

**SISTEMA DE REALIMENTACIÓN SENSORIAL SOBRE LA YEMA DE LOS  
DEDOS BASADO EN ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA**



**DAVID ESCOBAR VALENCIA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
MAESTRÍA EN AUTOMÁTICA  
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CONTROL Y ROBÓTICA  
POPAYÁN, NOVIEMBRE DE 2018**

**SISTEMA DE REALIMENTACIÓN SENSORIAL SOBRE LA YEMA DE LOS  
DEDOS BASADO EN ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA**



**Trabajo de grado para optar al título de:  
Magíster en Automática**

**DAVID ESCOBAR VALENCIA**

**Director:  
PhD. OSCAR ANDRÉS VIVAS ALBÁN**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
MAESTRÍA EN AUTOMÁTICA  
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CONTROL Y ROBÓTICA  
POPAYÁN, NOVIEMBRE DE 2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director, PhD. Andrés Vivas, porque con su conocimiento y experiencia apoyó y dirigió este trabajo de investigación.

Al PhD. José María Sabater y al Mg José María Vicente, de la Universidad Miguel Hernández de Elche, España, por su aporte científico al desarrollo de esta investigación.

A los evaluadores de este proyecto de investigación que con sus críticas constructivas incrementaron los aportes y alcances de esta investigación.

A mi novia y amigos por compartir este reto académico, brindarme su amistad y apoyo a lo largo de este tiempo.

Y en especial a mis padres y hermanas, que con su continuo apoyo y comprensión son un pilar fundamental en mi vida.

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como propósito general el desarrollo de un prototipo háptico para la generación de estímulos táctiles que reproduzcan texturas de superficies de diversos materiales, generados a través de patrones de señales eléctricas por medio de una matriz de electrodos dispuesta sobre un área reducida de la mano como lo es la yema de los dedos.

En primera instancia se enmarca la definición del concepto basado en háptica, consecutivamente por medio de una revisión bibliográfica, se procede al análisis de las diversas tecnologías y desarrollos planteados para la reproducción de texturas por medio de diferentes actuadores, para así establecer un criterio que permita evaluar la utilidad de la estimulación eléctrica en el presente proyecto de investigación.

Posteriormente se realiza el diseño y construcción de la interfaz táctil propuesta, apoyados en la adaptación de un método psicofísico aplicado sobre un grupo de usuarios para comprobar su funcionamiento, evaluado en criterios de percepción táctil y reconocimiento de texturas. Tal proceso fue acompañado por el diseño e implementación de una interfaz gráfica desarrollada en Labview con funcionalidades de variación de frecuencia, estimulación independiente por electrodos e ilustración de la señal portadora.

En este orden de ideas, en la parte final del proyecto, se presentan los índices estadísticos aplicados en esta interfaz háptica para la evaluación del reconocimiento de texturas en superficies reales de diversos materiales; por consiguiente, la ejecución del presente trabajo de investigación permite la generación de productos de nuevo conocimiento, divulgación, formación integral y desarrollo tecnológico.

## **ABSTRACT**

The present research project has as its general purpose the development of a haptic prototype for the generation of tactile stimuli that reproduce textures of surfaces of different materials, generated through patterns of electrical signals by means of an array of electrodes arranged over a reduced area hand as is the fingertip.

In the first instance, the definition of the concept based on haptics is framed, consecutively through a bibliographic review, we proceed to the analysis of the different technologies and developments proposed for the reproduction of textures by means of different actuators, in order to establish a criterion that allows evaluate the utility of electrical stimulation in the present research project.

Subsequently, the design and construction of the proposed tactile interface was carried out, supported by the adaptation of a psychophysical method applied to a group of users to check its operation, evaluated in terms of tactile perception and textural recognition. This process was accompanied by the design and implementation of a graphical interface developed in Labview with functionalities of frequency variation, independent stimulation by electrodes and illustration of the carrier signal.

In this order of ideas, in the final part of the project, the statistical indices applied in this haptic interface for the evaluation of the recognition of textures in real surfaces of different materials are presented; therefore, the execution of this research work allows the generation of new knowledge products, dissemination, comprehensive training and technological development.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	11
2. ESTADO DEL ARTE .....	13
2.1 FISIOLÓGÍA DEL TACTO.....	13
2.2 DESARROLLOS EN INTERFACES HÁPTICAS TIPO TÁCTIL .....	16
2.3 PROTOTIPOS EMPLEANDO VIBRACIÓN .....	17
2.4 PROTOTIPOS EMPLEANDO ULTRASONIDO .....	19
2.5 PROTOTIPOS EMPLEANDO PIEZOELÉCTRICOS.....	21
2.6 PROTOTIPOS EMPLEANDO ELECTROESTIMULACIÓN .....	23
2.7 METODOLOGÍAS PSICOFÍSICAS .....	25
3. DISEÑO DEL SISTEMA DE ELECTROESTIMULACIÓN E INTERFAZ DE USUARIO.....	29
3.1 ASPECTOS GENERALES DEL DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	29
3.2 DIAGRAMA GENERAL DEL HARDWARE .....	30
3.3 SEÑAL PORTADORA.....	32
3.4 ELEVACIÓN DE VOLTAJE.....	34
3.5 DISPOSITIVO ACTUADOR .....	36
3.6 DISEÑO FÍSICO DEL CHASIS EN SOLIDWORKS .....	38
3.7 INTERFAZ SOFTWARE .....	40
4. ADAPTACIÓN DEL PROTOCOLO PSICOFÍSICO PARA LA EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO.....	44
4.1 SELECCIÓN DE LA POBLACIÓN .....	44
4.2 ETAPA DE ADECUACIÓN.....	45
4.3 ETAPA DE ENTRENAMIENTO .....	46
4.4 ETAPA DE DIFERENCIABILIDAD .....	47
4.5 ETAPA DE EJECUCIÓN Y DE DIMENSIONES TÁCTILES .....	49
5. CRITERIO ESTADÍSTICO DE EVALUACIÓN DE LA INTERFAZ HÁPTICA..	50
5.1 EVALUACIÓN DE RESOLUCIÓN DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL.....	50
5.2 EVALUACIÓN PARA LA REPRODUCCIÓN DE TEXTURAS .....	55

