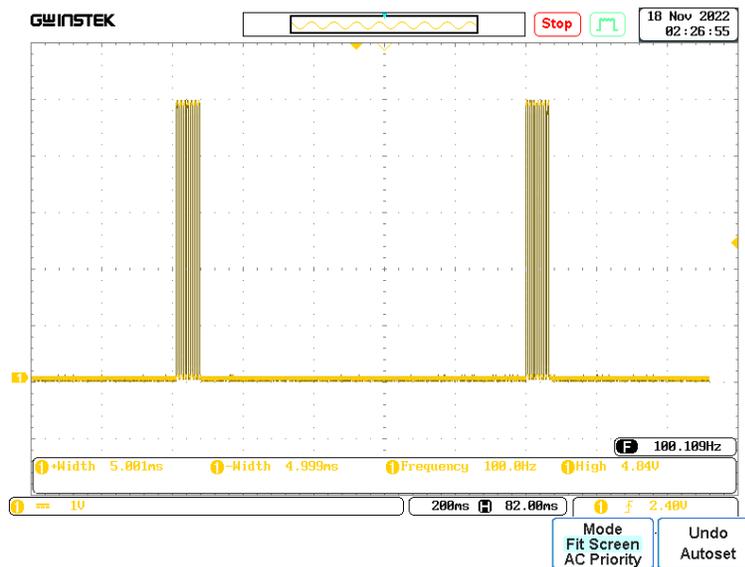


Figura 36. Forma de onda Burts (reducida).

- Forma de onda modo Trabet.

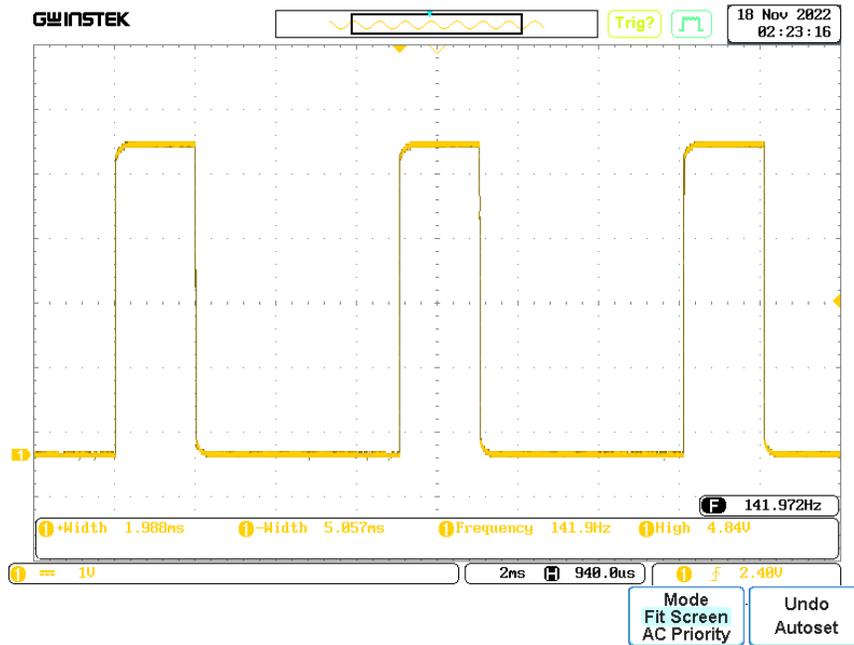


Figura 37. Forma de onda Trabet.

- Forma de onda modo Leduc.

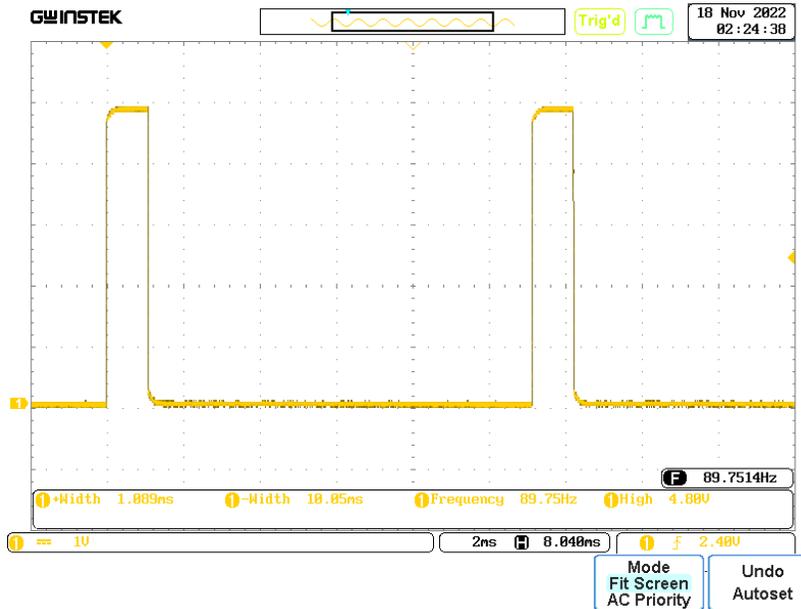


Figura 38. Forma de onda Leduc.

