



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”

**Diseño de un generador de corrientes para
estimulación nerviosa eléctrica transcutánea**

Proyecto
que presentan:

Norma Arrazola Herrera
José Antonio Fuentes Fonseca

Para obtener el título de:
INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

Asesores:
Ismael Gabriel Cosme Cisneros
Pedro Martín Morales Becerra



México D.F., Noviembre 2015

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERA (N) DESARROLLAR C. NORMA ARRAZOLA HERRERA
C. JOSE ANTONIO FUENTES FONSECA

**“DISEÑO DE UN GENERADOR DE CORRIENTES PARA ESTIMULACIÓN NERVIOSA ELÉCTRICA
TRANSCUTÁNEA”.**


DISEÑAR UN GENERADOR DE ESTÍMULOS ELÉCTRICOS TRANSCUTÁNEOS DEL NERVIIO.

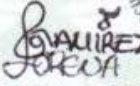
- ❖ GENERAR LOS DIFERENTES MODOS DE TERAPIA A TRAVÉS DE LA PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR
- ❖ DISEÑAR EL CIRCUITO ELÉCTRICO PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL
- ❖ ESTABLECER LA INTENSIDAD DE CORRIENTE A NIVELES ADECUADOS A LA FISIOLÓGÍA DEL CUERPO HUMANO Y A LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS PARA LA TERAPIA TENS
- ❖ DISEÑAR LA INTERFAZ QUE SERÁ MOSTRADA EN EL LCD

CIUDAD DE MÉXICO, A 10 DE OCTUBRE DEL 2016.

ASESORES


ING. PEDRO MARTÍN MORALES BECERRA


ING. ISMAEL GABRIEL COSME CISNEROS


ING. PATRICIA LORENA RAMÍREZ RANGEL
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

Dedicatoria

A mis padres y a mis hermanos por acompañarme en cada decisión, por hacer de mi lo que soy hoy.

A mis maestros por hacer de este mundo un lugar mejor.

Norma Arrazola Herrera

A mi familia por siempre apoyarme en cada paso que doy, porque sin ustedes no estaría escribiendo estas líneas.

A mis amigos por la excelente compañía durante este trayecto y a mis maestros, por ayudar a construir el conocimiento.

José Antonio Fuentes Fonseca

Índice

| | |
|---|----|
| Resumen | 1 |
| Capítulo I Introducción | 2 |
| 1.1 Antecedentes y Estado del Arte | 3 |
| 1.2 Objetivos..... | 5 |
| 1.2.1 Objetivo General..... | 5 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 5 |
| 1.3 Planteamiento del problema..... | 6 |
| 1.4 Justificación | 7 |
| Capítulo II Electroterapia..... | 8 |
| 2.1 Introducción | 8 |
| 2.2 Electroterapia..... | 8 |
| 2.2.1 Clasificación de las corrientes utilizadas en electroterapia | 9 |
| 2.2.2 Tipos de corrientes utilizadas en Electroterapia..... | 11 |
| 2.2.3 Comparación entre otras terapias y TENS..... | 13 |
| 2.2.4 Estimulación eléctrica transcutánea del Nervio (TENS)..... | 14 |
| 2.2.5 Características biofísicas | 14 |
| 2.2.6 Modos Terapéuticos. | 17 |
| 2.2.7 Evaluación de la terapia TENS | 17 |
| 2.2.8 Electroodos | 18 |
| 2.3 Sistema nervioso..... | 19 |
| 2.3.1 Divisiones o constitución | 19 |
| 2.3.2 Nocicepción..... | 21 |
| 2.3.3 Sistema muscular | 22 |
| 2.4 La piel | 23 |
| 2.5 El dolor..... | 23 |
| 2.5.1 Receptores para el dolor | 24 |
| 2.5.2 Teoría de compuertas..... | 24 |
| 2.6 El organismo como un conductor | 25 |
| 2.7 Efectos del organismo ante la aplicación de electroterapia | 26 |
| 2.7.1 Efectos físico-químicos en el organismo ante la aplicación de electroterapia..... | 26 |

| | | |
|--------------|--|----|
| 2.7.2 | Efecto biológico en el organismo ante la aplicación de electroterapia | 26 |
| 2.7.3 | Efectos fisiológicos en el organismo ante la aplicación de electroterapia..... | 26 |
| 2.7.4 | Resistencia de la piel..... | 28 |
| 2.7.5 | Causas de lesiones al aplicarse electroterapia7 | 28 |
| 2.7.6 | Manejo de intensidades en el tratamiento con electroterapia..... | 29 |
| Capítulo III | Desarrollo | 30 |
| 3.1 | Solución Propuesta | 30 |
| 3.2 | Generador de pulsos..... | 32 |
| 3.3 | Puente H..... | 32 |
| Capítulo IV | Resultados | 35 |
| 4.1 | Interfaz de usuario | 35 |
| 4.2 | Señales obtenidas a la salida del microcontrolador..... | 36 |
| 4.3 | Señales obtenidas a la salida del puente H..... | 38 |
| 4.4 | Señales obtenidas a la salida del transformador | 38 |
| Capítulo V | Conclusiones | 41 |
| Referencias | | 42 |
| Apéndice A. | Diagramas Eléctricos | 43 |
| Apéndice B. | Diagramas de flujo y códigos fuente | 44 |

Resumen

En esta tesis se describe el diseño de un generador de corrientes para estimulación nerviosa eléctrica transcutánea, al cual en adelante nos referiremos como TENS por sus siglas en inglés *Transcutaneous electrical nerve stimulation*, para su uso en rehabilitación mediante electroterapia a pacientes con dolor muscular. La aplicación de la electroterapia se realiza mediante electrodos colocados sobre el músculo al que se desea aplicar la terapia.

Los pulsos son generados a través de un microcontrolador programado con 11 diferentes modos de terapia, de los cuáles 9 modos tienen parámetros previamente establecidos, 8 modos de éstos son de modo típico de TENS con los parámetros de frecuencia y duración de pulso más usado en electroterapia, el noveno modo es de tipo ráfaga o burst con número de pulsos, frecuencia y duración de pulso preestablecido, sin embargo, se incorporan 2 modos más, uno de tipo burst y otro de forma de onda típica en los cuáles se puede modificar frecuencia, duración de pulso y número de pulsos para el modo ráfaga, con el fin de dar más versatilidad y posibilidades de aplicación al usuario. Estos parámetros se pueden modificar bajo los intervalos dados para la terapia TENS y que se presentan más adelante. Para una mejor experiencia con el usuario, se incorpora una pantalla LCD para mostrar el modo de terapia que se está aplicando y saber la duración de la misma.

Una vez que han sido generados los pulsos en el microcontrolador se procede a enviarlos a un circuito electrónico de puente H, con dos finalidades, una para que los pulsos sean amplificados de 5V (proporcionados por el microcontrolador) a 9V y la segunda, se basa en el principio básico de un puente H, para obtener una salida de corriente alterna con una entrada de corriente directa. Esto para cumplir con uno de los fundamentos de la terapia TENS. Posteriormente, la salida del puente H es enviada al devanado secundario de un transformador de 120 a 12 V, para que la señal sea amplificada aproximadamente a 80 Volts pico a pico y cuya corriente sea lo suficientemente grande para poder ser percibida por el usuario, estando dentro de los lineamientos previamente establecidos para la terapia TENS.

Capítulo I Introducción

En la actualidad resulta familiar encontrar generadores de corrientes para estimulación nerviosa eléctrica transcutánea o comúnmente conocidos como TENS (del inglés Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation), cuya función principal es la de ayudar a pacientes con algún dolor muscular. Este procedimiento se llama electroterapia.

Para el diseño del generador de corrientes realizado en esta tesis, se tuvieron en cuenta diversos parámetros en los pulsos de corriente, los cuales son: frecuencia, duración del pulso y forma de onda, de pulsos aislados (típica) o de ráfaga, cuyos valores quedan delimitados por la teoría establecida desde hace varios años para la electroterapia TENS.

Los pulsos que son aplicados al usuario son resultado de varias etapas que son: generación de pulsos, acondicionamiento de la señal y amplificación de ésta. La primera etapa se realiza mediante la programación de un microcontrolador, en el cual se proponen 11 diferentes modos de terapia que, dependiendo de la intensidad del dolor muscular, el problema a tratar y el nivel de sensibilidad del paciente se irá seleccionando. La etapa de acondicionamiento de la señal, consiste en que los pulsos de corriente directa de 5 volts que entrega a la salida el microcontrolador sean amplificados a 9 volts y a su vez sean convertidos a una señal de corriente alterna, la cual es parte fundamental de los principios de operación del TENS. Finalmente, la señal se amplifica nuevamente pero ahora a un nivel de aproximadamente 80 volts pico a pico, empleando un transformador para esta etapa, al tener este nivel de voltaje y un valor de resistencia en la piel, se obtiene el nivel de corriente ideal para la realización de la electroterapia.

1.1 Antecedentes y Estado del Arte

La idea de medicaciones conducidas a través de la piel, vía fuerza electromotriz de una corriente eléctrica fue propuesta por Pivati en el año de 1747 y después por Fabre-Palaprat en 1833. A mediados de los años 1900s Le Duc realizó diferentes experimentos en animales, lo que contribuyó a lo que sería denominado alrededor del mundo como terapia iontoforesis. Este término proviene de la palabra ionto, cuyo significado es ion y phoresis que significa transferencia.

De acuerdo con las investigaciones de Chien y Bang en el año de 1989, el primer uso clínico de terapia iontoforesis data del año de 1936. A partir de la década de los 50s, se han desarrollado considerables técnicas que, combinado con nuevas aplicaciones clínicas hicieron que la iontoforesis fuera usada alrededor del mundo en campos como la medicina, cirugía, odontología y rehabilitación.

De acuerdo con Walsh (1997), el precursor de la actual estimulación nerviosa por corrientes eléctricas transcutáneas (TENS, por sus siglas en inglés), fue un estimulador eléctrico disponible para el público estadounidense en los años de 1900s bajo el nombre de "*Electreat*" cuyo significado traducido del inglés es tratar o tratamiento con electricidad.

El descubrimiento del TENS, tal y como se conoce hoy en día está basado en el trabajo original de Ronald Melzack, un psicólogo canadiense, y Patrick Wall, un neuroanatomista británico, acerca de la teoría de la compuerta del dolor publicado en 1965.

Melzack y Wall revisaron su teoría para incluir la condición que el efecto modulador puede tener en el dolor, el dolor es modulado al nivel de la médula espinal de la columna dorsal a través de un sistema de compuerta que puede ser abierto o cerrado basándose en la actividad central y periférica neural.

Inmediatamente después de la publicación de esta revolucionaria teoría, se dio inicio a pruebas experimentales con humanos con una técnica quirúrgica para calmar el dolor basada en estímulos eléctricos en las fibras nerviosas de la espina dorsal. Impulsada por Normal Shealy, esta técnica es conocida como Estimulación de la Espina Dorsal (DCS, por sus siglas en inglés).

Shealy utilizó el estimulador electreat alimentado por baterías como un dispositivo de selección con el que estableció si los pacientes eran buenos candidatos a recibir la DCS. De forma inesperada, su trabajo preliminar reveló que algunas personas respondían mejor a la sencilla, no invasiva, terapia transcutánea de electreat comparada con técnicas más complejas e invasivas como la DCS. Con esta importante observación y el trabajo de investigación de Melzack y Wall, la terapia TENS dio inicio.

A partir del año de 1970 diferentes compañías tuvieron un importante y rápido lanzamiento al mercado de diferentes instrumentos electromédicos, en especial de aquellos enfocados a la terapia TENS.

En la actualidad resulta bastante común encontrar estos instrumentos, en el mercado donde las marcas más reconocidas en nuestro país son: I-Tech, Tens 3000, Stimtec, Hivox. Sin embargo, encontrar estos productos en nuestro país representa adquirirlos con un aumento en su costo, ya que la mayoría son de importación[1].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un generador de estímulos eléctricos transcutáneos del nervio.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Generar los diferentes modos de terapia a través de la programación del microcontrolador.
2. Diseñar el circuito eléctrico para el acondicionamiento de la señal.
3. Establecer la intensidad de corriente a niveles adecuados a la fisiología del cuerpo humano y a los parámetros establecidos para la terapia TENS.
4. Diseñar la interfaz que será mostrada en el LCD.

1.3 Planteamiento del problema

En la actualidad, gran parte de la sociedad presenta dolor muscular en diferentes partes del cuerpo, que en algunas ocasiones se deben a accidentes, golpes y en otros casos por situaciones de estrés resultado de las presiones a la que es sometida la persona en estos días. La electroterapia, combinada de medicamentos han presentado mejores resultados para la rehabilitación muscular comparado con la aplicación de cada método por separado.

En este trabajo se desarrolló un prototipo de generador de estímulos eléctricos basado en la teoría de la electroterapia y más específico, en la terapia con TENS, ya que hoy en día, algunos de los equipos que se encuentran en venta tienen un costo elevado, debido principalmente a los diferentes modos de operación, es por ello que en el diseño de este prototipo siempre se buscó el disminuir costos de producción y mantenimiento, ofreciendo una gran variedad de modos de operación para que así el prototipo se pueda emplear en cualquier músculo que presenta dolor.

1.4 Justificación

De acuerdo con el Doctor Juan Plaja, en su libro titulado *Guía práctica de electroterapia* [2], la estimulación eléctrica transcutánea ofrece una analgesia que puede persistir de varios minutos hasta días, según su modalidad o caso. Además de que está ampliamente recomendada para tratar dolores agudos o dolores crónicos localizados.

A pesar de que existen una amplia gama de aparatos que van desde equipos portátiles individuales hasta complejas unidades clínicas, la venta de estos aparatos en el país resulta con un costo elevado, ya que la mayoría de los productos son de importación.

Capítulo II Electroterapia

2.1 Introducción

A lo largo de este capítulo se explicará a detalle cada uno de los parámetros y definiciones a considerar para el diseño de un generador de corrientes para estimulación nerviosa eléctrica transcutánea. Este apartado se puede dividir en tres partes: la primera es electroterapia, seguido de las partes del cuerpo humano presentes en la electroterapia y la última parte son los efectos del organismo ante la aplicación de la terapia. Se eligió esta forma de estructura para que el lector tenga una mayor facilidad de comprensión de cada uno de los principales puntos a definir.

