

**COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE REALIMENTACIÓN SENSORIAL
APLICADA EN LA YEMA DE LOS DEDOS POR MEDIO DE ESTIMULACIÓN
ELÉCTRICA Y VIBRACIÓN PARA LA REPRODUCCIÓN DE TEXTURAS**



HUGO FERNANDO MENESES GÓMEZ
BRAYAN ANDRÉS MUTIS MOSQUERA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

POPAYÁN

2019

**COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE REALIMENTACIÓN SENSORIAL
APLICADA EN LA YEMA DE LOS DEDOS POR MEDIO DE ESTIMULACIÓN
ELÉCTRICA Y VIBRACIÓN PARA LA REPRODUCCIÓN DE TEXTURAS**

HUGO FERNANDO MENESES GÓMEZ
BRAYAN ANDRÉS MUTIS MOSQUERA

Director

MSc. Geovanny Alberto Catamusca Medina

Co director

MSc. David Escobar Valencia

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

POPAYÁN

2019

Nota de Aceptación:

MSc. Geovanny Alberto Catamuscay Medina

Director

MSc. David Escobar Valencia

Co director

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Fecha

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios por permitirme llevar a cabo mis estudios, le agradezco a mis padres que han sido los que me han dado la oportunidad de realizar mis estudios desde la primaria hasta el estudio superior, así como también la oportunidad de crecer como persona, y a mis hermanas y familiares que siempre estuvieron cerca de mí, brindándome su apoyo y regalándome consejos para seguir adelante.

Hugo Fernando Meneses Gómez

Le doy gracias a Dios por permitirme llevar a cabo mis estudios, le agradezco a mis padres que han sido la motivación para poder seguir adelante superando cuanta adversidad se presentaba en el camino, además me han ofrecido la oportunidad de realizar mis estudios, así como también la oportunidad de crecer como persona, fortalecer mis valores, y familiares que siempre estuvieron cerca de mí.

Brayan Andrés Mutis Mosquera

Agradecemos a nuestro director, el ingeniero Geovanny Catamusca, por su tiempo, dedicación y sus valiosos aportes para el desarrollo de este trabajo; así como al ingeniero David Escobar Valencia por sus sugerencias y asesorías para la culminación de este documento.

Los Autores

RESUMEN

Este trabajo de investigación, tiene como objetivo presentar una comparación de técnicas de realimentación basadas en vibración y estimulación eléctrica sobre un área reducida de la mano como lo es la yema de los dedos enfocado en la recreación de texturas por medio de prototipos hápticos. No obstante, el estudio se basa en adecuar un criterio psicofísico para la evaluación de la percepción táctil sobre la superficie del cuerpo humano al presentarse texturas de materiales reales, las cuales serán replicadas por los actuadores seleccionados.

Palabras claves: Háptica, reproducción texturas, estimulación táctil.

ABSTRACT

This research work aims to present a comparison of feedback techniques based on vibration and electrical stimulation on a reduced area of the hand such as the fingertips focused on the recreation of textures by means of haptic prototypes. However, the study is based on adapting a psychophysical criterion for the evaluation of tactile perception on the surface of the human body when textures of real materials are presented, which will be replicated by the selected actuators.

Key words: Haptic, textures reproduction, tactile stimulation.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2 JUSTIFICACIÓN	16
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo general.....	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 ENFOQUE METODOLÓGICO	19
1.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	21
2. CONTEXTO GENERAL	22
2.1 Generalidades del tacto	22
2.2 Interfaz háptica (IH).....	26
2.2.1. Desarrollos en interfaces cinestésicas.....	26
2.2.2. Desarrollos en interfaces táctiles	28
2.3 Componente psicofísico.....	32
3. DISEÑO DE SISTEMAS DE ESTIMULACIÓN PARA LA GENERACIÓN HÁPTICA DE TEXTURAS EN LA YEMA DE LOS DEDOS.....	34
3.1 Aspectos generales del diseño del prototipo basado en electroestimulación	34
3.1.1 Componente hardware	36
3.1.2 Componente actuador	53
3.1.3 Componente chasis	56

3.1.4 Componente Software	58
3.2 Aspectos generales del diseño del prototipo basado en vibración	60
3.2.1 Componente hardware	61
3.2.2 Componente actuador	63
3.2.3 Componente chasis	67
3.2.4 Componente software	68
4. DISEÑO DE UN MÉTODO PSICOFÍSICO PARA EVALUAR EL SISTEMA HÁPTICO PROPUESTO.	70
4.1 Selección de la población	70
4.2 Etapa de adecuación	72
4.3 Etapa de entrenamiento	73
4.4 Etapa de diferenciabilidad	74
4.5 Etapa de ejecución	75
5. CRITERIO ESTADÍSTICO DE EVALUACION	77
5.1 Evaluación para la reproducción de texturas	77
6. CONCLUSIONES	89
7. TRABAJOS FUTUROS	91
8. REFERENCIAS	92
ANEXOS	99
Anexo A: Códigos de los sistemas en LabVIEW 2016.	99
Anexo A.1: Código general para el sistema vibratorio.	99
Anexo A.2: Código general para el sistema eléctrico parte a.	104
Anexo B: Código elaborado en la plataforma de Arduino para el sistema de vibración	109
Anexo C: Cuestionario para los participantes.	113
Anexo C.1: Cuestionario para la selección de los participantes.	113

Anexo C.2: Preguntas post realizada la prueba a los participantes.....	114
Anexo D: Análisis estadístico.....	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de diseño del prototipo eléctrico	35
Tabla 2. Características generales de diseño del prototipo vibratorio.....	60
Tabla 3. Características de desempeño de vibro motores.	64
Tabla 4. Características de los vibro motores.	64
Tabla 5. Características de los participantes.....	71
Tabla 6. Parámetros descriptivos.	78
Tabla 7. Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov en T 1-2.....	79
Tabla 8. Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov en T 2-3.....	79
Tabla 9. Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov en T 1-3.....	80
Tabla 10. Resultados de la prueba de Friedman.....	81
Tabla 11. Matriz de confusión para el sistema eléctrico.....	84
Tabla 12. Matriz de confusión para el sistema vibratorio.	85
Tabla 13. Porcentajes de aciertos para cada textura	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología.	20
Figura 2. Adaptación de los mecanorreceptores ante un estímulo.	25
Figura 3. Localización de los mecanorreceptores en la piel.	25
Figura 4. Interfaces Cinestésicas.	27
Figura 5. Dispositivos comerciales cinestésicos.	28
Figura 6. Interfaces Táctiles.	32
Figura 7. Etapas del protocolo psicofísico.	33
Figura 8. Componentes de los sistemas propuestos.	34
Figura 9. Diagrama de bloques del sistema de estimulación eléctrica.	37
Figura 10. Diagrama hardware del sistema eléctrico.	38
Figura 11. Sistema de estimulación eléctrica diseñado.	39
Figura 12. Regulador de voltaje.	41
Figura 13. Generador de señal cuadrada.	42
Figura 14. Conmutación por transistor.	45
Figura 15. Acoplador de señal.	46
Figura 16. Entrada de señal al transformador.	48
Figura 17. Medición de resistencia en la yema de los dedos.	50
Figura 18. Conexión de optoacoplador y triac para activación de electrodo.	51
Figura 19. Diseño PCB y placa sin ensamblar del sistema.	52
Figura 20. Placa en proceso de ensamble.	52
Figura 21. Placa terminada.	53
Figura 22. Distribución de los electrodos.	54
Figura 23. Diagrama esquemático.	55
Figura 24. Vista de la board generada por Eagle.	55
Figura 25. Matriz en la PCB flexible.	56
Figura 26. Medidas del chasis.	57
Figura 27. Distribución final de los elementos.	57
Figura 28. Pantalla de presentación.	58

Figura 29. Pantalla principal o de control del sistema eléctrico.	60
Figura 30. Diagrama de bloques del sistema de estimulación vibratoria.	62
Figura 31. Diagrama hardware del sistema vibratorio propuesto.	62
Figura 32. Motor LRA elegido para el proyecto.	65
Figura 33. Vista frontal del dedal.	66
Figura 34. Dedal fabricado.	66
Figura 35. Driver DVR2605L.	67
Figura 36. Chasis del sistema vibratorio.	68
Figura 37. Pantalla principal o de control del sistema vibratorio.	69
Figura 38. Usuarios en etapa de adecuación.	72
Figura 39. Usuarios en entrenamiento.	74
Figura 40. Materiales seleccionados.	74
Figura 41. Usuarios en etapa de diferenciabilidad.	75
Figura 42. Usuarios en la etapa de ejecución.	76
Figura 43. Distribución de las calificaciones en la etapa de diferenciabilidad.	77
Figura 44. Resultados al recrear el material de esponja.	82
Figura 45. Resultados al recrear el material de lija.	82
Figura 46. Resultados al recrear el material de plástico.	83

1. INTRODUCCIÓN

El término háptico del griego *hapto-hapthesthai*, interpretado como tocar, es el adjetivo utilizado para describir todo aquello basado con el sentido del tacto, siendo el área del conocimiento que permite estudiar las sensaciones a través de la interacción entre el ser humano y el entorno que lo rodea, por consiguiente, el sentido háptico es aquel que permite obtener información de las diferentes características y/o propiedades de un objeto, siendo complementadas por los sentidos de la vista y la audición [1], [2].

El sentido háptico requiere entonces de la interacción con los objetos para generar intercambios estáticos o dinámicos los cuales proporcionan una secuencia de transmisión y recepción de información debido a la naturaleza de ejecución realizada por el usuario [3].

La captación de características físicas se obtiene generalmente por medio de los dedos, las manos o los brazos del usuario, el cual manipula un sistema háptico; se define de manera formal a un sistema háptico como un dispositivo que permite tocar, sentir, recrear e interactuar con un objeto que se encuentra representado de manera real o en un entorno virtual; esta captación se puede dar de dos maneras, una de tipo pasiva y otra de tipo activa. La forma de interacción pasiva indica que se toca la superficie de un material u objeto con los dedos o con la mano sin realizar movimiento alguno, obteniéndose información sobre dureza, temperatura, y contornos. Por su parte la forma de interacción activa hace referencia a la exploración y manipulación de la superficie a través de las extremidades, por medio de movimientos para así obtener información acerca del peso, maleabilidad y texturas [4], [5], [6].

Los sistemas hápticos se han ramificado desde hace un tiempo en dos líneas; la primera de ellas se enfoca en la producción de estímulos por medio de la

retroalimentación de fuerzas obtenidas gracias al sistema conocido como cinestésica, en donde el usuario interpreta el estado del cuerpo reflejado en la ubicación espacial, y en las posiciones. De manera fisiológica la interpretación de tipo cinestésica se produce a través de receptores ubicados en los músculos, los tendones y en las articulaciones [7].

Por su parte, la segunda línea de clasificación relaciona a los mecanorreceptores cutáneos los cuales se ubican en la piel. Dichos mecanorreceptores deben ser estimulados por medio de actuadores; el objetivo de estos actuadores es generar algún tipo de señal para producir una respuesta enmarcada en la sensación [6].

De forma fisiológica estas respuestas se generan debido a que en la piel se encuentran cuatro tipos de mecanorreceptores, siendo estos: los corpúsculos de Meissner, los discos de Merkel, los corpúsculos de Pacini y las terminaciones de Ruffini, encargados de detectar los diferentes cambios que se producen en la piel, respondiendo ante ellas por medio de un impulso nervioso [8].

Por consiguiente, el grado de realismo con el que el usuario percibe un estímulo que recrea las diferentes características de un material en este caso de estudio las texturas, se debe en gran proporción a la tecnología que se utiliza, al tipo de actuación sobre el cuerpo humano en un área reducida como la yema de los dedos y a la acción complementaria de una interfaz que ayude a la recreación de los estímulos para ser evaluadas por medio de interpretaciones psicofísicas.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad la línea de investigación de sistemas hápticos que involucran a los mecanorreceptores cutáneos, ha sido utilizado en el ámbito de generación de texturas presentes en las superficies de diversos materiales siendo recreados de manera virtual o estableciendo una interacción real, llevado a cabo por medio de la yema de los dedos la cual se encuentra en contacto con algún dispositivo de accionamiento, intentando entonces que el proceso de recreación de textura de un objeto pueda ser determinada a través de un enfoque psicofísico por parte del usuario. Los desarrollos y propuestas de tipo académicas para la generación de texturas implementando actuadores de vibración se han centrado en la fabricación de plataformas para la realización de estudios que analizan la deformación de la piel al ejecutarse un reconocimiento inicial de un material real frente a un estímulo fijo en un área determinada de la yema de los dedos.

De igual manera los trabajos que involucran sistemas que implementan estimulación eléctrica se han orientado hacia la fabricación de arreglos de electrodos y micro agujas con diversos tipos de materiales, para disminuir parámetros en voltaje y corriente, además de que sean adaptables a la yema de los dedos gracias a matrices de electrodos.

Sin embargo, la literatura científica actual no evidencia trabajos que realicen una comparación entre estimulación eléctrica y estimulación vibratoria, con el fin de evaluar el reconocimiento de diversas texturas en el usuario bajo un criterio psicofísico. Por consiguiente, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿En el marco de la realimentación háptica, qué ventajas o desventajas ofrece la estimulación eléctrica frente a la vibración en el contexto de reproducción de texturas de acuerdo con la interpretación psicofísica del ser humano?

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad los sistemas hápticos desarrollados para la recreación de texturas han sido implementados en diversos campos de la ciencia, como, por ejemplo, en la rama de la medicina aplicados a diversos simuladores quirúrgicos para entrenamiento médico permitiendo procesos de palpado, interacción con órganos y reconocimiento de patologías por medio de la interacción entre el usuario y dichos simuladores que presentan retroalimentación sensorial al entrar en contacto con algún objeto [9].

De igual manera en el área de rehabilitación, se han diseñado diversos video juegos serios, en los cuales se ejecutan procesos de recuperación motriz en entornos virtuales, donde se produce retroalimentación táctil en los usuarios por medio de estímulos al manipular un escenario didáctico con diversos materiales que deben ser movidos por el usuario de un punto a otro [10].

Por su parte, en el campo de la industria, los sistemas de diseño asistido por computador integran sistemas de realimentación sensorial, de tal forma que el operario pueda manipular libremente los componentes que hacen parte de algún proceso, permitiendo la evaluación en la realización de trabajos que requieren un alto grado de entrenamiento, tales como, ensamblajes, movilidad de componentes y tiempo de ejecución [10].

Las diferentes aplicaciones de los sistemas de realimentación sensorial en el reconocimiento de texturas dependen de la confiabilidad de la información que se obtenga de los dispositivos encargados de generar la señal de retroalimentación táctil.

Con el fin de contribuir en el reconocimiento de texturas es importante determinar cuál de los dos sistemas, vibración o estimulación eléctrica, establece en el usuario por medio de un protocolo psicofísico la recreación de sensaciones semejantes a las superficies de materiales reales.

El presente proyecto se realiza con el fin de articular lo aprendido en la academia, finalmente nuestra responsabilidad como ingenieros radica en generar un trabajo de investigación que involucre diferentes áreas de la ingeniería y que sea un pilar para trabajos futuros.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Comparar un sistema de realimentación sensorial aplicado en la yema de los dedos por medio de estimulación eléctrica y vibración para la reproducción de texturas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de estimulación eléctrica y vibratoria para la generación háptica de texturas en la yema de los dedos.
- Seleccionar un método psicofísico para la evaluación del sistema háptico propuesto en el ser humano.
- Validar el sistema diseñado por medio de una prueba piloto para la identificación de diversas texturas en un grupo de personas separadas por sexo.

1.4 ENFOQUE METODOLÓGICO

Este proyecto de investigación se divide en dos fases; la primera fase abarca todo aquello relacionado con la fundamentación teórica necesaria para la elaboración del trabajo, donde se incluyen áreas temáticas como: la fisiología del tacto, sistemas de realimentación sensorial aplicada en la yema de los dedos mediante estimulación eléctrica y vibratoria, en conjunto con las metodologías psicofísicas planteadas para establecer un enfoque experimental con este tipo de dispositivos.

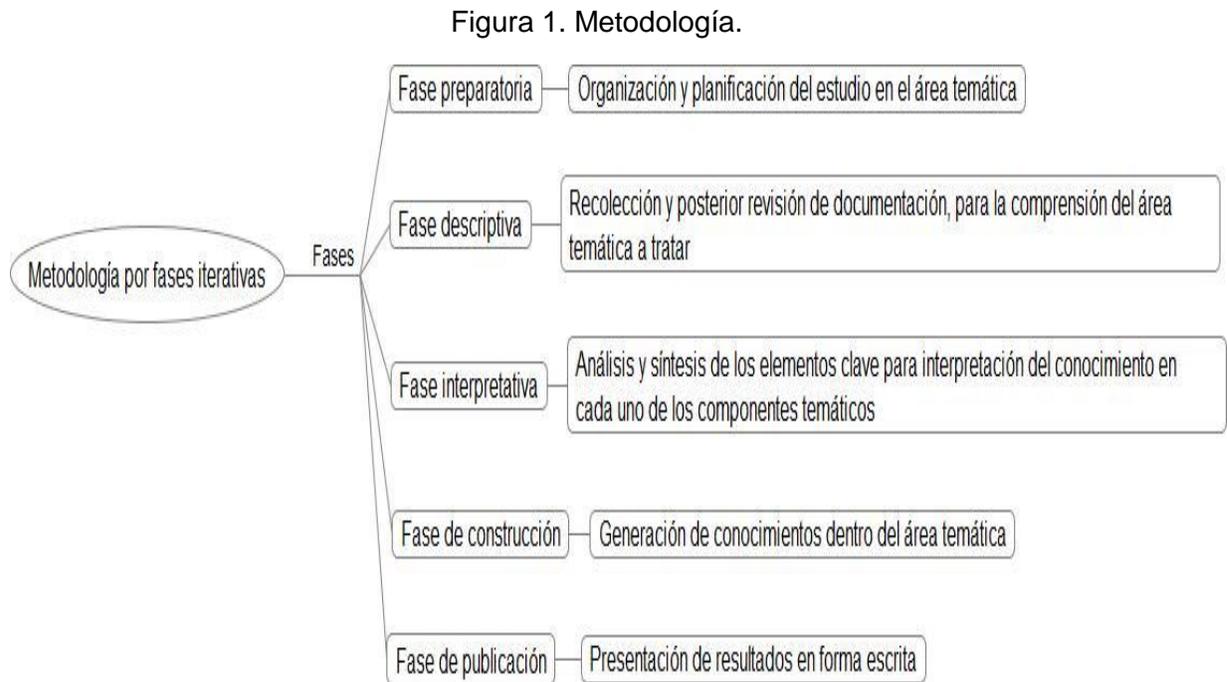
En la segunda fase, se realiza la descripción de los prototipos planteados desde el punto de vista de diseño e implementación, así como el proceso experimental desarrollado para la evaluación de los sistemas hápticos, definiendo entonces:

- Diseño de un sistema de electroestimulación y vibración para la generación de sensaciones sobre un área determinada de la mano como lo es la yema de los dedos.
- Construcción de los sistemas de electroestimulación y vibración acoplando un actuador tipo matriz y un actuador resonante lineal.
- Selección y adecuación de una metodología psicofísica para realizar pruebas en un grupo de usuarios.
- Análisis estadístico de resultados.

Las dos fases descritas anteriormente se desarrollaron utilizando la metodología iterativa por fases, la cual permite dividir la problemática en subtemas de menor envergadura según la necesidad y complejidad de este, y de esta forma incrementar el desarrollo del tema dándole una estructura la cual sirve como guía para las soluciones de cada fase iterativa [11].

Esta metodología es utilizada para el desarrollo de proyectos de investigación en distintas áreas.

En la figura 1 se ilustra las diversas fases llevadas a cabo en este proyecto de investigación.



Fuente: Elaboración propia.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El capítulo 2 muestra las generalidades del tacto, partiendo de la descripción de cada uno de los mecanorreceptores presentes en la piel, seguidamente se expresa la definición de interfaz háptica apoyada en el estado del arte describiendo las tendencias en diversas investigaciones realizadas en interfaces cinestésicas y táctiles, de igual manera se realiza la conceptualización de metodologías psicofísicas.

En el capítulo 3 se realiza el diseño e implementación de los sistemas propuestos para estimulación eléctrica y vibración, así como la descripción por componentes de cada uno de ellos, estructurados como hardware, chasis, e interfaz gráfica.

El capítulo 4 presenta la selección y adecuación de la metodología psicofísica para generar la posterior evaluación de los prototipos hápticos.

En el capítulo 5 se presentan las pruebas a las cuales fue sometido el dispositivo, incluyendo la interacción con el usuario.

El capítulo 6 presentan las conclusiones del trabajo de investigación.

En el capítulo 7 se describen los potenciales trabajos futuros.

2. CONTEXTO GENERAL

2.1 Generalidades del tacto

En la piel se encuentran diversos receptores nerviosos, encargados de traducir en impulsos eléctricos diferentes tipos de energía, interpretados en forma de percepción táctil en el ser humano. Dicha percepción es comprendida como la adquisición de información que se obtiene a través de estímulos una vez se haya realizado una interacción pasiva o activa con la superficie de un objeto [12].

Cuando la energía es de tipo térmica, su detección se realiza por medio de los termorreceptores, siendo estos una unidad micrométrica celular con terminaciones nerviosas libres, estableciendo en el usuario sensaciones de calor por medio de fibras amielínicas tipo C, y de frío por medio de fibras mielínicas tipo delta, es de notar que estas terminaciones se encuentran rodeando los folículos pilosos de la piel [13].

Cuando la energía es mecánica, es detectada por los mecanorreceptores, que constituyen una gran proporción de los receptores sensoriales, siendo sensibles a la deformación física. Se encuentran presentes en todo el cuerpo humano, monitoreando el contacto producido con la piel. Los mecanorreceptores se dividen en: corpúsculos de Meissner, discos de Merkel, corpúsculos de Vater-Pacini, y en las terminaciones de Ruffini [14].

Los corpúsculos de Meissner se encuentran en las papilas dérmicas, punta de los dedos, lengua, labios y piel sin pelo, se estructuran como dendritas aglomeradas, componen aproximadamente al 43% de la unidad táctil de la mano, permitiendo la interpretación de características físicas de un objeto enmarcado en cambios de texturas y vibraciones al ejecutarse contactos ligeros, estos receptores presentan una disminución de respuesta frente a estímulos constantes en el tiempo, clasificados como de adaptación rápida [15], [16].

Las principales características de los corpúsculos de Meissner, según [15], [16], [17] son:

Tienen estructuras con forma ovoide, miden aproximadamente 150 micrómetros (μm) de largo y de 40 a 70 micrómetros (μm) de diámetros, estructura aglomerada basada en células de Schwann, responde a oscilaciones en frecuencias entre 10 a 60 Hertz (Hz).

Los discos de Merkel están concentrados en la palma de la mano al igual que en la planta de los pies, estos receptores presentan una lenta disminución en respuesta a un estímulo, siendo clasificadas como de adaptación lenta [18].

En un aspecto comparativo, poseen una mayor resolución que los corpúsculos de Meissner, su principal diferencia con respecto al anterior receptor se sitúa en la respuesta frecuencial, esto significa que puede responder a una estimulación continua, también son capaces de poder discriminar los estímulos que se encuentran próximos actuando como un filtro pasa baja. Cabe resaltar que los discos de Merkel tienen la capacidad de adaptarse a un estímulo para dejar de registrarlo, esto refiere a que permite omitir diferentes sensaciones que se reciben constantemente por elementos cotidianos tales como: pantalones, zapatos, ropa interior, entre otros, conformando entonces aproximadamente el 25% de las unidades táctiles de la mano [19].

Las principales características de los discos de Merkel, según [17] son:

Se encuentran debajo de la epidermis, tienen un área de 1.1 milímetros cuadrados (mm^2), establecen por medio de deformación mecánica continua la identificación de presión y de texturas, responde a oscilaciones a frecuencias entre 0.4 a 100 Hertz (Hz).

Por su parte, el corpúsculo de Pacini o también comúnmente conocido como *Vater* corresponde aproximadamente al 13% de la composición de los receptores en la piel, este corpúsculo se compone de láminas o cápsulas que se encuentran dispuestas o distribuidas cilíndricamente rodeando un espacio central alargado, su principal función se basa en la detección de presión y vibración sobre altas frecuencias, además son receptores fásicos de adaptación rápida [20].

Las principales características de los corpúsculos de Pacini, según [17] son:

Ubicación a nivel profundo de la dermis, membranas y vísceras, miden aproximadamente de 1 a 4 milímetros (mm) de largo y 0.5 a 1 milímetro (mm), de diámetro, responde a oscilaciones a frecuencias entre 70 a 400 Hertz (Hz).

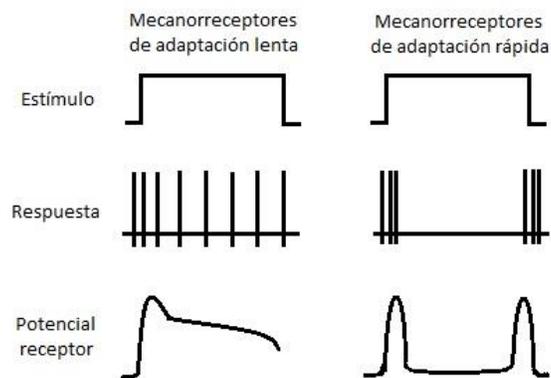
Finalmente, las terminaciones de Ruffini se encuentran ubicadas en distintas partes del cuerpo como lo son: piel velluda y piel glabra en la profundidad de la dermis [15].