7. Conclusiones

Se logró de ‘manera exitosa’ cumplir con los principales requerimientos principales que solicitaban tanto los fisioterapeutas, así como las sugerencias que se encuentran en el libro citado de José María Rodríguez “Electroterapia en fisioterapia” para el desarrollo y diseño de un prototipo de equipo de estimulación eléctrica dirigido a pacientes con trastornos músculo esqueléticos.

Las respuestas que se obtuvieron de algunos pacientes acerca de cómo se sentían al utilizar un equipo electroestimulador tipo TENS (comercial) fueron de impacto positivo, alcanzando un 78% de aceptación del proyecto, según las preguntas de encuesta, algunos decían que sentían una sensación de hormigueo al tener el equipo funcionando en una zona determinada del cuerpo, pero no un hormigueo incómodo sino satisfactorio, otros respondieron que podían sentir como su resistencia y fuerza mejora al combinar con otros ejercicios de rehabilitación, y otros pacientes indicaron que se sentían relajados durante el procedimiento. Con estos testimonios supimos comprender de mejor manera como se sentían al usar un electroestimulador.

Aunque no se pudo experimentar de manera directa con los pacientes, se realizaron pruebas con consentimiento de otras personas, bajo la vigilancia de los especialistas en fisioterapia, quienes probaron cómo funciona el prototipo admitieron que, sienten un cosquilleo reconfortable al subir la intensidad (llegando a un límite soportable).

A los fisioterapeutas se les realizó una encuesta con la que se utilizó la escala de Likert, que consta de 7 preguntas y cada una contiene 5 ítems, constando de una puntuación del 1 al 5, donde va desde una valoración negativa hasta una positiva, esto según el tipo de preguntas realizadas. Esta escala fue de gran apoyo para ir diseñando el equipo con todas las formas de ondas más utilizadas en el hospital, incluyendo rangos de frecuencia, voltaje y corriente. Asimismo, el sistema regulador funcionó de manera exitosa, pudiendo ser manipulable desde la aplicación de

escritorio, misma que sirve de apoyo para que los fisioterapeutas puedan tomar esos datos necesarios para el registro de cada uno de sus pacientes.

Exactamente no se ha encontrado una correlación entre una mayor intensidad y beneficios analgésicos, solo se conoce que los pacientes prefieren soportar un nivel de estimulación al más alto posible, algo fuerte pero cómodo, para esto no hay relación con la variable sexo o edad.

Un equipo electroestimulador no cura ningún problema fisiológico, solo ayuda a controlar el dolor. Estos equipos no funcionan para todas las personas, sin embargo, en la mayoría de los pacientes es eficaz para reducir o eliminar el dolor, lo que permite un retorno a la actividad normal [25].

8. Recomendaciones

Así como el buen uso de la tecnología tiene sus ventajas, también existen advertencias si no se utiliza de manera correcta o no se toma en cuenta las contraindicaciones de un producto o equipo. Para este caso, si se le va a dar un uso a este prototipo, se recomienda lo siguiente:

- Utilizar este dispositivo bajo supervisión de especialistas.
- Utilizar este dispositivo cuando el especialista lo sugiera o sea necesario, ya que, si se busca como utilizar por cuenta propia y sin previo conocimiento, el paciente puede desarrollar una codependencia hacia estos equipos de estimulación eléctrica.
- Antes de encender este equipo, se deben colocar los electrodos en los puntos motores o nerviosos a estimular; de igual manera, antes de retirar los electrodos, se debe apagar el equipo.
- No colocar los electrodos en la anterior del cuello ya que puede provocar un espasmo de los músculos de la laringe y de la faringe.
- Evitar ubicar los electrodos en la zona torácica, los impulsos del equipo podrían generar una interferencia entre las señales eléctricas del ritmo cardiaco (arritmia), y/o provocar una lesión directa miocárdica (asociada a una mortalidad del 60%) [31].
- No debe colocarse sobre el área del corazón, debido a que este órgano se ve influenciado por los campos eléctricos; alterando el ritmo y causando ausencia de latidos.
- Los electrodos nunca deben colocarse cerca de los ojos (podría causar riesgos oculares).
- Evitarse en periodo de gestación: podría afectar al bebé.
- Evitar la aplicación de la terapia a pacientes que tienen tumores benignos o cáncer.
- Evitar a pacientes que llevan objetos metálicos internamente (marcapasos, placas o tornillos, en casos de operaciones). La conductividad de los metales puede acumular cargas eléctricas y producir quemaduras.

- Evitar el uso cuando se tiene piel herida, ya que la región dañada hace una reducción a la resistencia; provocando lesiones o quemaduras al tejido.

A futuros trabajos:

Los aspectos que se podrían mejorar, pueden ser los siguientes:

- La programación del equipo también se podría hacer con Raspberry o Pic, dependiendo del gusto del programador o del cliente.
- Se pueden agregar más canales para los electrodos y así tener más entradas y utilizarlas simultáneamente pero cada una de manera independiente.
- A este equipo se le puede aumentar o disminuir su potencia y voltaje, a través de manipulación por medio del hardware o software.
- A este prototipo se le puede agregar más formas de ondas, pero pertenecientes a corrientes bajas y medias.
- Como el prototipo no pudo ser probado directamente en los pacientes que tienen TME, se recomienda hacer un manual dirigido a los especialistas, quienes son los encargados de manipular este tipo de equipos, para que estos puedan guiarse en las instrucciones, además de brindar una capacitación de cómo funciona.
- Si se es posible reducir el tamaño del equipo, entonces se recomienda hacerlo ya que brindará aún más comodidad.
- En el caso de almacenar historial de los datos de los pacientes, no solo se puede mediante también una aplicación de escritorio, se podría también por medio de una base de datos o alguna aplicación en una nube.