6. CONCLUSIONES .....	59
7. TRABAJOS FUTUROS.....	61
8. REFERENCIAS .....	62

## FIGURAS

Figura 1. Localización de los mecanorreceptores en la piel.....	15
Figura 2. Prototipos empleando actuación de vibración.....	19
Figura 3. Prototipos empleando actuación de ultrasonido.....	21
Figura 4. Prototipos empleando actuación piezoeléctrica.....	22
Figura 5. Prototipos empleando electroestimulación.....	24
Figura 6. Etapas del protocolo psicofísico.....	26
Figura 7. Dimensiones perceptivas.....	27
Figura 8. Diagrama hardware.....	31
Figura 9. Sub- etapas del sistema de estimulación eléctrica.....	31
Figura 10. Generador de onda tipo cuadrada.....	32
Figura 11. Acoplador de señal cuadrada.....	34
Figura 12. Elevación de voltaje por transformador.....	35
Figura 13. Placa PCB.....	35
Figura 14. Distribución de los electrodos.....	37
Figura 15. matriz de electrodos.....	38
Figura 16. Esquemático del chasis.....	39
Figura 17. Chasis en construcción.....	39
Figura 18. Prototipo.....	40
Figura 19. Ventana de inicio.....	41
Figura 20. Panel de frecuencias.....	42
Figura 21. Panel de electrodos.....	42
Figura 22. Panel de señal portadora.....	43
Figura 23. Visa y stop.....	43
Figura 24. Usuarios en etapa de adecuación.....	46
Figura 25. Usuarios en barrera de entrenamiento.....	47
Figura 26. Materiales seleccionados.....	48
Figura 27. Usuarios en etapa de diferenciabilidad.....	48
Figura 28. Usuarios en la etapa de ejecución.....	49



Figura 29. Resultados del experimento 1 .....	52
Figura 30. Resultados del experimento 2.....	53
Figura 31. Resultados del experimento 3.....	54
Figura 32. Distribución de las calificaciones en la etapa de diferenciabilidad .....	55

## TABLAS

Tabla 1. Descripción de los mecanorreceptores. ....	16
Tabla 2. Resumen de las investigaciones de dimensionalidad perceptiva .....	28
Tabla 3. Parámetros generales de diseño del prototipo .....	30
Tabla 4. Características de los usuarios. ....	45
Tabla 5. Parámetros descriptivos .....	56
Tabla 6. Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov .....	56
Tabla 7. Resultados de la prueba de Friedman.....	57

## 1. INTRODUCCIÓN

El término háptico fue mencionado en la literatura por primera vez en el año de 1931 en el campo de la psicología experimental, este concepto proviene del griego apto – haphthestai, contextualizado como tocar. Por ende, suele relacionarse para describir todo aquello basado con el sentido del tacto, haciendo referencia de igual manera a aquella ciencia que estudia las sensaciones y percepciones producidas por la interacción del ser humano frente al entorno en el cual se encuentra [1] [2].

Generalmente el sentido háptico se ve enmarcado o complementado por intercambios de tipo estáticos o dinámicos que proporcionan la captación de características físicas, estableciendo un papel de evaluación frente a algunos atributos del medio, debido a un proceso de transmisión y recepción de información por parte de los usuarios [3] [4]. Esta información del sentido háptico puede darse entonces de dos maneras, una pasiva y otra 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 entonces información sobre dureza, temperatura, y contornos. Por su parte la forma 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 [5].

Esto puede ser llevado a cabo por la yema de los dedos, ya que en la piel se encuentran múltiples terminaciones nerviosas. Desde el punto de vista fisiológico dichas respuestas se producen gracias a los mecanorreceptores cutáneos, siendo estos los corpúsculos de Meissner, los discos de Merkel, los corpúsculos de Vater-Pacini y finalmente las terminaciones de Ruffini, encargados de detectar los diferentes cambios que se producen en una superficie, respondiendo ante ellas a través de un impulso nervioso [6] [7].

Para llevar a cabo estados de estimulación de esta región del cuerpo humano, las diferentes investigaciones reportadas en los últimos años han prestado considerable atención a desarrollos de dispositivos táctiles empleando diversos actuadores, con el propósito de generar algún tipo de señal para producir una respuesta enmarcada en la sensación por medio de movimientos activos, incluyendo de igual manera adecuaciones de atributos psicofísicos dentro de los experimentos realizados [8] [9].

Por consiguiente, la percepción con la que el usuario capta un estímulo que recrea las características de un material se debe en gran medida a la tecnología que se utiliza, al tipo de actuación sobre el cuerpo humano y a la acción complementaria de parámetros psicofísicos [10].

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 FISIOLÓGÍA DEL TACTO

La piel se encuentra constituida por diversos tipos de receptores nerviosos, los cuales transducen en impulsos nerviosos diferentes tipos de energía; interpretados en forma de percepción táctil en el usuario. Dicha percepción es comprendida como la adquisición de información que se obtiene a través de estímulos por movimientos pasivos o activos con algún objeto. Por consiguiente, estos receptores producen el impulso hacia el cerebro o la médula espinal para ser tratado e interpretado en el sistema nervioso central y provocar reacciones comunes tales como: dolor, calor, frío, presión, contacto, entre otros [11].