Estas cumplen con las funciones de: variaciones de peso, tacto, rotación de articulaciones, calor y así como la interpretación frente a presiones continuas, siendo esta última una de sus principales características ya que presenta adaptación lenta, lo que permite enviar constantes respuestas durante un estímulo continuo; constituyen cerca del 19% de la cantidad de receptores ubicados en la piel [17], [18]. Además las terminaciones de Ruffini poseen las siguientes características:

Son sensibles a niveles bajos de deformación mecánica, registran variaciones de tensión y estiramiento del tejido, responde a frecuencias entre 0.4 a 100 Hertz (Hz) [15], [17].

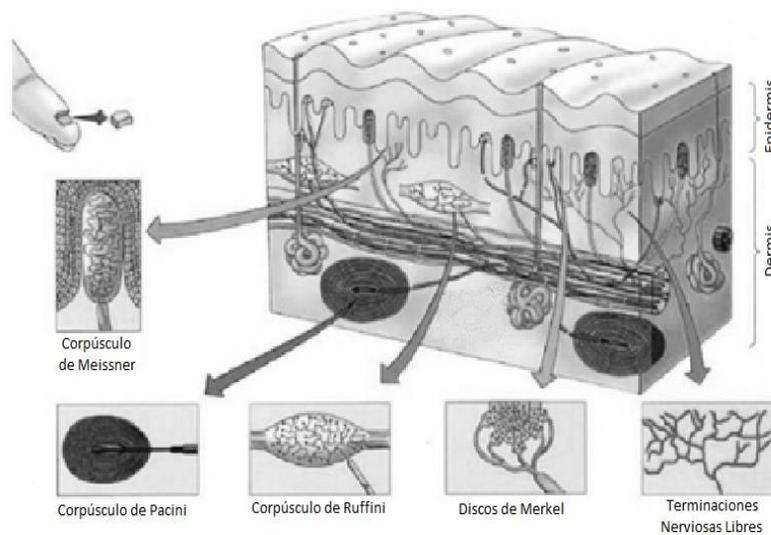
En la figura 2, se representan las adaptaciones de los mecanorreceptores según su clasificación, y en la figura 3, se ilustra la localización de los mecanorreceptores en la piel, así como las formas de cada uno de ellos.

Figura 2. Adaptación de los mecanorreceptores ante un estímulo.



Fuente: Tomada de [21].

Figura 3. Localización de los mecanorreceptores en la piel.



Fuente: Tomado de [15].

2.2 Interfaz háptica (IH)

Un sistema háptico es el encargado de obtener información que se extrae a través de la percepción táctil y la percepción cinestésica, con el objetivo de proporcionar la capacidad de recrear, distinguir y manipular objetos que se encuentran en un entorno real o virtual, permitiendo la interacción con el medio [22].

A continuación, se realiza una descripción de los diferentes desarrollos tecnológicos en las categorías de división de las interfaces hápticas.

2.2.1. Desarrollos en interfaces cinestésicas

Una IH cinestésica se encarga de producir una realimentación basada en la fuerza aplica sobre los músculos y articulaciones del cuerpo humano en el instante que se realiza algún tipo de contacto entre el dispositivo y un objeto [23].

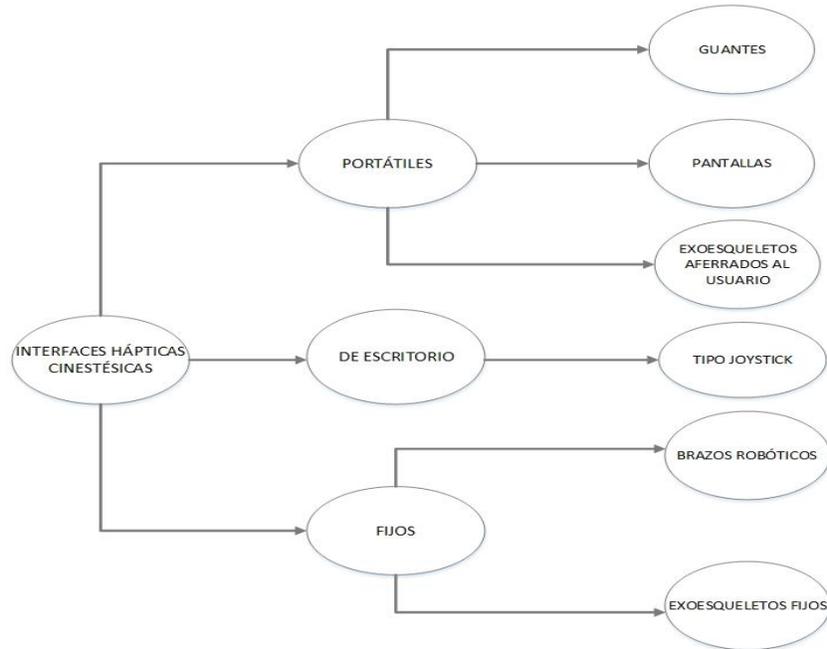
Las interfaces cinestésicas, busca ejercer un control en la realimentación de la fuerza al momento de ser redireccionada hacia las partes del cuerpo o miembros del usuario que se estén empleando, como, por ejemplo; en el brazo, la mano o los dedos y con esto poder generar una percepción del objeto en manipulación [5], [24].

La realimentación de fuerzas en una IH se realiza mediante diferentes tipos de actuadores, como accionamientos eléctricos por medio de motores, dispositivos cerámicos, electrodos, válvulas hidráulicas o neumáticas, elementos de Peltier y frenos magnéticos [23], [25].

Las IH de tipo cinestésicas relacionan e intercambian energía mecánica con el usuario, en general para esta clase de interfaces o prototipos se tienen en cuenta los grados de libertad (DOF) con el cual se busca replicar los mismos movimientos que el usuario desee ejecutar [26], [27].

En la figura 4, se presenta la clasificación que posee las interfaces hápticas cinestésicas según su soporte.

Figura 4. Interfaces Cinestésicas.



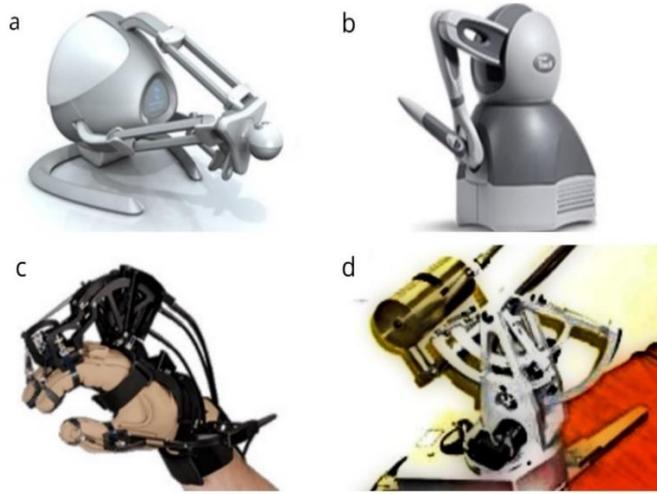
Fuente: Elaboración propia.

No obstante, las interfaces cinestésicas se encuentran disponibles en el mercado, los dispositivos más comunes se citan a continuación, según [24]:

a) Novint Falcon, b) Phantom Omni, c) Cybergrasp, y d) CyberForce

En la figura 5, se representan los dispositivos comerciales cinestésicos más utilizados.

Figura 5. Dispositivos comerciales cinestésicos.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Desarrollos en interfaces táctiles

Las IH táctiles a través de la interacción del tacto por medio de las extremidades del cuerpo humano, específicamente la palma de la mano y la yema de los dedos proporcionan información de características del entorno al usuario como el relieve de la superficie, la textura del material e inclusive la temperatura de un objeto [25].

Por ello, mediante un estudio realizado por Mallinckrodt y colaboradores en el año de 1953 se observó que al manipular una superficie de un material de tipo latón cubierta ligeramente con un aislante y siendo conectada a una línea de alimentación de 110 voltios (v), se genera una sensación de tipo variable al paso de las extremidades por dicha lamina [28].

Teniendo en cuenta lo anterior, se presentaron estudios, donde se logra hallar que en materiales conductivos desnudos se encuentra presente una capa de aislantes los cuales pueden actuar como un dieléctrico de un condensador, además se tiene

presente que el efecto producido en las extremidades del cuerpo humano parece aumentar de forma gradual con la sequedad de la piel [29]. En consecuencia, de esto, surgieron estudios que conllevaron a la generación de modelos equivalentes a los mecanorreceptores que se encuentran en la piel; por lo que se generó un modelo considerando las propiedades eléctricas de los nervios describiendo la evolución sensorial al aplicar un estímulo constante en el tiempo [30].

Desde esta perspectiva, una descripción fisiológica de la información sensorial que se presenta en la yema de los dedos se puede interpretar como la producción de una respuesta en la zona de estimulación cuando se exponen a unas frecuencias fijas [31].

No obstante, teniendo en cuenta algunos modelos realizados, se tiene que mediante una red eléctrica análoga en inmediaciones a las terminaciones que se encuentran en la piel, se permite conocer los parámetros para producir una actividad de estimulación en cada una de las capas modeladas [32].

En consecuencia, el proceso de realimentación táctil ejecutada sobre la yema de los dedos tiende a potencializar el grado de inmersión en el usuario. Por eso las estructuras experimentales más comunes para la generación de texturas dependen del uso de métodos psicofísicos los cuales se aplican en sistemas con diferentes principios de actuación [33].

Además, se han desarrollado otro tipo de sistemas basados en transductores ultrasónicos, los cuales presentan una mejora en la percepción táctil, ya que no hay interacción física entre la herramienta y la yema de los dedos, generando diversos puntos focales en la extremidad. Sin embargo, este tipo de actuación debe considerar y distinguir las separaciones entre estímulos para producir texturas de superficies [34].

Por lo que se presentan nuevos desarrollos en sistemas hápticos con:

- Actuador de tipo neumático para los cinco dedos de la mano, con resultados positivos para reconocimiento de texturas clasificadas como blandas o rígidas, lo cual ha sido probado en experimentos de palpación de tumores [35].
- Actuador tipo bobina para la percepción de rugosidad en superficies, el cual se coloca de forma lateral a la yema del dedo, presentando variaciones significativas de frecuencias a amplitudes constantes modificando la interpretación de rugosidad [36].
- Actuador vibro táctil, con el uso de este dispositivo se emplea un espectrograma espacial el cual permite la síntesis de texturas, utilizando escalamiento multidimensional encontrando texturas dentro de cuatro dimensiones ortogonales [37].
- Actuador tipo láser, permite generar sensaciones táctiles en diversas zonas focales donde se haya dispuesto el actuador, además de ser un tipo de dispositivo compacto debido al tamaño del mismo. Este tipo de sistemas a laser, se les debe generar un medio elástico apropiado para la transmisión de luz que sea indiferente a los cambios producidos en el aire, lo cual permitirá modificar en un cierto grado frecuencias y amplitudes para expandir el tipo de sensaciones [38].
- Actuador piezoeléctrico, este tipo de actuador permite la creación de sistemas más pequeños, y que requieren un menor consumo de energía [39].

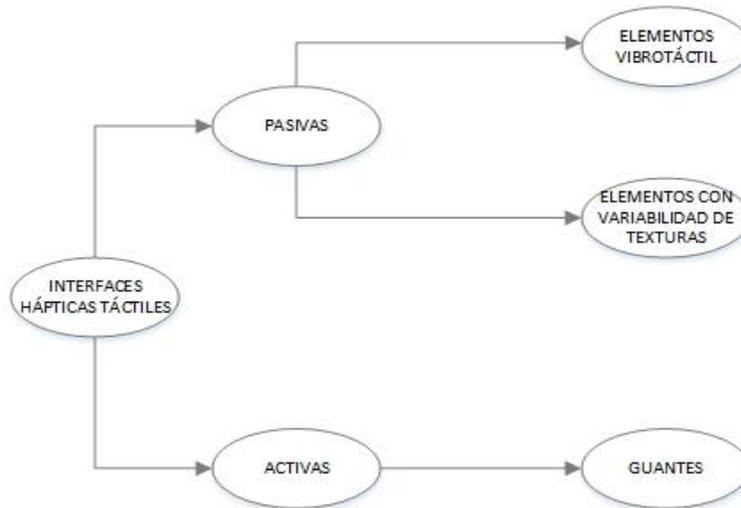
Teniendo en cuenta lo anterior, ya que existe una amplia variedad de actuadores, y una amplia variedad de sistemas hápticos de tipo táctiles, estos se ven enfocados a encontrar un equilibrio en aspectos como el costo, las sensaciones generadas, la portabilidad, entre otros aspectos para desarrollar sus proyectos.

Así mismo, todo depende de la percepción táctil que se quiera lograr con diferentes tipos de actuadores. Por ello, surgen varias ramas de estudio, y una que toma gran relevancia y es enfocada a los procesos de tele operación, la cual es ampliamente utilizada en los últimos años en sistemas inmersivos de entrenamiento apoyados por la realidad virtual. Un ejemplo de ello es un estudio en donde se plantea el desarrollo de un sistema que permita a pacientes amputados percibir texturas como rugosidad y dureza por medio de electrodos planos colocados sobre cualquier ubicación del cuerpo, una vez una prótesis de dedo haya captado información de diferentes tipos de materiales [40].

No obstante, las IH táctiles han tenido mayor auge en desarrollos relacionados con la retroalimentación sensorial en la yema de los dedos por medio de estimulación eléctrica, y las investigaciones se han concentrado en desarrollar actuadores para evaluar sensaciones en capas internas de las extremidades. Un ejemplo de ello es la construcción de micro agujas para la inserción bajo la yema de los dedos. Este tipo de actuadores permiten generar estimulación a un menor rango de voltaje debido a que se encuentran sobre la capa cornea y no en zona de contacto directa con la piel [41], [42].

En la figura 6, se especifica la clasificación que tiene las interfaces hápticas táctiles

Figura 6. Interfaces Táctiles.



Fuente: Elaboración propia.

2.3 Componente psicofísico

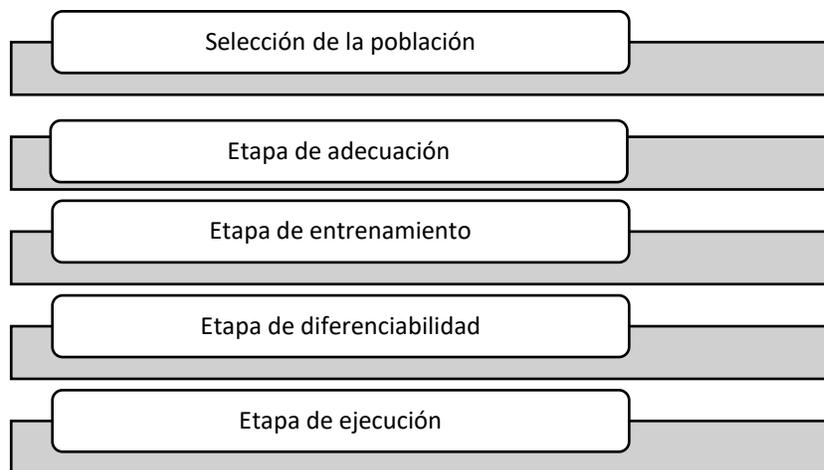
En general, los procesos de percepción táctil realizados por las extremidades de un usuario por medio de interfaces hápticas establecen cualidades de las superficies de los materiales a través del contacto. La percepción táctil se encuentra compuesta por capas de tipo afectivas y psicofísicas; la capa afectiva relaciona la valoración por medio de un proceso mental que conlleva a las emociones, por su parte la capa psicofísica determina la percepción de las propiedades físicas a través de una valoración del entorno [43], [44].

Es de notar que en la actualidad no existe un protocolo psicofísico estándar, debido a que cada experimento planteado varía en la población, varía en el método de actuación sobre la yema de los dedos y en el tipo de textura a reproducir; en este caso, se han adaptado 5 etapas, en primer lugar se elabora la selección de la muestra para el estudio, posteriormente se implementa una etapa de adecuación donde el usuario interactúa con la estimulación eléctrica por medio del actuador tipo matriz y vibración por medio de un motor resonante lineal,

seguidamente se ejecuta una etapa de entrenamiento para ubicar espacialmente al usuario por medio de percepciones táctiles en diversos puntos de la yema del dedo en el caso de la electroestimulación y en un punto focal para la vibración, se presenta después la etapa de diferenciabilidad, en donde cada usuario reconoce tres materiales reales por medio de un movimiento activo, y finalmente las etapas de ejecución para evaluar las sensaciones de estimulación eléctrica y vibración en el reconocimiento de las texturas.

En la figura 7, se ilustra el diagrama propuesto para los procedimientos basados en aspectos psicofísicos en la evaluación del prototipo.

Figura 7. Etapas del protocolo psicofísico.

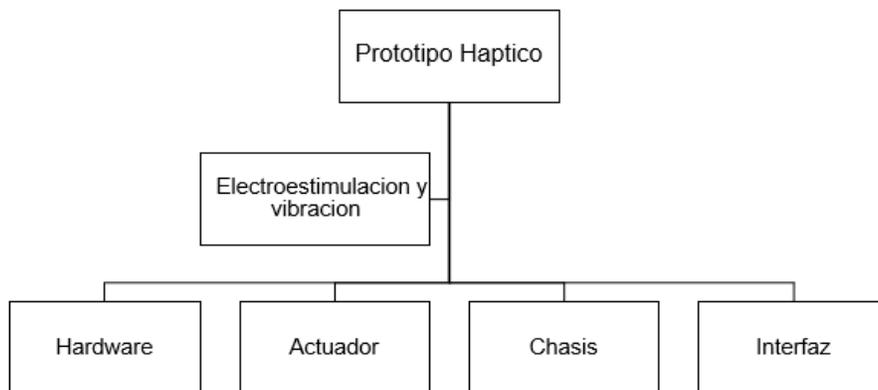


Fuente: Elaboración propia.

3. DISEÑO DE SISTEMAS DE ESTIMULACIÓN PARA LA GENERACIÓN HÁPTICA DE TEXTURAS EN LA YEMA DE LOS DEDOS.

En este capítulo se establecen los criterios de diseño e implementación de los sistemas de estimulación eléctrica y vibración los cuales contienen una estructura general basada en el diagrama de la figura 8, es de notar que en cada descripción de los prototipos se desarrollaran los mismos componentes.

Figura 8. Componentes de los sistemas propuestos.



Fuente: Elaboración propia.

3.1 Aspectos generales del diseño del prototipo basado en electroestimulación

Basados en la norma IEC 60601-1 para sistemas o tarjetas que involucren el desarrollo de sistemas electrónicos para ser utilizados en personas o participantes, se realizó una adaptación de criterios de la norma IEC 60601-1 para la creación de la tarjeta que se implementa en el proyecto de investigación, la cual establece que: debe contener una etapa de alimentación a 110 voltios (v) en alterna monofásico o trifásico dependiendo de la región en que se encuentre.

Posteriormente se debe considerar un transformador o una alimentación conmutada para regular la primera etapa de voltaje, siguiendo para la etapa de generación de señales se consideró un chip 555, para hacer la conmutación la norma indica que se debe realizar por medio de transistores o mosfet, seguidamente se considera para este tipo de dispositivos por temas de seguridad que debe tener un criterio de tierras, esto indica que cada etapa debe constar con un pin a tierra o punto en común, además post la conmutación se debe tener un acople de señal para un transformador, el cual será el encargado de transformar la señal que se le aplica al participante. Además, la norma IEC 60601-1 indica que los dispositivos no deben superar los 15 a 20 miliamperios (mA) de corriente por un tiempo mayor a 15 minutos por seguridad de las personas que entren en contacto con el dispositivo, ya que los participantes pueden sufrir algunas afectaciones [45].

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace la definición de componentes descritos para el sistema de electroestimulación y se realiza la descripción de características a tener en cuenta para el desarrollo de cada una de sus partes. En la tabla 1 se describen las características del sistema de estimulación eléctrica.

Tabla 1. Características generales de diseño del prototipo eléctrico

Componente del prototipo	Características
Hardware	Direccionamiento de una señal portadora, manipulación de encendido y apagado, frecuencias variables que permitan la reproducción del estímulo táctil para el reconocimiento de texturas, regulación de corriente en el rango de los micro y miliamperios.

<p>Actuador</p>	<p>Actuador con contacto directo en la yema de los dedos, disposición de electrodos para obtener diversos puntos de estimulación en la yema de los dedos.</p> <p>Criterio de portabilidad debido a su forma compacta, tamaño reducido y bajo peso.</p>
<p>Chasis</p>	<p>Robustez en su construcción, debido a que contendrá los dispositivos del prototipo.</p>
<p>Software</p>	<p>Panel de frecuencias, panel de electrodos, visualización de señal portadora.</p>

Fuente: Elaboración propia.

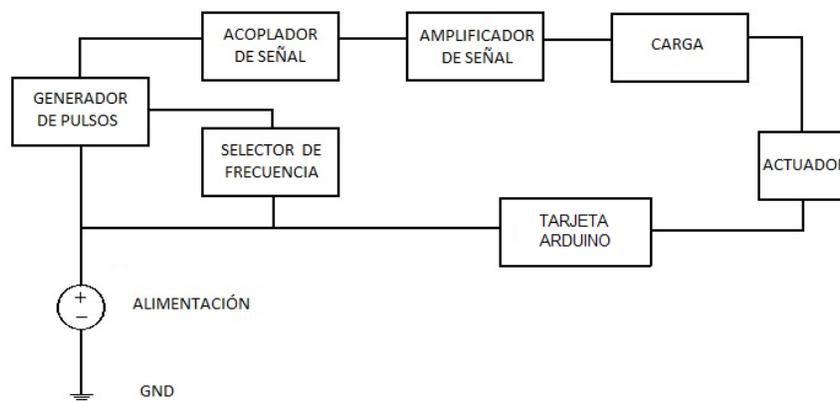
3.1.1 Componente hardware

Para dar cumplimiento a los requerimientos expuestos en la tabla 1, se plantea una propuesta de diseño hardware para el sistema de estimulación eléctrica.

En la figura 9, se ilustra el diagrama general del hardware para el sistema de estimulación eléctrica. En este diagrama de bloques, se encuentra de forma general las partes que constituyen el sistema. Se parte de una alimentación, para que los dispositivos entren en funcionamiento, por otro lado se tiene un bloque el cual se encarga de generar una señal cuadrada y la envía al bloque de acoplador

de señal en donde se conmuta la señal y se prepara para ser amplificada, luego de ser amplificada, esta señal se regula tanto en voltaje como en corriente mediante la carga conectada al circuito para después ser enviada al actuador, finalmente se cuenta con una tarjeta Arduino y un bloque de selector de frecuencia que permite conmutar diferentes frecuencias a la cual va a funcionar el sistema.

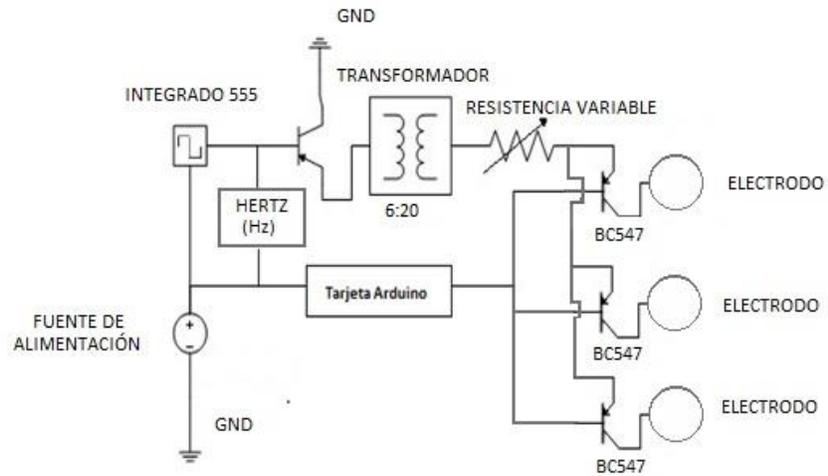
Figura 9. Diagrama de bloques del sistema de estimulación eléctrica



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente en la figura 10, se describe de manera específica la estructura del sistema propuesto; es de aclarar que el diagrama corresponde a una placa de estimulación eléctrica, teniendo en cuenta que el sistema consta de nueve electrodos y una placa es capaz de gobernar tres electrodos de manera independiente, se debe hacer uso de otras dos placas iguales, por lo que en definitiva el prototipo constará de tres placas.