9. Bibliografía

- [1] DALCAME, «Características técnicas de las formas de ondas, amplitudes, corrientes, frecuencias y tiempos de aplicación utilizadas en la electroterapia».
- [2] L. Castillo, 2022. [En línea]. Available: <https://backbone.care/blogs/preguntas-frecuentes/para-que-sirve-un-electroestimulador>. [Último acceso: 05 07 2022].
- [3] «fisioonline,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/electroterapia>. [Último acceso: 07 2022].
- [4] Organización Mundial de la Salud, «Trastornos músculoesqueléticos,» 08 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions#:~:text=Los%20trastornos%20m%C3%A9dicos%20comprenden%20m%C3%A1s,capacidades%20funcionales%20e%20incapacidad%20permanentes..> [Último acceso: septiembre 2022].
- [5] Fundación Española en Reumatología, «Miopatías,» España.
- [6] «salud laboral y discapacidad,» 2022. [En línea]. Available: <https://saludlaboralydiscapacidad.org/trastornos-musculo-esqueleticos/>.
- [7] «Trastornos Musculo Esqueléticos,» España.
- [8] SRT (Superintendencia de Riesgos del Trabajo), «Guía de actuación y diagnóstico de enfermedades profesionales. Trastornos Musculo-Esqueléticos,» Argentina.
- [9] O. Jonathan, «Mundo entrenamiento,» 20 01 2021. [En línea]. Available: <https://mundoentrenamiento.com/tipos-de-musculos-y-su-funcion/#:~:text=De%20esta%20forma%20podemos%20clasificar,los%20m%C3%BAsculos%20faciales%20y%20craneales..> [Último acceso: 07 2022].
- [10] R. M. José, Electroterapia en fisioterapia 3a edición, Buenos Aires: Médica Panamericana, 2013.
- [11] S. V. A. Ubilus C. Genaro E, «Fisioterapia en parálisis facial,» 2018.
- [12] R. M. José, Prácticas de electroterapia en fisioterapia (baja y media frecuencia), Madrid: Médica Panamericana, 2014.
- [13] D. ...-F. V. ... C.-K. ... Crépon .F, «Electroterapia. Electroestimulación».

- [14] eFisioterapia, «Electroestimulación y fisioterapia,» 17 Agosto 2009. [En línea]. Available: <https://www.efisioterapia.net/articulos/electroestimulacion-y-fisioterapia>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [15] «Neroga Fisioterapia,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.nerogafisio.es/Servicios-electroterapia.html>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [16] Fisiocasa, 2022. [En línea]. Available: <https://fisiocasa.es/la-electroterapia-en-fisioterapia-y-sus-aplicaciones/>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [17] «Fisiología del ejercicio,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.fisiologiadelejercicio.com/la-electroestimulacion-de-alta-frecuencia-aumenta-las-senales-anabolicas-musculares/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [18] «Trainfes,» [En línea]. Available: <https://www.trainfes.com/tipos-de-electroestimulacion/>. [Último acceso: julio 2022].
- [19] L. Pérez, «Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano,» 1994. [En línea]. Available: <https://saludlaboralydiscapacidad.org/wp-content/uploads/2019/04/NTP-400.pdf>. [Último acceso: febrero 2023].
- [20] Creative Commons, «Lesiones producidas por la electricidad,» 2023. [En línea]. Available: https://www.edu.xunta.gal/centros/iesblancoamorculleredo/aulavirtual/pluginfile.php/7043/mod_imsccp/content/1/seguridad.html#:~:text=La%20resistencia%20el%C3%A9ctrica%20del%20cuerpo,Ohmios%20para%20la%20corriente%20alterna.. [Último acceso: Enero 2023].
- [21] Arduino, «Microchip,» 2009. [En línea]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf>. [Último acceso: 2023].
- [22] Microchip, «Microchip,» 2009. [En línea]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf>. [Último acceso: 2023].
- [23] Texas Instrument, «Alldatasheet,» 2005. [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/27318/TI/SG3524.html>. [Último acceso: 20 Noviembre 2023].
- [24] Eurocircuits, «Eagle Logotipo,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.eurocircuits.com/blog/new-major-eagle-software-update/>. [Último acceso: 20 11 2023].