Se comenzará dando una explicación de lo que es la electroterapia, sus conceptos básicos, clasificaciones de acuerdo a diferentes propiedades como lo pueden ser: efectos sobre el organismo, modos de aplicación, frecuencias, etc. Se definirá el concepto de TENS, así como todas las bases y fundamentos teóricos. También se hablará sobre la importancia y el uso de los electrodos en la electroterapia.

Posteriormente, se hablará acerca de las diferentes partes del cuerpo humano que intervienen directa o indirectamente en la terapia TENS y las reacciones de cada una de estas partes al ser sometidas a la terapia, tal como puede ser el dolor, donde se describen las definiciones, escalas de umbral y a que se debe el dolor, así como la famosa teoría de compuertas del dolor propuesta por Melzack y Wall.

Finalmente, se explicarán algunos efectos del organismo ante la aplicación de la electroterapia como puede ser en diferentes categorías como: físico- químico, biológico o fisiológicos. Además de una lista de recomendaciones a verificar antes de aplicar la terapia TENS, para así evitar lesiones en el cuerpo humano.

2.2 Electroterapia

Es la rama de la fisioterapia que utiliza la electricidad como un agente físico para el tratamiento de diversas patologías. Existe una amplia gama de corrientes que, debido a la conformación de su onda, serán más eficientes y seguras.

Consiste en la aplicación de energía electromagnética al organismo (de diferentes formas) con el fin de producir sobre él, reacciones biológicas y fisiológicas, las cuales serán aprovechadas para mejorar los distintos tejidos cuando se encuentren sometidos a enfermedades o alteraciones metabólicas de las células que componen dichos tejidos.

Los objetivos de la electroterapia son principalmente:

- Disminución del dolor (agudo, crónico, puntos desencadenantes y puntos dolorosos)
- Relajación muscular.
- Incremento de la fuerza muscular y la normalización del tono (resistencia, potencia, fortalecimiento).
- Mejorar el control muscular (reeducación muscular)
- Disminución del edema crónico.
- Algunas aplicaciones menos usadas como la iontoforesis (propulsión del medicamento a través de la piel, utilizando la fuerza de la corriente).

2.2.1 Clasificación de las corrientes utilizadas en electroterapia

En terapia física se utiliza fundamentalmente la electricidad en forma dinámica, salvo algunos efectos propios del galvanismo, que lo harán como electricidad estática. Para diferenciar las variantes que se ofrecen en electroterapia, es necesario dividirlos del siguiente modo:

Clasificación según efectos sobre el organismo

- Efectos Electroquímicos.
- Efectos motores sobre nervio y músculo.
- Efectos sensitivos sobre nervio sensitivo.
- Efectos por aporte energético para mejora del metabolismo.

Clasificación según modos de aplicación

- Pulsos aislados (Reposos largos o estimulación motora con corriente cuadrada o de subida progresiva).
- Trenes o ráfagas (faradización).
- Aplicación mantenida o frecuencia fija (impulsos con sensación de repetición y siempre con la misma frecuencia).
- Corrientes con modulación (interferencias y otras de media frecuencia).

Clasificación según frecuencias

En fisioterapia se usan corrientes del espectro electromagnético de las radiaciones no ionizantes, cuyo límite se encuentra en las radiaciones ultravioletas de tipo B, aquí se encuentran:

- Baja frecuencias de 0 a 1000 Hz.

- Media frecuencia de 1000 a 5000 Hz (utilizadas desde 2000 hasta 10000 Hz).
- Alta frecuencia de 500,000 Hz hasta el límite entre los ultravioletas de tipo B y C.

Clasificación según formas de onda

Dado que existen muchos tipos de ondas eléctricas, se agrupan de la siguiente forma:

1. De flujo constante y mantenida la polaridad (Corriente galvánica o continua): Consiste en aplicar corriente continua al organismo haciendo subir lentamente la intensidad y manteniendo dicha intensidad sin alteración alguna al mismo tiempo que se mantiene la polaridad durante toda la sesión. Esto significa que los electrones van a entrar por el electrodo negativo (cátodo) y salen por el electrodo positivo (ánodo) cerrando así el circuito.
2. De flujo interrumpido y manteniendo la polaridad (Interrumpidas galvánicas): Se aplica corriente galvánica con la misma polaridad desde el principio, pero se hacen interrupciones en su intensidad, dando estímulos pausados, denominados impulsos. Estos impulsos van a variar dependiendo de su forma, del tiempo de duración, del tiempo de reposo entre los impulsos y el periodo comprendido entre un impulso y su latencia.

Las corrientes galvánicas (baja frecuencia) se destinarán a estimular al sistema muscular (musculo estriado y liso) y al sistema nervioso (sensitivo y motor).

Existen cuatro tipos de impulsos a saber:

- a) Impulsos aislados
- b) Trenes
- c) Aplicación mantenida
- d) Barridos de frecuencia

3. De flujo constante e invertida la polaridad (Alternas): Aplicación de una corriente eléctrica sin interrupciones con alternancias rítmicas en su polaridad. En estas corrientes cuando se hace el cambio de polaridad se obtienen flujo de electrones en diversos sentidos.
4. De flujo Interrumpido e invirtiendo la polaridad (Interrumpidas alternas): La polaridad se invierte, pero se realizan interrupciones o espacios en la aplicación de la corriente, dando como consecuencia *paquetes, polos o trenes de ondas* alternas

5. Modulando la amplitud (Interferenciales y otras de frecuencia media): Son corrientes normalmente de frecuencia media, donde las ondas (positiva y negativa) oscilan simultáneamente, aumentan y disminuyen de amplitud a la par y en el mismo instante. Este fenómeno se produce por la mezcla o suma de dos circuitos eléctricos, por la interferencia de dos ondas alternas de diferente frecuencia o por interrupciones en la frecuencia media. La resultante es una nueva *señal modulada en amplitud* y cuya frecuencia es la diferencia entre las frecuencias de los circuitos que se cruzan, pero sin cambios en la frecuencia modulada.
6. Modulando la frecuencia (Barridos de frecuencia con interrupciones galvánicas o modulaciones de frecuencia media [interferenciales]): Consiste en someter al organismo a barridos entre dos frecuencias con el fin de aplicar la frecuencia óptima para conseguir el efecto deseado a la vez que se evita la acomodación del sistema nervioso.
7. Aplicación simultánea de dos o más corrientes (Dinámicas de base galvánica): Aquí el objetivo es la aplicación de dos tipos de corrientes simultáneas como puede ser:
 - Las di-adinámicas con su base galvánica
 - Las ultrasónicas a la par de interferenciales

2.2.2 Tipos de corrientes utilizadas en Electroterapia

En la electroterapia existen varias formas de onda, cuyos parámetros ya han sido previamente definidos para lograr un objetivo específico. En la tabla I se muestra cada una de ellas, así como los parámetros eléctricos de cada una.

Tabla I. Diferentes tipos de corrientes usadas en electroterapia, características eléctricas y usos.

| Corriente | Tipo de Corriente | Frecuencia | Duración del pulso | Intervalo de pulso | Uso | Pulsos |
|---|--|--|---|--|--|--|
| Träbert, (2-5, Ultra Reiz o U R) | Directa | Baja y fija (142.8 Hz) | 2 ms | 5 ms | Analgésico en estados sub agudos y crónicos también puede ser usado en iontoforesis | Fijos |
| Jean: 1. Farádica automática y manual 2. Impulso galvánica (IG-30) 3. Dífrásica Triangular (DF-100) 4. Exponenciales: 50, 100, 200 y 500 ms | 1. Directa 2. Directa 3. Directa 4. Directa | 1. Baja (50 Hz) 2. Baja (12.5 Hz) 3. Baja (100 Hz) 4. Baja (0.5 Hz) | 1. Trenes de pulso de 3.5 s 2. 30 ms 3. 10 ms 4. 50, 100, 200 y 500 ms | 1. 3.5 s 2. 50 ms 3. 0 s 4. 1950 ms, 1900 ms, 1800 ms y 1500 ms | 1. Reeducación muscular, fortalecimiento muscular, electro gimnasia 2. Relajación, analgesia, edema 3. Analgesia, relajación 4. Paresias, denervaciones y diagnóstico | 1. En cada tren de pulsos ascenso y descenso de intensidad de 0.5 s 2. Triangulares 3. Triangulares 4. Triangulares |
| Alto Voltaje (Monofásico) | Directa | Baja (1 a 200 Hz) | De 50 a 200 μ s | Ajustable de 50 a 200 μ s | Fortalecimiento, relajación muscular, tratamiento de edema crónico y cicatrización de escaras y úlceras | Ondas gemelas triangulares o rectangulares |
| TENS (Neuroestimulador eléctrico transcutáneo) | Alternas (simétrica y asimétrica) | Baja (1 a 200 Hz) | Ajustable | Ajustable | Analgésico y relajante | Onda bifásica asimétrica (En un sentido tiene pulso rectangular y en el otro pulso triangular) |
| Corrientes Interferenciales | Alternas e interferenciales | Típicamente 5 kHz, los más sofisticados son de 2.5, 5, 7, 10 kHz | Ajustable de 2 a 150 μ s | - | Analgésico y relajante, disminución de edema, fortalecimiento muscular, consolidación ósea. | Pulsos continuos |
| Rusa (De Kots) | Alternas | 2500 Hz | 50 trenes por segundo (duración de 10 segundos) | 50 s | Fortalecimiento muscular, resistencia muscular, desarrollo de potencia muscular | Trenes de pulsos |
| Microcorriente | Alternas | Baja frecuencia (de 0.3 a 1000 Hz) | Duración de fase de 2.7 s | - | Incremento del metabolismo celular, aumento de la microcirculación, drenaje linfático, analgesia. | Pulso alterno o directo (máximo 1000 μ A de amplitud) |

2.2.3 Comparación entre otras terapias y TENS

Cuando se habla de electroterapia se debe recordar que existe una gran variedad de tipos de corrientes utilizadas en la misma, las cuales tienen un fin en particular. Sin embargo, es frecuente la comparación entre una y otra cuando no queda claro el objetivo de la misma, es por esto que a continuación se presenta una comparación entre la terapia TENS y otros tipos de terapia comúnmente comparados con la misma.

Tabla II: Comparación entre corrientes TENS y EMS

| | TENS | EMS |
|--|----------------------|------------------------|
| Destinado A | Analgesia | Trabajo muscular |
| Estímulo De Fibras | Nerviosas sensitivas | Nerviosas motoras |
| Respuestas Motoras | No superadas | Supera el umbral motor |
| Tipo De Corriente | Continua o Alterna | Continua |
| Tiempo De Sesión | 15 a 30 minutos | 10 a 20 minutos |
| Frecuencia | 1 a 200 Hz | 10 a 100 Hz |
| Intensidad De La Corriente (Pico) | Hasta 60 mA | Hasta 100 mA |

Como se observa, estas electroterapias comúnmente comparadas no tienen relación alguna con sus fines de su aplicación. A continuación, se presenta una tabla de comparación entre la terapia TENS y la IFC (*Interferential current therapy*). Ambas terapias son usadas para analgesia.

Tabla III: Comparación entre terapia TENS e IFC

| | TENS | IFC |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Destinado A | Analgesia | Analgesia |
| Estímulo De Fibras | Nerviosas sensitivas | Nerviosas periféricas |
| Estimula | Producción de endorfinas | La circulación |
| Tipo De Corriente | Continua o alterna | Alterna |
| Nivel De Penetración | Superficial | Tejidos |
| Frecuencia | 1 a 200 Hz | Hasta 10000 Hz |

La IFC tiene además un papel en la estimulación de la cicatrización y la restauración de los tejidos, mientras que la TENS solo se centra en el control del dolor. Se han realizado numerosos estudios y ambas corrientes son aceptadas para el tratamiento del dolor, la IFC además de ser un equipo más costoso tienen fines más especializados que la terapia TENS como son las alteraciones en los tejidos blandos.

2.2.4 Estimulación eléctrica transcutánea del Nervio (TENS)

El TENS, por sus siglas en inglés Transcutaneous Electrical Nervous Stimulation, es una modalidad terapéutica no invasiva de aplicación analgésica. Esta técnica consiste en el estímulo eléctrico de nervios periféricos por vía de los electrodos en la superficie de la piel. El desarrollo y el uso del TENS fueron basados en la teoría de control de la compuerta de dolor (Melzack y Wall, 1965). * Detallado en el punto 2.5.

Es considerada como una alternativa no invasiva comparado a los tratamientos tradicionales como medicación y operación, los cuales frecuentemente tienen serios efectos colaterales.

2.2.5 Características biofísicas

El principio biofísico del cual se basa el TENS es la liberación de pulsos de corriente eléctrica a través de la piel, transcutáneamente, usando un único o múltiples pares de electrodos superficiales.

Técnicamente, cualquier estimulador que libere pulsos de corriente eléctrica a través de la piel vía electrodos superficiales es una unidad de TENS. Sin embargo, por consenso, el término TENS es usado cuando el control del dolor es el objetivo terapéutico principal.

La terapia TENS se logra usando una corriente pulsada caracterizada por su forma de onda, duración de pulso, frecuencia del pulso/ráfaga y la amplitud de la corriente.

Forma de onda. La forma de onda básica asociada con la terapia TENS es bifásica, ya sea simétrica o asimétrica, y balanceada en la naturaleza (Figura 2.2.5.1)

- a. Una **forma de onda balanceada** tiene igual número de cargas eléctricas en cada fase, lo cual implica que el área de superficie debajo de cada fase es exactamente la misma.
- b. Una **forma de onda bifásica** no tiene que ser simétrica para ser balanceada, porque el área de superficie bajo cada fase dicta si la forma de onda esta balanceada, no su forma simétrica o asimétrica.
- c. Una **forma de onda balanceada** se dice que tiene una componente de corriente directa (DC) neta igual a cero, porque ninguna acumulación neta de cargas se produce bajo los electrodos a través del tiempo
- d. Si una forma de onda está **no balanceada**, ocurre una acumulación neta de cargas bajo cada electrodo, lo cual al pasar del tiempo puede conducir a la irritación de la piel debajo de los electrodos. El

uso de formas de onda balanceadas en la terapia TENS es crítica, porque la duración de estimulación eléctrica para el control de dolor es prolongada, frecuentemente más de una hora por aplicación, con más de una aplicación por día, por varios días consecutivos, semanas, y a veces meses.