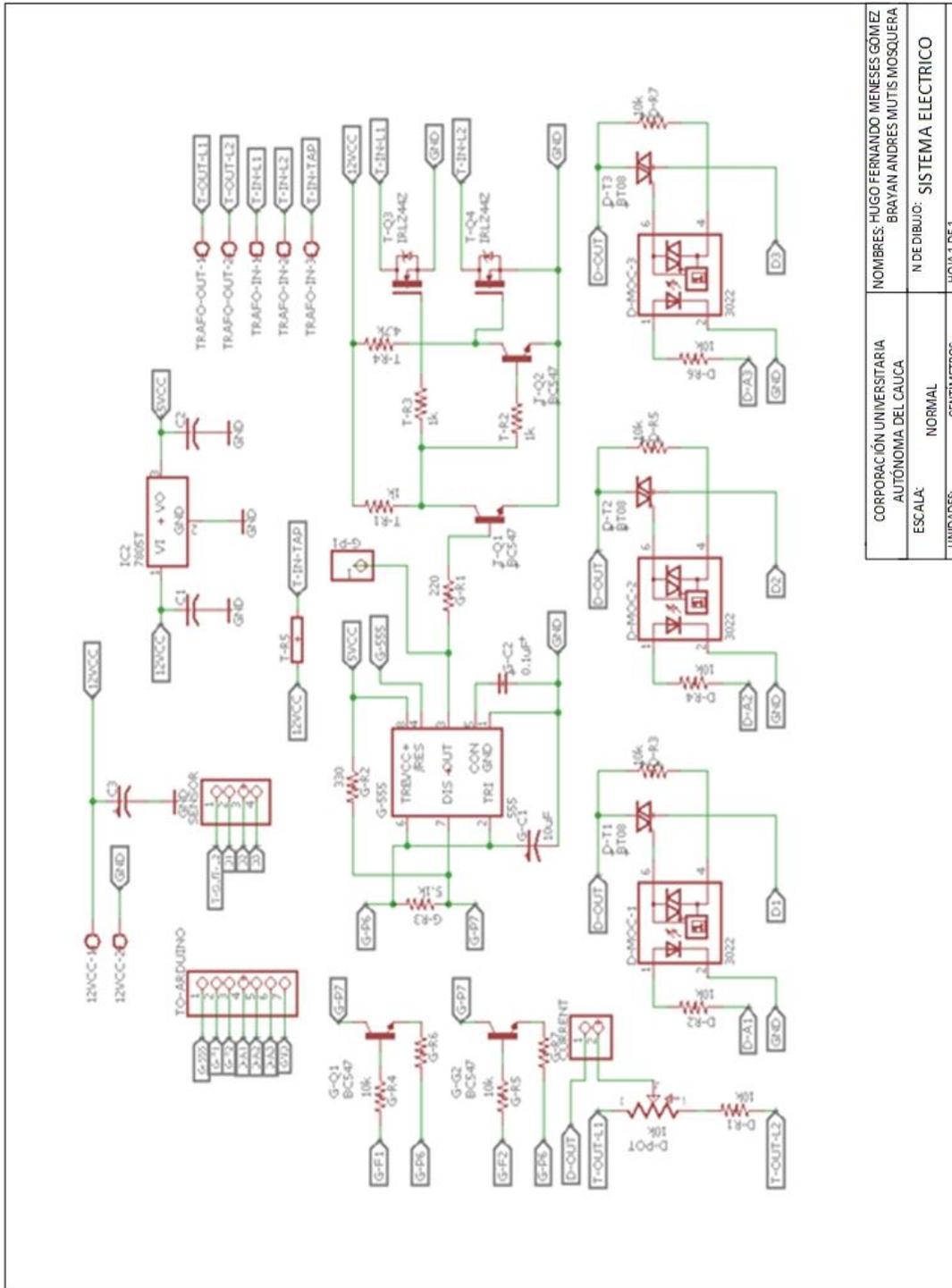
Figura 10. Diagrama hardware del sistema eléctrico.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11, se ilustra el diseño esquemático para la placa de electroestimulación, este diseño fue desarrollado en el programa Eagle 7.4.

Figura 11. Sistema de estimulación eléctrica diseñado.



Fuente: Elaboración propia.

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA	NOMBRES: HUGO FERNANDO MENESES GÓMEZ BRAYAN ANDRÉS MUTIS MOSQUERA
ESCALA: NORMAL	N DE DIBUJO: SISTEMA ELECTRICO
UNIDADES: CENTIMETROS	HOJA I DE I

A continuación, se realiza una descripción de cada una de las etapas del diseño del sistema de electroestimulación.

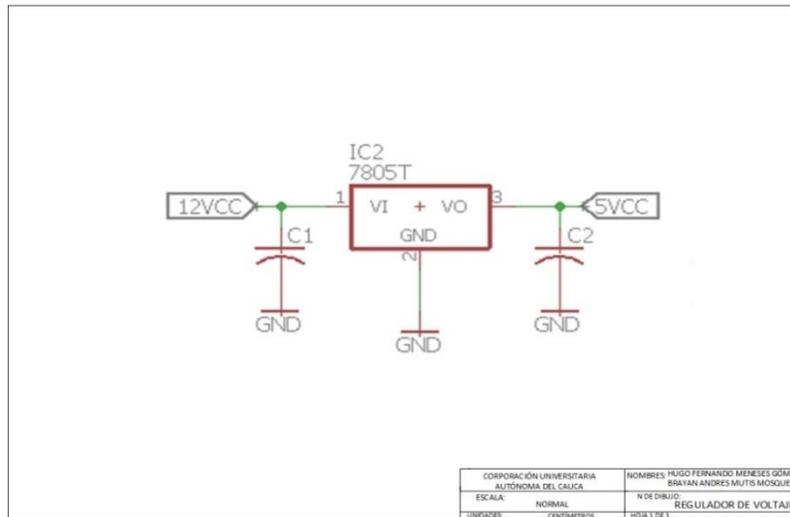
- **Alimentación**

Está dada por una Micro fuente de voltaje comercial unitec, posee sobre protección de energía, protección contra cortos circuitos y protección de sobre voltaje, además cuenta con diferentes salidas de voltaje, para el desarrollo del sistema de estimulación eléctrica se utilizó la salida a 12 voltios (v), esta conversión se realiza utilizando los 110 voltios (v) proveniente de la red eléctrica y la transforma en 12 voltios (v) de corriente directa (DC), los cuales se utilizan para alimentar el circuito hardware, ya que este cuenta con varios dispositivos que deben ser alimentados a ese voltaje, de igual manera se necesita alimentar algunos dispositivos a 5 voltios (v).

- **Regulación de voltaje**

Se emplea con el fin de controlar el voltaje que ingresa al circuito integrado 555. En la figura 12, se ilustra las conexiones realizadas para la regulación entre 12 voltios (v) a 5 voltios (v) DC.

Figura 12. Regulador de voltaje.



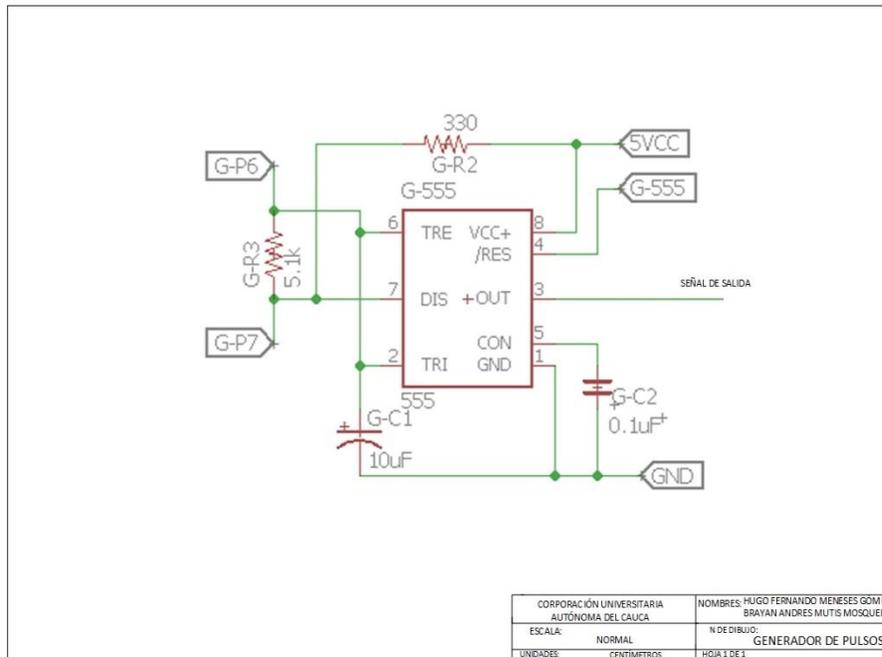
Fuente: Elaboración propia.

- **Generador de señal cuadrada**

Esta etapa se encuentra constituida por la generación de una señal cuadrada por medio de un circuito integrado 555, este chip permite modificar la frecuencia y la amplitud de la señal producida, por medio de una configuración astable que proporciona una regla de tiempo.

En la figura 13 se puede observar la implementación del integrado 555 para la generación de los pulsos con sus respectivas conexiones para la configuración astable. El chip consta de: una alimentación de entrada a 5 voltios DC (v) previamente regulada, una resistencia (R_a) de 330 ohmios (Ω) con una resistencia de 5.1 kilo ohmios ($k\Omega$) y un capacitor de 10 microfaradios (μF), además se observa que por el pin 3 del chip 555 se tiene la salida de la señal cuadrada, el pin 4 se utiliza para activar o desactivar la señal, en caso de una falla en el sistema el dispositivo mediante el pin 1 y 5 tiene la capacidad de ir directamente a tierra. Según la configuración inicial del chip 555, la frecuencia inicial generada al encender la placa es de 15 Hertz (Hz).

Figura 13. Generador de señal cuadrada.



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente proceso se puede verificar matemáticamente lo anteriormente mencionado.

Fórmula para configuración astable del integrado 555:

$$F = \left(\frac{1.44}{C(Ra + 2Rb)} \right) \quad (1)$$

F = frecuencia

1.44 = valor dado por fórmula

C = capacitor fijo

Ra = resistencia fija

Rb = resistencia que se varía

Para el cálculo de las frecuencias, se debe dejar unos valores fijos para la resistencia R_a y el capacitor C , los cuales son 330 ohmios (Ω) y 10 micro faradios (μF) respectivamente, y se varía el valor de la resistencia R_b . Se observa según la ecuación (1) que R_b es inversamente proporcional a la frecuencia de salida del circuito oscilador.

Por otro lado al realizar una serie de pruebas se observa que a frecuencias inferiores de 15 Hertz (Hz) no se tiene percepción de estímulos, por consiguiente el valor de frecuencia deseado es de 15 Hertz (Hz), En consecuencia la variable a calcular sería el valor de R_b , por lo que se debe despejar de la fórmula (1). El despeje de R_b se realiza de la siguiente manera:

$$F = \left(\frac{1.44}{C(R_a + 2R_b)} \right) \quad (1)$$

$$F * (R_a + 2R_b) = \left(\frac{1.44}{C} \right)$$

$$F * R_a + 2 * F * R_b = \left(\frac{1.44}{C} \right)$$

$$2 * F * R_b = \left(\frac{1.44}{C} \right) - F * R_a$$

$$R_b = \left(\frac{\left(\frac{1.44}{C} \right) - F * R_a}{2 * F} \right) \quad (2)$$

En la ecuación (2) se observa el resultado final del despeje de R_b , donde el siguiente procedimiento es reemplazar los valores de las constantes.

$$R_b = \left(\frac{\left(\frac{1.44}{C} \right) - F * R_a}{2 * F} \right) \quad (2)$$

$$Rb = \left(\frac{\left(\frac{1.44}{10 \text{ } \mu\text{f}} \right) - 15 \text{ Hz} * 330 \text{ } \Omega}{2 * 15 \text{ Hz}} \right) \quad (2)$$

$$Rb = 4635 \text{ } \Omega \quad (3)$$

Con el resultado de la ecuación (3) se puede verificar en la ecuación (1), cómo se obtiene una frecuencia inicial de 15 Hertz (Hz) en la placa. Se debe reemplazar (3) en (1), además de los valores de las constantes (Ra y C).

$$F = \left(\frac{1.44}{C(Ra + 2Rb)} \right) \quad (1)$$

$$F = \left(\frac{1.44}{10 \text{ } \mu\text{f} (330 \text{ } \Omega + 2 * 4635 \text{ } \Omega)} \right) \quad (1)$$

$$F = 15 \text{ Hz} \quad (4)$$

Resolviendo la ecuación (1), se verifica como obtener la frecuencia inicial de la placa, donde se obtuvo el resultado en la ecuación (4).

Teniendo en cuenta los anteriores procedimientos matemáticos, se pueden encontrar distintos valores de frecuencia deseados.

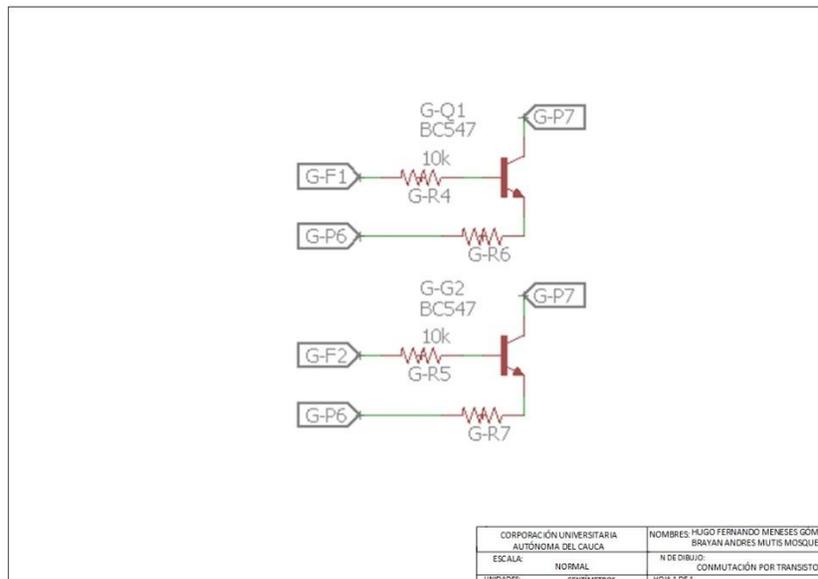
- **Conmutación por transistor**

Se implementó un acople por medio de transistores bc 547 con el objetivo de generar y switchear diferentes frecuencias en la placa por medio de resistencias variables, teniendo en cuenta que un transistor al operar en corte y saturación se comporta como un interruptor ON/OFF.

En la figura 14 se ilustra que el proceso de switcheo por transistor consta de una excitación por base, una salida por colector y un aterrizaje por emisor. La

excitación se realiza por base a través de un pin digital proveniente de la tarjeta Arduino, etiquetados como (G-F1 o G-F2), una vez el transistor se encuentre en la región de trabajo, el colector se dirige a una resistencia variable calculada anteriormente para la generación de diversas frecuencias comprendidas entre 15 y 400 Hertz (Hz) (ya que en este rango existe la generación de texturas) en paralelo con la resistencia de 5.1 kilo ohmios ($k\Omega$), finalmente se tiene un aterrizaje por emisor a tierra de toda la placa.

Figura 14. Conmutación por transistor.



Fuente: Elaboración propia.

- **Acoplador de señal**

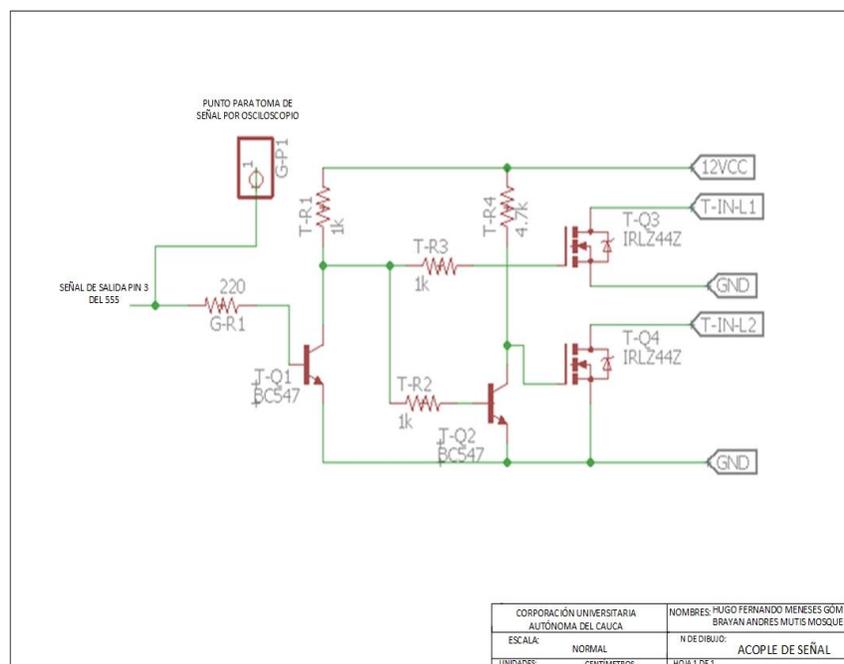
En la figura 15 se ilustra la fase de acoplar una señal, esta etapa se encarga de recibir la señal de tipo cuadrada enviada desde el pin 3 del integrado 555, posteriormente pasa por un switcheo por transistor, consecutivamente se dirige hacia dos mosfet de referencia IRLZ44Z los cuales se ocupan de conmutar las señales, por lo tanto el mosfet 1 permite obtener el flanco positivo, y el mosfet

2 el flanco negativo, después cada uno se comunica con una línea de 6 voltios del transformador para en seguida realizar una etapa de amplificación.

Asimismo, en la figura 15 se ilustra que por el pin G-P1 se consigue una lectura al conectar una sonda del osciloscopio para observar el tipo de señal generada por el oscilador.

Debido a que los mosfet para ser excitados necesitan más de 10 Voltios (v), En su terminal de compuerta (Vgt), la placa posee alimentaciones independientes, por lo tanto, la alimentación de esta etapa se encuentra a 12 voltios (v).

Figura 15. Acoplador de señal.



Fuente: Elaboración propia.

- **Amplificación por transformador**

Un transformador es una máquina que se encarga de transformar el voltaje de corriente alterna que ingresa en otro de diferente amplitud, el cual entrega a su salida [46].

El transformador consta de dos bobinas una primaria y otra secundaria. La bobina primaria es aquella que recibe el voltaje de entrada, mientras que la bobina secundaria se ocupa de entregar el voltaje transformado [46].

El tipo de transformador implementado en el sistema es monofásico, se debe aclarar el tipo, ya que también se encuentran los transformadores trifásicos. Los transformadores monofásicos reciben su nombre debido a que constan de dos devanados (uno primario y uno secundario), y los transformadores trifásicos constan de 3 devanados primarios y 3 devanados secundarios [47], teniendo en cuenta que el transformador utilizado es monofásico, se amplía su información para conocer detalladamente sus diferentes conexiones como son la configuración como reductor o elevador de tensión.

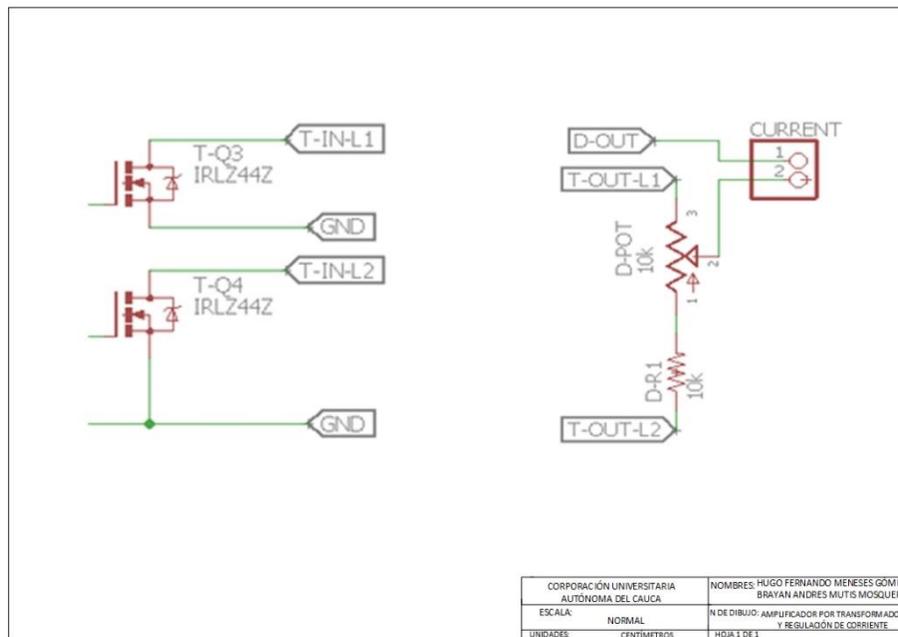
- **Transformador en conexión elevador**

En esta etapa se utiliza la configuración de un transformador en conexión elevador, ya que posee la característica de aumentar el voltaje de señal alterna que le ingresa, para ello la bobina secundaria debe poseer un número mayor de vueltas que la bobina primaria, bajo este concepto el voltaje en aquel es mayor que en el primario y, por consiguiente, el transformador aumenta el voltaje.

En la figura 16 se ilustran las conexiones realizadas a un transformador en configuración o en conexión de elevador de voltaje, además de mostrar la conexión de cómo se logra variar la amplitud de la señal (voltaje), posteriormente, se observa como los mosfet al ser excitados permiten el paso de una señal cuadrada tanto para el ciclo positivo y negativo enviada por el pin 3 del 555, esta

señal posee una amplitud máxima de 5 voltios (v) y una frecuencia variable asignada anteriormente, posteriormente ingresan a un transformador por bornes con etiquetas T-IN-L1 y T-IN-L2 que son líneas del transformador a 6 voltios (v), luego el transformador se encarga de elevar la señal de voltaje a 110 voltios AC (v).

Figura 16. Entrada de señal al transformador.



Fuente: Elaboración propia.

Después de amplificar la señal cuadrada, se utiliza un divisor de voltaje entre el potenciómetro de 10k ohmios ($k\Omega$) y la resistencia de 5k ohmios ($k\Omega$) con la finalidad de regular el voltaje que saldrá por la etiqueta D-OUT e irá hacia el actuador propuesto.

La variación de voltaje se calcula utilizando la fórmula de un divisor de voltaje.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

Esta ecuación establece que el voltaje de salida es directamente proporcional al voltaje de entrada conforme a la relación de R1 y R2, en donde R1 es una resistencia variable (Potenciómetro) de 10 kilo ohmios ($k\Omega$) y R2 es equivalente a 5 kilo ohmios ($k\Omega$).

Una vez se obtenga el voltaje de salida se procede a utilizar la siguiente ecuación para hallar la corriente que llega a la yema del dedo:

$$I = \frac{V_{out}}{\text{Resistencia del dedo}} \quad (2)$$

Para la medida de la resistencia del dedo se tiene en cuenta la literatura según [48], en donde utilizan un polímetro (multímetro) para realizar dicha medición, en el caso de estudio se utilizara un multímetro de precisión KEITHLEY 2110 y un multímetro UNI-T UT70A con el fin de comparar datos y obtener un valor promedio de las mediciones, cada multímetro tiene incorporadas dos salidas una positiva (+) y otra negativa (-), a la salida (+) se le conecta una punta de color rojo y a la salida (-) una de color negro. Después se procede a efectuar las distintas mediciones colocando las puntas sobre la yema del segundo dedo de ambas manos, es de resaltar que las medidas y su lectura se realizaron en contacto con los dedos secos, de forma tal que el promedio equivalente es aproximadamente a 10 Mega ohmios ($M\Omega$).

En la figura 17, se ilustra la toma de mediciones de la resistencia en la yema del dedo en un usuario

Figura 17. Medición de resistencia en la yema de los dedos



Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando el potenciómetro cuando el valor es 10 kilo ohmios ($k\Omega$) en (1):

$$V_{out} = 110v * \frac{5k}{10k + 5k}$$
$$V_{out} = 36.67 v \quad (3)$$

Reemplazando (3) en (2), el valor de la corriente es igual a:

$$I = \frac{36.67}{10M} = 3.66 \mu A \quad (4)$$

Reemplazando el potenciómetro cuando el valor es 0 ohmios (Ω) en (1):

$$V_{out} = 110v * \frac{5k}{0k + 5k}$$
$$V_{out} = 110 v \quad (5)$$

Reemplazando (5) en (2), el valor de la corriente es igual a:

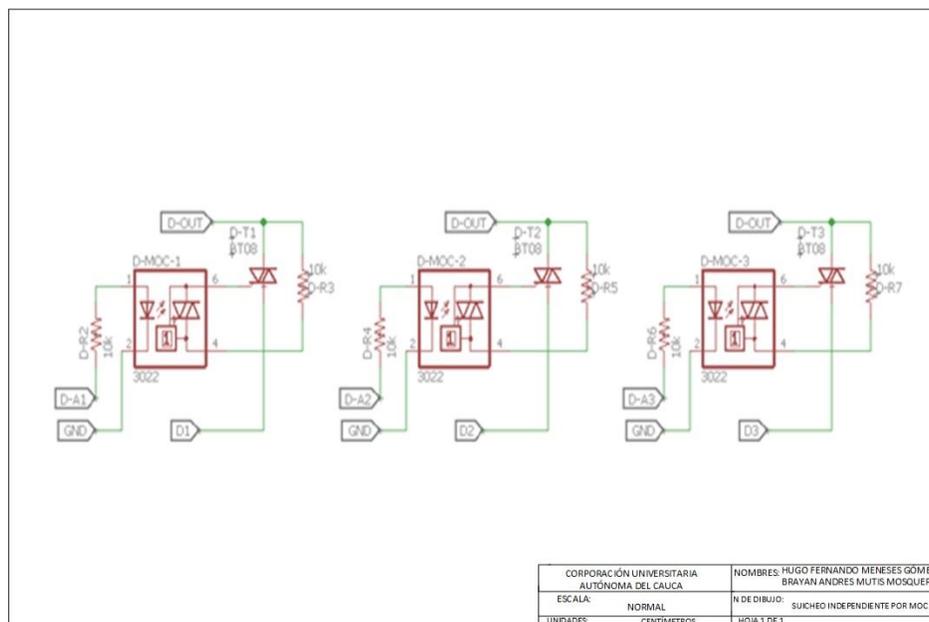
$$I = \frac{110 \text{ v}}{10 \text{ M}} = 11 \text{ uA} \quad (6)$$

- **Conmutación independiente por optoacoplador y triac**

Luego de que la señal cuadrada es amplificada se direcciona a los electrodos, estos puntos inferiores reciben una señal cuadrada, cada punto es accionado por un circuito diferente. Se cuenta entonces con un optoacoplador que se cierra por medio de un pin digital de 0 a 5 voltios (v) que es accionado por la tarjeta Arduino Mega 2560 y el cual habilita el paso de corriente al triac permitiendo la conmutación, y posteriormente la estimulación en el dedo.