- [25] Compass Health Brands, Corp, [En línea]. Available: https://compasshealthbrands.com/itemFiles/DT7202_Manual_OTC_04_es-US.pdf. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [26] eFisioterapia, «eFisioterapia,» Corrientes Trabert, 19 Diciembre 2005. [En línea]. Available: <https://www.efisioterapia.net/articulos/tratamiento-las-aaf-corrientes-trabert>. [Último acceso: 20 Noviembre 2023].
- [27] B. Luis, «Forma de onda Leduc,» 2023. [En línea]. Available: <https://mundomanuales.files.wordpress.com/2012/07/23baja-media-y-alta-frecuencia.pdf>. [Último acceso: 20 Noviembre 2023].
- [28] Scribd, «Convertidor reductor-elevador,» 2023. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/250055407/Convertidor-Reductor-Elevador-Buck-Boost>. [Último acceso: 2023].
- [29] Electrical Engineering, push-pull circuit, 2023. [En línea]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/369044/totem-pole-push-pull-circuit-is-not-working-properly>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [30] Trimble Inc., «SketchUp,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.sketchup.com/es/plans-and-pricing/sketchup-free>. [Último acceso: 2023].
- [31] UNINET, «Capítulo 9.2. Lesiones por la electricidad y el rayo,» 2023. [En línea]. Available: <https://uninet.edu/tratado/c090202.html>. [Último acceso: Abril 2023].
- [32] LG, [En línea]. Available: https://www.uis.edu.co/intranet/calidad/documentos/bienestar_estudiantil/instruccion/IBE.19.pdf. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [33] Current Solutions, [En línea]. Available: <https://www.tenspros.com/assets/images/manuals/EMS-7500-DE7502-Manual.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [34] EME Physio , [En línea]. Available: https://tecnomed2000.com/wp-content/_pdf/EM-CO1325.pdf. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [35] EME Physio, [En línea]. Available: <https://ilan.bg/upload/iblock/970/970f9440285d534e094123b050026838.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2022].

- [36] Swagatam Innovations, DC to DC circuits using SG3524, 24 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.homemade-circuits.com/dc-to-dc-converter-circuits-using-sg3524-buck-boost-designs/>. [Último acceso: 2023].
- [37] Texas Instrument, «Alldatasheet,» 2022. [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/27318/TI/SG3524.html>. [Último acceso: 2022].

10. Anexos

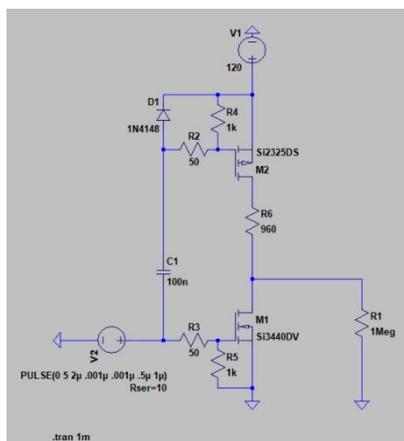
En este apartado se muestran datos como manuales de equipos electroestimuladores existentes en el mercado, usado como guías de referencia, además se muestra la encuesta que se le hizo a los especialistas del hospital Aldo Chavarría y una aproximación de gastos para el diseño de este prototipo de estimulación eléctrica.

- Manuales de referencia.

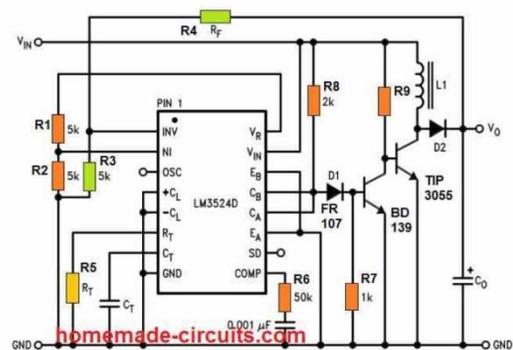
Modelo de equipo	Descripción
TENS 3000 [32]	Es un pequeño equipo, generador de pulsos y funcionar con baterías. El dispositivo tiene dos canales de salida. Tiene una amplitud ajustable de 0-80mA. Con una carga de 500 Ohm y un voltaje variable de 0-40V. Solo cuenta con tres formas de onda.
TENS 7000 [25]	Este tipo de equipo es uno de los que se suele usar en el hospital Aldo Chavarría. El dispositivo es un generador de pulsos con dos canales, pero se le da uso a uno. Con una carga de 500 Ohm, un voltaje variable de 0-50V y una amplitud de pulso regulable de 0-100mA. Este cuenta con cinco modos de programación de formas de onda.
EMS 7500 [33]	Este otro equipo también es utilizado en el hospital Aldo Chavarría, similar al TENS físicamente, es otro generador de pulsos con dos canales, pero de la misma manera al anterior, solo se le da uso a un canal cualquiera. Con una carga de 500 Ohm, un voltaje de 0-50V y una amplitud de pulso regulable de 0-100mA.

	Cuenta con tres modos de formas de onda, muy diferentes a las del TENS.
Combined 2000 [34]	Este dispositivo posee programas un tratamiento combinado de efecto analgésico e hiperémico del estímulo eléctrico con el mecánico y térmico del ultrasonido, también lo poseen en el hospital Aldo, pero su uso es menos frecuente que el del TENS 7000 y EMS 7500. Funciona hasta 100V con 100-120mA y cuenta con al menos 26 formas de onda (baja y media frecuencia).
Therapic 9200 [35]	Es un dispositivo que posee 26 formas de onda (baja y de media frecuencia), 4 canales independientes, funcionando has 100V con una corriente pico de 100-120mA.

Todos estos manuales se consultaron para poder limitar y concretar el diseño de este prototipo de equipo electroestimulador, además se consultaron otras fuentes para poder diseñar el convertidor reductor-elevador.



Push pull [29].



Diseño de Buck-boost [36].

Encuesta

Encuesta sobre el prototipo de equipo de estimulación eléctrica para pacientes con trastornos músculo esqueléticos del hospital de rehabilitación Aldo Chavarría.