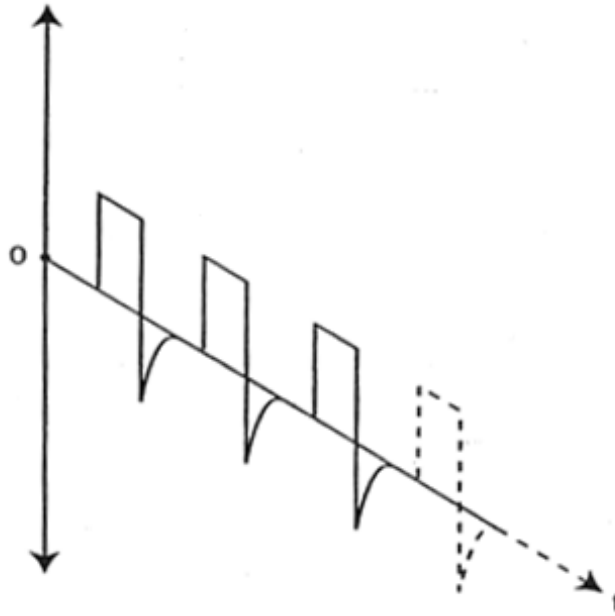


Fig. 2.2.5.1 Forma de onda típica de un pulso de corriente bifásico y balanceado, liberado por un dispositivo TENS. Notar que la forma de onda no está dibujada a escala para mostrar el balance.

Duración del Pulso (PD). También conocido como ancho de pulso, PD es medido en microsegundos (μs) para terapias TENS y está definido como el tiempo transcurrido entre el inicio y el fin de todas las fases dentro de un único pulso. La mayoría de dispositivos TENS tienen una PD que varía entre 50 y 400 μs .

Frecuencia del pulso. La frecuencia del pulso, o el número de pulsos liberados por segundo, es comúnmente expresado en Hertz (Hz). El periodo de un pulso de corriente es la suma del PD más el intervalo de inter-pulso (IPI) (Fig. 2.2.5.2).

El rango de frecuencia de pulso de la mayoría de unidades TENS va desde 1 a 200 Hz. El concepto de frecuencia de ráfaga es relevante ya que uno de los cinco modos clásicos de TENS, etiquetado como "ráfaga TENS", hace uso de ráfagas de pulsos.

- i. Una ráfaga, o un tren de pulsos interrumpido, es una serie finita de pulsos liberados a una frecuencia identificada,

- ii. La duración de ráfaga (BD) es el tiempo transcurrido desde el inicio hasta el término de una ráfaga.
- iii. El tiempo transcurrido entre dos ráfagas es el intervalo de inter-ráfaga (IBI)
- iv. La frecuencia de ráfaga de la mayoría de unidades TENS, tiene un rango de 1 a 10 Hz, con un rango de número de pulsos por ráfaga que varía entre 5 y 10 pulsos.

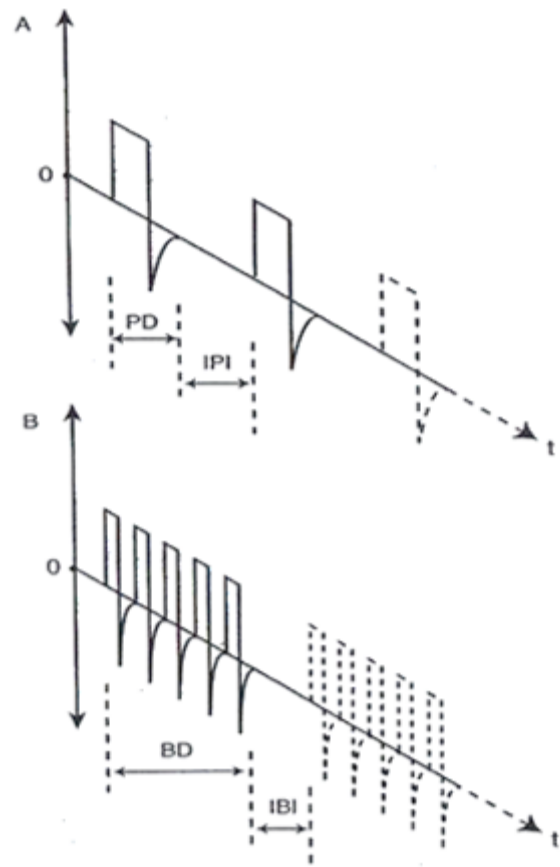


Fig. 2.2.5.2 Determinación de la duración de pulso (PD) e intervalo de inter-pulso (IPI) medidas de la liberación de pulsos únicos. B. Determinación de la duración de ráfaga (BD) e intervalo de inter-ráfaga (IBI) medidos con respecto al modo ráfaga de TENS.

Amplitud de la Corriente. También conocida como la intensidad, la amplitud de la corriente hace referencia a la magnitud de la corriente liberada por el estimulador TENS y es medida en miliampers (mA). En la mayoría de unidades TENS, la amplitud de la corriente varía entre 0.1 a 120 mA. Tal intervalo de amplitud, o intensidad, de corriente es más que necesario para despolarizar todas las fibras nerviosas periféricas dentro de la piel.

La mayoría de estimuladores TENS están diseñados para liberar corriente en la misma amplitud durante toda la aplicación, sin importar los cambios de impedancia ocurridos en la piel con el paso de tal corriente durante el tiempo[3], [4].

2.2.6 Modos Terapéuticos.

Por medio de una cuidadosa selección de la frecuencia de pulso/ráfaga, duración del pulso, y la amplitud de la corriente, los profesionales pueden programar las unidades TENS para liberar uno de los cinco modos terapéuticos básicos.

Las características de cada uno de estos modos son presentadas en la tabla IV.

Tabla IV. Cinco modos clásicos de la terapia TENS y sus características biofísicas y psicológicas respectivas [3].

| | Convencional | Tipo Acupuntura | Intensidad Breve | Ráfaga | Modulación |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------|
| Duración del pulso | Corto (<150 μ s) | Largo (>150 μ s) | Largo (>150 μ s) | No disponible | Variable |
| Frecuencia | Alta (>80 Hz) | Baja (<10 Hz) | Alta (>80 Hz) | Baja (<10 Hz) | Variable |
| Amplitud de la corriente | Confortable | Confortable/Tolerable | Confortable/Tolerable | Confortable | Variable |
| Fibras nerviosas preferentemente despolarizadas | S | S-M | S-M-N | S-M | Variable |
| Mecanismo preferente para la modulación del dolor | No opiáceos | Opiáceos | Opiáceos | Opiáceos | Variable |
| Aparición de la analgesia | Rápido (en minutos) | Lento (en horas) | Rápido (en minutos) | Lento (en minutos) | Variable |
| Duración de la analgesia | Corto (< pocas horas) | Largo (> Horas) | Largo (>pocas horas) | Largo (>pocas horas) | Variable |

2.2.7 Evaluación de la terapia TENS

Para constatar el efecto de la terapia TENS en el organismo se requiere de aplicar un cuestionario al paciente, ya que actualmente no existe alguna herramienta capaz de otorgar resultados concisos de la respuesta muscular antes y después de la sesión terapéutica. A continuación, se muestra un ejemplo de estos cuestionarios, el cual es tomado de la investigación realizada por Melzak.

McGill - Melzack Pain Questionnaire

Patient's Name _____ Date _____ Time _____ an/pm
 Analgesic(s) _____ Dosage _____ Time Given _____ an/pm
 _____ Dosage _____ Time Given _____ an/pm

Analgesic Time Difference (hours): +4 +1 +2 +3
 PRI: S _____ A _____ E _____ M(S) _____ M(AE) _____ M(T) _____ PRI(T) _____
 (1-10) (11-15) (16) (17-19) (20) (17-20) (1-20)

| | |
|--------------|-----------------|
| 1 FLICKERING | 11 TIRING |
| QUIVERING | EXHAUSTING |
| PULSING | 12 SICKENING |
| THROBBING | SUFFOCATING |
| BEATING | 13 FEARFUL |
| FOUNDING | FRIGHTFUL |
| 2 JUMPING | TERRIFYING |
| FLASHING | 14 PUNISHING |
| SHOOTING | GRUELLING |
| 3 PRICKING | CRUEL |
| BORING | VICIOUS |
| DRILLING | KILLING |
| STABBING | 15 WRETCHED |
| LANCINATING | BLINDING |
| 4 SHARP | 16 ANNOYING |
| CUTTING | TROUBLESOME |
| LACERATING | MISERABLE |
| 5 PINCHING | INTENSE |
| PRESSING | UNBEARABLE |
| GNAWING | 17 SPREADING |
| CRAMPING | RADIATING |
| CRUSHING | PENETRATING |
| 6 TUGGING | PIERCING |
| PULLING | 18 TIGHT |
| WRENCHING | NUMB |
| 7 HOT | DRAWING |
| BURNING | SQUEEZING |
| SCALDING | TEARING |
| SEARING | 19 COOL |
| 8 TINGLING | COLD |
| ITCHY | FREEZING |
| SMARTING | 20 NAGGING |
| STINGING | NAUSEATING |
| 9 DULL | AGONIZING |
| SORE | DREADFUL |
| HURTING | TORTURING |
| ACHING | PPI _____ |
| HEAVY | 0 No pain |
| 10 TENDER | 1 MILD |
| TAUT | 2 DISCOMFORTING |
| RASPING | 3 DISTRESSING |
| SPLITTING | 4 HORRIBLE |
| | 5 EXCRUCIATING |

PPI _____ COMMENTS: _____

CONSTANT
PERIODIC
BRIEF

| | | |
|--------------------|-------------------|-----------------|
| ACCOMPANYING | SLEEP: _____ | FOOD INTAKE: |
| SYMPTOMS: | GOOD _____ | GOOD _____ |
| NAUSEA _____ | FITFUL _____ | SOME _____ |
| HEADACHE _____ | CAN'T SLEEP _____ | LITTLE _____ |
| DIZZINESS _____ | COMMENTS: _____ | NONE _____ |
| DROWSINESS _____ | | COMMENTS: _____ |
| CONSTIPATION _____ | | |
| DIARRHEA _____ | | |
| COMMENTS: _____ | ACTIVITY: _____ | COMMENTS: _____ |
| | GOOD _____ | |
| | SOME _____ | |
| | LITTLE _____ | |
| | NONE _____ | |

Figura 2.2.7.1: Cuestionario aplicador por Melzack para el tratamiento de TENS para aliviar el dolor.[5]

Las clases de cada sección son sensoriales, para el punto 1 al 10; afectivo, del punto 11 al 15; evaluativa, para el punto 16; y diversos, para el punto 17 al 20. El valor de clasificación para cada punto se basa en la posición de la palabra establecida. La suma de los valores de rango es el índice de valoración del dolor. El índice de la intensidad del dolor se basa en una escala de 0 a 5.

De esta forma se puede tener una aproximación de los cambios sensoriales en el paciente antes y después de que la terapia fue aplicada.

2.2.8 Electrodo

Convierten las corrientes iónicas del organismo, como las producidas en el caso de biopotenciales, en corrientes electrónicas. Los electrodos se pueden clasificar como: adquisición superficial o interna, microelectrodos y electrodos para estimulación[6].

Electrodos usados en la terapia TENS

Algunas de las consideraciones fundamentales que se deben de tener en cuenta al momento de tomar una elección de un electrodo son: forma de onda de estimulación, material de fabricación, corriente de estimulación, es por ello que los electrodos más indicados con una terapia son los electrodos de estimulación. En caso de no escoger bien el tipo de electrodo se puede tener una corriente de estimulación que produzca oxidación en éste, lo que ocasiona que se consuma y resulte tóxico para el tejido con el que esté en contacto. Este tipo de electrodos también se puede emplear en marcapasos, estimuladores funcionales y desfibriladores cardíacos[6].

Circuito equivalente de los electrodos

Se han establecido diferentes modelos eléctricos de los electrodos, incluyendo la interface entre electrodo y piel. En la siguiente figura se muestra un circuito equivalente que incluye el electrodo, el contacto con el electrolito (gel), la epidermis y la capa dérmica más profunda. En el caso de adquisición de respuesta electrodérmica se debe de tener en consideración las glándulas y conductos sudoríparos[6].

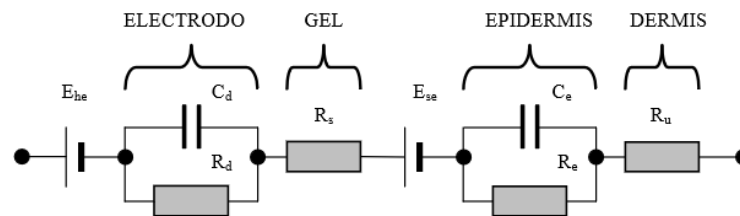


Figura 2.2.6.1: Circuito equivalente electrodo-electrolito-piel.

2.3 Sistema nervioso

Es el regulador de todas las funciones del organismo. Su unidad estructural es la neurona, una clase de célula tan especializada que ha perdido la facultad de reproducirse. Su propiedad principal es la excitabilidad, o capacidad de responder a cualquier modificación del ambiente mediante un impulso eléctrico transmisible denominado estímulo. Las neuronas se conectan unas con otras mediante una unión llamada sinapsis, en la que una sustancia química, la acetilcolina, transmite los impulsos[7].

2.3.1 Divisiones o constitución

Considerado en conjunto, se divide en: órganos centrales, que forman el sistema nervioso central, y órganos periféricos (en relación con los órganos centrales), que constituyen el sistema nervioso periférico[7].

Sistema nervioso central

Es la parte alojada en el canal óseo craneorraquídeo, integrada esencialmente por la sustancia blanca cuya función principal es conducir el impulso nervioso y la sustancia gris que se encarga de integrar reflejos y generar impulsos nerviosos. En la medula espinal la sustancia gris se sitúa en la zona central del órgano y la blanca lo hace periféricamente mientras que en el encéfalo ocurre a la inversa[7].

El sistema nervioso central está integrado por células nerviosas y fibras mielíticas y mielínicas (prolongaciones de las células nerviosas). Estas últimas están envueltas en vaina lipídica. La sustancia blanca consta de fibras, y la gris de células nerviosas y fibras; existe también otro componente del tejido nervioso: la neuroglia. Además de la célula espinal, dentro del sistema nervioso central se hallan el encéfalo, dividido en: bulbo, protuberancia, mesencéfalo, diencéfalo, telencéfalo y cerebelo[7].