En la figura 18, se ilustra el diagrama esquemático de un optoacoplador conectado a un triac para habilitar y deshabilitar un pin electrodo.

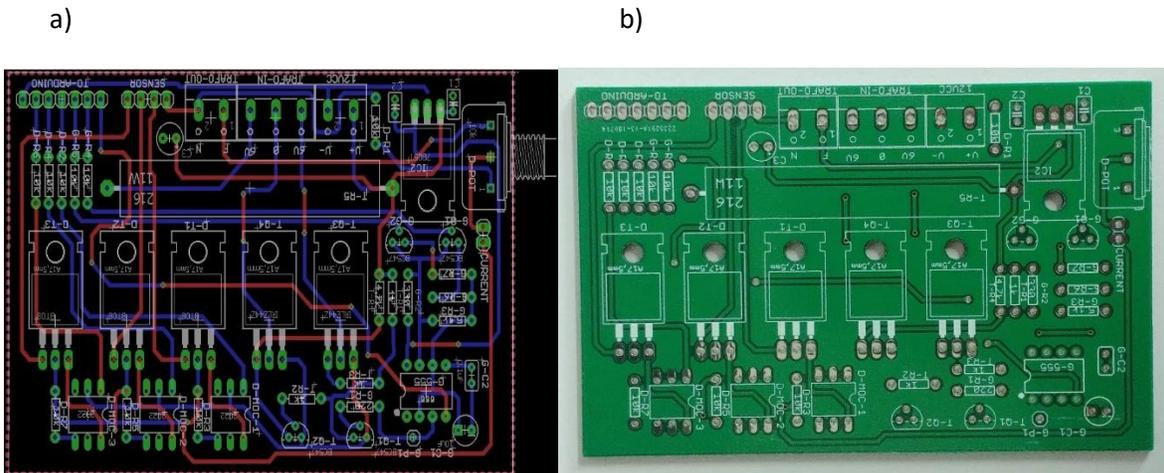
Figura 18. Conexión de optoacoplador y triac para activación de electrodo.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 19, se ilustra en el apartado a) el diseño de la placa PCB realizada en Eagle 7.4 y en el apartado b) el resultado de la placa PCB sin soldar con el circuito impreso para el sistema de estimulación eléctrica.

Figura 19. Diseño PCB y placa sin ensamblar del sistema.



Fuente: Elaboración propia. a) Diseño placa PCB, b) Resultado de la placa.

En la figura 20, se logra observar la placa en el proceso de ensamblaje de sus componentes electrónicos.

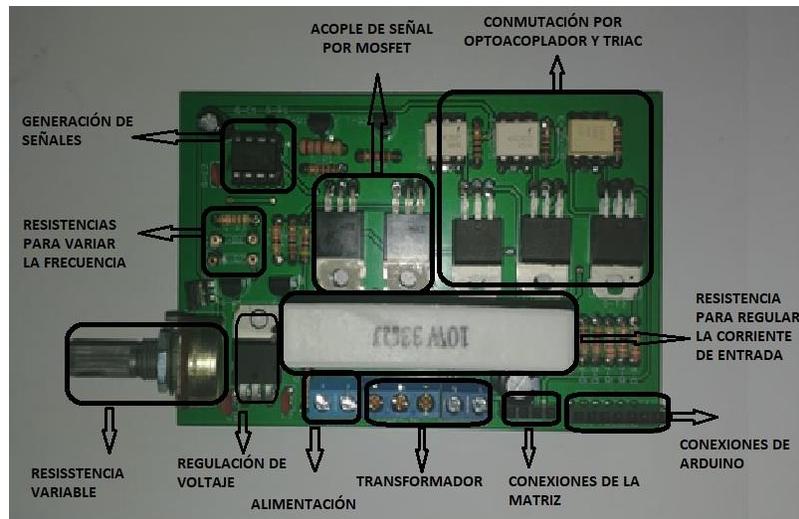
Figura 20. Placa en proceso de ensamblaje.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 21, se muestra la placa final, la cual tiene las siguientes características: 12 centímetros (cm) de largo por 10 centímetros (cm) de ancho, es doble capa, aproximadamente de 1.6 milímetros (mm) de espesor y 15 gramos (g) de peso.

Figura 21. Placa terminada.



Fuente: Elaboración propia.

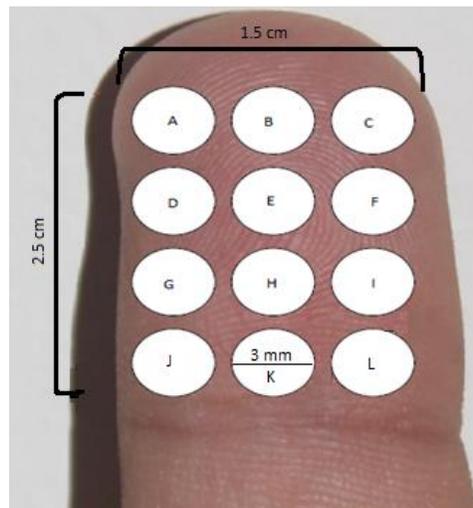
3.1.2 Componente actuador

Se diseña un electrodo tipo matriz flexible para la actuación sobre la yema de los dedos por medio de impulsos eléctricos, se consideró que el PCB fuera de tipo flexible con el fin de que se pueda adaptar a la forma de la yema de los dedos, además se dispuso que la matriz sea de 4 filas por 3 columnas, debido al tamaño del dedo índice de un adulto promedio (falange distal) con medidas de 1.5 centímetros (cm) de ancho por 2.5 centímetros (cm) de largo, ya que con esta distribución se logra abarcar toda la zona del dedo que se desea estimular, las principales características de fabricación de la matriz son:

Impreso en PCB flexible, las pistas y nodos son en cobre, la dimensión de cada pin electrodo es de 3 milímetros (mm), las pistas son de 0.25 milímetros (mm) de grueso; correspondiente a su distribución las primeras tres filas de la matriz son implementadas para electroestimulación y la última fila corresponde a la señal de salida proveniente del transformador.

En la figura 22 se denota la distribución de la matriz para un dedo índice de un adulto promedio con medidas de 1.5 centímetros (cm) de ancho por 2.5 centímetros (cm) de largo.

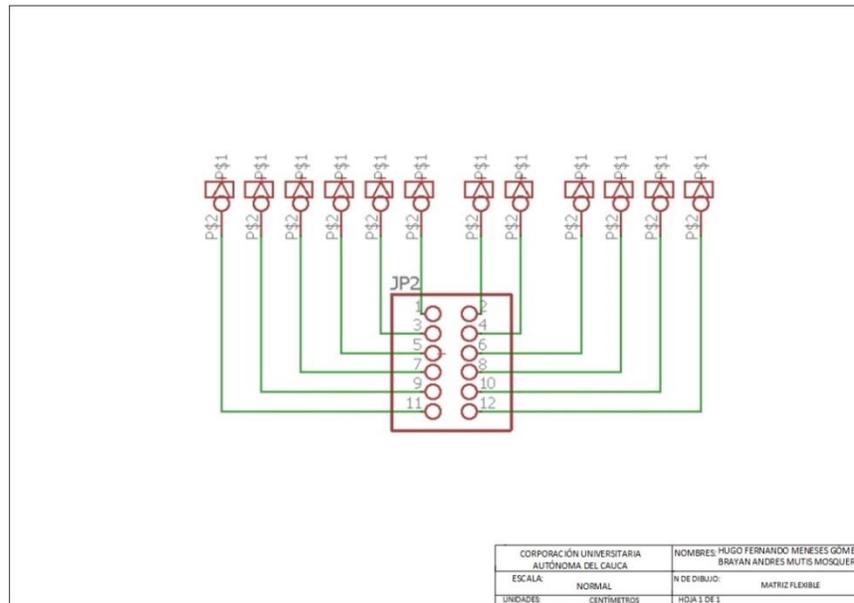
Figura 22. Distribución de los electrodos.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 23, se ilustra la disposición de la matriz de electrodos en el software Eagle 7.4, como un esquemático.

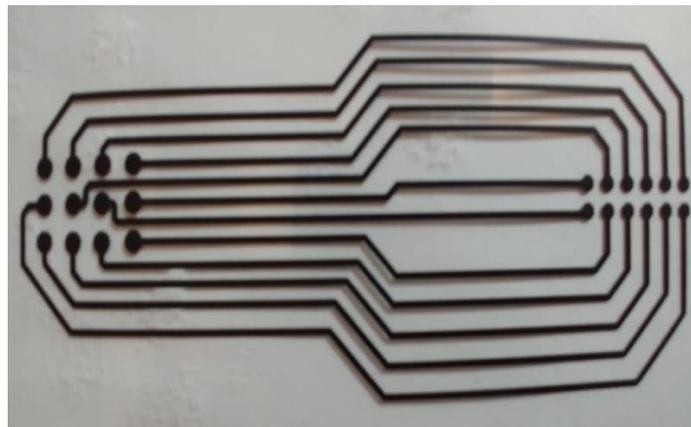
Figura 23. Diagrama esquemático.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 24, se muestra el diseño impreso en acetato de la matriz antes de ser fabricada.

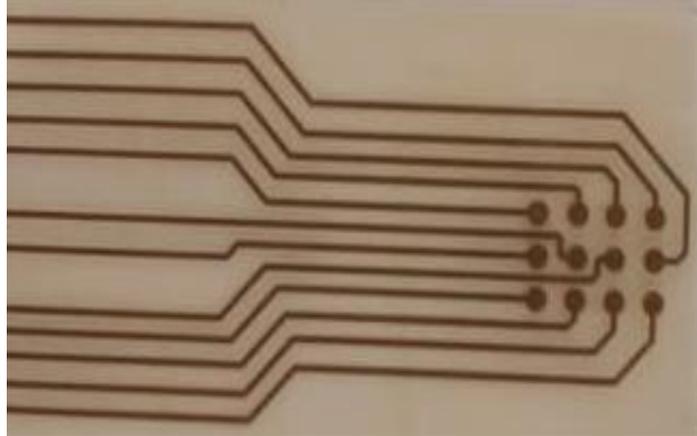
Figura 24. Vista de la board generada por Eagle.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, se puede observar la figura 25 con la matriz elaborada en PCB flexible.

Figura 25. Matriz en la PCB flexible.



Fuente: Elaboración propia.

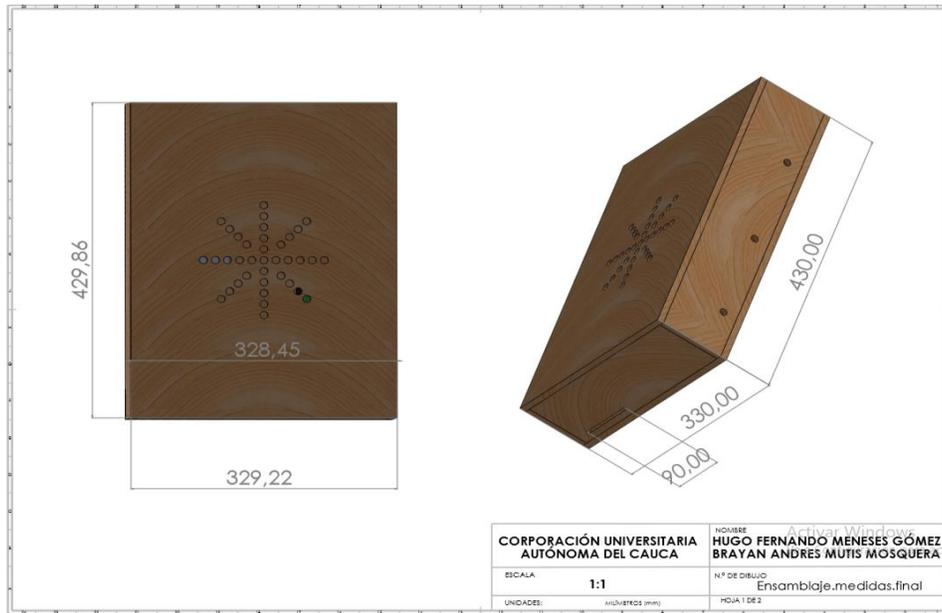
3.1.3 Componente chasis

Para generar protección contra caídas, golpes y la luz solar a la tarjeta Arduino Mega 2560 como también a la tarjeta de electroestimulación, se diseñó una caja o chasis en madera.

El diseño se realizó en el programa SolidWords y posteriormente recortada en una máquina CNC (control numérico computarizado), además de generar protección ante posibles golpes, también ofrece mayor comodidad para su traslado.

En la figura 26, se puede apreciar las medidas que tiene el chasis.

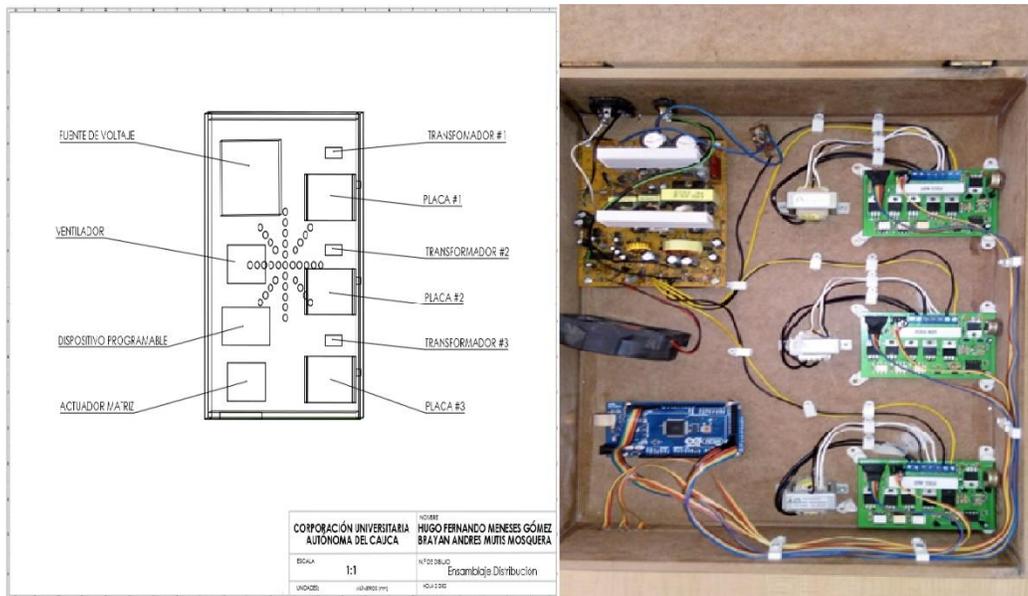
Figura 26. Medidas del chasis.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 27, ilustra el prototipo de electroestimulación ensamblado.

Figura 27. Distribución final de los elementos.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Componente Software

El desarrollo de la interfaz de electroestimulación se lleva a cabo en el software LabView 2016. La interfaz de usuario consta de un menú en el cual se crearon dos pantallas; la primera corresponde a la presentación y la otra es la pantalla principal. La pantalla de presentación contiene el nombre del proyecto, los nombres de los estudiantes y el escudo de la universidad.

En la figura 28, se ilustra el contenido de la pantalla de presentación.

Figura 28. Pantalla de presentación.



Fuente: Elaboración propia.

La pantalla principal o también denominada como pantalla de control está estructurada por medio de 4 sub-paneles independientes llamados:

- 1) Panel de selección de frecuencias,
- 2) Panel de electrodos,
- 3) Panel de señal portadora, y
- 4) Visa y stop.

En la figura 29, se ilustra el contenido de la pantalla principal.

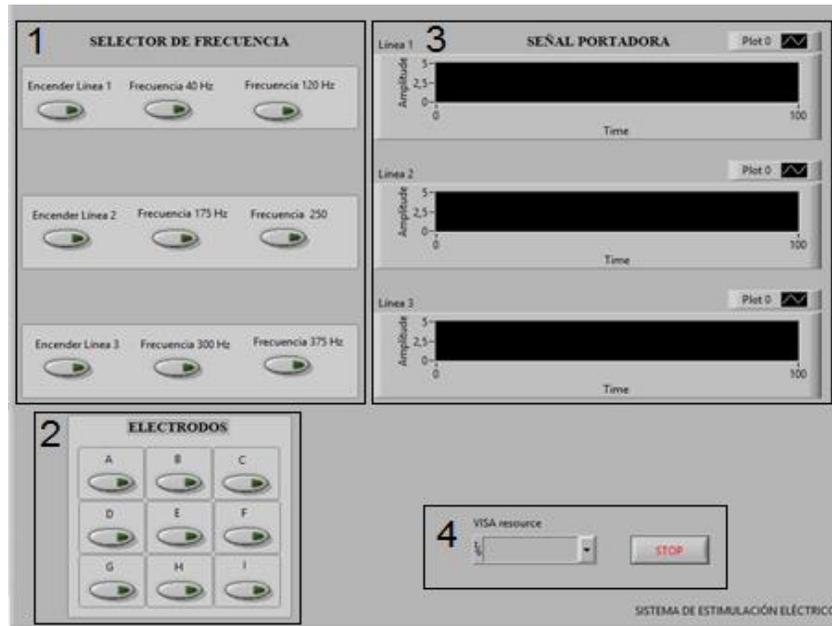
En 29-1 se ilustra el selector de frecuencia creado con 3 botones por fila de electrodos, se tiene el botón de encender línea que se encarga de habilitar el flujo de la señal cuadrada proveniente del LM555, posteriormente se tiene dos botones adicionales a la línea de encendido que se encargan de modificar la frecuencia de las placas PCB.

En 29-2 se ilustra, el panel de electrodos creado con 9 botones, cada botón indica un punto de activación equivalente en la matriz flexible, al momento de activación se permite estimular un punto focal o en su defecto emplear una combinación de ellos.

En 29-3 se ilustra, el panel de señal portadora creado con tres visualizadores de señal cuadrada proveniente del dispositivo 555, cabe destacar que cada visualizador corresponde a una placa PCB

En 29-4 se ilustra, una casilla denominada VISA utilizada para elegir un puerto de comunicación disponible para ser usado como conexión entre la interfaz y la tarjeta Arduino Mega 2560, además posee un botón de STOP el cual permite detener en cualquier momento la interfaz y así el proceso generado por el sistema de electroestimulación.

Figura 29. Pantalla principal o de control del sistema eléctrico.



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Aspectos generales del diseño del prototipo basado en vibración

Por medio de la definición de componentes descritos para el sistema de vibración, se realiza la descripción de características a tener en cuenta para el desarrollo de cada una de sus partes. En la tabla 2 se describen las características del sistema de vibración.

Tabla 2. Características generales de diseño del prototipo vibratorio.

Componente del prototipo	Características
Hardware	Manipulación de encendido y apagado, frecuencias variables que permitan la reproducción del estímulo táctil para el reconocimiento de texturas.

Actuador	<p>Actuador con contacto directo en la yema de los dedos, disposición de un vibro motor para obtener diversos estímulos en la yema de los dedos.</p> <p>Criterio de portabilidad debido a su forma compacta, tamaño reducido y bajo peso.</p>
Chasis	<p>Construcción hecha en madera para contener los dispositivos del prototipo.</p>
Software	<p>Indicador de frecuencia, indicador de distancia, lectura de bytes, visualizador de distancia.</p>

Fuente: elaboración propia.

3.2.1 Componente hardware

Para dar cumplimiento a los requerimientos expuestos en la tabla 2, se plantea una propuesta de diseño hardware para el sistema de estimulación vibratoria.

En la figura 30, se ilustra el diagrama general del hardware para el sistema de estimulación vibratoria. En este diagrama de bloques, se encuentra de forma general las partes que constituyen el sistema. Se parte de una alimentación, para que los dispositivos entren en funcionamiento, por otro lado se tiene un bloque compuesto de un sensor, el cual tiene como función registrar y enviar datos a la

tarjeta Arduino, donde será el encargado de procesar dicho dato o información con el objetivo de enviar una señal de activación al driver, el cual permite manipular el funcionamiento del motor.

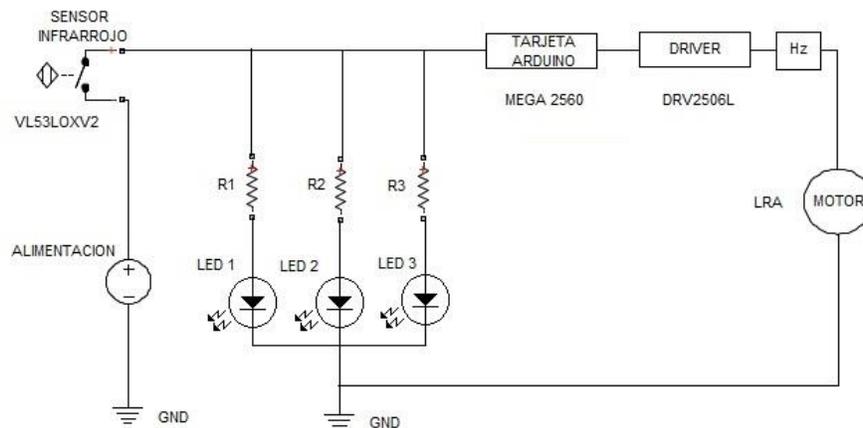
Figura 30. Diagrama de bloques del sistema de estimulación vibratoria.



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente en la figura 31, se describe de manera específica la estructura del sistema propuesto.

Figura 31. Diagrama hardware del sistema vibratorio propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se realiza una descripción de cada una de las etapas del diseño del sistema de estimulación vibratoria.

- **Alimentación**

La alimentación del sistema está dada a 5 voltios (v), este voltaje es generado por la tarjeta Arduino Mega 2560, que a su vez es alimentado por medio de puerto USB desde un computador.

- **Proceso**

Para el control del sistema se definieron tres rangos de distancia, los cuales son medidos por un sensor infrarrojo, cada rango posee un led indicador para visualizar la posición del dedo y una señal de activación diferente.

- **Salida**

Para la etapa de salida se tiene un accionador háptico (driver) el cual proporciona un sistema de control de activación para el motor LRA que es el actuador final del dispositivo, dado que el driver necesita de una señal de accionamiento para funcionar se utiliza la tarjeta Arduino a fin de proporcionarle dicha señal de entrada.

3.2.2 Componente actuador

Puesto que para el componente actuador se debe de disponer de un dispositivo vibro táctil se realiza una búsqueda sistemática para evaluar desempeños de sistemas comerciales más utilizados y así tener certeza del dispositivo a utilizar, en la tabla 3 se resumen.

Tabla 3. Características de desempeño de vibro motores.

Atributo	ERM	LRA	Piezo mono capa	Piezo multi capa
Desempeño	BUENO	MUY BUENO	EXCELENTE	EXCELENTE
Aceleración	1 g	1 y 2 g	3 a 5 g	3 a 5 g
Ruido audible	Muy ruidoso	Ruido bajo	Silencioso	Silencioso
Tiempo de respuesta	50 ms	30 ms	0.5 ms	0.5 ms
Consumo de energía	Alto	Bajo	Muy bajo	Muy bajo
Voltaje de trabajo	3 Vdc	3 Vdc	100 a 200 Vdc	100 a 200 Vdc
Alta definición háptica	No	No	Si	Si
Costo	Muy bajo	Bajo	Alto	Muy alto

Fuente: tomada de [49].

En la tabla 4 se ilustran otras características que tienen relevancia como lo son: el peso, portabilidad, consumo eléctrico, choque eléctrico y resolución para la selección del dispositivo vibro táctil.

Tabla 4. Características de los vibro motores.

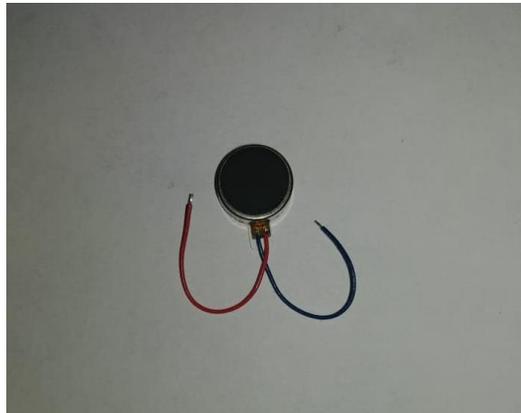
Dispositivo	Peso	Portabilidad / Adaptabilidad	Consumo eléctrico	Choque eléctrico	Resolución
ERM (Masa de Rotación Excéntrica)	Bajo	Alta / Media	Bajo	Bajo	Media
LRA (Actuador de Resonancia Lineal)	Bajo	Alta / Alta	Bajo	Bajo	Media
Piezo eléctrico	Bajo	Alta / Alta	Alto	Alto	Media

Fuente: Tomada de [18].

Posteriormente después de evaluar y comparar las características de cada uno de los dispositivos se observó que el motor piezo eléctrico es el que tiene mejor desempeño, pero debido a que una característica de diseño del sistema es la alimentación de 5 voltios (v), y este motor piezo eléctrico necesita de una alimentación de 100 a 200 voltios (v), además se tiene en cuenta su elevado costo, lo que no entra en consideración, por esa razón se excluye su implementación, por ello se busca la mejor opción entre los dispositivos restantes evaluados, en consecuencia se decide elegir el vibro motor LRA, el cual sí cumple con las requisitos de voltaje y en la mejor relación costo-beneficio para el proyecto.

En la figura 32, se muestra el actuador háptico vibro táctil LRA seleccionado.