Esta encuesta está dirigida a fisioterapeutas y pacientes que frecuentan el hospital de rehabilitación Aldo Chavarría en la ciudad de Managua, para que estas personas evalúen la función del prototipo a través de una serie de preguntas, las respuestas son de carácter personal, en donde cada pregunta tiene niveles para poder tomarse en cuenta.

1. ¿Usaría un equipo médico que sería fabricado en el país de Nicaragua?
 - Muy probable
 - Bastante probable
 - Más o menos probable
 - No muy probable
 - Nada probable

2. ¿Cómo se siente usar el prototipo de equipo de estimulación eléctrica por primera vez?
 - Excelente capacidad de respuesta
 - Gran capacidad de respuesta
 - Sin demasiada capacidad de respuesta
 - Nula capacidad de respuesta

3. ¿Qué tan satisfecho ha quedado luego de utilizar este prototipo?
 - Extremadamente satisfecho
 - Muy satisfecho
 - Moderadamente satisfecho
 - Poco satisfecho

4. ¿Utilizaría este prototipo para las sesiones de rehabilitación?
- Muy probable
 - Bastante probable
 - Más o menos probable
 - No muy probable
 - Nada probable
5. ¿Compraría un producto final de este prototipo?
- Muy probable
 - Bastante probable
 - Más o menos probable
 - No muy probable
 - Nada probable
6. ¿Cree usted que sea necesario añadir una opción que permita registrar y mostrar los datos de los pacientes por medio de una aplicación de escritorio?
- Muy necesario
 - Bastante necesario
 - Más o menos necesario
 - No muy necesario
 - Nada necesario

Generación de las señales con MCP4725

```
#include <Adafruit_MCP4725.h>
```

```
volatile bool LED_STATE = false, i2c_status = false, Chance_status = false;;
```

```
volatile byte FREQUENCY_MODE = 0;
```

```
int volt = 0, frec = 0;
```

```
char serial = 0;
```

```
Adafruit_MCP4725 dac;
```

```
volatile byte Contador = 0, Chance = 0;
```

```
volatile byte Modo_modulacion[4][20] = {{100, 108, 115, 123, 130, 138, 145, 153, 160, 168, 175,  
183, 190, 198, 205, 213, 220, 228, 235, 243}, // Pres: 32
```

```
        {200, 215, 230, 245, 130, 138, 145, 153, 160, 168, 175, 183, 190, 198, 205,  
213, 220, 228, 235, 243}, // Pres: 32 y 64
```

```
        {255, 220, 192, 170, 153, 138, 126, 116, 107, 99, 93, 87, 81, 77, 72, 68, 65,  
61, 58, 55}, // Pres: 1024
```

```
        {124, 105, 91, 80, 70, 250, 225, 203, 184, 167, 152, 139, 127, 116, 105, 96,  
88, 79, 72, 65}}; // Pres: 256
```

```
        //↑ Pres: 1024
```

```
byte Modos_normal[17] = {194, 155, 129, 111, 97, 86, 77, 70, 64, 59, 55, 51, 48, 45, 42, 40, 38};
```

```
volatile byte Modo_trabert[2] = {78, 30};
```

```
volatile byte Modo_leduc[2] = {156, 16};
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
    FREQUENCY_MODE = 0;
```

```

SREG &= 0x7F; // Deshabilita las interrupciones Globales

TCCR2A = 0x02; // Inicializa y desactiva los comparadores PWM, Activa Modo CTC (Para limpiar
contador automatico)

TCCR2B = 0x07; // Activando el Prescaler de TIMER2 en 1024

OCR2A = FREQUENCY_MODE; // Inicia el Comparador en el valor de frecuencia.

TCNT2 = 0x00; // Inicializando el contador de TIMER2 en 0

TIMSK2 |= 0x02; // Activa la Interrupcion por Comparacion de OCR2A

SREG |= 0x80; // Habilita las interrupciones Globales

pinMode(A0, OUTPUT); // Definimos A0 como pin de salida digital.

dac.begin(0x60);

dac.setVoltage(0, true); // Inicializa en memoria el valor de 0 en el dac.

Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if (Serial.available() > 1)
  {
    seniales(Serial.read());
  }
}

void seniales(char entrada)
{
  senial = entrada;
  while(senial == 'N')

```

```

{
  if (i2c_status)
  {
    cambio_nivel_i2c(LED_STATE);
    i2c_status = false;
    if (Serial.available() > 1)
    {
      String datos = Serial.readStringUntil('\n');
      for (int i = 0; i < datos.length(); i++)
      {
        int coma = datos.indexOf(',');
        volt = datos.substring(0, coma).toInt();
        frec = datos.substring(coma + 1).toInt();
      }
      dac.setVoltage(volt,false);
      FREQUENCY_MODE = Modos_normal[frec];
    }
  }
}

```

```

while(serial == 'L')
{
  if (i2c_status)
  {
    cambio_nivel_i2c(LED_STATE);
    i2c_status = false;
    if (Serial.available() > 1)
    {
      String datos = Serial.readStringUntil('\n');

```

```

for (int i = 0; i < datos.length(); i++)
{
    int coma = datos.indexOf(',');
    volt = datos.substring(0, coma).toInt();
    frec = datos.substring(coma + 1).toInt();
}
dac.setVoltage(volt,false);
}
}
FREQUENCY_MODE = Modo_leduc[!LED_STATE];
}