Sistema nervioso periférico

Este sistema está integrado por nervios y ganglios. Los nervios, según sus funciones se clasifican en: nervios motores, especializados en la musculatura estriada, y en los músculos lisos y del corazón; y nervios sensoriales, que aportan los estímulos de la sensibilidad de la piel o del interior del organismo[7].

La mayoría de los nervios del organismo son mixtos, es decir, con un componente sensorial y otro motor.

Los ganglios nerviosos se sitúan en el trayecto de los nervios sensoriales y están compuestos por células y fibras nerviosas.

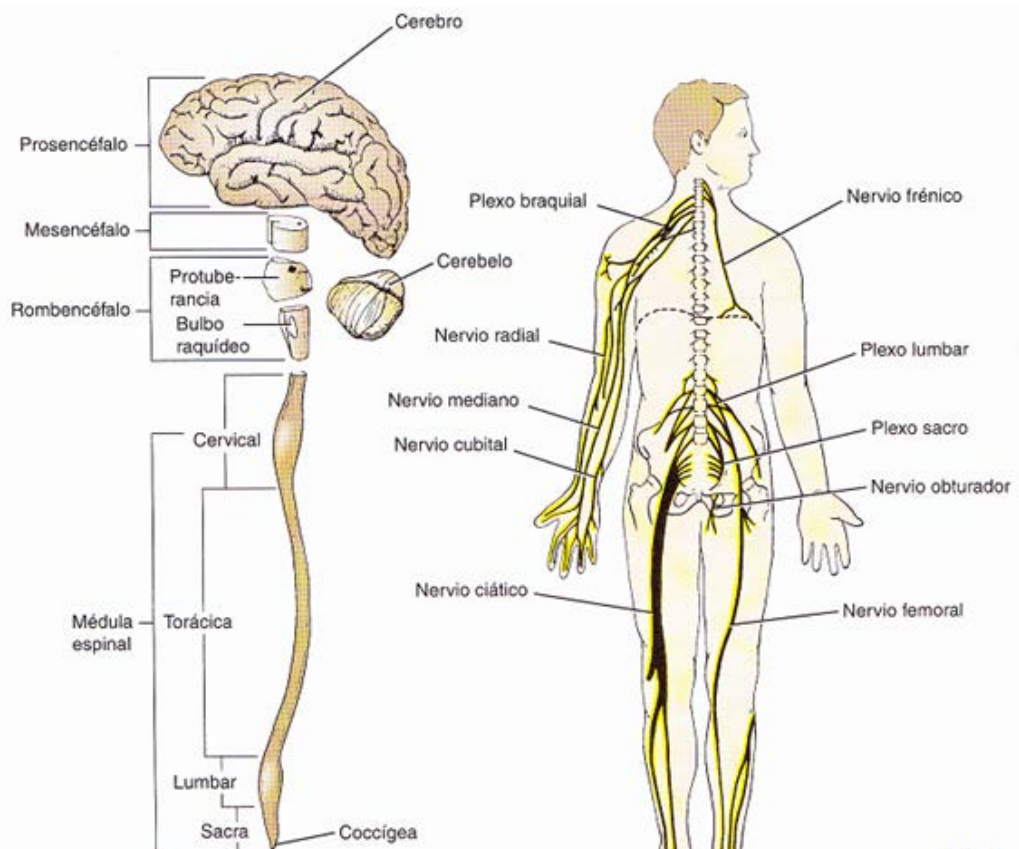


Figura 2.3.1.1: Estructura del Sistema Nervioso (Central y periférico)

Tejidos sensoriales

Transmiten la información sensitiva desde los receptores repartidos por la superficie de todo el cuerpo y desde algunas estructuras profundas. Esta información penetra al Sistema Nervioso Central a través de los nervios periféricos y se transporta de inmediato hasta múltiples zonas sensitivas. Son los encargados de manejar los estímulos como dolor, temperatura y presión[7].

Tejidos motores

Los músculos y glándula son los que manejan los impulsos desde el Sistema Nervioso Central hacia las células efectoras igual que las sensitivas[7].

2.3.2 Nocicepción

La capacidad para detectar y reaccionar a los estímulos que comprometen la integridad del organismo se puede definir como nocicepción. Para ello, el organismo emplea receptores específicos o nociceptores, que son estructuras para percibir los estímulos de naturaleza desagradable, y efectores, que son

estructuras que responden a la entrada de estos estímulos. La respuesta de los efectores depende del tipo de estímulo y posteriormente, de la decisión central y periférica[7].

2.3.3 Sistema muscular

Los músculos son órganos contráctiles (que son capaces de contraerse con facilidad) y se clasifican en: estriados, que funcionan bajo el dominio de la voluntad, y lisos, que lo hacen fuera del control de la voluntad. La musculatura estriada se inserta en el esqueleto, directamente o a través del tejido conjuntivo (tendones) [7].

Los músculos y tendones están envueltos por membranas fibrosas (aponeurosis) y muchas veces entre el músculo y el hueso, o entre el tendón y el hueso, se interponen bolsas grasas repletas de un líquido con función amortiguadora [7].

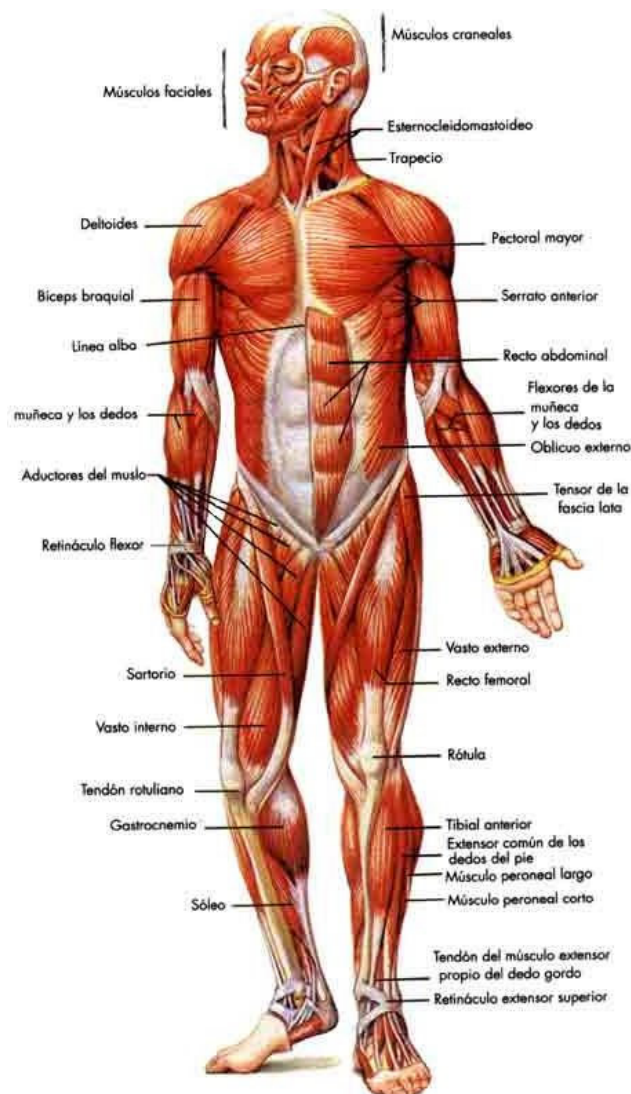


Figura 2.3.3.1. Diagrama del Sistema Muscular.

2.4 La piel

La piel humana es un órgano complejo, el cual cubre el exterior del cuerpo. Es el órgano humano más grande, tanto en peso puro como en superficie. Está conformado por tres principales capas: epidermis, dermis y tejido subcutáneo, como se muestra en la Figura 2.4.1 [8].

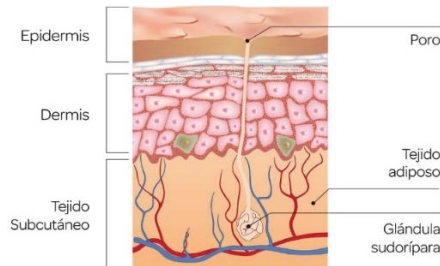


Figura 2.4.1. Capas de la piel.

La epidermis es la capa más externa, la cual actúa como una barrera contra la radiación, sustancias químicas y patógenas limitando al mismo tiempo la pérdida de agua a través de la piel. Entre la epidermis y el tejido subcutáneo se encuentra la dermis, cuyas funciones principales son la de suministrar a la epidermis con nutrientes, además de proporcionar tanto resistencia mecánica como elasticidad. La capa más interna, el tejido subcutáneo, consiste principalmente de grasa y tejido conectivo laxo y funciona como un aislante y amortiguador[8].

El tejido subcutáneo o también denominado como hipodermis cuya interpretación literal es, por debajo de la piel, implicaría que la piel abarque sólo dos capas. Sin embargo, debido a la interacción y funcionalidad del tejido subcutáneo con la epidermis y la dermis, un enfoque es verlos como una parte integral de la piel[8].

2.5 El dolor

El dolor se define como una experiencia sensorial y emocional desagradable asociada a un daño real o potencial del tejido, o se describe en términos de dicho daño. El dolor constituye un mecanismo de protección, aparece siempre que cualquier tejido resulta dañado y hace que el individuo reaccione apartando el estímulo doloroso [7].

El dolor se ha clasificado en dos tipos fundamentales: dolor rápido y dolor lento. El dolor rápido se siente en cuestión de 0.1 segundos después de haber aplicado el estímulo correspondiente (ejemplos de este dolor puede ser cuando se clava una aguja en la piel), mientras que el dolor lento no empieza hasta un período mínimo de 1 segundo y a continuación crece con lentitud a lo largo de muchos segundos y en ocasiones hasta minutos [7].

2.5.1 Receptores para el dolor

Los receptores para el dolor de la piel y de otros tejidos siempre son terminaciones nerviosas libres. Se encuentran extendidos por las capas superficiales de la piel, así como en ciertos tejidos internos. La mayor parte de los demás tejidos profundos no reciben más que terminaciones dispersas para el dolor [7].

El dolor puede despertarse por múltiples tipos de estímulo los cuales se dividen en: estímulos dolorosos mecánicos, térmicos y químicos. El dolor rápido se suscita a partir de los tipos de estímulo mecánico y térmico, mientras que el dolor lento puede surgir con cualquiera de los tres [7].

2.5.2 Teoría de compuertas

La teoría de la compuerta del dolor es una explicación de cómo la mente desempeña un papel esencial en la opinión del dolor. Sugirieron que hay un "sistema que bloquea" a nivel del sistema nervioso central que hace que se abra o se cierre las vías del dolor. Las puertas se pueden abrir, dejando proceder el dolor a través de las fibras aferentes y eferentes desde y hacia el cerebro, o viceversa, las puertas se pueden cerrar para bloquear estos caminos del dolor, este mecanismo puede ser influenciado por impulsos nerviosos eferentes. Los impulsos eferentes son afectados por una enorme variedad de factores psicológicos conocidos para influenciar el cerebro.

El mensaje enviado del cerebro (vías eferentes) al área donde se siente el dolor se puede influenciar por la interpretación de la mente. Muchos factores externos afectan la interpretación del dolor tal como, emociones y experiencias anteriores con dolor y ansiedad. Esta teoría del dolor integra los componentes fisiológicos, psicológicos, cognoscitivos, así como emocionales que regulan la percepción del dolor.

La teoría de la compuerta explica por qué se disminuye el dolor cuando el cerebro está experimentando una sensación de distracción. En estas circunstancias, la percepción del dolor se disminuye porque la interpretación del dolor es modulada por la experiencia agradable de distracción [1], [9].

2.6 El organismo como un conductor

El organismo es un conductor de segundo nivel, es decir, los iones contenidos en las disoluciones (mezcla homogénea a nivel molecular o iónico de dos o más sustancias que no reaccionan entre sí, cuyos componentes se encuentran en proporción que varía entre ciertos límites) y dispersiones coloidales (sistema formado por dos o más fases, normalmente una continua, en forma de fluido y energía aplicada). Desde el punto de vista eléctrico y magnético, se puede dividir al organismo en:

- Tejidos pocos conductores
- Tejidos medianamente conductores
- Tejidos relativamente buenos conductores
- Tejidos generadores de electricidad

Fundamentalmente, la mayor o menor conectividad va a depender del mayor o menor contenido de agua como disolvente y sus solutos (dispersiones coloidales y disoluciones) los cuáles van a ser conductores fundamentales de la energía eléctrica por el organismo. El agua sola y por sí misma no es buena conductora, pero sí, en cambio, lo son los solutos en ella disueltos.

Por lo anterior, el hueso, la grasa, piel callosa y gruesa, el pelo y las uñas serán poco conductores. Mientras que la piel, tendones, fascias gruesas y cartílagos se comportarán como medianamente conductores. La sangre, linfa (líquido que se encuentra entre las células del cuerpo humano), líquidos intra y extracelulares, tejidos musculares, vísceras, hormonas, tejido conjuntivo, líquidos y jugos orgánicos y el tejido nervioso son representantes de una buena conducción debido a su proporción de agua y la cantidad de electrolitos que sustentan.

La energía eléctrica se desplaza por el organismo en forma de electrones asociados a iones que se moverán por la fuerza electromotriz aplicada:

- a) Bien con electrodos procedentes de una fuente de energía externa.
- b) Por las cargas internas del organismo.

Se deduce entonces que, dentro del organismo se desplazan sustancias y elementos químicos que componen los tejidos, los cuales funcionan adecuadamente dependiendo:

- Las distintas proporciones de las sustancias antes mencionadas.
- Su facilidad para desplazarse.
- Su capacidad para reproducir reacciones bioquímicas que desencadenaban el trabajo encomendado a cada tejido.

Los iones son atraídos por la polaridad eléctrica opuesta y repelidos por la polaridad del mismo signo; esto quiere decir que, unos iones se moverán en un sentido y otros lo harán en el opuesto, rompiendo las proporciones y composición

de las disoluciones que se ven afectadas por la corriente eléctrica de aplicación externa [10].