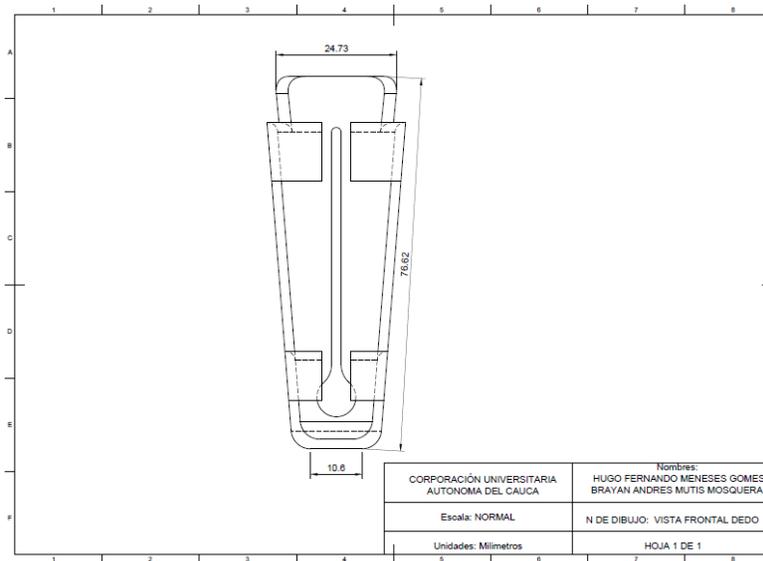
Figura 32. Motor LRA elegido para el proyecto.



Fuente: Elaboración propia

Para sostener el dispositivo de vibración, fue necesario el uso de un dedal, el cual brinda agarre al vibro motor y genera mayor comodidad. Este dedal se diseñó en el programa fusión 360 y su fabricación fue por medio de una impresora 3D. En la figura 33 ilustra una vista del diseño del dedal en fusión 360 con sus respectivas medidas.

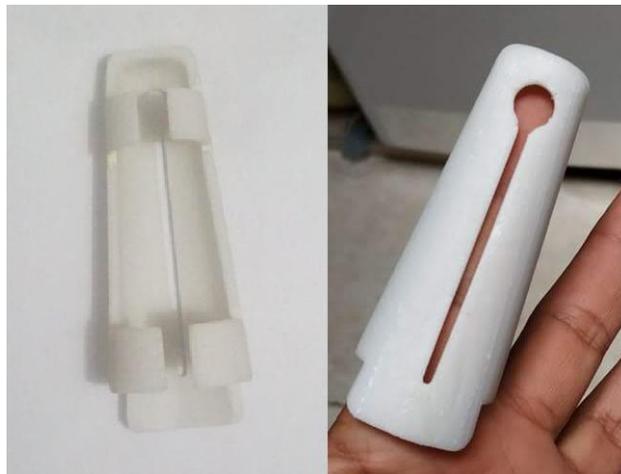
Figura 33. Vista frontal del dedal.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 34, se presenta el dedal fabricado.

Figura 34. Dedal fabricado.

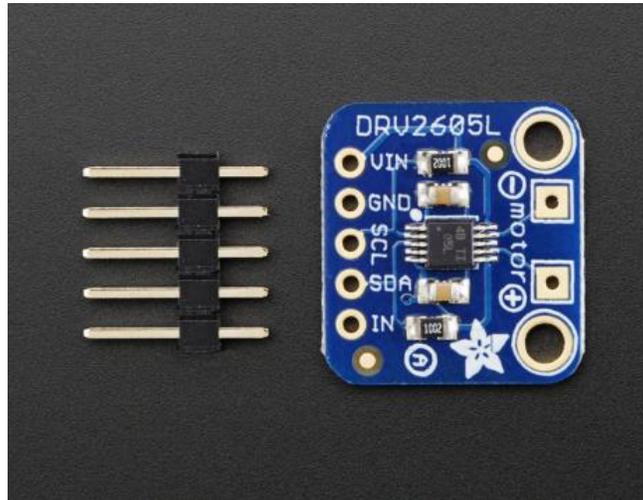


Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente para el control del vibro motor se hace necesario utilizar un driver que se encargue de su funcionamiento, para ello se utiliza el driver dvr2605 el cual tiene la capacidad de aumentar o disminuir el nivel de vibración del motor.

En la figura 35, se ilustra el driver utilizado para el control del motor LRA

Figura 35. Driver DVR2605L.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Componente chasis

El chasis es una estructura hecha en madera que contendrá todos los dispositivos electrónicos, sus dimensiones son 22 centímetros (cm) de largo, 8 centímetros (cm) de alto (hasta la tapa superior sin tener en cuenta los que están sobre ella) y 15 centímetros (cm) de ancho, además cuenta en la parte superior con una regla métrica real impresa, de igual manera cuenta con la distribución de los leds y en el interior del chasis el cableado de conexiones de los dispositivos utilizados.

En la figura 36, se ilustra el chasis desde una vista frontal y de su interior con los dispositivos conectados y encendidos.

Figura 36. Chasis del sistema vibratorio.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Componente software

El desarrollo de la interfaz de estimulación vibratoria se lleva a cabo en el software LabView 2016. La interfaz de usuario consta de un menú en el cual se crearon dos pantallas; la primera corresponde a la presentación y la otra es la pantalla principal. La pantalla de presentación contiene el nombre del proyecto, los nombres de los estudiantes y el escudo de la universidad.

En la figura 28, se ilustra el contenido de la pantalla de presentación.

La pantalla principal o también denominada como pantalla de control está estructurada por medio de 5 sub-paneles independientes llamados:

- 1) Panel de grafica de distancia, 2) Panel de indicador de frecuencia, 3) Panel de indicador de distancia, 4) lectura de bytes, y 5) configuración VISA.

En la figura 37, se ilustra el contenido de la pantalla principal.

En la figura 36-1 se ilustra la gráfica de distancia creada con el fin de mostrar la distancia en el tiempo

En 37-2 se ilustra, el panel indicador de frecuencia creado con 3 leds virtuales los cuales están sincronizados con los 3 leds reales, se activa dependiendo de la distancia que marque el sensor infrarrojo

En 37-3 se ilustra, el panel indicador de distancia el cual posee un cuadro de texto que muestra la distancia

En 37-4 se ilustra el panel lectura de bytes, el cual posee una casilla que muestra la cantidad de datos que se están recibiendo

En 37-5 se ilustra el panel configuración VISA en donde tenemos dos recuadros, el primero llamado VISA se encarga de escoger el puerto de comunicación que va a enlazar a la interfaz de Labview con la tarjeta Arduino Mega 2560 y el otro recuadro permite escoger la velocidad de transmisión de datos.

Figura 37. Pantalla principal o de control del sistema vibratorio.



Fuente: Elaboración propia.

4. DISEÑO DE UN MÉTODO PSICOFÍSICO PARA EVALUAR EL SISTEMA HÁPTICO PROPUESTO.

En este capítulo, se desarrolla cada etapa propuesta en la sección de metodologías psicofísicas, las fases se realizan con el prototipo de electroestimulación y el prototipo de vibración en un mismo grupo de participantes.

4.1 Selección de la población

Se realizó una selección de una muestra para el estudio, dependiendo de los registros de selección de población utilizada en la literatura según [34], [36], [40]. En donde utilizan de 8 a 12 usuarios, teniendo en cuenta que estos estudios plantean que es favorable ampliar la muestra, se trata de buscar la mayor cantidad de usuarios posibles, logrando un grupo de 24 personas de diversas edades comprendidas entre 20 a 49 años de edad. La selección de este grupo se hace con el objetivo de reducir en un cierto modo sesgos producidos por muestras pequeñas que conlleven a inducir a los participantes a las respuestas sobre los experimentos planteados.

Además la muestra se encuentra dividida entre 12 hombres y 12 mujeres, así mismo esta se encuentra distribuida en 3 grupos donde se mantiene la misma proporción de las edades, estos grupos están establecidos por 8 personas y a su vez se encuentran divididos por 4 hombres y 4 mujeres respectivamente, siendo estos:

Grupo A: 20-29 años

Grupo B: 30-39 años

Grupo C: 40-49 años

En la tabla 5, se presentan las características de los sujetos de prueba.

Tabla 5. Características de los participantes.

Participante	Sexo	Edad	Ocupación
P1	Masculino	20	Laboratorista
P2	Masculino	37	Estudiante
P3	Masculino	41	Abogado
P4	Masculino	29	Ingeniero
P5	Femenino	25	Ama de casa
P6	Femenino	30	Abogada
P7	Femenino	47	Administradora
P8	Femenino	49	Medica
P9	Masculino	30	Matemático
P10	Masculino	25	Físico
P11	Masculino	49	Físico
P12	Masculino	33	Estudiante
P13	Femenino	28	Nutricionista
P14	Femenino	33	Nutricionista
P15	Femenino	35	Ingeniera
P16	Femenino	40	Ama de casa
P17	Masculino	39	Administrador
P18	Masculino	20	Secretario
P19	Masculino	41	Enfermero
P20	Masculino	44	Estudiante
P21	Femenino	38	Abogada
P22	Femenino	27	Economista
P23	Femenino	27	Nutricionista
P24	Femenino	48	Enfermera

Fuente: Elaboración propia.

Es de notar, que previamente a la selección de la población de los 24 usuarios se les realizó una serie de preguntas como por ejemplo: si contenían algún tipo de equipo, platina en su cuerpo o si presentaban alergias a los materiales de los actuadores con el fin de conocer si estas eran aptas para participar en el estudio. Así mismo se les explicó las etapas a desarrollar con los dispositivos hápticos.

4.2 Etapa de adecuación

La etapa de adecuación consiste en realizar un acercamiento entre la yema de los dedos y el actuador tipo matriz y tipo vibrador por parte de los usuarios. Esto se realiza mediante una descripción por parte de los autores hacia los participantes de que o como estaba constituido el dispositivo háptico, también se da a conocer la adecuada posición de la extremidad en el actuador, además esta etapa conlleva un proceso de limpieza a cada participante en su extremidad, para ello deben lavarse las manos con agua y jabón, posteriormente deben secar muy bien las manos, después de ello se debe frotar la yema del dedo índice con un algodón que contiene alcohol etílico.

En la figura 38, se ilustra a dos usuarios en la etapa de adecuación con los actuadores de cada prototipo.

Figura 38. Usuarios en etapa de adecuación.



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Etapa de entrenamiento

La etapa de entrenamiento se realiza con cada uno de los participantes, con el propósito de enseñarle a focalizar los estímulos, además de establecer psicológicamente un estado de costumbre frente a la estimulación eléctrica y la vibración.

En esta etapa se procede a realizar la activación de un electrodo aleatorio para posteriormente realizar la activación de una secuencia de electrodos a una frecuencia fija, en el caso de la electroestimulación, de igual manera se realiza la activación del vibrador que se encuentra dispuesto sobre el dedal, este proceso cuenta con un tiempo de excitación y un tiempo de reposo.

Basados en la literatura se han visto que autores tales como Masashi Konyo y colaboradores, Juárez y colaborador [50], [51] especifican que los tiempos de estimulación no son estándar, así como los tiempos de descanso, por lo tanto se selecciona un tiempo de excitación inicial correspondiente a 5 segundos (s), con el fin de que el usuario capte los estímulos o sensaciones, de igual manera se incluye un tiempo de descanso determinado por 5 veces el tiempo de excitación con el objetivo de evitar calentamiento y deformaciones en la yema de los dedos, en este tiempo se debe reposar la yema de los dedos en una placa de vidrio.

En la figura 39, se observa a dos usuarios reposando la yema de los dedos después de la etapa de entrenamiento con cada dispositivo.

Figura 39. Usuarios en entrenamiento.



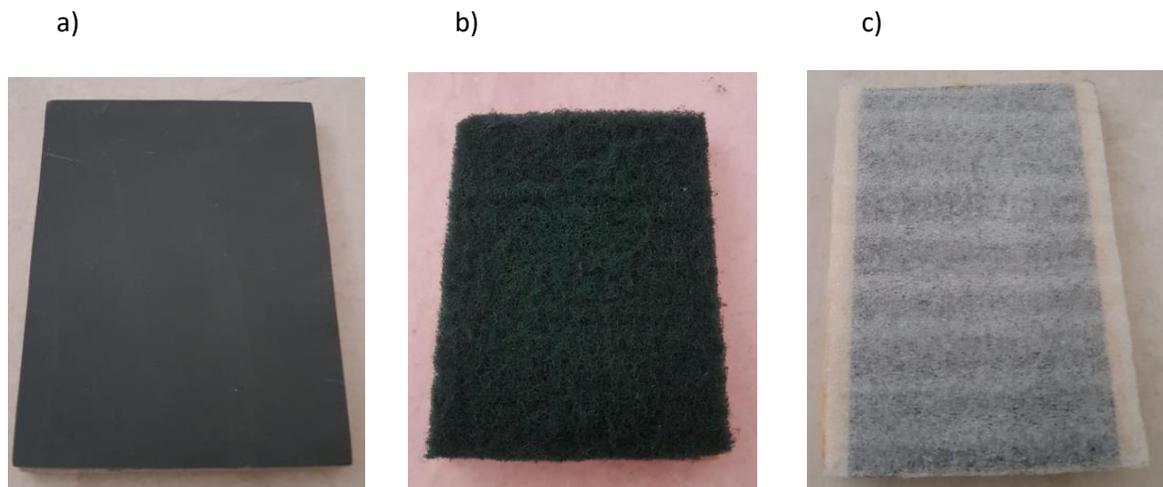
Fuente: Elaboración propia.

4.4 Etapa de diferenciabilidad

En la etapa de diferenciabilidad se solicitó a cada participante que realizara un total de 3 reconocimientos de superficies de materiales reales, estos materiales se encuentran dispuestos sobre unas placas de madera de dimensiones de 5 centímetros (cm) por 4 centímetros (cm), siendo estos: lija para carpintería de la marca ABRACOL calibre 1000, esponja de brillo y plástico.

En la figura 40, se ilustran los materiales seleccionados.

Figura 40. Materiales seleccionados.

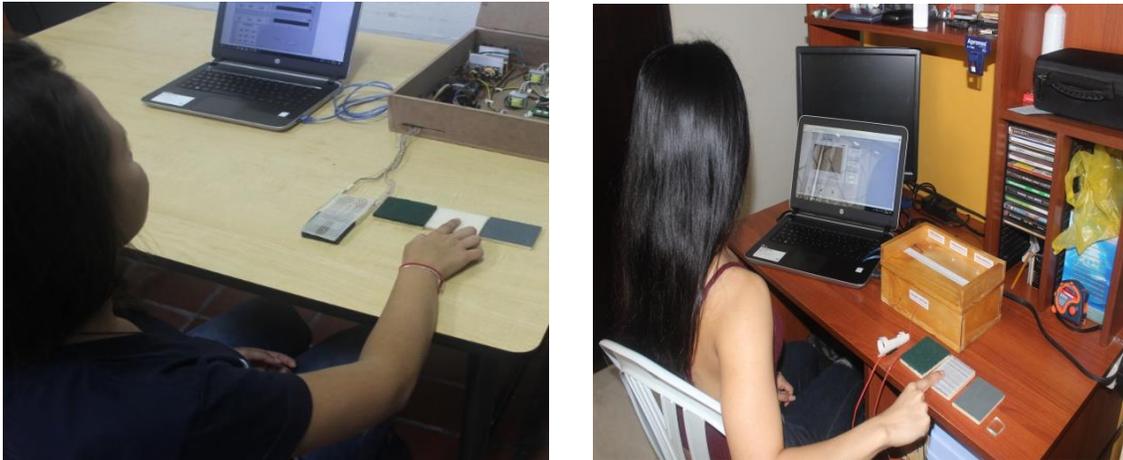


Fuente: Elaboración propia. a) Lija, b) Esponja, c) Plástico.

Posteriormente, se le solicitó a cada participante ejecutar o realizar movimientos exploratorios con la yema de los dedos en forma de círculos o de arriba abajo, sobre las superficies de los materiales.

En la figura 41, se ilustra a dos participantes realizando el proceso de reconocimiento entre texturas.

Figura 41. Usuarios en etapa de diferenciabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

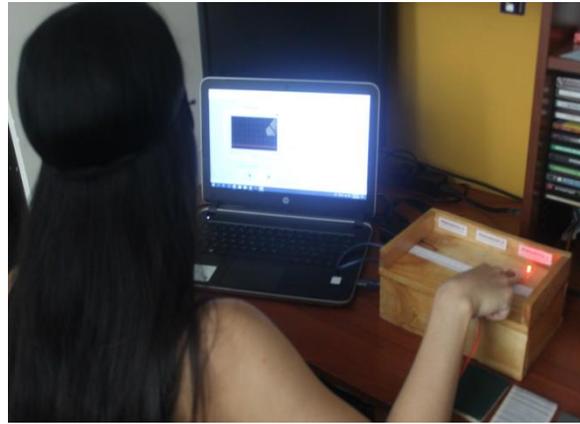
4.5 Etapa de ejecución

Posteriormente se le solicitó a cada usuario que, una vez ejecutado la etapa de diferenciabilidad, colocara la yema del dedo en el actuador tipo matriz y en el dedal que dispone el actuador de vibración para encontrar una semejanza por medio de un estímulo con una característica física y/o el nombre de la textura de la superficie.

Dicha respuesta se consignó en forma tabulada, se obtuvo igualmente una retroalimentación sobre la percepción de comodidad del dispositivo al interactuar con el usuario, este proceso se llevó a cabo con los ojos vendados y con auriculares para aumentar la concentración en esta última etapa del protocolo psicofísico.

En la figura 42, se ilustran a dos usuarios en las etapas de ejecución.

Figura 42. Usuarios en la etapa de ejecución.



Fuente: Elaboración propia.

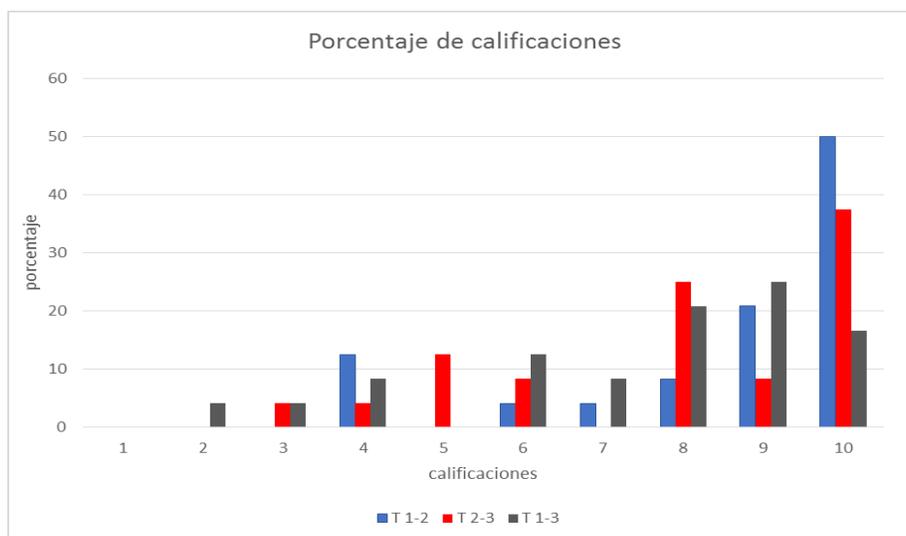
5. CRITERIO ESTADÍSTICO DE EVALUACION

5.1 Evaluación para la reproducción de texturas

Se presentaron tres materiales reales, con los cuales se realizaron parejas, siendo estas, T 1-2: esponja y plástico, T 2-3: plástico y lija, y T 1-3: esponja y lija, este proceso se consideró de esta manera con el fin de generar estímulos o sensaciones diferenciables al ejecutarse un movimiento activo sobre cada material; una vez realizada la interacción con los materiales, se le solicitó a cada participante que para cada pareja en una escala de 0 a 10 expresara un valor, siendo 0 que la pareja de materiales no se percibe diferente, y 10 que la pareja se percibe diferente, este procedimiento se realizó basados en los trabajos presentados por Okamoto y colaboradores, Konyo y colaboradores, Weber y colaboradores y Heaps y colaborador [33], [50], [52], [53].

La figura 43 muestra los resultados de la etapa de diferenciabilidad. En el eje X se ilustra la escala de 0 a 10 que representa las calificaciones, y en el eje Y el porcentaje de la muestra que interpuso cada calificación.

Figura 43. Distribución de las calificaciones en la etapa de diferenciabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

La relevancia estadística con respecto al comportamiento de las calificaciones para cada par de texturas reales se analizó por medidas descriptivas como: el mínimo, el máximo, la media, la desviación estándar, la mediana, el rango intercuartílico y el coeficiente de asimetría, descrito en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros descriptivos.

	T 1-2	T 2-3	T 1-3
Mínimo	4	3	2
Máximo	10	10	10
Media	8,583333333	7,916666667	7,458333333
Desviación Estandar	2,062431378	2,22469669	2,302723655
Mediana	9,5	8	8
Rango Intercuartílico	2	3	2,7
Coefficiente de asimetría	-1,492064417	-0,79058779	-0,99056129

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión se observa que el par de texturas T 1-2, presenta el mayor porcentaje de diferenciabilidad en la muestra con un valor del 50 % y una calificación de 10, asimismo reflejado en la media con un valor de 8.583, posteriormente se registra el par de texturas T 2-3 con una media de 7.916, y finalmente el par de texturas T 1-3 con un valor de 7.458.

La distribución de las variaciones reflejadas en los coeficientes de asimetría, arrojan valores negativos, por tanto, debe aplicarse la prueba de Kolmogórov-Smirnov (test que verifica la normalidad de los datos obtenidos), para observar si los datos se distribuyen normalmente y así determinar si se realiza pruebas paramétricas o no paramétricas al caso de estudio. El análisis de la prueba del Kolmogórov-Smirnov se realizó en el software de IBM (Maquina de Negocios Internacionales) SPSS statistics 23 [54].

En la tabla 7, se muestra los resultados al aplicar la prueba en el par de texturas 1-2.

Tabla 7. Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov en T 1-2.

		T12
N		24
Parámetros normales ^{a,b}	Media	8,5833
	Desviación estándar	2,06243
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,288
	Positivo	,246
	Negativo	-,288
Estadístico de prueba		,288
Sig. asintótica (bilateral)		,000 ^c

Fuente: Tomada de [54].

En la tabla 8, se muestra los resultados al aplicar la prueba en el par de texturas 2-3.

Tabla 8. Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov en T 2-3.

		T23
N		24
Parámetros normales ^{a,b}	Media	7,9167
	Desviación estándar	2,22470
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,223
	Positivo	,175
	Negativo	-,223
Estadístico de prueba		,223
Sig. asintótica (bilateral)		,003 ^c

Fuente: Tomada de [54].

En la tabla 9, se muestra los resultados al aplicar la prueba en el par de texturas 1-3.

Tabla 9. Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov en T 1-3.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra		T13
N		24
Parámetros normales ^{a,b}	Media	7,4583
	Desviación estándar	2,30272
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,218
	Positivo	,135
	Negativo	-,218
Estadístico de prueba		,218
Sig. asintótica (bilateral)		,005 ^c

Fuente: Tomada de [54].

Del mismo modo en el test de Kolmogórov-Smirnov se plantean para la investigación dos hipótesis, se tiene la hipótesis nula que hace referencia a que los datos analizados siguen una distribución normal, y la hipótesis del investigador la cual indica que los datos analizados no siguen una distribución normal, como se obtuvo un valor de significancia menor al 0.05 se rechaza entonces la hipótesis nula, por consiguiente se establece que los datos analizados no siguen una distribución normal, teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se considera como un criterio para realizar pruebas no paramétricas en el caso de estudio.

Posteriormente para comparar si existen diferencias estadísticamente significativas en las valoraciones de los participantes, se aplicó la prueba no paramétrica para muestras dependientes o pareadas, conocido como la prueba de Friedman (test que verifica que los datos obtenidos sean parecidos entre sí) en donde se establecen dos hipótesis, la hipótesis nula que hace referencia a que no hay diferencia significativa de las valoraciones entre los grupos y la hipótesis del investigador que afirma la existencia de una diferencia significativa de las valoraciones entre los grupos. El análisis de la prueba de Friedman se realizó en el software de IBM (Maquina de Negocios Internacionales) SPSS statistics 23 [54]. En la tabla 10 se muestra el resultado al aplicar la prueba.

Tabla 10. Resultados de la prueba de Friedman.

Estadístico	Valor
Muestra (N)	24
Chi cuadrado	20.031
Grados de libertad	2
Asintótica	0

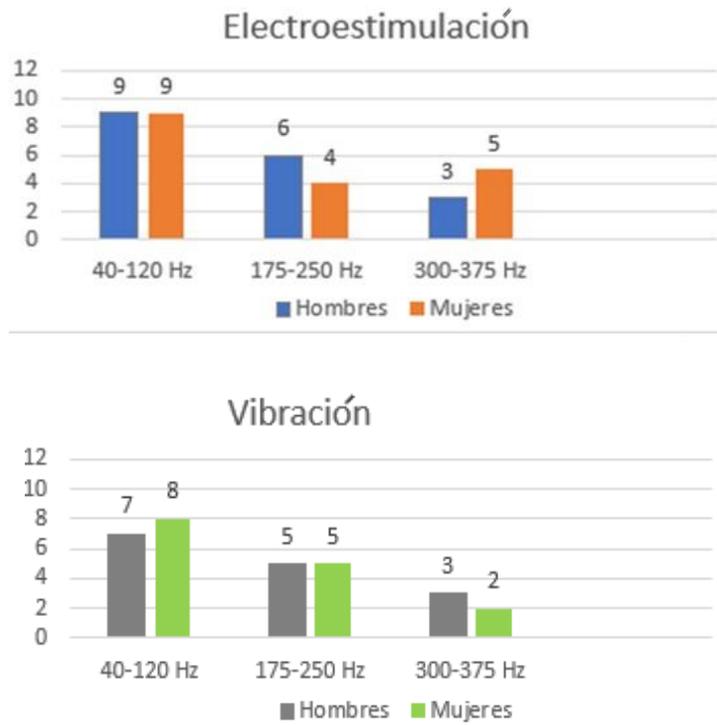
Fuente: Tomada de [54].