```

```

while(serial == 'T')
{
    if (i2c_status)
    {
        cambio_nivel_i2c(LED_STATE);
        i2c_status = false;
        if (Serial.available() > 1)
        {
            String datos = Serial.readStringUntil('\n');
            for (int i = 0; i < datos.length(); i++)
            {
                int coma = datos.indexOf(',');
                volt = datos.substring(0, coma).toInt();
                frec = datos.substring(coma + 1).toInt();
            }
            Serial.println("volt");
            dac.setVoltage(volt,false);

```

```

    }
}
FREQUENCY_MODE = Modo_trabert[!LED_STATE];
}

```

```

while(serial == 'B')
{
    if (i2c_status)
    {
        cambio_nivel_i2c(LED_STATE);
        i2c_status = false;
        if (Serial.available() > 1)
        {
            String datos = Serial.readStringUntil('\n');
            for (int i = 0; i < datos.length(); i++)
            {
                int coma = datos.indexOf(',');
                volt = datos.substring(0, coma).toInt();
                frec = datos.substring(coma + 1).toInt();
            }
            Serial.println("volt");
            dac.setVoltage(volt,false);
        }
    }
}
}

```

```

while(serial == 'M')
{
    if (i2c_status)

```

```

{
  cambio_nivel_i2c(LED_STATE);
  i2c_status = false;
  if (Serial.available() > 1)
  {
    String datos = Serial.readStringUntil('\n');
    for (int i = 0; i < datos.length(); i++)
    {
      int coma = datos.indexOf(',');
      volt = datos.substring(0, coma).toInt();
      frec = datos.substring(coma + 1).toInt();
    }
    dac.setVoltage(volt,false);
    FREQUENCY_MODE = Modo_modulacion[0][frec];
    Chance = (60 + FREQUENCY_MODE*10) >> 1;
  }

}
}
}
}
}

```

```

void cambio_nivel_i2c(boolean flag)
{
  if (!flag)
  {
    digitalWrite(A0, HIGH);
  }
}

```

```

else
{
    digitalWrite(A0, LOW);
}
}

ISR(TIMER2_COMPA_vect)
{
    if(serial == 'B')
    {
        LED_STATE = !LED_STATE;

        if (LED_STATE)
        {
            Contador++;
        }
        if (Contador <= 7)
        {
            i2c_status = true;
        }
        else if(Contador == 99) //Modificar para el periodo n-1
        {
            Contador = 0;
        }
    }
    else if(serial == 'M')
    {
        LED_STATE = !LED_STATE;
        if (LED_STATE)

```

```

{
    Contador++;
    if(Contador == Chance)
    {
        Contador == 0;
        Chance_status = !Chance_status;
    }

    if(Chance_status && FREQUENCY_MODE > 3)
    {
        TCCR2B = 0x04; // Configuracion del "Preescaler a 64
    }
    else
    {
        TCCR2B = 0x03; // Configuracion del "Preescaler a 32
    }
    OCR2A = Modo_modulacion[Chance_status][FREQUENCY_MODE] - 3; // Duracion de pulso en
    alto.

}
else
{
    if(Chance_status && FREQUENCY_MODE > 4)
    {
        TCCR2B = 0x06; // Configuracion del "Preescaler a 256
    }
    else
    {
        TCCR2B = 0x07; // Configuracion del "Preescaler a 1024

```

```
    }  
    OCR2A = Modo_modulacion[Chance_status + 2][FREQUENCY_MODE];  
  }  
  i2c_status = true;  
}  
else  
{  
  LED_STATE = !LED_STATE;  
  i2c_status = true;  
  OCR2A = FREQUENCY_MODE;  
}  
}
```