2.7 Efectos del organismo ante la aplicación de electroterapia

2.7.1 Efectos físico-químicos en el organismo ante la aplicación de electroterapia

- Calor. El agua actúa como electrolito al estar en contacto con la piel.
- Disociación. Divide los componentes químicos del tejido cutáneo.
- Endósmosis. Los radicales químicos se trasladan de forma general hasta el cátodo y se acumulan en esta zona mayor cantidad de agua.
- Tonicidad. En el ánodo se produce un estiramiento de la piel [10].

2.7.2 Efecto biológico en el organismo ante la aplicación de electroterapia

- Polarización. El cuerpo humano actúa como una resistencia al paso de la corriente eléctrica (2000 a 3000W), creándose un voltaje entre los electrodos que determina en el paciente la sensación de corriente [10].

2.7.3 Efectos fisiológicos en el organismo ante la aplicación de electroterapia

Tabla V: Efectos de los polos positivo y negativo en electroterapia

| Polo positivo (+) | Polo negativo (-) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Atrae iones negativos | Atrae iones positivos |
| Atrae Oxígeno | Atrae Hidrógeno |
| Reacción ácida | Reacción alcalina |
| Vasoconstricción | Licuefacción de tejidos |
| Causa isquemia | Causa hiperemia |
| Detiene Sangrado | Causa sangrado |
| Menos bactericida | Más bactericida |
| Disminuye la excitabilidad nerviosa | Incrementa la excitabilidad nerviosa |
| Menos irritante para la piel | Más irritante para la piel |
| Disminuye el dolor agudo | Disminuye el dolor crónico |

Efecto estimulante

El efecto estimulante primario de la corriente eléctrica sobre el tejido, es más o menos pronunciado según la concentración de iones en reposo. Esta variación produce efectos en las membranas celulares que propician una separación de cargas electroquímicas dentro de la célula y los líquidos extracelulares [10].

Respuesta del tejido humano al flujo de la corriente

El tejido humano responde de diferente manera al paso de la corriente, esto depende del tipo de tejido y la cantidad de corriente. Existen tejidos excitables y no excitables pero la electricidad puede estimular ambos. Los tejidos como las membranas celulares, las fibras musculares, nervios periféricos, responderán mejor ante la presencia de la corriente que los no excitables como los huesos, fascias, tendones y ligamentos.

El ambiente interno de una célula es más negativo comparado con el exterior de la membrana que es positivo. Cuando se aplica una corriente, los iones y electrones son impulsados y dirigidos hacia la membrana celular o muscular, este flujo unidireccional provoca que las cargas positivas internas de la membrana son también atraídas hacia el cátodo y dirigiéndose hacia él, se acercan a la membrana haciéndola más positiva. La carga neta a través de la membrana va desde **-70 hasta -90mV**.

Este breve momento en la membrana causará un repentino cambio de polaridad a través de ella llamada *despolarización*, que permitirá el paso del sodio y potasio al interior de la célula. La membrana inmediatamente buscará restaurar su equilibrio, con cargas negativas dentro de ella, a este proceso se le llama *repolarización*. Mientras sucede este proceso, la célula no podrá excitarse nuevamente ya que se encuentra en un *período refractario*; una vez *repolarizada*, está lista para otra *despolarización*. Al evento completo se le llama *potencial de acción*.

Un ejemplo es que la despolarización de la membrana muscular llevará a la contracción de las fibras musculares, dependiendo del tipo de corriente será la resultante, así se obtendrá una respuesta sensitiva o motora. La corriente requerida para lograr la despolarización de una membrana muscular, necesitará mayor densidad de energía que una membrana de nervio periférico.

Las fibras dolorosas necesitarán una mayor exposición de la corriente en tiempo e intensidad antes de alcanzar la despolarización; así mismo, las células de un músculo denervado requieren intensidades y duraciones de pulso significativamente más altas para obtenerlas.

La corriente siempre viajará por la vía que le ofrezca menor resistencia, en base a la constitución anatómica, se puede predecir el siguiente comportamiento:

- Un tejido más humectado, opondrá menor resistencia.
- Un axón con un diámetro mayor conducirá la corriente más fácilmente que una fibra nerviosa delgada.
- Entre más superficial esté un nervio, se encontrará más cercano al electrodo, por lo que recibirá mayor densidad de energía.
- Típicamente se excita primero el nervio sensitivo, seguido del nervio motor y por último los tejidos afectados por el dolor [10].

2.7.4 Resistencia de la piel

Factores que influyen en la resistencia de la piel

- Edad del paciente: La queratinización del tejido, la hidratación y probables alteraciones en la sensibilidad
- Región corporal: Cada región tiene diferentes umbrales de tolerancia, algunas están expuestas a las agresiones propias del medio ambiente haciéndose menos sensibles. Las enfermedades degenerativas y la dieta juegan un papel importante en los umbrales, así como el horario mismo del día del tratamiento.
- Humedad de las esponjas de los electrodos: las esponjas deben estar completas y en buen estado, la humedad deber ser suficiente para lograr una buena conducción especialmente para la corriente directa. No debe gotear ya que el agua que escurra puede cerrar el circuito y provocar una descarga eléctrica. Dependiendo de la corriente elegida y la sensibilidad o área a tratar, se recomienda utilizar doble capa de esponja a fin de prevenir quemaduras.
- Irrigación del tejido: se refiere a la humedad que contiene el tejido a tratar, debe considerarse antes de la aplicación, si es un tejido excitable o no excitable.
- La piel debe estar en condiciones íntegras: Si existen heridas, por pequeñas que sean serán puntos de concentración de energía, por lo que puede provocar una quemadura. Si es un paciente con mucha vello no es recomendable hidratar las esponjas al principio y en el intermedio del tratamiento a fin de conservar una buena conducción [8], [11].

Resistencia que ofrece la piel

Tabla VI: Resistencia de la piel bajo diferentes condiciones de corriente y frecuencia [8].

| | |
|------------------------------|---------------------|
| Corriente Directa (50 Hz) | 150-250 k Ω |
| Corriente Directa (100 Hz) | 250-500 k Ω |
| Corriente Alterna (50 Hz) | 100- 150 k Ω |
| Corriente alterna (100 Hz) | 50-80 k Ω |
| Corriente Alterna (1,000 Hz) | 2-5 Ω |

2.7.5 Causas de lesiones al aplicarse electroterapia

- Esponjas con humedad insuficiente.
- Esponjas deterioradas o muy usadas.
- Uso de electrodos de carbono (empleando C.D.).
- Electrodo corroídos o calcificados.
- Presión de apoyo irregular sobre la superficie de la piel.

- Cambios locales de la resistencia (Disminuye al avanzar el tratamiento).
- Contacto directo del metal sobre la piel.

2.7.6 Manejo de intensidades en el tratamiento con electroterapia

Para un buen tratamiento es necesario establecer adecuadamente la intensidad de la corriente que se utilizará durante la sesión, ubicando el nivel dentro de los umbrales y eficientando así la corriente elegida para la patología a tratar, de tal manera que se obtenga un efecto cualitativo durante la misma sesión.

Escala de umbrales

- El umbral de sensibilidad es aquel en el que el paciente empieza a percibir la corriente.
- El umbral de excitación es cuando el paciente presenta una mínima contracción.
- El umbral de tolerancia es cuando existe una contracción franca, debe considerarse que el paciente puede percibir molestias con el paso de la corriente.
- El umbral del dolor es cuando la contracción es tan intensa que rebasa la tolerancia del paciente. Comúnmente dicho umbral está por debajo de los anteriores cuando existe una patología y es indispensable que regrese a su nivel normal con el manejo de la electroterapia.

En tratamientos para manejo del dolor, es decir a nivel sensorial, debe incrementarse la intensidad a medida que disminuye la percepción de la corriente para desfasar el umbral del dolor al nivel normal, en términos generales la acomodación de la percepción de la corriente se llevará a cabo entre 3 y 5 minutos dependiendo de cada paciente.

Estos aumentos se repetirán cuantas veces sean necesarios durante el tiempo que dura la aplicación de la corriente o hasta que el paciente refiera que no es necesario aumentar la intensidad ya que la percibe claramente.

En tratamientos de estimulación motora, fortalecimiento, resistencia o potencia, se observa la calidad deseada en cada contracción. Si la respuesta muscular disminuye aplicando todavía la misma intensidad, debe darse por terminado el tratamiento de electroterapia para evitar una fatiga mayor y desencadenar efectos adversos, puede continuar con otra modalidad terapéutica[7].

Capítulo III Desarrollo

3.1 Solución Propuesta

Con base en la teoría de la compuerta de Melzack y Wall, así como en los parámetros preestablecidos para la corriente TENS, se procedió a diseñar un circuito bajo las siguientes especificaciones:

Tabla VII: Especificaciones de la forma de onda para una terapia TENS

| | |
|--|-----------|
| Duración del Pulso PD[=]μs | 50 - 400 |
| Frecuencia f[=]Hz | 1 - 200 |
| Corriente I[=]ma | 0.1 - 120 |

La forma de onda considerada es una onda cuadrada, simétrica y bifásica para así lograr una componente de corriente directa con valor de cero.

El diagrama a bloques simplificado propuesto fue el siguiente:

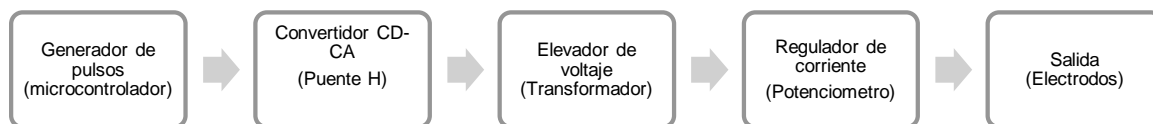


Fig. 3.1.1 Diagrama a bloques propuesto para el diseño del generador de corrientes TENS

El generador de pulsos generará dos salidas con pulsos de valor $PD/2$ a una frecuencia de valor f , los cuáles, al estar conectados a las dos entradas de control del puente H dan como resultado la forma de onda típica para el TENS, con la posibilidad de manipular el ancho del pulso, la frecuencia y el número de pulsos en caso de estar usando el modo ráfaga.

Por motivos de seguridad siempre se recomienda que los generadores de corrientes para rehabilitación no deben estar conectados a la línea de alimentación, con el fin de evitar riesgos de descargas accidentales en el paciente. Debido a esto, se propuso utilizar una pila de 9V como fuente de alimentación.

Con la condición anterior, la señal obtenida a la salida del puente H sería un pulso de CA de forma cuadrada, con un $V_p=9V$ cuyo tiempo en alto y bajo sería equivalente a $PD/2$ y el periodo estaría definido por la frecuencia. Cabe resaltar que estos tiempos dependen del modo de programa a utilizar o los parámetros seleccionados.

Para la mayoría de los casos, el tiempo en que $V \neq 0$ es mucho menor al tiempo en que $V=0$, por lo cual el voltaje eficaz de la onda disminuirá considerablemente, por ende, al ser directamente proporcional, la corriente eficaz también lo hará.

A continuación, se presenta la ecuación con la cual se obtiene el valor del voltaje eficaz de cualquier onda.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} \dots (2.1)$$

Como se puede observar este voltaje, depende de las variaciones en el tiempo del voltaje en la señal analizada.

Para cumplir con los requisitos de corriente establecidos por el TENS se analizarán los valores picos del pulso.

Si se considera una impedancia en la piel de $100 \text{ k}\Omega$, por Ley de Ohm es posible obtener la corriente pico máxima a lograr con el puente H sería de:

$$I = \frac{V}{R} \dots (2.2)$$

$$I_{pp} = \frac{18 V_{pp}}{100 \times 10^3 \Omega} = 0.18 \text{ mA} \dots (2.3)$$

Como se puede observar esta corriente es demasiado baja, y apenas alcanza a llegar al límite inferior de amplitud de la corriente para despolarizar las fibras nerviosas periféricas dentro de la piel que marca la teoría de TENS

Por lo que, para obtener una amplitud de corriente mayor se decidió elevar el voltaje de los pulsos haciendo uso de un transformador con relación 1:10, por lo cual el nuevo voltaje a la salida del transformador sería de 180 Vpp .

Con esto:

$$I_{pp} = \frac{180 V_{pp}}{100 \times 10^3 \Omega} = 1.8 \text{ mA} \dots (2.4)$$

Al parecer esta corriente no es suficiente para cubrir el rango de amplitudes que marca la teoría del TENS, sin embargo, este cálculo se ha realizado considerando una Impedancia de $100 \text{ k}\Omega$, pero siempre se debe mantener presente que ésta varía en cada organismo, a diferentes frecuencias y dependiendo de la parte del cuerpo donde se esté aplicando la corriente.

3.2 Generador de pulsos

Para generar los pulsos se tuvo como primera opción diseñar un circuito analógico-discreto, sin embargo, debido a que los TENS comerciales cuentan con varios modos de programa preestablecidos, además de una pantalla y botones para crear una interfaz de control de usuario, se tomó la decisión de emplear un microcontrolador de bajo costo como es el caso de Arduino, con el fin de reducir espacio, economizar costos, añadir versatilidad y capacidad de expansión para el generador de corrientes TENS.

El programa creado para el microcontrolador cuenta con las siguientes características

- Una pantalla LCD 20x4 para el despliegue de datos.
- Un botón para selección de programa.
- Dos botones para controlar la frecuencia (uno para aumentarla y el otro para disminuirla).
- Dos botones para cambiar el ancho de pulso, aumentarlo y disminuirlo.
- Un botón para seleccionar el número de pulsos en el modo ráfaga.

Al consultar los parámetros de diferentes modelos de TENS elaborados por diversas compañías, se decidió crear un programa con 11 modos de operación, los cuales incluyen la terapia convencional con parámetros de frecuencia y ancho de pulso típicamente usados, el modo de modulación, un modo ráfaga con frecuencia, ancho de pulso y número de pulsos preestablecidos, así como un modo ráfaga con la posibilidad de modificar los tres parámetros anteriormente mencionados.

El diagrama de flujo del sistema propuesto se muestra en el Apéndice B. Diagramas de flujo y códigos fuente.

3.3 Puente H

Para generar el pulso bifásico a partir de una señal de CD se decidió usar un puente H con un circuito integrado, con la finalidad de economizar espacio. El Integrado usado fue el *L298N* de la compañía ST microelectronics.