Igual sucede con la energía térmica, que es detectada por medio de los termorreceptores, siendo estos una unidad micrométrica celular con terminaciones nerviosas libres estructuralmente constituidas por dendritas de neuronas sensoriales, estableciendo en el usuario sensaciones de calor por medio de fibras amielínicas tipo C (fibras que permiten captar temperaturas mayores a 37 grados centígrados), y de frío por medio de fibras mielínicas tipo delta (fibras que permiten captar temperaturas inferiores a 10 grados centígrados), estas terminaciones se encuentran rodeando los folículos pilosos de la piel [12].

Cuando la energía es de tipo mecánica, es detectada por los mecanorreceptores, que constituyen la mayor parte de los receptores sensoriales del sistema nervioso somático, siendo sensibles a la deformación física. Se encuentran presentes en todo el cuerpo, monitoreando el contacto producido con la piel. Fundamentalmente los mecanorreceptores se dividen en: corpúsculos de Meissner, discos de Merkel, corpúsculos de Váter-Pacini, y en las terminaciones de Ruffini [13].

Los corpúsculos de Meissner están ubicados generalmente en las papilas dérmicas, punta de los dedos, labios, lengua y piel glabra o lampiña, se estructuran en dendritas aglomeradas o encapsuladas en tejido conjuntivo, componen aproximadamente el 43 % de las unidades táctiles de la mano, reconociendo así contactos ligeros como los roces, cambios de texturas y vibraciones superficiales, aquellas comprendidas entre 10 y 50 Hz, estos receptores presentan una rápida disminución de respuesta frente a un estímulo constante, siendo clasificados como de adaptación rápida [14] [15].

Los discos de Merkel por su parte se encuentran concentradas en la palma de las manos y la planta de los pies, siendo células especializadas del epitelio estratificado de la epidermis, percibiendo la sensación de tacto sostenido, con frecuencias comprendidas entre 5 y 15 Hz constituyen aproximadamente el 25 % de las unidades táctiles de la mano, estos receptores presentan una lenta disminución progresiva en respuesta a un estímulo constante, siendo clasificadas como de adaptación lenta [16].

Los corpúsculos de Vater- Pacini se encuentran ubicados en el nivel profundo de la dermis, se estructuran por medio de láminas concéntricas de dendritas encapsuladas, percibiendo sensaciones de vibraciones con variaciones rápidas a frecuencias comprendidas entre 60 y 400 Hz, siendo receptores de adaptación rápida, así como presiones de tipo profundas producidas por contacto en áreas mayores de la piel, constituyen aproximadamente el 13 % de la composición de los receptores en la piel [16].

Finalmente, las terminaciones de Ruffini se localizan en la dermis con pelo, constituyen el 19% de las unidades táctiles de la mano, permiten transmitir sensaciones de estiramiento en la piel activando sus impulsos de respuesta a frecuencias comprendidas entre 0.5 y 100 Hz [15] [16].

En la figura 1, se ilustra la localización de los mecanorreceptores en la piel, así como las formas de cada uno de ellos.

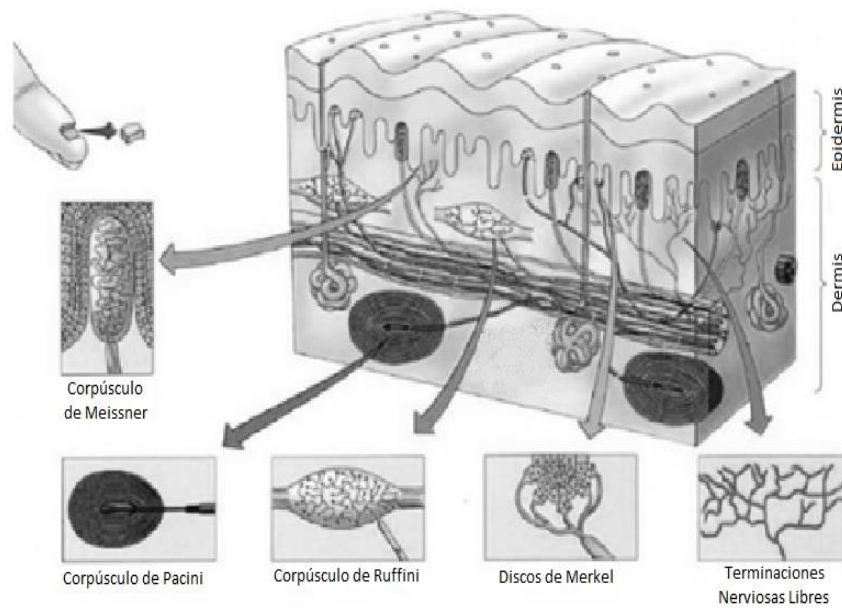


Figura 1. Localización de los mecanorreceptores en la piel.

Fuente: Tomado de [15].

Seguidamente en la tabla 1, se expresa de forma general los mecanorreceptores por su ubicación, función, rangos de frecuencia, y tipo de adaptación.

Tabla 1. Descripción de los mecanorreceptores.