Programación en Tkinter

```
import tkinter as tk

import time

from tkinter import messagebox

import serial

from numoy import *

arduino = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 9600)

time.sleep(2)

senal = True

# Configuración de la ventana

ventana = tk.Tk()

ventana.title("Menú de electroestimulador")

ventana.geometry("800x480")

#ventana.config(bg="MediumOrchid3", bd= 10, relief="ridge")

### primera parte

# Lista de opciones

opciones = ["Normal", "Bursts", "Modulación", "Léduc", "Trabert"]

# Variable con el valor de la opción seleccionada

opcion_seleccionada = tk.StringVar(ventana)

# Definimos el valor por defecto inicial

opcion_seleccionada.set("Forma de onda")

# Creamos el widget menu y le pasamos las opciones
```

```
menu_onda = tk.OptionMenu(ventana, opcion_seleccionada, *opciones)
```

```
menu_onda.config(width = 20)
```

```
menu_onda.place(x = 10, y = 10)
```

```
#Regresion para respuesta lineal, vector de linealidad.
```

```
vector_lin = [1311, 1322, 1333, 1344, 1355, 1372, 1383, 1400, 1417, 1439, 1461, 1489, 1517, 1556,  
1601, 1657, 1729, 1819, 1902, 1986, 2059, 2126, 2193, 2254, 2315, 2382, 2444, 2511, 2578, 2650,  
2723, 2795, 2874, 2952, 3024, 3097, 3164, 3231, 3298, 3365, 3426, 3493, 3560, 3627, 3700, 3778,  
3856, 3924, 4001, 4051]
```

```
# Funcion para imprimir la opcion seleccionada
```

```
def imprimir():
```

```
    #print(f"Señal: {opcion_seleccionada.get()}")
```

```
    print(f"{opcion_seleccionada.get()[0]}")
```

```
    if(opcion_seleccionada.get() == "Normal"):
```

```
        slider1.config(from_ = 0, to = 16)
```

```
        #slider1.config(from_ = 40, to = 200)
```

```
        slider3.config(from_ = 0, to = 50)
```

```
    elif(opcion_seleccionada.get() == "Burts"):
```

```
        slider3.config(from_ = 0, to = 50)
```

```
    elif(opcion_seleccionada.get() == "Modulación"):
```

```
        slider1.config(from_ = 0, to = 19)
```

```
        #slider1.config(from_ = 60, to = 250)
```

```
        slider3.config(from_ = 0, to = 50)
```

```
    elif(opcion_seleccionada.get() == "Léduc"):
```

```
        #slider1.config(from_ = 90, to = 91)
```

```
        slider3.config(from_ = 0, to = 50)
```

```
elif(opcion_seleccionada.get() == "Trabert"):
```

```
    #slider1.config(from_ = 142, to = 143)
```

```
    slider3.config(from_ = 0, to = 50)
```

```
return None
```

```
boton_señal = tk.Button(ventana, text="Seleccionar", command=imprimir)
```

```
boton_señal.config(width = 10)
```

```
boton_señal.place(x = 300, y = 14)
```

```
### Segunda parte
```

```
# Etiqueta1
```

```
etiqueta1 = tk.Label(ventana, text = "Frecuencia")
```

```
etiqueta1.config(width = 10)
```

```
etiqueta1.place(x = 10, y = 60)
```

```
# Primer Slider
```

```
slider1_valor = tk.DoubleVar()
```

```
slider1 = tk.Scale(ventana, variable = slider1_valor, orient = "horizontal", from_ = 0, to = 0)
```

```
slider1.place(x = 10, y = 90)
```

```
#slider1.pack()
```

```
# Etiqueta 3
```

```
etiqueta3 = tk.Label(ventana, text = "Voltaje")
```

```
etiqueta3.config(width = 10)
```

```
etiqueta3.place(x = 10, y = 180)
```

```

# Tercer Slider
slider3_valor = tk.DoubleVar()

slider3 = tk.Scale(ventana, variable = slider3_valor, orient = "horizontal", from_ = 0, to = 0)
slider3.place(x = 10, y = 210)

#slider3.pack()

# Etiqueta 4
etiqueta4 = tk.Label(ventana, text = "Tiempo")
etiqueta4.config(width = 10)
etiqueta4.place(x = 10, y = 300)

# Entradas de tiempo
minute=tk.StringVar()
second=tk.StringVar()
minute.set("00")
second.set("00")

minute_box = tk.Entry(ventana, width=3, textvariable = minute)
minute_box.place(x = 30, y = 320)

second_box = tk.Entry(ventana, width=3, textvariable = second)
second_box.place(x = 60, y = 320)

volti = slider3_valor.get()
freci = slider1_valor.get()

volto = volti
freco = freci

```

```

def crono():
    try:
        # Leer entradas de tiempo
        tiempo = float(minute.get())*60 + float(second.get())

    except:
        messagebox.showwarning("", 'Valor invalido')

    global senial
    global volto
    global freco
    global volti
    global freci

    tiempo -= 0.01
    mins, secs = divmod(tiempo, 60)

    #print(f"{tiempo}, {mins}:{secs}")
    minute.set("{0:2f}".format(mins))
    second.set("{0:2f}".format(secs))

    if (tiempo < 0.5):
        arduino.write(bytes("0,0", "utf-8"))
        #rawString = arduino.readline()
        #print(int(rawString))
        messagebox.showinfo("Time Countdown", "Time Over")
    elif (tiempo > 0):

        volti = slider3_valor.get()

```

```

freci = slider1_valor.get()

cadena1 = str(int(vector_lin[slider3_valor.get()]))
cadena2 = str(int(slider1_valor.get()))

# para mandar la letra del tipo de señal una sola vez
if (senal == True):
    salida = opcion_seleccionada.get()[0]
    arduino.write(bytes(salida, "utf-8"))
    senial = False

# Si hay variacion cambia, sino, no cambia
# Cuando se envian señales, el arduino no genera la señal
if(volto != volti or freco != freci):
    volto = volti
    freco = freci
    salida = cadena1 + ',' + cadena2
    print(salida)
    arduino.write(bytes(salida, "utf-8"))

#rawString = arduino.readline()
#print((rawString))
ventana.after(10, crono)

#boton de inicio
boton_inicio = tk.Button(ventana, text="Inicio", command=crono)
boton_inicio.config(width = 10)
boton_inicio.place(x = 200, y = 320)

ventana.mainloop()

```

Costo estimado del prototipo

En este capítulo se muestra la suma de los subtotales, que conllevan a un total solamente de los materiales o componentes utilizados para hacer las tarjetas de los circuitos.

La creación de un prototipo puede ser costoso, debido al tiempo invertido y el uso de los materiales necesarios; la necesidad de haber diseñado un prototipo fue para mostrar un modelo de prueba del producto, además que ayudan a probar la funcionalidad, durabilidad y estética.