A continuación, se muestran las características principales del circuito integrado, así como su diagrama de conexión.

Características principales:

- Voltaje de operación máximo de 46 Volts.
- Corriente máxima de 4 Amperes.
- Bajo voltaje de saturación.
- Protección de altas temperaturas.
- Alta inmunidad a ruido.

Diagrama de conexión:

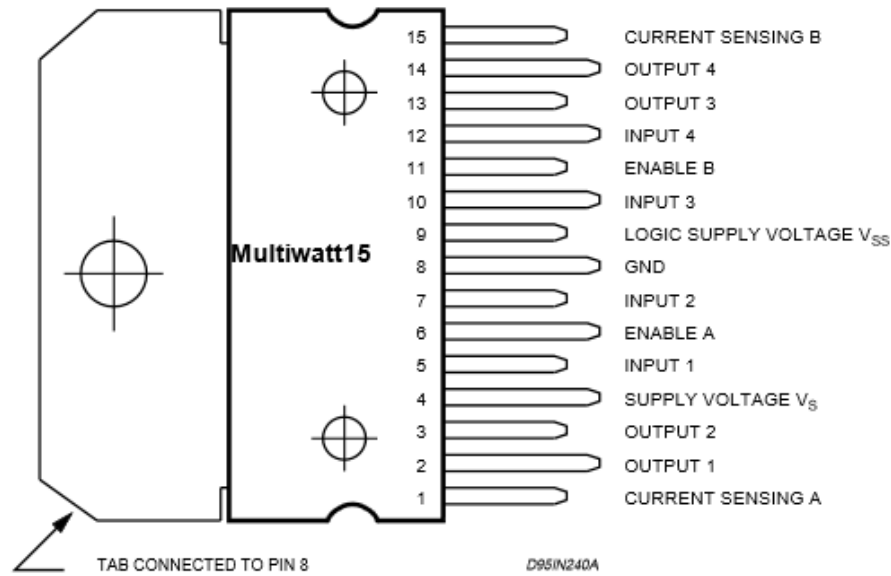


Fig. 3.3.1. Encapsulado del integrado de puente H utilizado, así como la descripción de cada uno de sus pines.

En el cual, los pines 5 y 7 son las entradas del puente H, por lo que serán conectados a la salida del microcontrolador. Las terminales 2 y 3 son las salidas del puente H las cuales se conectarán en el devanado secundario del transformador, para que a partir de una señal de CA de aproximadamente 18 Vpp genere una nueva señal amplificada con una relación 1 a 10. Las terminales 8 y 9 son las terminales de alimentación. Finalmente, la terminal número 6 es conectado a V_{cc} , cuya función es habilitar la sección A del controlador, la terminal 1 se conectó a tierra y finalmente el pin 4 a V_{cc} que es el valor del Voltaje pico deseado para la señal generada por el integrado.

A continuación, se presenta el diagrama de bloques, teniendo en consideración los puntos desarrollados anteriormente.

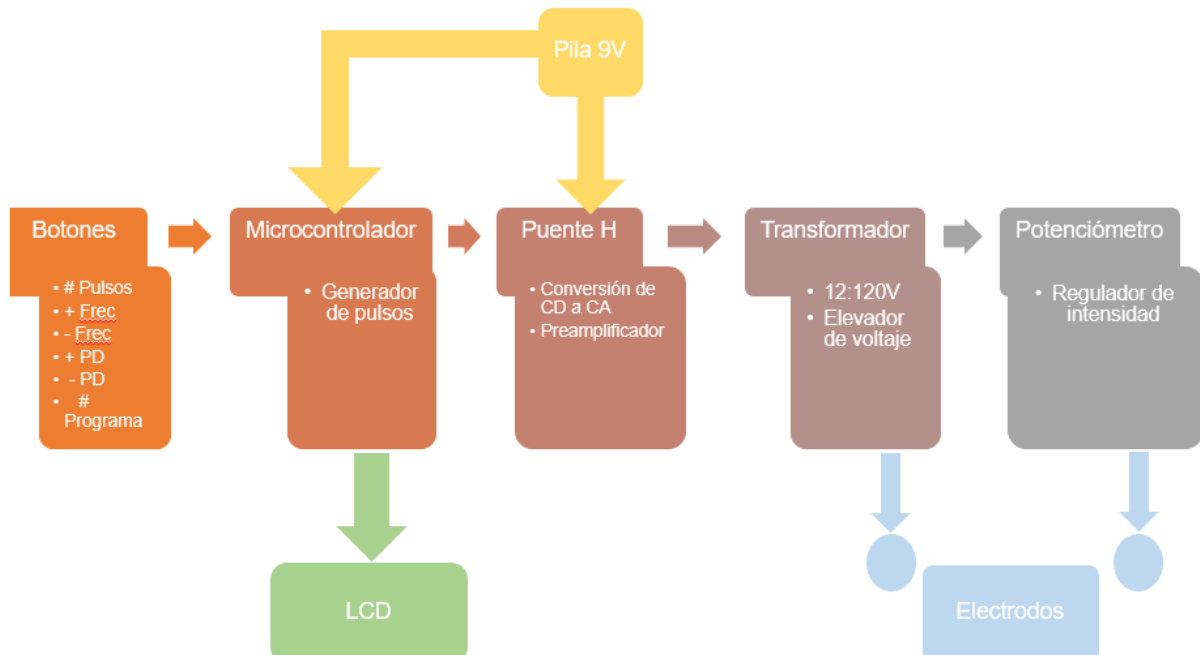


Fig. 3.3.2. Diagrama a bloques del circuito propuesto para un generador de corrientes TENS

En el apéndice A, se mostrará el diseño del circuito realizado para la elaboración del prototipo.

Capítulo IV Resultados

4.1 Interfaz de usuario

Para las pruebas de la interfaz de usuario se midieron los pulsos generados para cada programa y verificando que los tiempos de pulso y la frecuencia fueran correctos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el modo de programa número 3, el cual está dentro de la modulación típica del TENS, con una frecuencia de 200 Hz y un ancho del pulso de 100 μ s, recordando que el pulso es una señal de corriente alterna bifásica, simétrica.

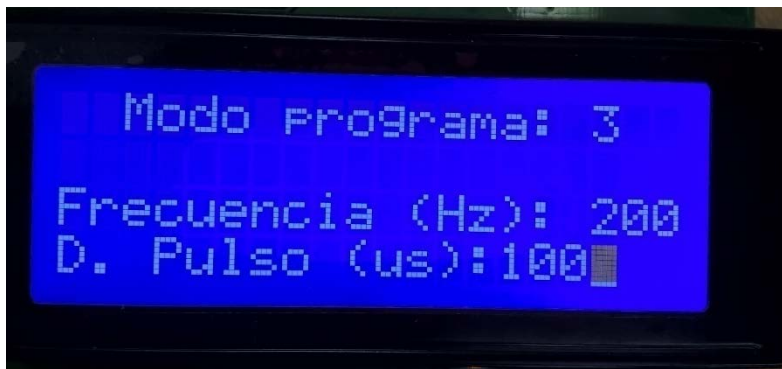


Fig. 4.1. Interfaz de usuario del prototipo desarrollado en el cual se despliegan los datos de los parámetros que serán propiciados en la terapia.

4.2 Señales obtenidas a la salida del microcontrolador

La señal obtenida en la salida del microcontrolador, es la de dos terminales las cuáles activan el puente H, creando la señal de CA. A continuación, se muestra la visualización de dichas señales en el osciloscopio donde se aprecia cómo los pulsos tienen una forma similar a espigas, lo que se debe a la relación entre el tiempo del pulso y el periodo de la forma de onda completa. La frecuencia del programa disminuyó de 200 Hz a 188.7 Hz. Todas estas variaciones en el tiempo de la señal son debido al tiempo que el microcontrolador consume en ejecutar cada instrucción, puesto que el microcontrolador opera de forma secuencial.

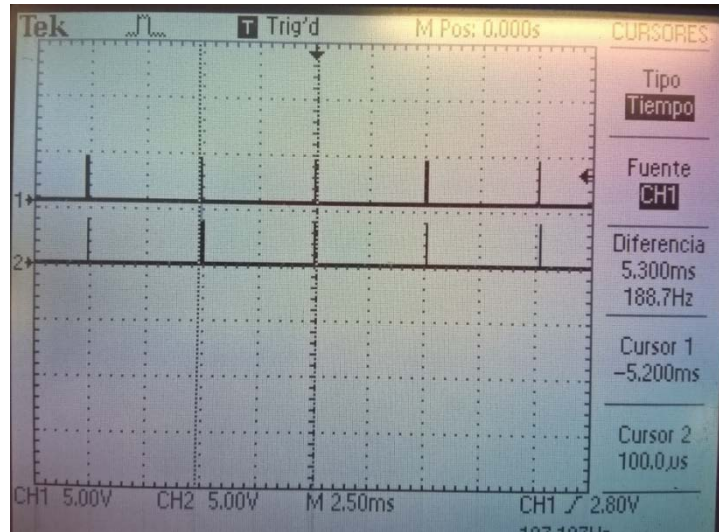


Fig. 4.2.1 Pulsos obtenidos a la salida del microcontrolador, los cuáles son empleados para disparar al puente H. En esta imagen se puede apreciar como la duración del pulso es demasiado corta en relación el periodo total de la onda.

En la siguiente imagen se muestra el valor de la duración del pulso, recordando que el ancho de pulso que se muestra en la pantalla del generador de TENS (100us) es la suma del pulso de la fase positiva, más el de la fase negativa, por lo cual cada pulso debería tener un tiempo de 50 μ s, sin embargo, el tiempo que consume el microcontrolador en ejecutar cada instrucción vuelve a alterar el valor de dicho tiempo.

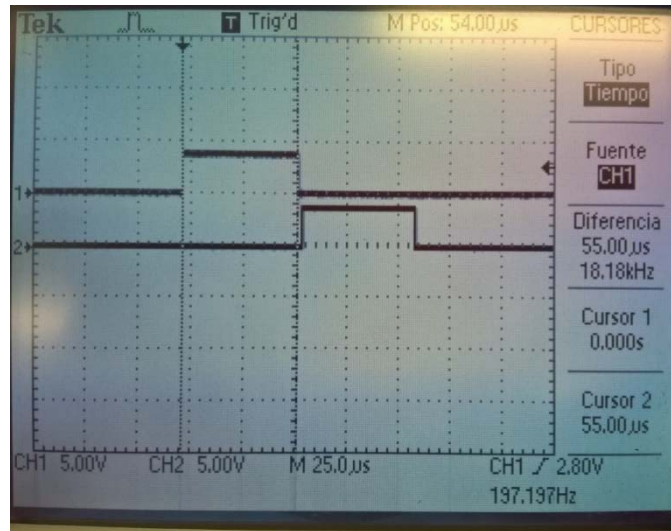


Fig. 4.2.2. Pulsos obtenidos a la salida del microcontrolador los cuales determinan el modo de programa de la terapia TENS

La siguiente imagen muestra los pulsos obtenidos a la salida del puente H, en los cuales podemos apreciar el cambio en el nivel de la amplitud, que pasó de ser de 3.3V a casi 9 V, esto debido a la descarga de la pila usada.

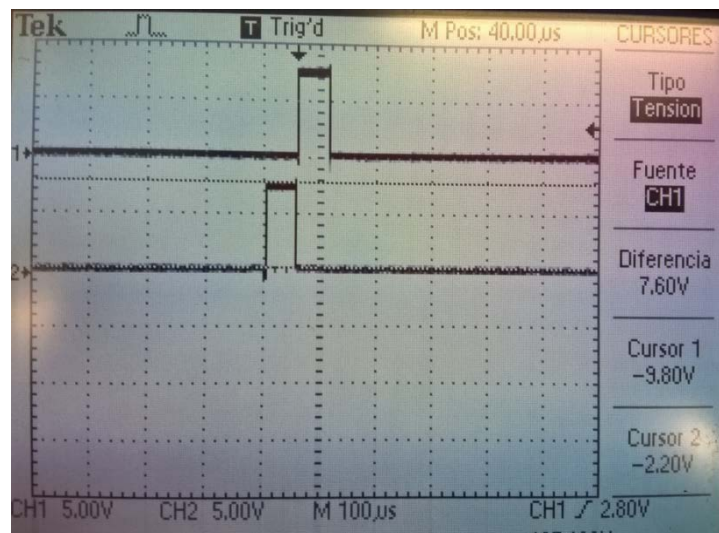


Fig. 4.2.3. Pulsos obtenidos a la salida del puente H, los cuales al aumentar de amplitud permitirán una mayor amplitud al ser amplificados nuevamente por medio del transformador.

4.3 Señales obtenidas a la salida del puente H

A continuación, se presenta la forma de onda después de haber sido convertida de pulsos de CD a una forma de onda de CA. Esta nueva forma de onda al ser de CA y estar amplificada del voltaje lógico que entrega el microcontrolador, a un voltaje de 9Vp, puede ser finalmente suministrada a la siguiente etapa la cual permitirá obtener un valor de corriente más alta al aumentar también el voltaje de la onda diez veces haciendo uso de un transformador.

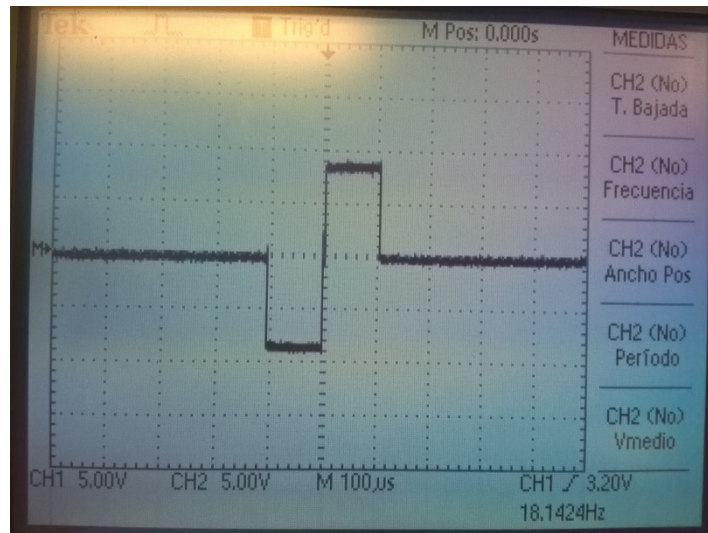


Fig. 4.3.1. Pulso obtenido a la salida del puente H, la cual ya cumple con los requisitos de la corriente tipo TENS, sin tomar en cuenta aun el valor de la carga a la que será conectada.