<b>Mecanorreceptor</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Función</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Adaptación</b>
Corpúsculos de Meissner	Papilas dérmicas, punta de los dedos, labios, lengua, piel glabra.	Vibración, identificación de texturas, posición.	[10 – 50] Hz.	Rápida.
Discos de Merkel	Debajo de la epidermis.	Deformación mecánica continua, presión, identificación de texturas.	[5-15] Hz.	Lenta.
Corpúsculos de Váter- Pacini	Nivel profundo de la dermis, membranas interóseas, vísceras.	Vibración, presión a altas frecuencias	[60-400] Hz.	Rápida.
Terminaciones de Ruffini	Piel con vello, dermis.	Presión, calor, rotación de articulaciones.	[0.5-100] Hz.	Lenta

## 2.2 DESARROLLOS EN INTERFACES HÁPTICAS TIPO TÁCTIL

Un sistema o interfaz háptica se puede definir de manera formal, como un dispositivo que permite tocar, sentir, e interactuar con las características de un objeto que se encuentra representado de manera real o virtual, dentro de un espacio definido o de tipo remoto [17].

Las interfaces hápticas clasificadas como táctiles son aquellos dispositivos que se encargan de ejecutar estados de estimulación dirigido hacia los receptores nerviosos del tacto, produciendo entonces interacción con la piel del usuario el cual tiende a reconocer parámetros tales como, temperatura, formas, y texturas.



En varios estudios presentados en la literatura científica, se ha podido demostrar que los procesos de realimentación táctil implementados sobre el área de la yema de los dedos presentan el potencial de aumentar la inmersión en los usuarios al momento de interactuar o definir las características de un objeto [18].

A continuación, se describen prototipos desarrollados para la producción de percepciones táctiles y simulación de texturas por medio de diversos actuadores, aplicados sobre la superficie de la yema de los dedos.

### **2.3 PROTOTIPOS EMPLEANDO VIBRACIÓN**

Para la reproducción de contacto en un área focal definida en la yema de los dedos, se implementan dispositivos electromecánicos de diversos tamaños como lo son vibradores, usualmente clasificados como, actuadores resonadores lineales [19], bobinas de voz [20] y los motores de masa excéntrica [21].

Tal es el caso descrito en el estudio presentado por Bau y colaboradores, denominado TeslaTouch, donde se analiza la percepción de los diferentes estímulos de tipo vibratorio ejecutados sobre una pantalla táctil transparente. La principal ventaja del método es la generación de vibraciones intercaladas entre 80 Hz y 400 Hz que conlleva a fricciones replicadas en el usuario, esto siempre y cuando la yema de los dedos se encuentre en movimiento, sin embargo los autores concluyen que por medio de la vibración se tiende a estimular áreas de mayor tamaño debido a las dimensiones del actuador lo que conlleva a presentar una baja inmersión por parte del usuario siendo compensadas por el sentido de la vista a través de animaciones [22].

En la investigación de Lynette y colaboradores, se presenta una comparación entre tres actuadores comerciales, siendo estos, EMR factor, C3 factor y el Haptuator II.

Los autores plantean experimentos de vibración con parámetros variables en amplitud, formas de onda y frecuencias, con el objetivo de generar en el usuario percepciones táctiles con grados de similitud o disimilitud entre pares de estímulos, obteniendo la caracterización de dimensiones ásperas a frecuencias bajas por medio de un proceso pasivo entre la yema de los dedos y el prototipo, de igual manera se implementa una interfaz bajo el software Labview y una evaluación estadística por el método de escalamiento multidimensional, los autores concluyen que los usuarios registraron dificultad a la hora de distinguir variaciones en las formas de onda, además de registrar una característica de similitud proveniente del contacto inicial con los actuadores sin que existiera estimulación [23].

Seguidamente, para la reproducción de texturas aplicando actuadores de vibración, Sthohmeier y colaboradores proponen una interfaz háptica tipo bastón, en la cual el usuario ejecuta diversos movimientos sobre una barra de aluminio para activar puntos de estimulación, este prototipo se encuentra apoyado por una representación auditiva para mejorar la inmersión del usuario a la hora de identificar la textura, registrando clasificaciones de granulidad y aspereza, los autores concluyen que una limitación del método propuesto se enmarca en la experimentación, donde los usuarios reportaron texturas que se les asemejaban a materiales cotidianos variando en algunos casos las clasificaciones establecidas [24].

Adicionalmente en la investigación realizada por Asano y colaboradores, se desarrolla un sistema háptico aplicado en la reproducción de rugosidad, los estímulos vibro táctiles estimulan la zona lateral de la yema de los dedos, mientras el usuario realiza un proceso activo sobre una superficie ondulada. De igual manera se realiza un experimento en el cual cada participante se encuentra aislado por medio de auriculares y una venda, indicando de forma simultánea la magnitud de rugosidad percibida, los autores concluyen que se debe realizar el experimento con una población mayor a 8 personas para no presentar sesgos provenientes de la

selectividad de cada usuario, del mismo modo reportan que se presentaron sensaciones de saturación en la región estimulada lo que conlleva a describir incorrectamente las percepciones táctiles [25].

De igual modo, Ito y colaboradores, establecen la combinación de estimulación vibrotáctil con estímulos de fricción aplicados sobre una rejilla en la cual el usuario realiza desplazamientos sobre esta. Los autores concluyen que la combinación de estímulos produce una respuesta adecuada al momento de calificar una textura siempre que se acompañe de parámetros variables como magnitud, frecuencia y tiempo de ejecución [26].

En la figura 2, se ilustran los prototipos propuestos empleando dispositivos de vibración.



Figura 2. Prototipos empleando actuación de vibración

Fuente: Tomada de [24], [25], [26].