Dado que el valor de la asintótica es menor al 0.05, se rechaza entonces la hipótesis nula, por consiguiente se establece que existe una diferencia significativa de las valoraciones entre los grupos.

Una vez realizada la prueba de Friedman se procede a evaluar estadísticamente los sistemas hápticos de electroestimulación y vibración para realizar la comparación y definir cuál de ellos presenta un mayor número de aciertos en la población seleccionada. Los participantes se encuentran divididos en dos grupos diferenciados por sexo, se le solicito a cada participante que una vez ejecutado el reconocimiento activo del material real, dispusieran la yema de los dedos en los dispositivos, siendo aislados de forma visual y auditiva, proceso recomendado para aumentar la concentración, y una vez ejecutados las estimulaciones en determinados rangos de frecuencia(rangos de 40 – 120hz , de 175 – 250hz, y de 300 - 375hz) , expresaran de forma verbal a que textura se les asemejaba, este proceso fue consignado como aciertos para el grupo de los hombres y el grupo de las mujeres.

En la figura 44 muestra los resultados obtenidos al recrear el material de esponja, con los prototipos planteados.

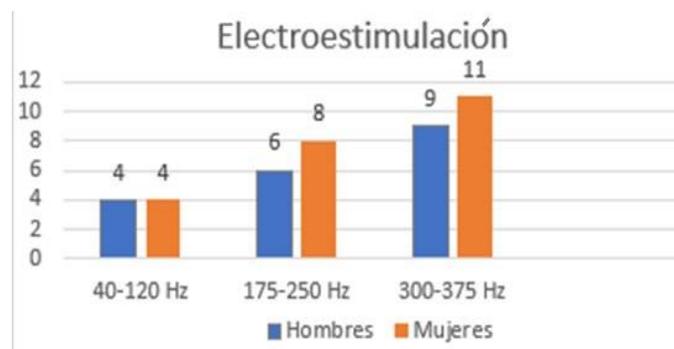
Figura 44. Resultados al recrear el material de esponja



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 45, se ilustra los resultados obtenidos al recrear el material de lija, con los prototipos planteados.

Figura 45. Resultados al recrear el material de lija.

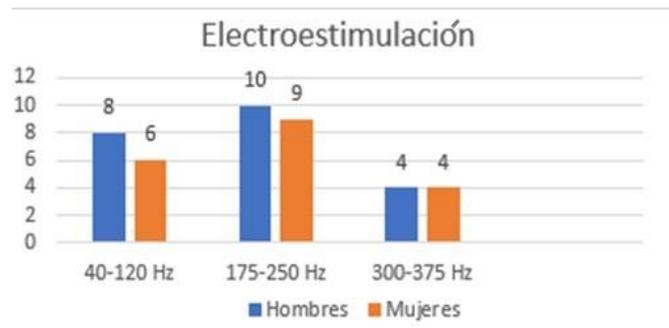




Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para el último reconocimiento, la figura 46 muestra los resultados obtenidos al recrear el material de plástico.

Figura 46. Resultados al recrear el material de plástico.



Fuente: Elaboración propia.

Al realizar una prueba de aciertos de cada material en cada rango de frecuencia se obtiene que en la figura 44, se determina por el mayor número de aciertos que para recrear el material de esponja el rango de frecuencia a utilizar es de 40 a 120 Hz para ambos dispositivos hápticos, asimismo en la figura 45, se observa que el mejor rango de frecuencia para recrear el material de lija es de 300 a 375 Hz, por último en la figura 46, se capta que el rango de frecuencia para recrear el material de plástico es de 175 a 250 Hz.

Teniendo en cuenta que para cada rango de frecuencia se le asigna una textura a recrear, se decide realizar el análisis de comparación de los dispositivos de estimulación eléctrica y vibración utilizando una matriz de confusión general para cada dispositivo, una matriz de confusión es una matriz cuadrada en la que se compara la clasificación tanto de aciertos como de errores de la prueba, además permite evaluar la exactitud de la clasificación, situando en el eje horizontal los valores de referencia o reales y en el eje vertical las predicciones (respuesta proporcionada por los participantes). Posteriormente presenta una visión general de los valores, tanto de los aciertos (elementos en la diagonal) como de los errores (fuera de la diagonal) [55].

En la tabla 11 se ilustran los datos de los aciertos y errores para el sistema de estimulación eléctrico.

Tabla 11. Matriz de confusión para el sistema eléctrico.

		VALOR REAL			
		40-120 Hz Esponja	175-250 Hz Plástico	300-375 Hz Lija	Totales
PREDICCIÓN	Esponja	18	4	2	24
	Plástico	1	19	4	24
	Lija	0	4	20	24
	Totales	19	27	26	72

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 12 se ilustran los datos de los aciertos y errores para el sistemas de estimulación vibratorio.

Tabla 12. Matriz de confusión para el sistema vibratorio.

		VALOR REAL			
		40-120 Hz Esponja	175-250 Hz Plástico	300-375 Hz Lija	Totales
PREDICCIÓN	Esponja	15	6	3	24
	Plástico	6	16	2	24
	Lija	4	5	15	24
	Totales	25	27	20	72

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la tabla 11 y 12, se procede a sacar la exactitud global con el fin de observar el porcentaje de aciertos para los sistemas de estimulación eléctrica y vibración, la exactitud global se calcula como el número de aciertos, sobre el número total de datos recogidos. Se obtiene sumando los elementos de la diagonal divididos por el total de observaciones.

Entonces, para el sistema de estimulación eléctrica se tiene que:

$$Exactitud\ global = \frac{\text{suma de la diagonal principal}}{\# total de datos\ recogidos} \quad (1)$$

En la formula (1) se reemplazan los valores de la matriz de confusión del sistema eléctrico.

$$Exactitud\ global = \frac{18 + 19 + 20}{72} = 0.7916666667$$

$$Exactitud\ global = 0.7916666667 * 100 = 79.167\% \quad (2)$$

El valor del porcentaje es de 79.167% para la exactitud global en el sistema de estimulación eléctrica.

Posteriormente, para el sistema de vibración se tiene que:

$$Exactitud\ global = \frac{\text{suma de la diagonal principal}}{\# \text{ total de datos recogidos}} \quad (1)$$

En la formula (1) se reemplazan los valores de la matriz de confusión del sistema vibratorio.

$$Exactitud\ global = \frac{15 + 16 + 15}{72} = 0.6388888889$$

$$Exactitud\ global = 0.6388888889 * 100 = 63.889\% \quad (3)$$

El valor del porcentaje es de 63.889% para la exactitud global en el sistema de vibración.

Posteriormente con los datos obtenidos en la matriz de confusión se consigna en la tabla 13, los porcentajes de aciertos y errores para cada material:

Tabla 13. Porcentajes de aciertos para cada textura.

Materiales Dispositivo	Estimulación eléctrica	Vibración
Esponja	<ul style="list-style-type: none"> • La cantidad de aciertos para el material es del 75%. • El 16.667% indicaron que el material recreado se le asemejaba al plástico. 	<ul style="list-style-type: none"> • La cantidad de aciertos para el material es del 62.5%. • El 25% indicaron que el material recreado se le asemejaba al plástico.

	<ul style="list-style-type: none"> • El 8.33% indicaron que el material recreado se logra confundir con la lija. 	El 12.5% indicaron que el material recreado se logra confundir con la lija.
Plástico	<ul style="list-style-type: none"> • La cantidad de aciertos para el material es del 79.167%. • El 4.167% indicaron que el material recreado se le asemejaba a la esponja. • El 16.666% indicaron que el material recreado se logra confundir con la lija. 	<ul style="list-style-type: none"> • La cantidad de aciertos para el material es del 66.667%. • El 25% indicaron que el material recreado se le asemejaba a la esponja. • El 8.33% indicaron que el material recreado se logra confundir con la lija.
Lija	<ul style="list-style-type: none"> • La cantidad de aciertos para el material es del 83.333%. • El 0% indicaron que el material recreado se le asemejaba a la esponja. • El 16.667% indicaron que el material recreado se logra confundir con el plástico. 	<ul style="list-style-type: none"> • La cantidad de aciertos para el material es del 62.5%. • El 16.667% indicaron que el material recreado se le asemejaba a la esponja. • El 20.833% indicaron que el material recreado se logra confundir con el plástico.

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la tabla 12, se determina que el dispositivo de estimulación eléctrica recrea en mayor nivel de percepción o aciertos, la textura del material de lija con un porcentaje del 83.333%, seguido por el material de plástico con el 79.167% y finalmente el material de esponja con el 75%, en segundo lugar el dispositivo de vibración recrea en mayor nivel de percepción o aciertos, la textura del material plástico con un porcentaje del 66.667%, seguido de igual manera por los materiales de esponja y lija con un porcentaje de 62.5% respectivamente.

En conclusión, se observa que el dispositivo de estimulación eléctrica con un porcentaje de exactitud global del 79.167% supera al dispositivo de estimulación vibratoria que posee un porcentaje de tan solo 63.889%, indicando que para la reproducción de las sensaciones recreadas de los materiales tales como lija, plástico y esponja, el dispositivo de estimulación eléctrica logra recrear las texturas en mayor nivel de percepción o aciertos, por lo tanto se define que el sistema de estimulación eléctrica genera mejores resultados a la hora de reproducir sensaciones de las texturas lija, plástico y esponja en el grupo de participantes seleccionados.

Después de la prueba, ningún usuario manifestó dolor, incomodidad con el dispositivo, o problemas de temperatura en la yema de los dedos. De igual manera ningún usuario presentó lesiones, sin embargo, dos usuarios femeninos manifestaron una leve sensación de hormigueo que duró poco tiempo después de terminar la prueba.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación realizó una comparación entre dos sistemas de realimentación sensorial por medio de estímulos eléctricos y estímulos vibratorios aplicada en un área reducida como lo es la yema de los dedos; con el fin de reproducir o recrear diversas texturas de materiales reales. Para ello se emplearon tres clases de texturas tales como lija, plástico y esponja. La investigación tiene como referencia de estudio, la intención de identificar el dispositivo que tenga mayor semejanza en las sensaciones reproducidas con las texturas reales.

Cada sistema de realimentación sensorial cuenta con un actuador final que es el encargado de enviar los diferentes estados de estimulación hacia la yema del dedo, para que el usuario perciba las sensaciones. Además, los dispositivos táctiles cuentan con una interfaz de usuario con el fin de poder manipular los actuadores y así no tener señales parásitas.

Se realizaron una serie de pruebas con 24 personas separadas por sexo para determinar las diferentes respuestas de la percepción que obtenían ante las estimulaciones expuestas, se empleó el mismo proceso con los dos dispositivos para así lograr realizar una comparación estadística y poder definir qué sistema tiene mejores resultados reproduciendo sensaciones de texturas.

De acuerdo al análisis estadístico se obtuvo que: a rangos de frecuencia entre 40 – 120 Hz el material que recrean los dispositivos se asemeja al de la esponja, además se observa que en el dispositivo de estimulación eléctrica los niveles de percepción es similar entre ambos géneros, a diferencia del dispositivo de estimulación vibratoria en donde las mujeres tienen mejor percepción del material de esponja.

Por otro lado, a rangos de frecuencias entre 175 - 250 Hz, los dispositivos recrean la sensación del material de plástico según los participantes. Es de notar, que en el sistema de estimulación eléctrica, los hombres tienen una mayor percepción del material en comparación con el dispositivo de vibración, en donde son las mujeres las que logran tener mayor percepción del material.

Además, a rangos de frecuencias entre 300 – 375 Hz, los dispositivos logran recrear la sensación del material de lija según los participantes. En consecuencia, se evidencia que en el sistema de estimulación eléctrica las mujeres poseen mayor percepción del material, a diferencia en el dispositivo de estimulación vibratoria, en donde los hombres perciben mejor las sensaciones recreadas.

Del mismo modo, se observa según la estadística, que en el dispositivo de estimulación eléctrica se obtiene un mayor nivel de percepción o aciertos de los tres materiales recreados en comparación con el sistema de estimulación vibratoria. Teniendo en cuenta lo anterior, se define que el sistema de electroestimulación genera mejores resultados a la hora de reproducir sensaciones de las texturas lija, plástico y esponja.

Una conclusión potencialmente útil a tener en cuenta para la comparación de ambos sistemas son las ventajas que trae utilizar el sistema de electroestimulación en comparación al sistema vibratorio, como lo son: mayor rango de puntos focales para estimulación, la posibilidad de generar combinaciones de frecuencias en diferentes puntos al mismo tiempo y en secuencias, y variar la intensidad de corriente aplicada por el actuador.

7. TRABAJOS FUTUROS

Aumentar en el caso de estimulación eléctrica la matriz de electrodos sobre la yema de los dedos.

Realizar un prototipo que abarque todas las yemas de los dedos de una mano con estimulación eléctrica o vibración, para evaluar la reproducción de texturas.

Adaptar por medio de un dispositivo de percepción cinestésica y táctil para la realimentación sensorial en el campo de la rehabilitación motriz de miembro superior e inferior en personas que hayan perdido o disminuido su sensibilidad por alguna causa.

Generar un entorno virtual basado en texturas virtuales, de igual manera adicionar inmersión auditiva y visual para procesos de entrenamientos en la evaluación de reproducción de texturas en los campos de palpado de tumores y reconocimiento de órganos.

Plantear un criterio de evaluación de los sistemas hápticos de estimulación para que estos se rijan a la norma IEC 60601, con el fin de crear un prototipo comercial.

8. REFERENCIAS

- [1] W. Barfield, "The use of haptic display technology in education", *Themes in science and technology education*, vol. 2, pp. 11–30, 2009.
- [2] M. Eid, M. Orozco, and A. El Saddik, "A guided tour in haptic audio-visual environments and applications", *International Journal of Advanced Media and Communication*, vol. 1, no. 3, pp. 265–297, 2007.
- [3] P. Do and D. Homa, "Haptics rendering and applications", Intech, 2012.
- [4] B. Varalakshmi, J. Thriveni, K. Venugopal, and L. Patnaik, "Haptics: state of the art survey", *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, no. 5, pp. 234–244, 2012.
- [5] M. Bergamasco and E. Ruffaldi, "Haptic interfaces for embodiment in virtual environment", In *Robot and Human Communication*, 2011.
- [6] D. Pamungkas, and K. Ward, "Tele operation of a robot arm with electro tactile feedback", *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 704-709, 2013.
- [7] M. H. Fogtman, J. Fritsch, and K. J. Kortbek, "Kinesthetic interaction: revealing the bodily potential in interaction design", In *Proceedings of the 20th Australasian Conference on Computer-Human Interaction: Designing for Habitus and Habitat*, pp. 89–96, 2008.
- [8] V. G. Chouvardas, A. N. Miliou, and M. K. Hatalis, "Tactile displays: Overview and recent advances", *Displays*, vol. 29, no. 3, pp. 185–194, 2008.

- [9] C. Basdogan and A. Srinivasan, "Ayam. Haptic Rendering in Virtual Environments", 2001.
- [10] H. Medellín, G. González, R. Espinosa, E. Govea and T. Lim, "Desarrollo de Aplicaciones de Realidad Virtual y Sistemas Hápticos en Ingeniería, Medicina y Arte", 2014.
- [11] A. Sánchez, "Gestión de proyectos tecnológicos basado en un enfoque iterativo incremental", Corporación Universidad de la Costa, 2016.
- [12] G. Hernández, and G. Berenice, "La percepción táctil: consideraciones anatómicas, psico-fisiología y trastornos relacionados", Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas, Vol. 10, pp. 8-15, 2005.
- [13] L. Dellon. "Touch sensibility in the hand". Journal of Hand Surgery", Vol 9, no. 1, pp. 11-13. 1984.
- [14] C. Novak. "Evaluation of hand sensibility: a review", Journal of Hand Therapy, Vol. 14, no. 4, pp. 266-272. 2001.
- [15] A. Contreras, and R. Labrador, "Dedos lectores, los exteroceptores de los discapacitados visuales I", Acción Pedagógica, no 23, pp 74-92, 2104.
- [16] L. Medina, "Estudio de la resonancia estocástica en el sistema táctil humano", Universidad de Chile, pp. 17-22, 2006.
- [17] K. Malamud, B. Estañol, S. Ayala, H. Senties, and M. Hernandez, "Physiology of vibration sense", instituto nacional de ciencias médicas y nutrición salvador zuriban, 2014.

[18] M. Chaves, "Diseño y construcción de un prototipo de interfaz háptica para la reproducción de texturas", Universidad Pontificia Bolivariana, 2017.

[19] J. Londoño, "La piel", Universidad de Antioquia, no 152, 2009.

[20] J. Tresguerres, "Fisiología Humana", Universidad Complutense de Madrid, vol 3, pp 72-85, 2005.

[21] G. Guillazo, D. Redolar, M. Torras, and A. Vale, "Fundamentos de Neurociencia", Editorial UOC, vol 1, 2007.

[22] L. Raya, "Visión global sobre la tecnología háptica", Revista ACTA, pp. 115-122, 2011.

[23] J. Sabater, "Desarrollo de una interfaz kinestésica paralela y experimentación en control de sistemas hápticos y teleoperados", Universidad Miguel Hernández de Elche, 2003.

[24] D. Escobar, O. Vivas, "Sistemas hápticos: Una revisión", Journal Ciencia e Ingeniería, vol. 10, num. 1, pp. 47-54, 2018.

[25] M. Pinto, "Análisis e implementación de una interfaz háptica en entornos virtuales", universidad nacional de Colombia, 2009.

[26] H. Medellin, E. Gallegos, R. Espinosa and D. Rodriguez, "Desarrollo de un sistema de realidad virtual asistido por dispositivos hápticos para la enseñanza-aprendizaje del sistema Braille", Revista de Prototipos Tecnológicos, pp 10-22, 2015.

[27] V. Andreu, and A. Torronteras, "Introducción a la Háptica. Nuevos dispositivos de entrada y salida", Universidad Politécnica de Catalunya, 2015.

[28] E. Mallinckrodt, A. Hughes, and W. Sleator, "Perception by the skin of electrically induced vibrations", *Science*, vol 118, 1953.

[29] S. Grimnes, "Electrovibration, cutaneous sensation of microampere current", In *Acta Physiol Scand*, vol 118, no 1, pp 19-25, 1983.

[30] D. Mcneal, "Analysis of a model for excitation of myelinated nerve", *IEEE transactions on biomedical engineering*, no 4, vol BME-23, 1976.

[31] K. A. Kaczmarek, J. G. Webster, P. Bach, and W. J. Tompkins, "Electrotactile and Vibrotactile Displays for Sensory Substitution Systems", *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol 38, no 1, pp 1–16, 1991.

[32] F. Rattay, "Analysis of models for external stimulation of axons", *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol BME-33, no 10, pp 974–977, 1986.

[33] S. Okamoto, H. Nagano, and Y. Yamada, "Psychophysical dimensions of tactile perception of textures", *IEEE transactions on haptics*, pp. 1-13, 2012.

[34] T. Carter, S. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, "Ultrahaptics: Multi point mid air haptic feedback for touch surfaces", In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 505-514, 2013.

[35] M. Li, S. Luo, T. Nanayakkara, L. Seneviratne, P. Dasgupta, and K. Althoefer, "Multi fingered haptic palpation using pneumatic feedback actuators", *Sensors Actuators*, vol. 218, pp. 132-141, 2014.

[36] S.Asano, S. Okamoto, and Y. Yamada, “Vibrotactile stimulation to increase and decrease texture roughness”, IEEE Transactions on Human- Machine Systems, vol. 45, no. 3, pp. 393-398, 2015.

[37] D.J Meyer, M.A Peshkin, and J.E Colgate, “Modeling and synthesis oftactile texture with spatial spectrograms fordisplay on variable friction surfaces”, IEEE World Haptics Conference, pp. 125-130, 2015.

[38] H. Lee, J. Kim, S.Choi, J. Hoon, J. Park, A. Kim, H. Oh, and S. Chung, “Mid air tactile stimulation using laser induced thermoelastic effects: The first study for indirect radiation”, IEEE World Haptics Conference, pp. 374-380, 2015.

[39] M. Kawazoe, Y. Kosemura, and N. Miki, “Encoding and presentation of Surface textures using mechanotactile display”, Sensors Actuators, vol. 261, pp. 30-39, 2017.

[40] D. Pamungkas and K. Ward, “Tactile sensing system using electro-tactile feedback,” In Automation, Robotics and Applications (ICARA), pp. 295–299, 2015.

[41] N. Kitamura, J. Chim, and N. Miki, “Micro needle electrode array for electro tactile display”, In Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, pp. 106-107, 2013.

[42] N. Kitamura, J. Chim, and N. Miki,” Electrotacile display using microfabricated micro needle array”, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.25, no. 2, pp. 25016, 2015.

[43] X. Chen, F. Shao, C. Barnes, T. Childs, and B. Henson. “Exploring relationship between touch perception and surface physical properties”, International Journal of Design, Vol. 3, no.2, pp. 67-76. 2009.

[44] B. Geng, J. Dong, W. Jensen, S. Dosen, D. Farina, and N. Kamavuako. "Psychophysical evaluation of subdermal electrical stimulation in relation to prosthesis sensory feedback", IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 26, no.3, pp. 709-715. 2018.

[45] Icontec Internacional, "Requisitos generales para la seguridad básica y el desempeño esencial", Norma técnica Colombiana NTC-IEC 60601-1, 2011.

[46] J. Álvarez, "Transformadores", pp 122-159, noviembre, 2009.

[47] M. Rodríguez, "Transformadores", Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Electrónica, 2012.

[48] M. Aguado, "Resistencia de la piel al paso de la corriente eléctrica en adultos trabajadores", Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Medicina Legal, 1998.

[49] F. Wang, "Haptic Energy Consumption", Texas Instruments, Application Report, 2014.

[50] M. Konyo, S. Tadokoro, A. Yoshida and N. Saiwaki, "A Tactile Synthesis Method Using Multiple Frequency Vibrations for Representing Virtual Touch", International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005.

[51] E. Juárez and O. Oliva, "Diseño de un estimulador muscular para terapias analgésicas de baja frecuencia", Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, Instituto politécnico nacional, México, 2012.

[52] A. Weber, H. Saal, J. Lieber, J. Cheng, L. Manfredi, J. Dammann III and S. Bensmaia, “Spatial and temporal codes mediate the tactile perception of natural textures”, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.

[53] C. Heaps and S. Handel, “Similarity and Features of Natural Texture”, University of Tennessee, Knoxville, Journal of Experimental Psychology, vol 25, pp. 299-320.

[54] IBM Corp. Released 2015. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0. Armonk, NY: IBM Corp.

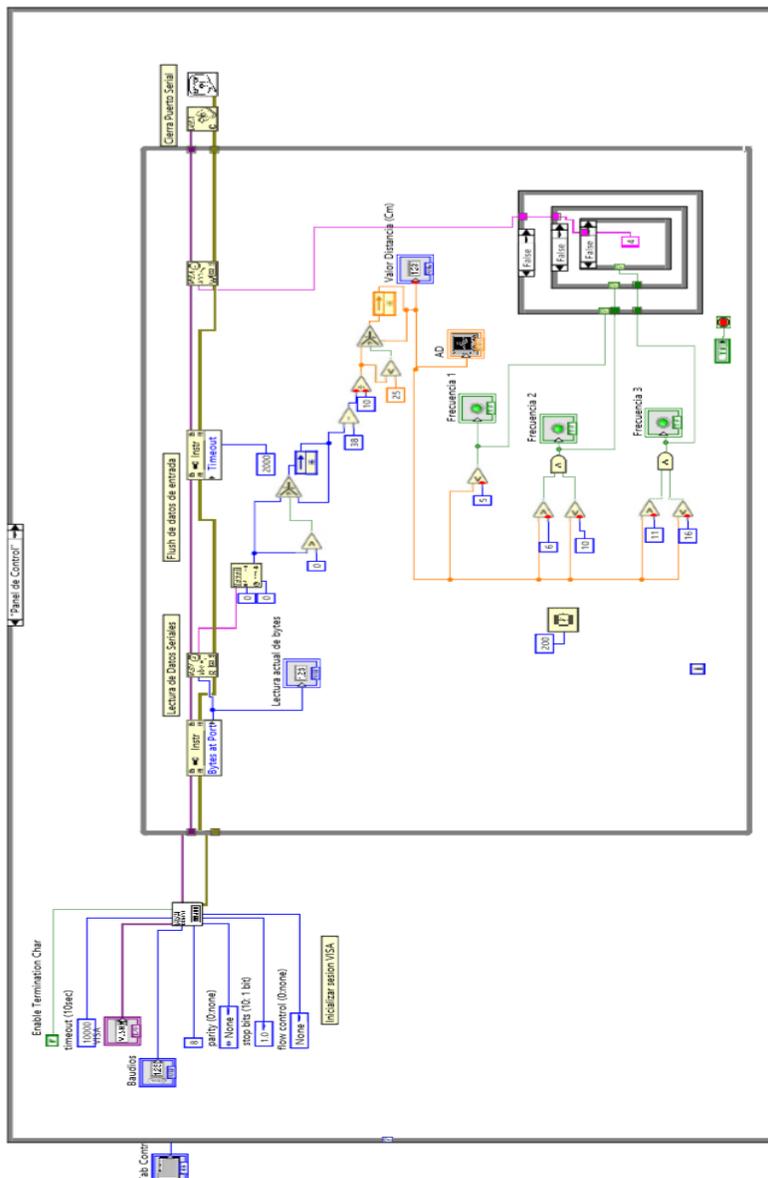
[55] F. Ariza, J. Rodríguez and V. Alba, “Control estricto de matrices de confusión por medio de distribuciones multinomiales”, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, GeoFocus, nº 21, p. 215-226, 2018.