4.4 Señales obtenidas a la salida del transformador

Los pulsos obtenidos a la salida del transformador, se muestran en la imagen siguiente, se aprecia una deformación debido a que la carga es de tipo inductiva y al efecto transitorio propio del transformador. Sin embargo, esto no afecta en absoluto la terapia ya que la forma de onda no es establecida. El único requisito de esta es que el voltaje de CD de la onda sea cero.

Por otro lado, se nota el cambio de amplitud de la señal el cual de ser de 7.60Vp aumentó a aproximadamente 94 Vpp.

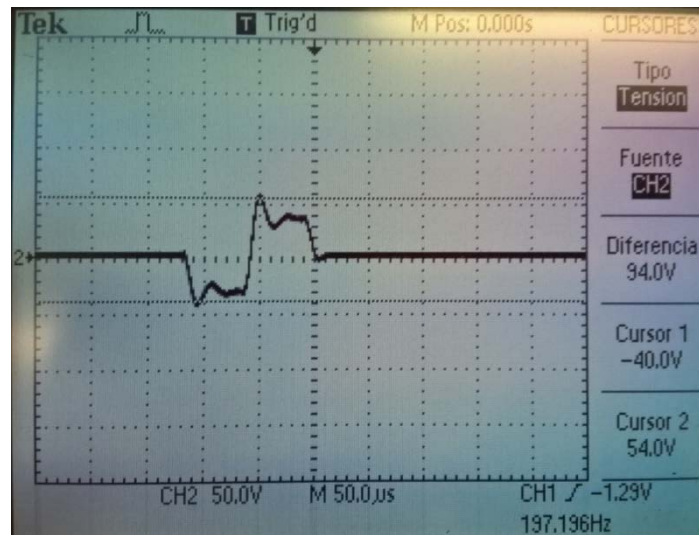


Fig. 4.4.1 Pulsos obtenidos a la salida del puente H, los cuales al aumentar de amplitud permitirán una mayor amplitud al ser amplificados nuevamente por medio del transformador.

Al simular la conexión del dispositivo a la piel por medio de una resistencia de 50 k Ω , la corriente obtenida fue muy baja, de 29.9 μ A. Esto se debe a que el multímetro mide el valor de la corriente eficaz y durante el periodo de las ondas TENS, el tiempo en que esta permanece con un voltaje de 0V es mucho mayor que cuando tiene un valor distinto a este.

Se intentó medir los pulsos de corriente con un medidor de calidad de la energía, el cual cuenta con una sonda para medir corriente, pero este no permite medir corrientes tan bajas por lo cual no se pudo obtener el valor pico de los pulsos de corriente de la onda.



Fig. 4.4.2. Corriente eficaz medida del modo de programa 3, sin ningún regulador, es decir, corriente máxima eficaz.

A continuación se presentan las imágenes de salida de pulsos en el modo tipo ráfaga, donde podemos apreciar como estos pulsos formarían varios pulsos de CA sin tener una interrupción entre ellos.

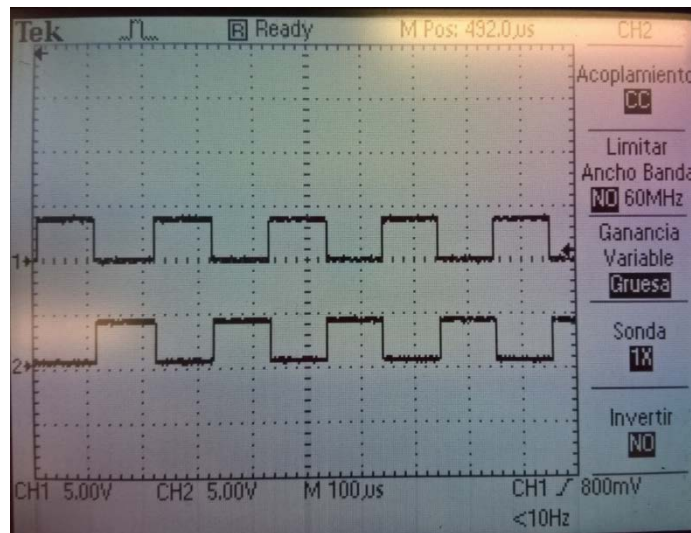


Fig. 4.4.3. Pulsos generados por el microcontrolador para obtener una forma de onda de tipo ráfaga o burst

Capítulo V Conclusiones

A partir de las investigaciones realizadas por Melzack y Wall que dieron origen a su teoría de compuertas del dolor, es que fue posible iniciar nuevos tratamientos alternativos a los medicamentos tradicionales, hasta el poder llegar a lo que hoy en día se conoce como estimulación nerviosa por corrientes eléctricas transcutáneas.

Aplicando los fundamentos teóricos de la electroterapia y de forma más específica, de la estimulación nerviosa por corrientes eléctricas transcutáneas, así como de las composiciones del cuerpo humano tales como el sistema nervioso, la piel, el dolor, etc. es que se pudo realizar el diseño de un dispositivo capaz de ofrecer terapia para estimulación nerviosa con 11 diferentes modos de aplicación, ofreciendo al usuario final una amplia variedad de personalización en la terapia. Incluyendo una interfaz simple y sencilla de uso, para que el usuario no tenga mayor problema al seleccionar la terapia deseada.

El dispositivo, además de cumplir con las características anteriores, se suma a seleccionar la intensidad deseada, ya que como se mencionó anteriormente, cada persona presenta diferente valor de resistencia en su piel, por lo que la sensación de estimulación variará de una persona a otra y al ajustar esta intensidad se abarcará a un mayor número de usuarios. Esto sin sobrepasar los niveles de corriente que puedan causar alguna contraindicación en el cuerpo humano, los cuáles se recomienda que no sean mayores a 120 mA a una frecuencia que sea de entre 1 y 200 Hz para el modo de terapia normal mientras que para el modo ráfaga las frecuencias permitidas están en un intervalo de 1 a 10 Hz.

Se recomienda, por razones de seguridad, utilizar baterías de 9 volts, para eliminar cualquier posibilidad de que se produzca alguna descarga del generador de corrientes hacia el cuerpo humano. Es decir, al emplear la batería se mantiene un nivel adecuado de corriente que no afecte la piel o el organismo del usuario.

A pesar de que los cálculos teóricos mostraban una corriente muy por debajo de los niveles estipulados para TENS, al realizar las pruebas correspondientes se tuvieron casos en los que el valor de la corriente era de tal nivel que se presentaba movimiento involuntario del músculo, lo cual indica que se superó la corriente de 120 mA. Para evitar estos niveles de corriente se colocó una perilla para regular la intensidad.

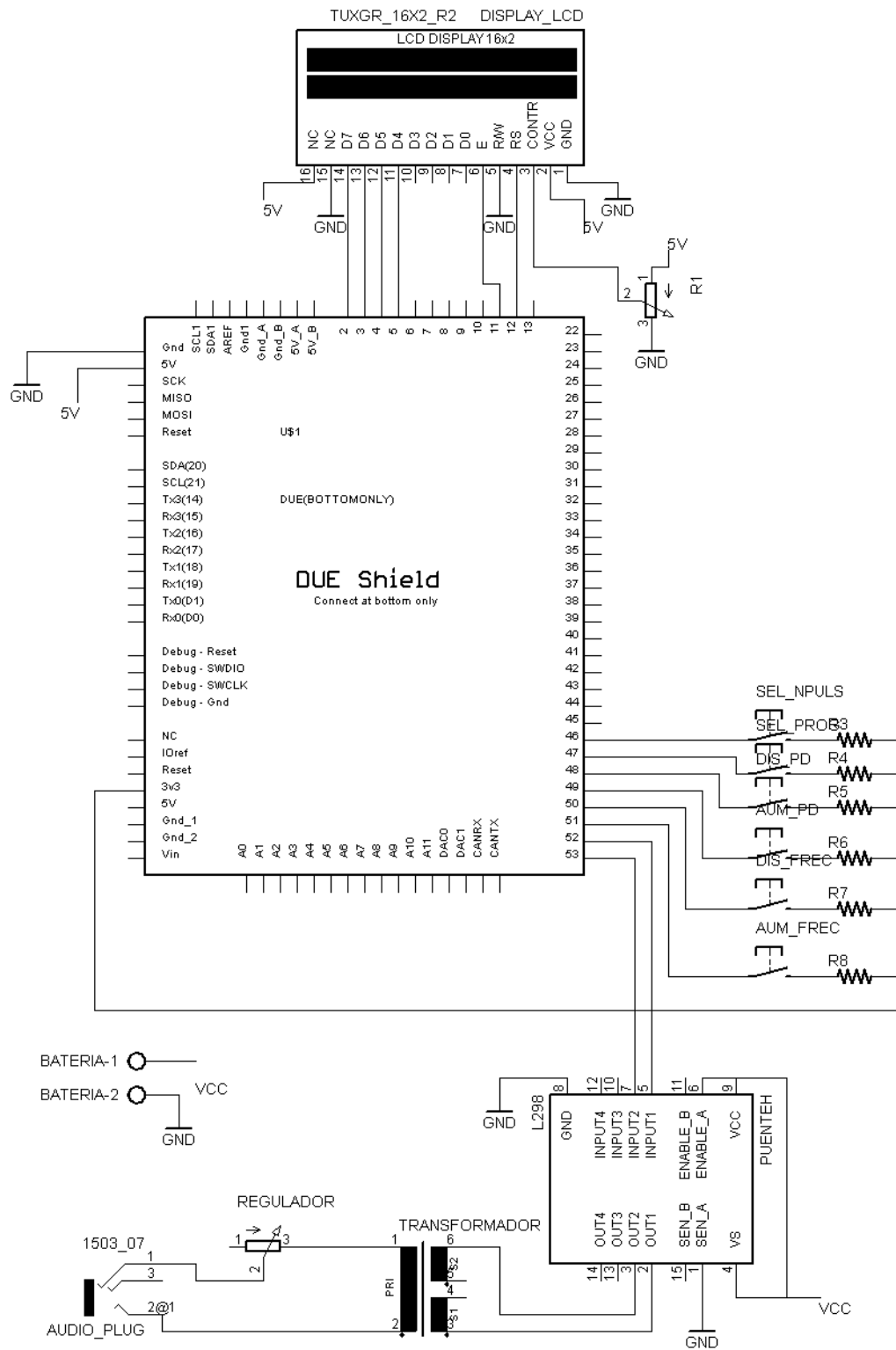
Para la construcción del prototipo se emplearon componentes de bajo costo, sin dejar de lado las características necesarias para un buen funcionamiento del mismo.

Al emplear un microcontrolador para generar los pulsos, se asegura que los pulsos generados tengan una variación en frecuencia despreciable, así como una implementación de interfaz y una variedad de modos de terapia más sencilla y con una mayor variedad de modificación de parámetros.

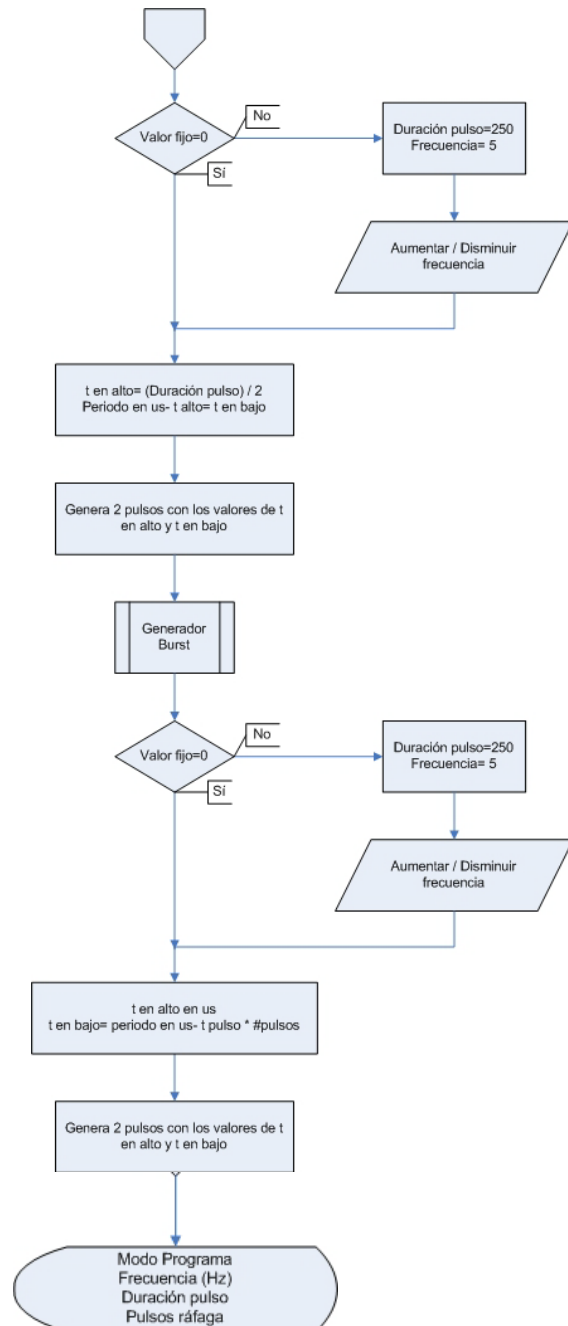
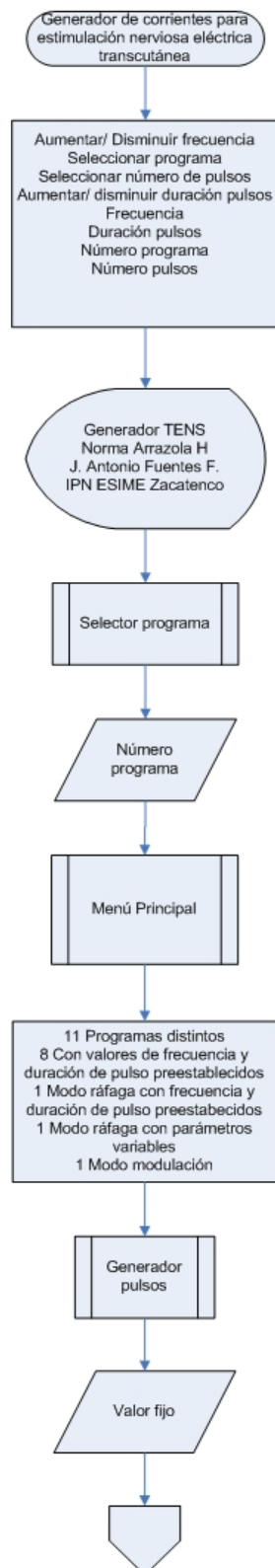
Referencias