Los costos van divididos de tal manera que corresponden a cada tarjeta y materiales extras.

Componentes para la tarjeta de fuente			
Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio Total
Bornera eléctrica (2 entradas)	C\$12.00	2	C\$24.00
Bornera eléctrica (3 entradas)	C\$20.00	1	C\$20.00
Condensador 10nF (cerámico)	C\$12.00	2	C\$24.00
Condensador 10uF(cerámico)	C\$12.00	1	C\$12.00
Condensador 100uF (electrolítico)	C\$22.00	2	C\$44.00
Diodo 1N4004	C\$20.00	3	C\$60.00
Diodo UF5400	C\$50.00	2	C\$100.00
Inductor	C\$104.00	1	C\$104.00
Porta integrado	C\$20.00	1	C\$20.00
Resistencia de 47K	C\$4.00	1	C\$4.00
Resistencia de 10K	C\$4.00	2	C\$8.00
Resistencia de 1K2	C\$4.00	1	C\$4.00
Resistencia de 1K5	C\$4.00	1	C\$4.00
Resistencia de 22K	C\$4.00	4	C\$16.00
Resistencia de 2K2	C\$4.00	2	C\$8.00
Resistencia de 390 Ohm	C\$4.00	1	C\$4.00
Resistencia de 5K6	C\$4.00	7	C\$28.00
SG3525	C\$50.00	1	C\$50.00
Socket DC 2.1mm	C\$181.00	1	C\$181.00
Transistor 2N2222A	C\$12.00	3	C\$36.00
Transistor 2N3904	C\$12.00	2	C\$24.00
Transistor 2N3906	C\$20.00	2	C\$40.00
Transistor MOSFET IRF9520N	C\$60.00	1	C\$60.00
Transistor MOSFET IRF540	C\$50.00	3	C\$150.00
Subtotal 1 (C\$)			C\$1,025.00

Componentes para la tarjeta de Arduino			
Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio Total
Bornera eléctrica (2 entradas)	C\$12.00	3	C\$36.00
Bornera eléctrica (3 entradas)	C\$20.00	1	C\$20.00
MCP4725	C\$363.00	1	C\$363.00
Pines hembra	C\$25.00	3	C\$75.00
Pines macho	C\$15.00	2	C\$30.00
Pantalla capacitiva	C\$4,745.00	1	C\$4,745.00
Placa Arduino UNO	C\$600.00	1	C\$600.00
Raspberry pi 3	C\$3,800.00	1	C\$3,800.00
Subtotal 2(C\$)			C\$9,669.00

Otros componentes o materiales			
Materiales	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Acetona	C\$35.00	1	C\$35.00
Ácido clorhídrico	C\$70.00	1	C\$70.00
Agua oxigenada vol. 20	C\$52.00	1	C\$52.00
Baterías recargables 18650	C\$180.00	3	C\$540.00
Bicarbonato	C\$50.00	1	C\$50.00
Cables (para conexión)	C\$20.00	1	C\$20.00
Cables para TENS	C\$545.00	1	C\$545.00
Caja porta baterías (3S)	C\$180.00	1	C\$180.00
Electrodos (almohadilla)	C\$220.00	1	C\$220.00
Estaño	C\$12.00	5	C\$60.00
Fusible de 0.25V	C\$12.00	1	C\$12.00
Impresión (pistas de tarjetas)	C\$60.00	3	C\$180.00
Impresión 3D		Proporcionada por la UNI	
Lija número 80	C\$25.00	1	C\$25.00
Módulo protector BMS	C\$180.00	1	C\$180.00
Placa virgen (fibra de vidrio)	C\$250.00	1	C\$250.00
Porta fusible	C\$43.00	1	C\$43.00
Socket DC	C\$25.00	1	C\$25.00
Switch (interruptor)	C\$12.00	1	C\$12.00
Transformador (15V)	C\$200.00	1	C\$200.00
Subtotal 3 (C\$)			C\$2,419.00

SUMA DE SUBTOTALES	
Subtotal 1	C\$1,025.00
Subtotal 2	C\$9,669.00
Subtotal 3	C\$2,419.00
Total (C\$)	C\$13,113.00

Los detalles de las especificaciones técnicas se muestran en el siguiente cuadro:

Mecanismo	Descripción técnica
Canal	Uno
Voltaje	0-50V (500 Ohm)
Fuente de energía	Tres baterías de 4 V (18650).
Forma de onda	Pulso cuadrado
Modos	Normal, Burts, Modulación, Trabert, Leduc
Modo normal	Genera una estimulación continua dependiendo del valor ajustado.
Modo modulación	Es una combinación de la frecuencia del pulso y del ancho del pulso, también varían dependiendo del valor ajustado.
Modo burts	Trenes de impulso con ráfaga de 7 trenes de impulsos, con frecuencia fija de 100 Hz.
Modo Trabert	Frecuencia fija de 142 Hz, con un tiempo de impulso de 2ms y 5ms de reposo.
Modo Leduc	Frecuencia fija de 91 Hz, con tiempo de impulso de 10ms y reposo de 1ms.
Temporizador	Ajustable en minutos y segundos, con cuenta regresiva.
Indicador de batería	Hay un módulo indicador de batería en la parte frontal de la caja.