ANEXOS

Anexo A: Códigos de los sistemas en LabVIEW 2016.

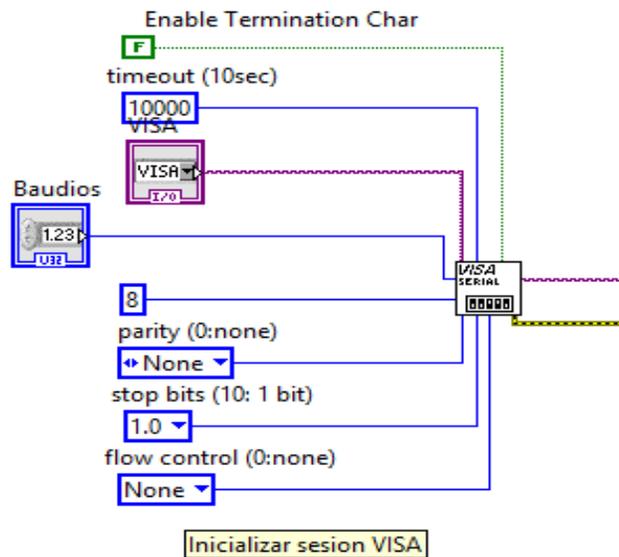
En este anexo se incluyen los códigos por medio de diagramas de bloques en LabVIEW empleados en el trabajo. Primero se presentan los códigos en general y seguido las partes que lo conforman.

Anexo A.1: Código general para el sistema vibratorio.



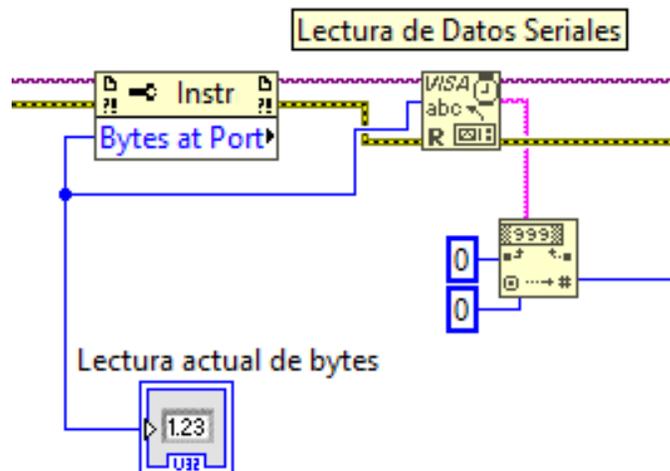
Anexo A.1.1: Configuración VISA.

Configuración de la conexión por protocolo serial entre en el Arduino y el pc.



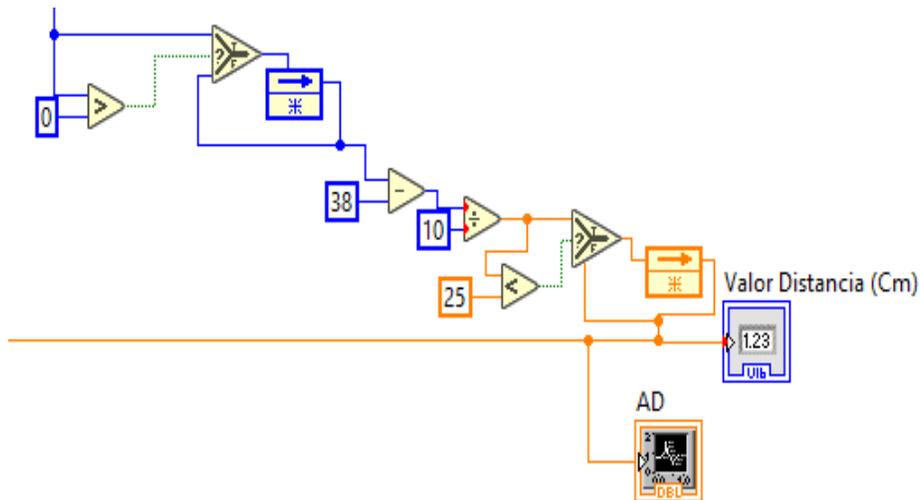
Anexo A.1.2: Lectura de datos.

Se recibe los datos para darles lectura de cuantos bytes de información se están recibiendo, los cuales se muestran en un indicador numérico y posteriormente se leen los datos para ser procesados.



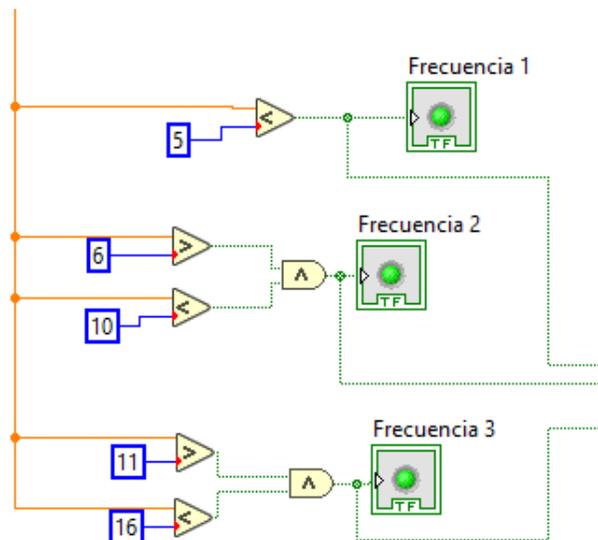
Anexo A.1.3: Conversión numérica.

Después de la lectura del dato, se convierte el valor de distancia leído a centímetros (cm) y se muestra en un indicador numérico y en un histograma.



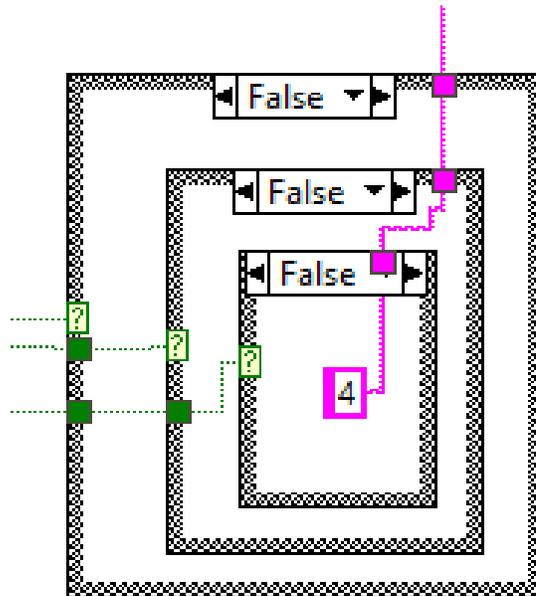
Anexo A.1.4: Rangos de distancia de activación.

Dependiendo de la distancia leída, existen unos rangos de distancia para activar una señal, cuando una señal se activa, también se activa un indicador led.



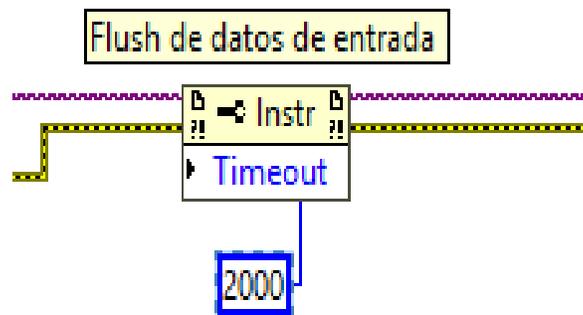
Anexo A.1.5: Casos para la activación.

Cuando se activa una señal, entra a una serie de casos, los cuales contienen unos caracteres y al momento de ser activados (que el caso sea verdadero), este envía el dato al Arduino.



Anexo A.1.5: Tiempo para cada dato.

El siguiente bloque flush de datos, funciona dando un tiempo para recibir cada dato que le llega.



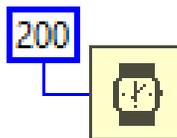
Anexo A.1.6: Cierre de puerto serial.

Después de finalizado el proceso, se debe colocar un bloque que cierre el puerto serial.

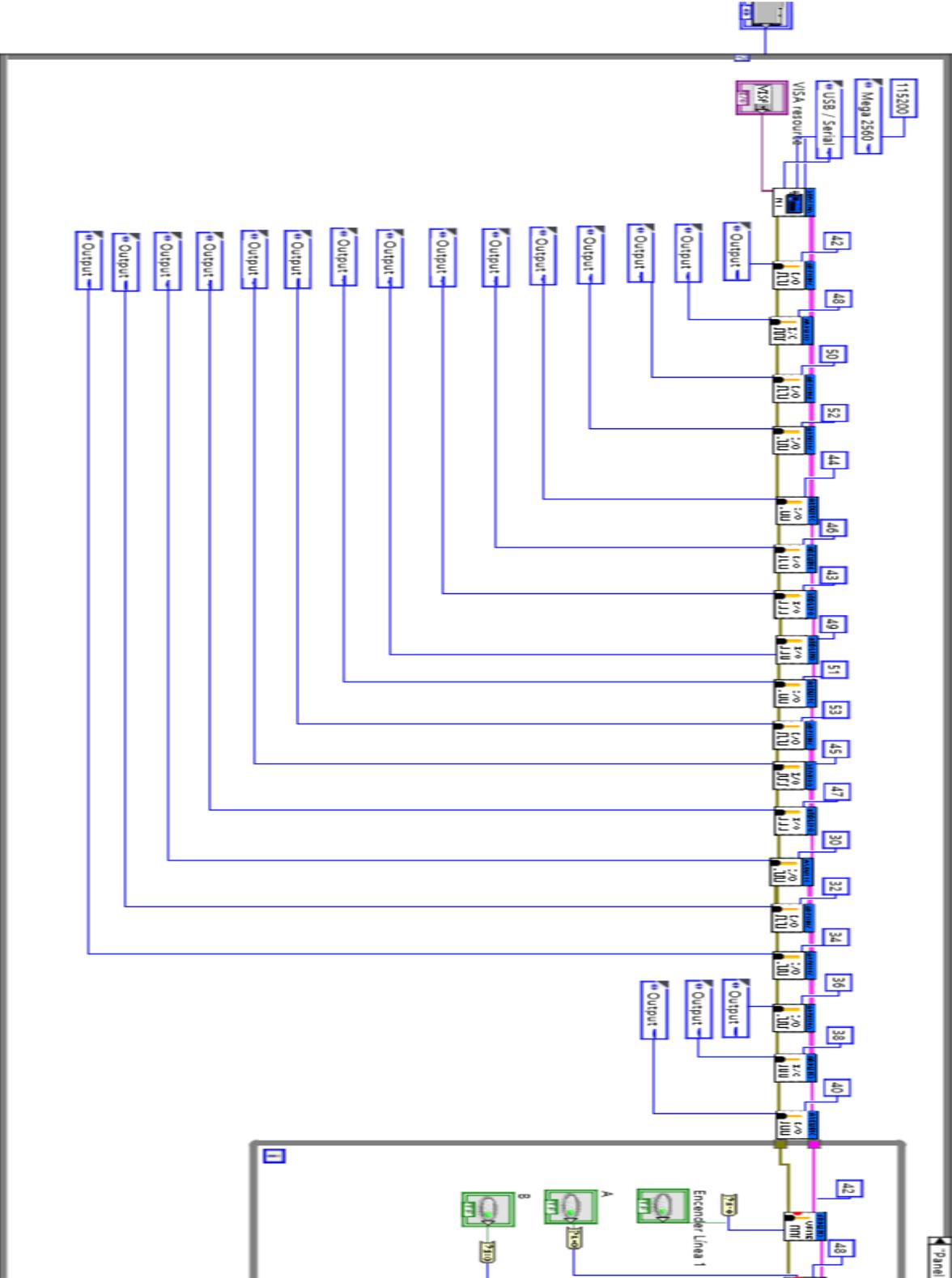


Anexo A.1.7: Velocidad de envío de datos.

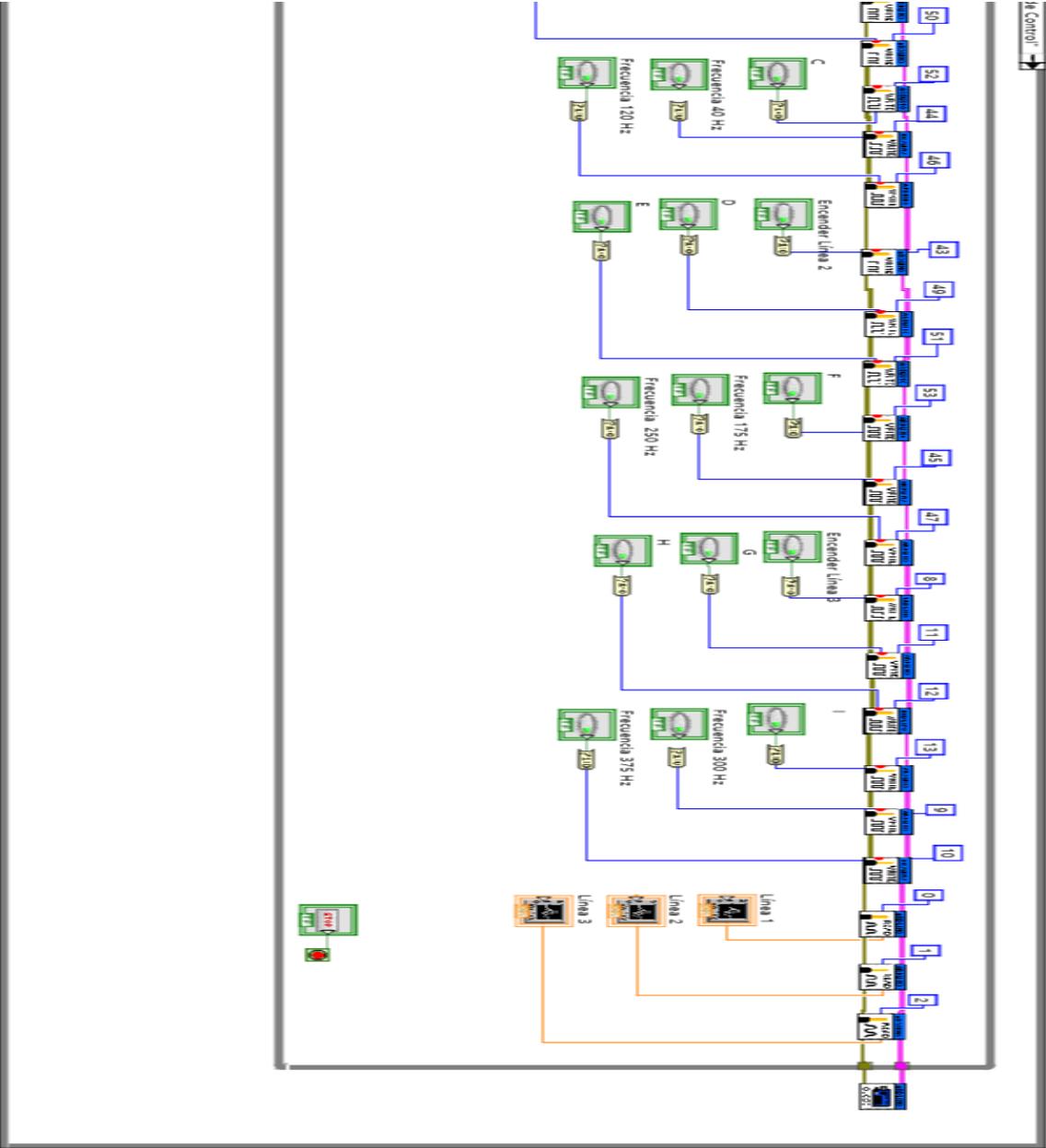
Este bloque sirve para modificar la velocidad de envío de datos.



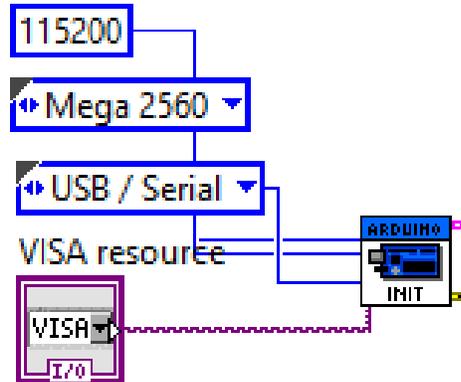
Anexo A.2: Código general para el sistema eléctrico parte a.



Anexo A.2.1: Código general para el sistema eléctrico parte b.

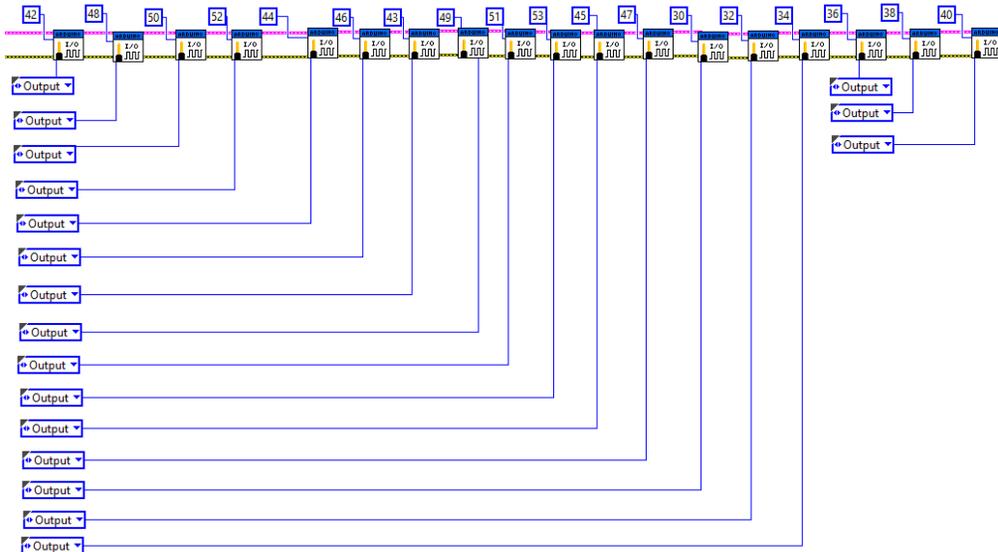


Anexo A.2.2: Configuración de la conexión serial.



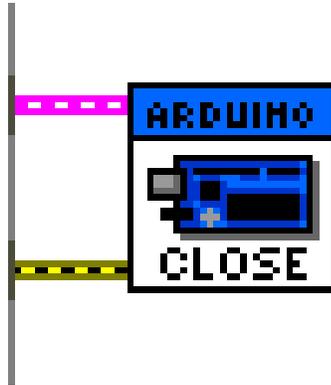
Anexo A.2.3: Configuración I/O.

Configuración de los pines a utilizar de la tarjeta Arduino como entradas y salidas.



Anexo A.2.6: Cierre de comunicación.

Este bloque permite cerrar el proceso de comunicación.



Anexo B: Código elaborado en la plataforma de Arduino para el sistema de vibración

```
#define COMANDO1 '1' // Variables utilizadas para el funcionamiento de la estructura
switch case
#define COMANDO2 '2'
#define COMANDO3 '3'
#define COMANDO4 '4'

#include <Wire.h>
#include "Adafruit_DRV2605.h" //Libreria utilizada para el funcionamiento del driver
#include "Adafruit_VL53L0X.h" // Libreria utilizada para el funcionamiento del
sensor infrarrojo

Adafruit_DRV2605 drv;
Adafruit_VL53L0X lox = Adafruit_VL53L0X();

char comando = '0'; //Se inicializa la variable comando
int led1=13; //Se le brinda una etiqueta al pin 13
int led2=12; //Se le brinda una etiqueta al pin 12
int led3=11; //Se le brinda una etiqueta al pin 11

unsigned long Sample = 0;
uint16_t stringComplete = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Velocidad de transmisión de datos
  pinMode(led1,OUTPUT); //Se declara como salida el pin 13
  pinMode(led2,OUTPUT); //Se declara como salida el pin 12
  pinMode(led3,OUTPUT); //Se declara como salida el pin 11

  drv.begin(); //Inicializa el funcionamiento de la libreria del driver

  drv.selectLibrary(1); //Se envia un comando 'go' a la libreria
  drv.setMode(DRV2605_MODE_INTTRIG); //disparador interno al enviar el comando 'go'

void loop() {

  VL53L0X_RangingMeasurementData_t measure; //Activa la funcion para recibir datos
  lox.rangingTest(&measure, false); // Pasar en 'verdadero' para obtener la
impresión de datos de depuración!
```

```

if (measure.RangeStatus != 4) { // Verifica que no existan datos incorrectos
  Serial.println(measure.RangeMilliMeter); //Imprime los valores de distancia en
milimetros
}
delay(20);

switch(comando){
  case COMANDO1:{ //Eventos para el caso #1

    digitalWrite(led1,HIGH); //Coloca en alto el pin #13
    digitalWrite(led2,LOW); //Coloca en bajo el pin #12
    digitalWrite(led3,LOW); //Coloca en bajo el pin #11

    drv.setWaveform(0, 5); // Envia un comando con el fin de activar un efecto en
el driver
    drv.setWaveform(1, 0);

    // inicia el efecto a funcionar
    drv.go();

    // tiempo de espera
    delay(500);

  }break;

  case COMANDO2:{ //Eventos para el caso #2

    digitalWrite(led1,LOW); //Coloca en bajo el pin #13
    digitalWrite(led2,HIGH); //Coloca en alto el pin #12
    digitalWrite(led3,LOW); //Coloca en bajo el pin #11

    drv.setWaveform(0, 60); // Envia un comando con el fin de activar un efecto
en el driver
    drv.setWaveform(1, 0);

    // inicia el efecto a funcionar
    drv.go();

    // tiempo de espera
    delay(500);

  }break;
}

```

```

    case COMANDO3:{ //Eventos para el caso #3

        digitalWrite(led1,LOW); //Coloca en bajo el pin #13
        digitalWrite(led2,LOW); //Coloca en bajo el pin #12
        digitalWrite(led3,HIGH); //Coloca en alto el pin #11

        drv.setWaveform(0, 105); // Envia un comando con el fin de activar un efecto
en el driver
        drv.setWaveform(1, 0);

        // inicia el efecto a funcionar
        drv.go();

// tiempo de espera
delay(500);

    }break;

    case COMANDO4:{ //Eventos para el caso #4

        digitalWrite(led1,LOW); //Coloca en bajo el pin #13
        digitalWrite(led2,LOW); //Coloca en bajo el pin #12
        digitalWrite(led3,LOW); //Coloca en bajo el pin #11

        drv.setWaveform(0, 200); // Envia un comando con el fin de desactivar el
funcionamiento del driver
        drv.setWaveform(1, 0);

        // Ejecuta el comando
        drv.go();

        // tiempo de espera
        delay(500);

    }break;

}

}

void serialEvent() { //Se establece una funcion para recibir en cualquier momento el
valor de comando
    while (Serial.available()) {

        comando = Serial.read();
    }
}

```

El código elaborado en la plataforma de Arduino consta de tres etapas: en la primera, mediante una librería llamada Adafruit_VL53L0X se controla el sensor infrarrojo VL53LOXV2 para tomar datos de rangos de distancia los cuales son registrados en el Arduino, en la segunda etapa, los datos de rangos de distancia son enviados por medio de puerto serie a un código realizado en el programa Labview, el cual toma la información que envía el Arduino y devuelve cuatro posibles salidas, finalmente en la tercera etapa, el Arduino recibe la información de salida por puerto serie que se envía desde Labview y manda al driver DVR2605L una función de registro mediante una librería llamada Adafruit_DRV2605, con el fin de manipular el motor LRA.

Anexo C: Cuestionario para los participantes.

Anexo C.1: Cuestionario para la selección de los participantes.

A continuación se presenta una serie de preguntas realizadas a los participantes que experimentaron la reproducción de texturas por medio de los dispositivos hápticos previo a su selección.

1. ¿Conoce usted que es un dispositivo háptico? _____
2. ¿Presenta usted en la actualidad algún tipo de enfermedad o alergia?

3. ¿Presenta usted algún tipo de platina en el cuerpo? _____ en caso de ser afirmativa la respuesta, responder la siguiente pregunta, ¿En qué parte del cuerpo la tiene? _____
4. ¿Tiene usted conectado marcapasos? _____
5. ¿Consume algún tipo de sustancia alucinógena? _____ en caso de ser afirmativa la respuesta, responder la siguiente pregunta, ¿Hace cuantas aproximadamente lo hizo? _____
6. ¿Qué tipos de trabajos realiza frecuentemente con sus manos?
7. ¿Ha sufrido accidentes neurológicos? _____
8. ¿presenta perdida de sensibilidad con las manos? _____

9. En la noche anterior, ¿Cuántas horas aproximadamente durmió? _____

10. ¿La mano dominante de usted es la derecha o la izquierda? _____

Anexo C.2: Preguntas post realizada la prueba a los participantes.

Después de realizar la prueba a los participantes, se les realizó las siguientes preguntas, con el fin de verificar su estado de salud.

1. ¿Siente algún tipo de dolor?
1. ¿Sufrió alguna quemadura?
2. ¿Qué inconvenientes se le presentaron para realizar las pruebas?
3. ¿Resultó complicada realizar las pruebas?

Anexo D: Análisis estadístico.

A continuación, se describe cada paso desarrollado para el análisis estadístico en la evaluación de los prototipos hápticos de electroestimulación y vibración, así como las herramientas utilizadas.