## 2.4 PROTOTIPOS EMPLEANDO ULTRASONIDO

Por otra parte, se han realizado desarrollos de interfaces implementando el principio de ultrasonido, generando en el usuario estados de presión en la piel por medio de frentes de onda. Este tipo de dispositivos liberan a los participantes de colocarse

algún tipo de instrumentación sobre las extremidades de las manos, como es el caso del prototipo desarrollado por Carter en la Universidad de Bristol, Inglaterra, denominado UltraHaptics. Los investigadores registran mapas de percepción táctil en dos puntos focales de la yema de los dedos bajo frecuencias variables comprendidas entre 4 y 250 Hz a alturas variables de la pantalla táctil, de igual manera en la investigación se enmarca que se debe ejecutar una etapa de entrenamiento, ya que en el experimento planteado se debió incitar a los usuarios hacia las respuestas correctas de localización háptica [27].

Monnai y sus investigadores, por medio del proyecto denominado HaptoMine de la Universidad de Tokio, Japón, presentan un sistema para la interacción de la yema de los dedos con una pantalla virtual, adicionando entonces una inmersión visual por medio de imágenes en forma de hologramas transmitidos por reflexión indirecta [28].

También se encuentra la investigación realizada por Kamigaki y colaboradores, donde se propone una metodología para cuantificar la rugosidad de una superficie áspera regular, irradiando el objeto para obtener una distribución espacial de la presión sonora, los autores concluyen que, por medio de una matriz de actuadores de ultrasonido, se podría obtener el perfil de materiales rugosos y finos para ser replicados en la yema de los dedos [29].

Freeman y colaboradores, diseñan una plataforma tipo matriz donde se distribuyen los actuadores, de igual forma validan el sistema por medio de representaciones de superficies virtuales en un plano de tipo piramidal o de tetraedros, que al aplicarle formas de onda tipo senoidal, cuadrada o triangular a frecuencias comprendidas entre 5 y 40 Hz recrean las irregularidades de los objetos, los autores concluyen que se debe aumentar los puntos de interacción para obtener diversas percepciones, por ende aplican estimulación de ultrasonido en las falanges del dedo [30].

En la figura 3, se ilustran los prototipos propuestos empleando dispositivos de ultrasonido.



Figura 3. Prototipos empleando actuación de ultrasonido  
Fuente: Tomada de [27], [28], [30]

## 2.5 PROTOTIPOS EMPLEANDO PIEZOELÉCTRICOS

Sin embargo, algunos prototipos implementan actuadores con bajo consumo de energía, como es el caso de las láminas piezoeléctricas. Por medio de este principio de actuación combinado con mecanismos de amplificación de desplazamiento hidráulico (HDAM), se han producido micro arreglos deformables tipo matriz para estimular la yema de los dedos, con frecuencias soportadas por el actuador por debajo de los 200 Hz [31].

Kosemura y sus investigadores, desarrollan una interfaz táctil tipo matriz de 3 por 3 actuadores, registrando que al producirse desplazamientos mayores a 100 micro metros con frecuencias de excitación comprendidas entre 1 y 200 Hz a tensiones inferiores de 150 voltios, los autores concluyen que se registraron respuestas por parte de los usuarios describiendo sensaciones similares a rugosidad, sin embargo plantean que se debe ejecutar una metodología psicofísica para la evaluación de

diversas texturas en una población mayor apoyados en una evaluación de percepción táctil [32].

Por su parte, Zarate y sus investigadores presentan una pantalla táctil portable de 12 por 16 actuadores, en donde el usuario debe realizar un trabajo de exploración para la percepción de gráficos dinámicos producidos por la deformación de las láminas piezoeléctricas, los autores proyectan el dispositivo en video juegos serios, escenarios de navegación y trabajos de tipo remoto [33].

Posteriormente en el trabajo de Kawasoe y colaboradores, los autores publican un artículo en donde se presenta la utilidad de un actuador piezoeléctrico, concluyendo que este tipo de transductores permiten dispositivos hápticos pequeños, que requieren un consumo de energía menor reflejado en parámetros de voltaje en el sistema, obteniéndose la reproducción de percepciones táctiles en regiones independientes de la yema de los dedos [34].

En la figura 4, se ilustran los prototipos propuestos empleando actuación piezoeléctrica.



Figura 4. Prototipos empleando actuación piezoeléctrica

Fuente: Tomada de [31], [33], [34]

## 2.6 PROTOTIPOS EMPLEANDO ELECTROESTIMULACIÓN

También se han desarrollado interfaces electro cutáneas, utilizando el principio de estimulación eléctrica en las terminaciones nerviosas a nivel de la superficie de la piel, estas interfaces desarrolladas tienden a ser de un menor tamaño, durables y aplicables a diferentes puntos de la yema de los dedos [35].

Este método de estimulación generalmente se produce a través de electrodos, obteniendo una gran variedad de sensaciones reportadas como hormigueos, vibraciones y estados de pulsaciones a través de señales variantes en frecuencia, siendo utilizadas en diversas áreas de contacto del cuerpo humano [36] [37].

En los trabajos de Kitamura y colaboradores, se desarrolla la construcción de una matriz de 3 por 3 micro agujas de titanio. Este tipo de actuadores permite la generación de estímulos a un menor rango de voltaje. De igual manera los autores reportan que la forma de las micro agujas afectará las percepciones en el usuario y que se debe considerar la frecuencia e intensidad de la corriente aplicada sobre la yema de los dedos para evitar registros de calentamiento o fatiga en los experimentos que se utilizan para la evaluación de este método [38] [39].