- [1] A. Bélanger, *Evidence-based Guide to Therapeutic Physical Agents*. Lippincott Williams & Wilkins, 2002.
- [2] J. Plaja, "Guía Práctica de Electroterapia." Electromedacarin, S.A., España, p. 133, 1999.
- [3] G. Payne and J. Payne, "Key Concepts in Electrotherapy," pp. 1–9, 2014.
- [4] B. S. F. Andrade C, *Electroterapia Funcional Especializada, U.S. y Laserterapia*. ALAC Consultoría y Servicios integrales a Rehabilitación S.A. de C.V, 2009.
- [5] R. Melzack, P. Vetere, and L. Finch, "Transcutaneous electrical nerve stimulation for low back pain. A comparison of TENS and massage for pain and range of motion.," *Phys. Ther.*, vol. 63, no. 4, pp. 489–493, 2005.
- [6] J. F. Guerrero Martínez, "Procesado Analógico," *Univ. València*, pp. 1–32, 2011.
- [7] J. E. Hall, *Guyton y Hall. Tratado de fisiología médica*. Elsevier Health Sciences, 2011.
- [8] U. Birgersson, *Electrical impedance of human skin and tissue alterations: Mathematical modeling and measurements*. 2012.
- [9] E.-N. B.V., "Low and medium frequency therapy," 2005.
- [10] J. M. R. Martín, *Electroterapia en fisioterapia*. Ed. Médica Panamericana, 2004.
- [11] E. J. Clar, C. P. Her, and C. G. Sturelle, "Skin impedance and moisturization," *J. Soc. Cosmet. Chem*, vol. 26, no. 26, pp. 337–353, 1975.

Apéndice A. Diagramas Eléctricos



Apéndice B. Diagramas de flujo y códigos fuente



```

/* Programa prueba para un generador de pulsos
TENS
* Se pueden modificar tanto la frecuencia, el
ancho de pulso y seleccionar configuraciones
preestablecidas
* Se agregará un display LCD para ver las
selecciones hechas en pantalla
* Hecho por Norma Arrazola H. y J. Antonio
Fuentes F.el 02/12/2015
*/

```

```
#include<LiquidCrystal.h>
```

```

//salidas para el puente H
intPos_Pul=53;
intNeg_Pul=52;

```

```

// Selectores de PD, f, Programa, y numero de
pulsos para modo ráfaga
intAum_Frec=51;
intDis_Frec=50;

```

```

intAum_PD=49;
intDis_PD=48;

```

```

intSel_Prog=47;
intSel_Npuls=46;

```

```

float THL1, T1;
int f, PD, T2, THL2, Nprog=0, Npuls, M;
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
//LiquidCrystal(rs, enable, d4, d5, d6, d7)

```

```
void setup() {
```

```

lcd.begin(20, 4);
lcd.setCursor(2,0);
lcd.print("Generador TENS");
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("Norma Arrazola H.");
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("J. Antonio Fuentes F");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("IPN ESIME Zacatenco");
delay (1500);
lcd.clear();

```

```

pinMode(Pos_Pul, OUTPUT);
pinMode(Neg_Pul, OUTPUT);
pinMode(Aum_Frec, INPUT);
pinMode(Dis_Frec, INPUT);
pinMode(Aum_PD, INPUT);
pinMode(Dis_PD, INPUT);
pinMode(Sel_Prog, INPUT);
pinMode(Sel_Npuls, INPUT);
}

```

```
void loop()
```

```

{
SelectorPrograma ();
switch (Nprog)
{
case 0:
GeneradorPulsos (200, 90, 0);
break;

case 1:
GeneradorPulsos (175, 90, 0);
break;

case 2:
GeneradorPulsos (200, 80, 0);
break;

case 3:
GeneradorPulsos (200, 100, 0);
break;

case 4:
GeneradorPulsos (200, 10, 0);
break;

case 5:
GeneradorPulsos (200, 2, 0);
break;

case 6:
GeneradorPulsos (100, 65, 0);
break;

case 7:
GeneradorPulsos (200, 90, 0);
break;

case 8: //Ráfaga preestablecida
GeneradorBurst (2, 200, 5, 0);
break;

case 9: //Ráfaga variable
GeneradorBurst (f, PD, Npuls, 1);
break;

case 10: //Modulación
GeneradorPulsos (f, PD, 1);
break;
}
}
}

```

```

intSelectorPrograma ()
{
  if (digitalRead(Sel_Prog)==HIGH &&Nprog<10)
  {
    Nprog+=1;
  }
  else if (digitalRead(Nprog)==HIGH
&&Nprog==10)
  {
    Nprog=0;
  }
  delay (500);
  returnNprog;
}

// Función para variar la frecuencia desde 1 hasta
200 Hz
intFrecuencia ()
{
  if (digitalRead(Aum_Frec)==HIGH && f<200)
  {
    f+=1;
  }
  else if (digitalRead(Aum_Frec)==HIGH &&
f==200)
  {
    f=1;
  }
  else if (digitalRead(Dis_Frec)==HIGH && f>1)
  {
    f-=1;
  }
  else if (digitalRead(Dis_Frec)==HIGH && f==1)
  {
    f=200;
  }
  return f;
}

intFrecuenciaBurst ()
{
  if (digitalRead(Aum_Frec)==HIGH && f<10)
  {
    f+=1;
  }
  else if (digitalRead(Aum_Frec)==HIGH && f==10)
  {
    f=1;
  }
  else if (digitalRead(Dis_Frec)==HIGH && f>1)
  {
    f-=1;
  }
  else if (digitalRead(Dis_Frec)==HIGH && f==1)
  {
    f=10;
  }
}

}
return f;
}

//Función para variar la duración del pulso desde
50 hasta 400 us
intPulseDuration ()
{
  if (digitalRead(Aum_PD)==HIGH && PD<400)
  {
    PD+=10;
  }
  else if (digitalRead(Aum_PD)==HIGH &&
PD==400)
  {
    PD=50;
  }
  else if (digitalRead(Dis_PD)==HIGH && PD>50)
  {
    PD-=10;
  }
  else if (digitalRead(Dis_PD)==HIGH && PD==50)
  {
    PD=400;
  }
  return PD;
}

intSelectorNumeroPulsos ()
{
  if (digitalRead(Sel_Npuls)==HIGH &&Npuls<11)
  {
    Npuls+=1;
  }
  else if (digitalRead(Sel_Npuls)==HIGH
&&Npuls==11)
  {
    Npuls=5;
  }
  return Npuls;
}

void GeneradorPulsos (int f, int PD, int M)
{
  if (M==0)
  {
    THL1= PD/2; //Tiempo en alto o en bajo
e us
    T1=((1000000/f)-THL1); //Periodo en
microsegundos - tiempo en alto = tiempo en bajo
    T2= (int) T1;
    THL2= (int) THL1;

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(2,0);

```

```

lcd.print ("Modo programa: ");
lcd.setCursor (17,0);
lcd.print (Nprog);
lcd.setCursor (0,2);
lcd.print ("Frecuencia (Hz): ");
lcd.setCursor (17,2);
lcd.print (f);
lcd.setCursor (0,3);
lcd.print ("D. Pulso (us): ");
lcd.setCursor (14,3);
lcd.print (PD);

do
{
digitalWrite(Pos_Pul, HIGH);      // tiempo de la
fase positiva encendida
digitalWrite(Neg_Pul, LOW);       // tiempo de la
fase negativa apagada
delayMicroseconds(THL2);         // medio PD

digitalWrite(Pos_Pul, LOW);       // tiempo de la
fase positiva apagada
digitalWrite(Neg_Pul, HIGH);     // tiempo de la
fase negativa encendida
delayMicroseconds(THL2);         // medio PD

digitalWrite(Pos_Pul, LOW);       // tiempo de la
fase positiva apagada
digitalWrite(Neg_Pul, LOW);      // tiempo de la
fase negativa apagada
delayMicroseconds(T2);           //Tiempo en
apagado IPI
}
while (digitalRead(Sel_Prog)==LOW);
}

elseif (M==1)
{
//Valores default a ser modificados
PD=250;
f=5;

do
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(2,0);
lcd.print ("Modo programa: ");
lcd.setCursor (17,0);
lcd.print (Nprog);
lcd.setCursor (0,2);
lcd.print ("Frecuencia (Hz): ");
lcd.setCursor (17,2);
lcd.print (f);
lcd.setCursor (0,3);
lcd.print ("D. Pulso (us): ");
lcd.setCursor (14,3);
lcd.print (PD);

if      (digitalRead(Aum_Frec)==1      ||
digitalRead(Dis_Frec)==1)
{
f= Frecuencia ();
}
else if (digitalRead(Aum_PD)==1      ||
digitalRead(Dis_PD)==1)
{
PD= PulseDuration ();
}

THL1= PD/2;           //Tiempo en alto o en bajo
e us
T1=((1000000/f)-THL1); //Periodo en
microsegundos - tiempo en alto = tiempo en bajo
T2= (int) T1;
THL2= (int) THL1;

digitalWrite(Pos_Pul, HIGH);        // tiempo de la
fase positiva encendida
digitalWrite(Neg_Pul, LOW);        // tiempo de la
fase negativa apagada
delayMicroseconds(THL2);          // medio PD

digitalWrite(Pos_Pul, LOW);         // tiempo de la
fase positiva apagada
digitalWrite(Neg_Pul, HIGH);       // tiempo de la
fase negativa encendida
delayMicroseconds(THL2);          // medio PD

digitalWrite(Pos_Pul, LOW);         // tiempo de la
fase positiva apagada
digitalWrite(Neg_Pul, LOW);        // tiempo de la
fase negativa apagada
delayMicroseconds(T2);             //Tiempo en
apagado IPI
}
while (digitalRead(Sel_Prog)==LOW);
}

void GeneradorBurst (int f, int PD, intNpuls, int M)
{
//Modo Fijo
if (M==0)
{
THL1= PD/2;           //Tiempo en alto o en bajo
e us
T1=((1000000/f)-(2*Npuls*THL1)); //Periodo
en microsegundos - tiempo de pulso * #Pulsos =
tiempo en bajo
T2= (int) T1;
THL2= (int) THL1;

lcd.clear();
lcd.setCursor(2,0);
lcd.print ("Modo programa: ");

```

```

lcd.setCursor (17,0);
lcd.print (Nprog);
lcd.setCursor (0,1);
lcd.print ("Frecuencia (Hz): ");
lcd.setCursor (17,1);
lcd.print (f);
lcd.setCursor (0,2);
lcd.print ("D. Pulso (us): ");
lcd.setCursor (14,2);
lcd.print (PD);
lcd.setCursor (0,3);
lcd.print ("Pulsos rafaga: ");
lcd.setCursor (15,3);
lcd.print (Npuls);

do
{
for (inti=0; i<Npuls; i++)
{
digitalWrite(Pos_Pul, HIGH);          // tiempo de la
fase positiva encendida
digitalWrite(Neg_Pul, LOW);           // tiempo de la
fase negativa apagada
delayMicroseconds(THL2);              // medio PD

digitalWrite(Pos_Pul, LOW);           // tiempo de la
fase positiva apagada
digitalWrite(Neg_Pul, HIGH);          // tiempo de la
fase negativa encendida
delayMicroseconds(THL2);              // medio PD
}
digitalWrite(Pos_Pul, LOW);           // tiempo de la
fase positiva apagada
digitalWrite(Neg_Pul, LOW);           // tiempo de la
fase negativa apagada
delayMicroseconds(T2);                 //Tiempo en
apagado IPI
}
while (digitalRead(Sel_Prog)==LOW);
}

//ModoProgramable
else if (M==1)
{
//Valores default a ser modificados
PD=250;
f=5;
Npuls=3;
do
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(2,0);
lcd.print ("Modo programa: ");
lcd.setCursor (17,0);
lcd.print (Nprog);
lcd.setCursor (0,1);
lcd.print ("Frecuencia (Hz): ");
lcd.setCursor (17,1);

lcd.print (f);
lcd.setCursor (0,2);
lcd.print ("D. Pulso (us): ");
lcd.setCursor (14,2);
lcd.print (PD);
lcd.setCursor (0,3);
lcd.print ("Pulsos rafaga: ");
lcd.setCursor (15,3);
lcd.print (Npuls);

if (digitalRead(Aum_Frec)==1         ||
digitalRead(Dis_Frec)==1)
{
f= FrecuenciaBurst ();
}

else if (digitalRead(Aum_PD)==1      ||
digitalRead(Dis_PD)==1)
{
PD= PulseDuration ();
}

else if (digitalRead(Sel_Npuls)==1)
{
Npuls= SelectorNumeroPulsos ();
}
THL1= PD/2;          //Tiempo en alto o en bajo
e us
T1=((1000000/f)-(2*Npuls*THL1)); //Periodo
en microsegundos - tiempo de pulso * #Pulsos =
tiempo en bajo
T2= (int) T1;
THL2= (int) THL1;
for (inti=0; i<Npuls; i++)
{
digitalWrite(Pos_Pul, HIGH);          // tiempo de la
fase positiva encendida
digitalWrite(Neg_Pul, LOW);           // tiempo de la
fase negativa apagada
delayMicroseconds(THL2);              // medio PD

digitalWrite(Pos_Pul, LOW);           // tiempo de la
fase positiva apagada
digitalWrite(Neg_Pul, HIGH);          // tiempo de la
fase negativa encendida
delayMicroseconds(THL2);              // medio PD
}

digitalWrite(Pos_Pul, LOW);           // tiempo de la
fase positiva apagada
digitalWrite(Neg_Pul, LOW);           // tiempo de la
fase negativa apagada
delayMicroseconds(T2);                 //Tiempo en
apagado IPI
}
while (digitalRead(Sel_Prog)==LOW);
}
}

```