Selección de Población: se realizó una selección de una muestra de 24 personas, con rangos de edades comprendidas entre 20 y 49 años de edad, es de notar que esta muestra se escogió debido a que estudios que evalúan sistemas hápticos aplicados en reproducción de texturas sugieren ejecutar una selección de muestra semejante a este valor, con el objetivo de reducir en un cierto modo sesgos producidos por muestras pequeñas que conlleven a inducir a los participantes a las respuestas sobre los experimentos planteados, expresados en Asano y Carter.

Es de notar, que a cada participante se le explico las etapas a desarrollar con los dispositivos hápticos, de igual manera se realizó una explicación de cada componente de los prototipos, no obstante, se hicieron preguntas sobre si contenían algún tipo de equipo, platina en su cuerpo o si presentaban alergias a los materiales de los actuadores para poder empezar con las pruebas.

Se presentaron tres materiales reales, con los cuales se realizaron parejas, siendo estas pareja 1: esponja y plástico, pareja 2: plástico y lija, y pareja 3: esponja y lija, este proceso se consideró de esta manera para generar estímulos o sensaciones diferenciables al ejecutarse un movimiento activo sobre cada material; una vez realizada la interacción con los materiales, se le solicito a cada participante que para cada pareja en una escala de 0 a 10 expresara un valor, siendo 0 que la pareja de materiales no se percibe diferente, y 10 que la pareja se percibe

diferente, este proceso se realizó basados en los trabajos presentados por Konyo y colaboradores, Okamoto y colaboradores, Weber y colaboradores y Heaps.

Como se hizo:

Cada participante etiquetado como P_n , expreso su calificación para cada pareja, estas calificaciones fueron introducidas en la herramienta Excel, como se ilustra a continuación:

	calificaciones		
	T1-2	T 2-3	T 1-3
P1	10	10	10
P2	4	10	9
P3	9	3	3
P4	8	4	4
P5	4	5	2
P6	4	5	4
P7	6	5	6
P8	7	6	6
P9	8	6	6
P10	10	8	8
P11	9	8	7
P12	9	8	7
P13	9	8	8
P14	9	8	8
P15	10	8	8
P16	10	9	8
P17	10	9	9
P18	10	10	9
P19	10	10	9
P20	10	10	9
P21	10	10	10
P22	10	10	10
P23	10	10	10
P24	10	10	9

Seguidamente se realizó un conteo para cada una de las calificaciones, para observar con qué frecuencia se expresaron en la muestra de 24 personas, fueron introducidas en la herramienta Excel como se ilustra a continuación:

Calificación	frecuencias		
	T 1-2	T 2-3	T1-3
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	1
4	3	1	2
5	0	3	0
6	1	2	3
7	1	0	2
8	2	6	5
9	5	2	6
10	12	9	4
	24	24	24

Seguidamente se realizó una semejanza para expresar a que porcentaje de la población correspondía las calificaciones, con este aspecto se realizó la gráfica de diferenciabilidad donde el eje x es la escala de 0 a 10 que representa las calificaciones y el eje y, es la escala que representa los porcentajes para cada una de ellas.

Calificación	porcentajes		
	T 1-2	T 2-3	T 1-3
1	0	0	0
2	0	0	4,16666667
3	0	4,16666667	4,16666667
4	12,5	4,16666667	8,33333333
5	0	12,5	0
6	4,16666667	8,33333333	12,5
7	4,16666667	0	8,33333333
8	8,33333333	25	20,83333333
9	20,83333333	8,33333333	25
10	50	37,5	16,66666667
	100	100	100

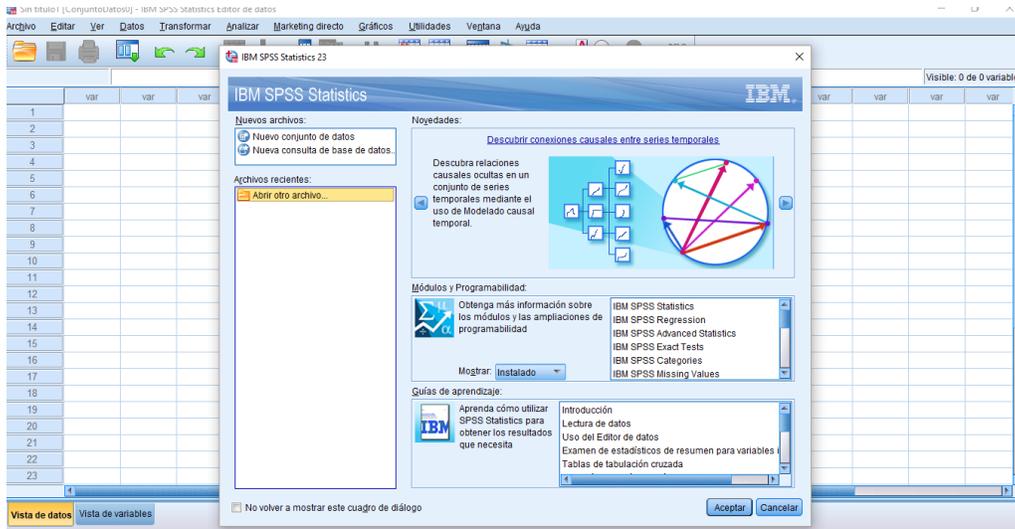
Después de obtener el grafico de los datos, se encuentran parámetros descriptivos, los cuales están dados por el mínimo, el máximo, la media, la desviación estándar, la mediana, el rango intercuartílico y el coeficiente de asimetría. Estos valores son calculados con la herramienta Excel.

	T 1-2	T 2-3	T 1-3
Mínimo	4	3	2
Máximo	10	10	10
Media	8,583333333	7,916666667	7,458333333
Desviación Estandar	2,062431378	2,22469669	2,302723655
Mediana	9,5	8	8
Rango Intercuartílico	2	3	2,7
Coefficiente de asimetría	-1,492064417	-0,79058779	-0,99056129

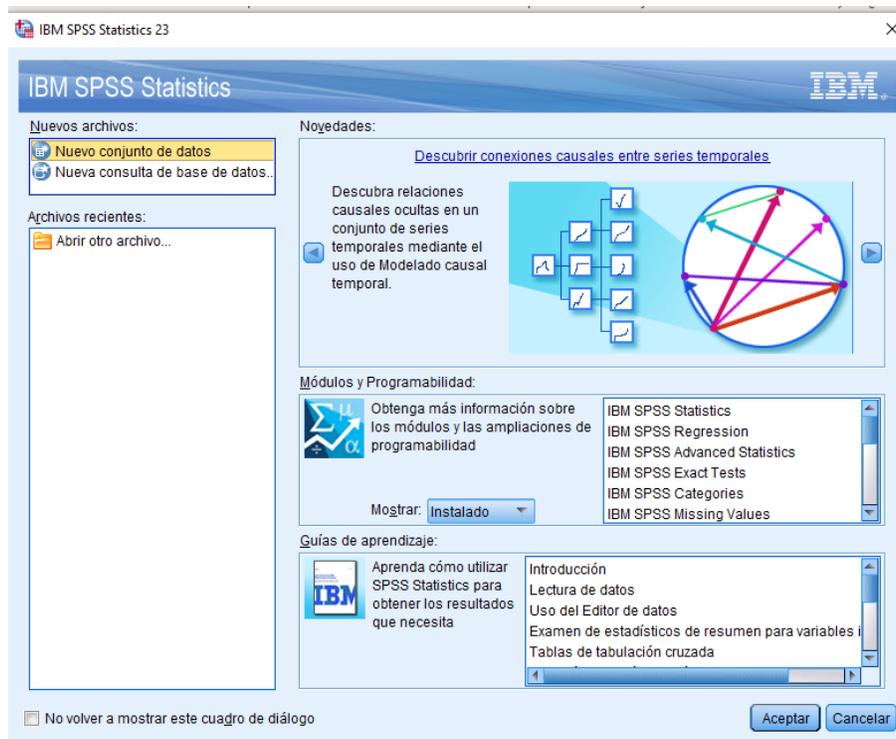
Para que nos sirven estos datos ?, este primer análisis estadístico nos sirve para evaluar que par de textura se encuentra con mayor porcentaje de diferenciabilidad en la muestra, además se tiene que los datos expresados en calificaciones de una muestra igual se comportan de forma uniforme interpretado como una dispersión con respecto al valor promedio, de igual manera al tener coeficientes de asimetría, se debe tener en cuenta que este valor expresa si los datos siguen una distribución de tipo normal representado como una campana de gauss, para el primer caso, si el coeficiente es 0 se considera simétrica, es asimétrico a la derecha si este coeficiente es positivo, y es asimétrico a la izquierda si es negativo, por consiguiente se debe realizar la prueba de Kolmogórov para determinar si los datos siguen una distribución normal.

Como se hizo: Para la prueba de Kolmogórov, se utilizó el software de IBM denominado SPSS 23.

En primer lugar, se ejecuta el software:



Seleccionamos en la ventana nuevos archivos, la opción nuevo conjunto de datos, luego aceptar.



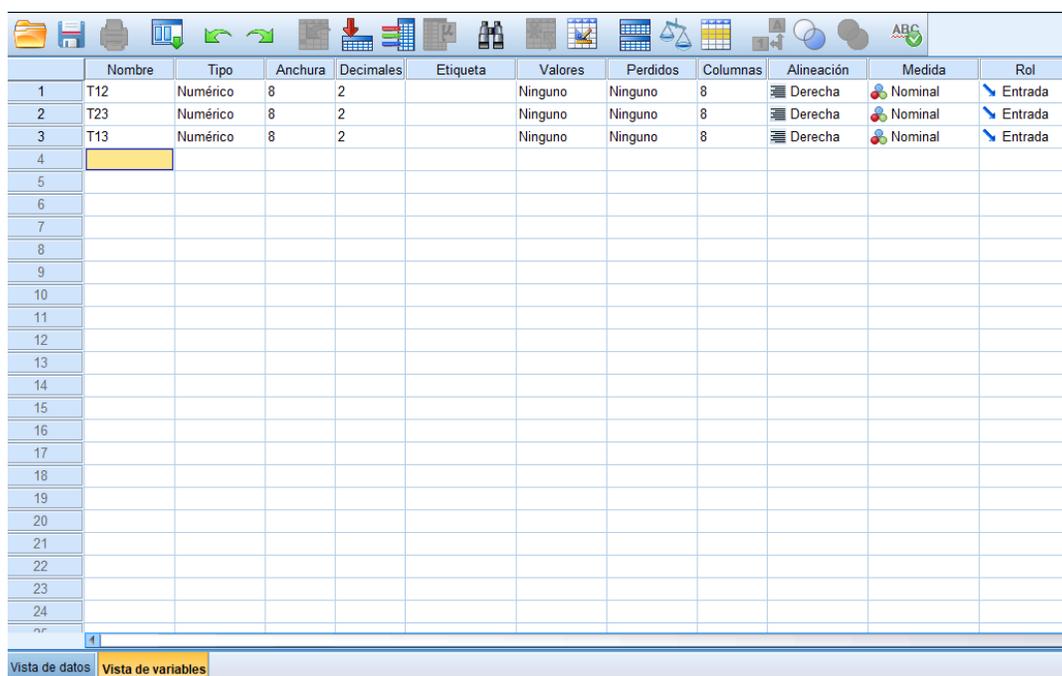
En la parte inferior seleccionamos la vista de variables, campos designados para introducir los datos.

En la celda nombre, se colocan las parejas de texturas etiquetadas como: T12, T23, T13.

Tipo de dato, seleccionar numérico.

Tipo de anchura 8, y cantidad de decimales 2.

Etiquetas, sin etiquetas, valores se debe seleccionar ninguno, en la opción perdidos seleccionar ninguno, numero de columnas seleccionar 8, alineación a la derecha, medidas de tipo nominal, y finalmente su rol, son entradas de datos.



	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta	Valores	Perdidos	Columnas	Alineación	Medida	Rol
1	T12	Numérico	8	2		Ninguno	Ninguno	8	Derecha	Nominal	Entrada
2	T23	Numérico	8	2		Ninguno	Ninguno	8	Derecha	Nominal	Entrada
3	T13	Numérico	8	2		Ninguno	Ninguno	8	Derecha	Nominal	Entrada
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											

Vista de datos Vista de variables

Una vez definidas las variables, se procede a ingresar los datos correspondientes a las calificaciones, en la pestaña vista de datos.

KOLGOMOROV_COMO.sav [ConjuntoDatos] - IBM SPSS Statistics Editor de datos

Archivo Editar Ver Datos Transformar Analizar Marketing directo Gráficos Utilidades Ventana Ayuda

Visible: 3 de 3 variables

	T12	T23	T13	var												
1	10,00	10,00	10,00													
2	4,00	10,00	9,00													
3	9,00	3,00	3,00													
4	8,00	4,00	4,00													
5	4,00	5,00	2,00													
6	4,00	5,00	4,00													
7	6,00	5,00	6,00													
8	7,00	6,00	6,00													
9	8,00	6,00	6,00													
10	10,00	8,00	8,00													
11	9,00	8,00	7,00													
12	9,00	8,00	7,00													
13	9,00	8,00	8,00													
14	9,00	8,00	8,00													
15	10,00	8,00	8,00													
16	10,00	9,00	8,00													
17	10,00	9,00	9,00													
18	10,00	10,00	9,00													
19	10,00	10,00	9,00													
20	10,00	10,00	9,00													
21	10,00	10,00	10,00													
22	10,00	10,00	10,00													
23	10,00	10,00	10,00													

Vista de datos Vista de variables

Posteriormente, se realiza el test de Kolmogórov – Smirnov, con un valor de significancia del 0.05, en donde se plantea la hipótesis nula siendo esta: los datos analizados siguen una distribución normal, y la hipótesis del investigador la cual indica que los datos analizados no siguen una distribución normal. Esto permite determinar si a la prueba se le pueden aplicar pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas.

Desde la vista de datos, en la ventana analizar, se ubica pruebas no paramétricas, cuadro de dialogo antiguo, K-S de una muestra.

Archivo Editar Ver Datos Transformar Analizar Marketing directo Gráficos Utilidades Ventana Ayuda

Visible: 3 de 3 variables

	T12	T23	T13	var											
1	10,00	10,00													
2	4,00	10,00													
3	9,00	3,00													
4	8,00	4,00													
5	4,00	5,00													
6	4,00	5,00													
7	6,00	5,00													
8	7,00	6,00													
9	8,00	6,00													
10	10,00	8,00													
11	9,00	8,00													
12	9,00	8,00													
13	9,00	8,00													
14	9,00	8,00													
15	10,00	8,00													
16	10,00	9,00													
17	10,00	9,00													
18	10,00	10,00													
19	10,00	10,00													
20	10,00	10,00													
21	10,00	10,00													
22	10,00	10,00													
23	10,00	10,00													

Vista de datos Vista de variables

- Informes
- Estadísticos descriptivos
- Tablas personalizadas
- Comparar medias
- Modelo lineal general
- Modelos lineales generalizados
- Modelos mixtos
- Correlaciones
- Regresión
- Loglineal
- Redes neuronales
- Clasificar
- Reducción de dimensiones
- Escala
- Pruebas no paramétricas
 - Muestras relacionadas...
 - Muestras independientes...
 - Una muestra...
 - Cuadros de diálogo antiguos
 - Chi-cuadrado...
 - Binomial...
 - Rachas...
 - K-S de 1 muestra...
 - 2 muestras independientes...
 - K muestras independientes...
 - 2 muestras relacionadas...
 - K muestras relacionadas...
- Predicciones
- Supervivencia
- Respuesta múltiple
- Análisis de valores perdidos...
- Imputación múltiple
- Muestras complejas
- Simulación...
- Control de calidad
- Cuya COR...
- Modelado espacial y temporal...

En el cuadro de texto para aplicar Kolmogórov de una muestra, se selecciona un conjunto de datos correspondiente a cada pareja de texturas, y se añade a la lista de variables de prueba, seleccionar distribución de prueba normal, y aceptar. Este proceso se realiza con cada una de las parejas de texturas.



Se obtuvo entonces:

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		T12
N		24
Parámetros normales ^{a,b}	Media	8,5833
	Desviación estándar	2,06243
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,288
	Positivo	,246
	Negativo	-,288
Estadístico de prueba		,288
Sig. asintótica (bilateral)		,000 ^c

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

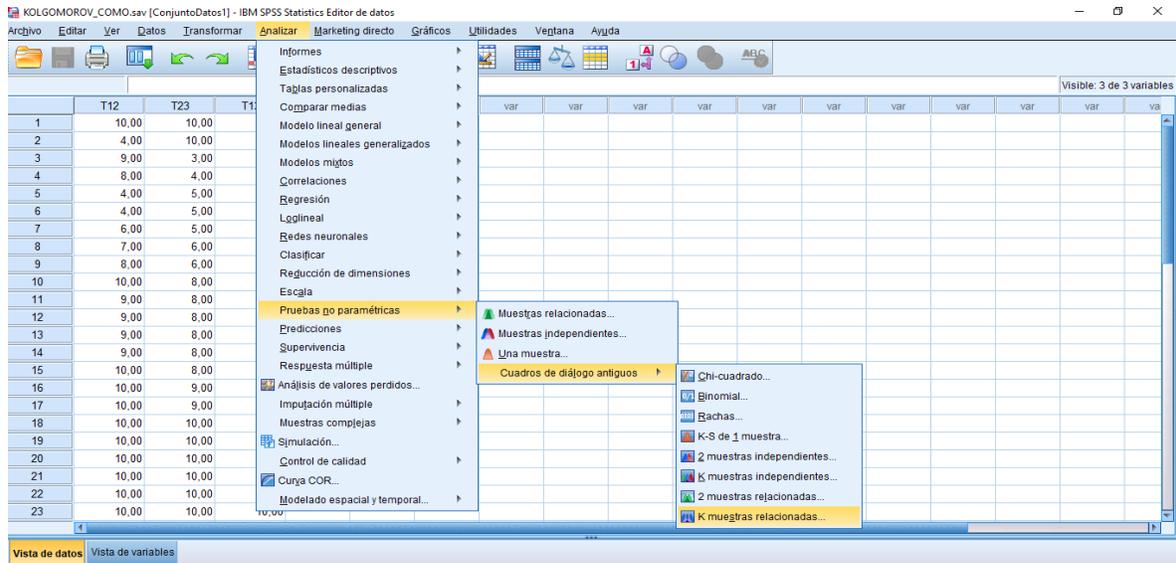
		T23
N		24
Parámetros normales ^{a,b}	Media	7,9167
	Desviación estándar	2,22470
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,223
	Positivo	,175
	Negativo	-,223
Estadístico de prueba		,223
Sig. asintótica (bilateral)		,003 ^c

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		T13
N		24
Parámetros normales ^{a,b}	Media	7,4583
	Desviación estándar	2,30272
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,218
	Positivo	,135
	Negativo	-,218
Estadístico de prueba		,218
Sig. asintótica (bilateral)		,005 ^c

En este test de Kolmogórov-Smirnov, la hipótesis nula se refiere entonces a que los datos analizados siguen una distribución normal, y la hipótesis del investigador indica que los datos analizados no siguen una distribución normal, como se obtuvo un valor de significancia menor al 0.05 se rechaza entonces la hipótesis nula, por consiguiente se establece que los datos no siguen una distribución normal por lo tanto se debe aplicar pruebas no paramétricas.

Para comparar si existen diferencias estadísticamente significativas en las valoraciones de los participantes en la comparación entre texturas, se aplicó la prueba no paramétrica para muestras dependientes o pareadas, conocido como la prueba de Friedman. Para ello en la vista de datos, pestaña analizar, pruebas no paramétricas, cuadro de diálogos antiguo, K muestras relacionadas.



Seleccionar el tipo de prueba: Friedman, y añadir las variables de prueba para cada pareja de texturas.



Obteniéndose entonces:

Prueba de Friedman

Rangos

	Rango promedio
T12	2,54
T23	1,98
T13	1,48

Estadísticos de prueba^a

N	24
Chi-cuadrado	20,031
gl	2
Sig. asintótica	,000

a. Prueba de Friedman

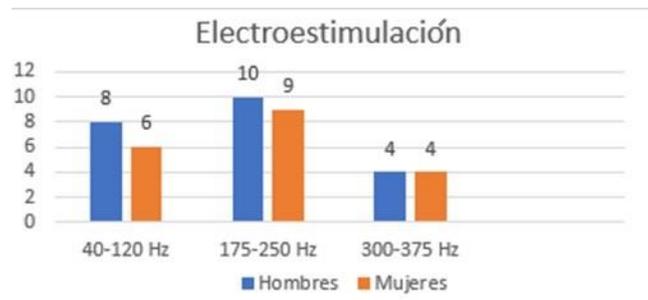
Luego para evaluar estadísticamente los sistemas hápticos, en dos grupos diferenciados por sexo, se le solicitó a cada participante que una vez ejecutado el reconocimiento activo del material real, dispusieran la yema de los dedos en los dispositivos, siendo aislados de forma visual y auditiva, proceso recomendado para aumentar la concentración, y una vez ejecutados las estimulaciones expresaran de forma verbal a que textura se les asemejaba, este proceso fue consignado como aciertos para el grupo de los hombres y el grupo de las mujeres.

Para recrear el **material plástico** en los participantes, con el dispositivo de estimulación eléctrica se habilitaron tres puntos tales como DBF, y en el dispositivo de vibración se cercioró que este cubriera la zona centro y baja de la yema de los dedos, una vez activadas las frecuencias, los grupos no manifestaron molestias, no registraron dolor, ni calentamiento en su extremidad, de igual manera al realizar una realimentación verbal, manifestaron sensaciones irregulares; se puede concluir que al aumentar la frecuencia el número de aciertos en ambas poblaciones y en ambos dispositivos disminuye interpretado desde los participantes como contactos dispersos, no obstante a frecuencias intermedias las poblaciones presentaron similitud de aciertos con el dispositivo de vibración lo que genera en este aspecto que la textura real de plástico se puede recrear en este

parámetro, de igual manera por medio de electroestimulación el grupo de los hombres presento mayor número de aciertos, y a frecuencias bajas también se obtuvieron patrones similares.

Como se hizo: Realizar la tabla de datos de aciertos, y posteriormente se realiza una gráfica.

	Frecuencia 40 -120 Hz	Frecuencia 175-250 Hz	Frecuencia 300-375 Hz
Hombres	8	10	4
Mujeres	6	9	4



Realizamos el mismo proceso para el dispositivo de vibración

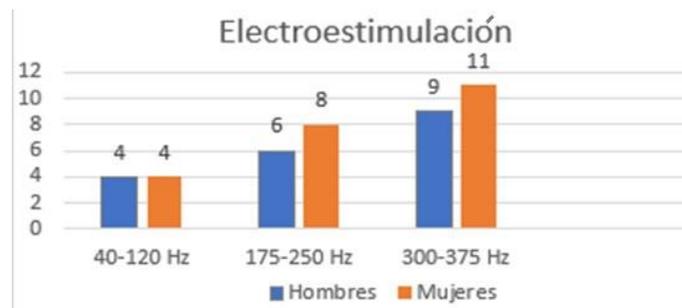
	Frecuencia 40 -120 Hz	Frecuencia 175-250 Hz	Frecuencia 300-375 Hz
Hombres	6	7	4
Mujeres	6	9	3



Ahora, para el material **tipo lija**, se tienen los siguientes gráficos y datos para los dispositivos de electroestimulación y vibración, es de notar que, en el grupo de las mujeres, dos de ellas al finalizar el experimento manifestaron cosquilleo que

desapareció al poco tiempo, los grupos no manifestaron molestias, no registraron dolor, ni calentamiento en su extremidad, de igual manera al realizar una realimentación verbal, calificaron haber percibido desplazamientos en la extremidad. Para el dispositivo de electroestimulación se habilitaron los puntos DEF, y se cercioro que el actuador de vibración cubriera toda la yema de los dedos.

	Frecuencia 40-120 Hz	Frecuencia 175-250 Hz	Frecuencia 300-375 Hz
Hombres	4	6	9
Mujeres	4	8	11

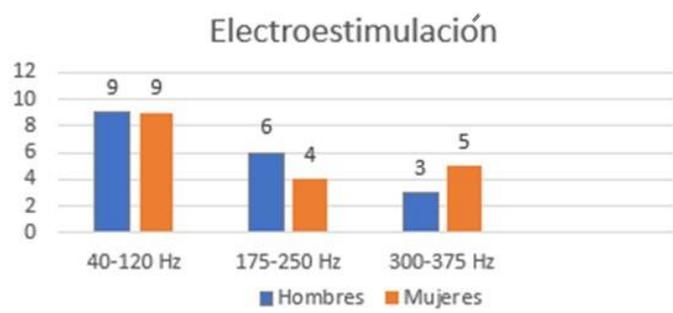


	Frecuencia 40-120 Hz	Frecuencia 175-250 Hz	Frecuencia 300-375 Hz
Hombres	3	6	8
Mujeres	5	6	7



Para recrear el **material esponja** en los participantes, con el dispositivo de estimulación eléctrica se habilitaron tres puntos tales como BDF, y en el dispositivo de vibración se cercioro que este cubriera la zona centro y baja de la yema de los dedos, una vez activadas las frecuencias, los grupos no manifestaron molestias, no registraron dolor, ni calentamiento en su extremidad, de igual manera al realizar una realimentación verbal, manifestaron sensaciones de relieve; se puede concluir que al aumentar la frecuencia el número de aciertos en ambas poblaciones y en ambos dispositivos disminuyen.

	Frecuencia 40 -120 Hz	Frecuencia 175-250 Hz	Frecuencia 300-375 Hz
Hombres	9	6	3
Mujeres	9	4	5



	Frecuencia 40 -120 Hz	Frecuencia 175-250 Hz	Frecuencia 300-375 Hz
Hombres	7	5	3
Mujeres	8	5	2