Por su parte Yem y colaboradores, desarrollan un dispositivo háptico híbrido implementando un actuador mecánico tipo motor y un actuador eléctrico. Los autores concluyen que las percepciones producidas en el usuario se pueden enmarcar en presión y fricciones finas. De igual manera concluyen que combinando áreas de contacto e intensidad de corriente eléctrica se pueden obtener diversas sensaciones proyectadas hacia texturas de materiales debido a las deformaciones producidas en la yema de los dedos [40].

En el trabajo de Shima y colaboradores, se implementa la estimulación eléctrica para la reproducción de movimiento junto a un dispositivo tipo servo motor con el

objetivo de reproducir en el usuario sensaciones de fuerza. Los autores concluyen que se deben considerar diversos puntos focales para ampliar la gama de percepciones debido a que el método propuesto está aplicado a la parte superior de la yema de los dedos donde la región de percepción se disminuye [41].

Finalmente, en el trabajo de Geng y colaboradores, se acondiciona un método psicofísico para la evaluación de factibilidad de retroalimentación sensorial de umbrales por medio de estimulación eléctrica, clasificadas como detección, dolor y sensación notable. Los autores concluyen que este tipo de mecanismos pueden ser implementados para sustituir la pérdida de sentido en usuarios con discapacidad siempre que se controle frecuencias e intensidades en regiones de piel específicas [42].

En la figura 5, se ilustran los prototipos propuestos empleando actuación por electroestimulación.



Figura 5. Prototipos empleando electroestimulación

Fuente: Tomada de [39], [40], [42].

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, el método de actuación aplicado sobre la yema de los dedos, por medio de electroestimulación presenta diversas



ventajas, en comparación con los actuadores de vibración, ultrasonido y piezoeléctricos.

La principal ventaja enmarca que al producirse señales eléctricas estas pueden ser aplicadas sobre la extremidad por medio de electrodos que se encuentren en contacto con la piel, generando así diversos puntos focales sobre esta área, lo que amplía el registro de sensaciones percibidas por los usuarios, ya que se puede estimular una sola región o al realizarse combinaciones de electrodos diversas áreas sobre la yema del dedo.

Además, al generarse una señal eléctrica que supere la barrera resistiva de la piel, se pueden variar parámetros de frecuencia estableciendo respuestas de los mecanorreceptores en sus rangos específicos, al igual que la amplitud de la señal, enmarcando diversas percepciones que dependerán de dicho parámetro.

La electroestimulación entonces permite la construcción de actuadores tipo matriz, estableciendo sistemas de menor tamaño, de menor peso, y en muchas ocasiones adaptables a las deformaciones de la piel.

## **2.7 METODOLOGÍAS PSICOFÍSICAS**

En general, los procesos de percepción táctil realizados por las extremidades de un usuario por medio de interfaces hápticas establecen cualidades y propiedades 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]. Las metodologías psicofísicas, empleadas al momento de evaluar los desarrollos de interfaces

hápticas, se basan en enfoques experimentales los cuales permiten establecer y definir la tipología del tipo de pruebas y procedimientos previos a la detección o clasificación de texturas [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 6 etapas partiendo de la selección de la muestra para el estudio la cual consta de 20 usuarios de diversas edades, posteriormente se implementa una etapa de adecuación donde el usuario interactúa con la estimulación eléctrica por medio del actuador tipo matriz, 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, 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 y dimensión táctil evalúan las sensaciones de electroestimulación para clasificar y reconocer las texturas.

En la figura 6, se ilustra el diagrama propuesto para los procedimientos basados en aspectos psicofísicos en la evaluación del prototipo.

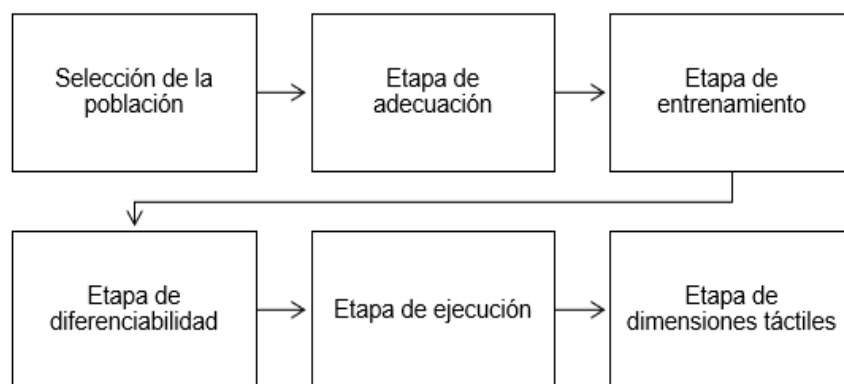


Figura 6. Etapas del protocolo psicofísico.

Fuente: Elaboración propia.

En la literatura científica, se han reportado adecuaciones de experimentos psicofísicos al evaluar los diversos prototipos hápticos, describiendo que por medio de estas interfaces se han reconocido 3 dimensiones fundamentales, comprendidas como la interpretación subjetiva de cada usuario, implementando etiquetas por medio de adjetivos frente a los estímulos presentados [45].

En la figura 7, se ilustra las dimensiones perceptivas; la primera dimensión enmarca texturas rugosas, la segunda dimensión se relaciona con la interpretación de la fricción entre la textura y la yema de los dedos y finalmente la tercera dimensión relaciona movimientos de tipo pasivos sobre el material.

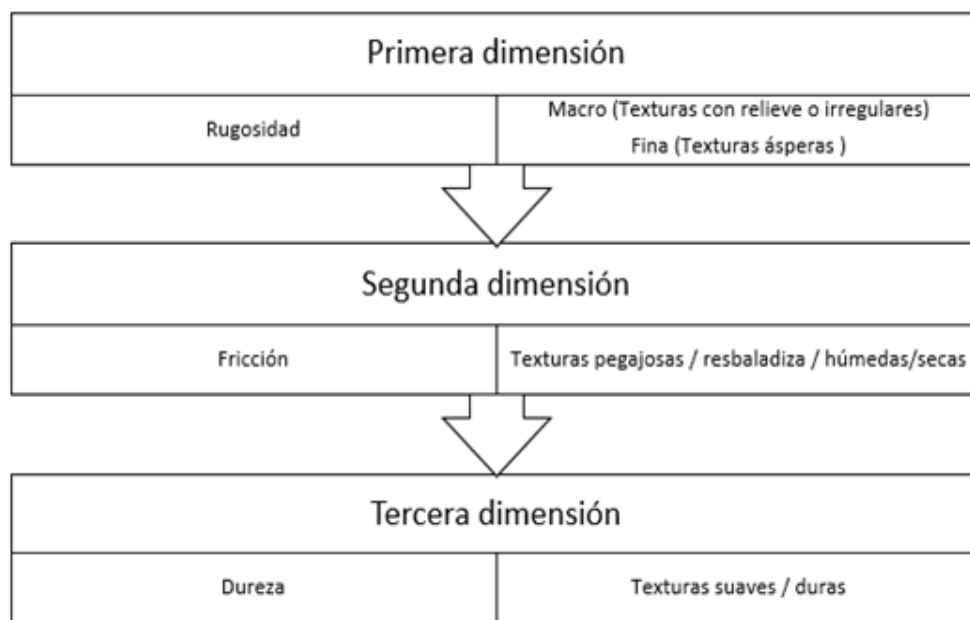


Figura 7. Dimensiones perceptivas

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2 se realiza una síntesis de los trabajos sobre dimensionalidad perceptiva, en la cual cada autor estudia el reconocimiento de diversos materiales, replicados por medio de interfaces hápticas sobre una población previamente seleccionada.

La mayoría de los estudios científicos registra reconocimiento de texturas rugosas de tipo macro y fina por medio de movimientos activos con las interfaces hápticas, seguidos del reconocimiento de suavidad y dureza llevado a cabo por una interacción inicial con los diversos materiales presentados, y finalmente se registran pocos reconocimientos por parte de los usuarios en materiales húmedos o secos.

Tabla 2. Resumen de las investigaciones de dimensionalidad perceptiva

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Primera dimensión</b>	<b>Segunda dimensión</b>	<b>Tercera dimensión</b>	<b>Población</b>	<b>Materiales</b>
Gescheider [46]	2005	rugosidad macro y fina	-	suavidad	19	7
Tiest [47]	2006	rugosidad macro	-	suavidad y dureza	20	124
Tanaka [48]	2006	rugosidad macro	humedad	suavidad	21	13
Yoshioka [49]	2007	rugosidad fina	-	suavidad y dureza	8	16
Summers [50]	2008	rugosidad macro y fina	-	suavidad	12	10
Guest [51]	2011	rugosidad fina	humedad	dureza	35	5

### **3. DISEÑO DEL SISTEMA DE ELECTROESTIMULACIÓN E INTERFAZ DE USUARIO**

En esta sección se establecen los criterios del sistema de electroestimulación desde el punto de vista fisiológico, lo cual conlleva a la selección de dispositivos para el diseño final del prototipo, así como una reflexión sobre los posibles riesgos que traería para el usuario la interacción con el sistema y la manera en que dichos riesgos se minimizaron o subsanaron dentro del desarrollo del trabajo, de igual manera se describe la herramienta software que permite la manipulación del hardware a través de la tarjeta Arduino Mega 2560 aplicado sobre un actuador tipo matriz.

#### **3.1 ASPECTOS GENERALES DEL DISEÑO DEL PROTOTIPO**

Tras definir el método de actuación sobre la yema de los dedos por medio de electroestimulación, se establece que el prototipo para la reproducción de texturas debe constar de: hardware, actuador tipo matriz, chasis, y software.

En la tabla 3 se describen los parámetros de cada uno de los componentes del prototipo háptico.

Tabla 3. Parámetros generales de diseño del prototipo

Componente del prototipo	Parámetros
Hardware	Frecuencias variables que permitan la reproducción del estímulo táctil para el reconocimiento de texturas.
Actuador	Actuador con contacto directo en la yema de los dedos, disposición de electrodos adecuada para cubrir y obtener diversos puntos de estimulación.  Portabilidad debido a su forma compacta, tamaño reducido y bajo peso.
Chasis	Robustez en su construcción, debido a que contendrá los dispositivos del prototipo.
Software	Panel de frecuencias, panel de electrodos, visualización de señal portadora, conexión con la tarjeta Arduino Mega 2560.

### 3.2 DIAGRAMA GENERAL DEL HARDWARE

Para dar cumplimiento a los requerimientos expuestos en la tabla 3, se plantea una propuesta de diseño hardware para el sistema de estimulación eléctrica.

En la figura 8 se ilustra el diagrama general del sistema propuesto; es de notar que el diagrama corresponde a una placa de electroestimulación, el prototipo constara de tres tarjetas, las cuales de manera independiente habilitaran o no la estimulación de una fila de tres electrodos respectivamente.

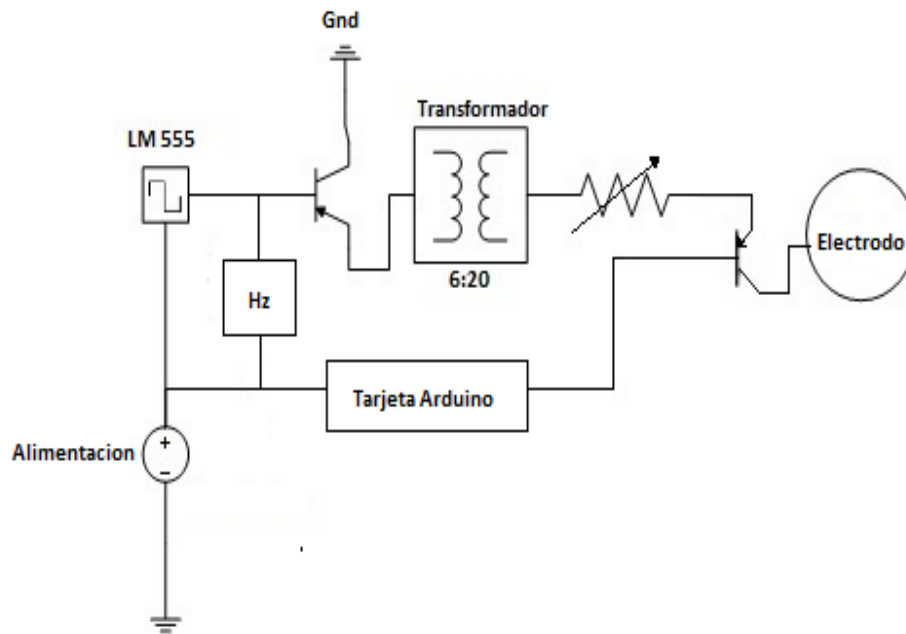


Figura 8. Diagrama hardware

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la figura 9, se realiza una descripción de las sub-etapas que conforman el diagrama hardware.

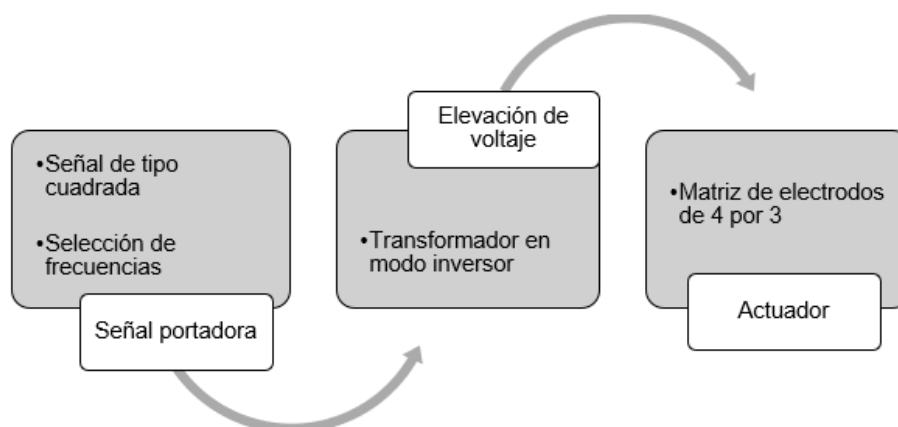


Figura 9. Sub- etapas del sistema de estimulación eléctrica

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 SEÑAL PORTADORA

Esta sub-etapa se encuentra constituida por la generación de una señal tipo cuadrada por medio de un circuito integrado 555.

La configuración utilizada en el proceso es astable, ya que esta proporciona una regla de tiempo que permite la variación de frecuencias.

En la figura 10, se ilustran las conexiones del integrado 555 en configuración astable.

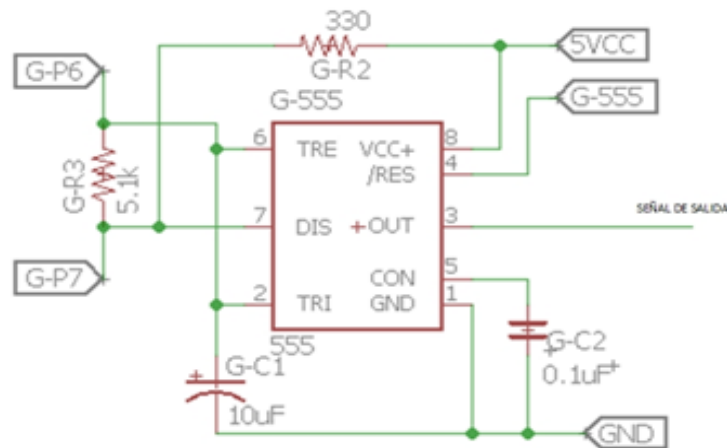


Figura 10. Generador de onda tipo cuadrada  
Fuente: Elaboración propia.

El generador de onda cuadrada consta de una alimentación de entrada a 5 voltios, se ha dispuesto un valor  $R_a$  de  $330 \Omega$  con una resistencia  $R_b$  de  $5.1 k\Omega$  y un capacitor de  $10 \mu F$ , para obtener una frecuencia inicial de 14 Hz.



De igual manera, el encendido y apagado de esta etapa se encuentra comunicado con la tarjeta Arduino Mega 2560, en caso de una falla en el sistema, el dispositivo mediante los pines 1 y 5 tiene la capacidad de ir directamente a tierra.

A continuación, se expresa la formula general implementada para el cálculo de frecuencias.

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

Donde:

$F =$  frecuencia (Hz)

1.44 = valor constante

$C =$  valor del capacitor

$Ra =$  resistencia fija

$Rb =$  resistencia variable

Tras obtener la señal cuadrada, y seleccionar la frecuencia deseada, en la figura 11 se observa la fase para acoplar esta señal antes de pasar a la sub- etapa de elevación de voltaje.

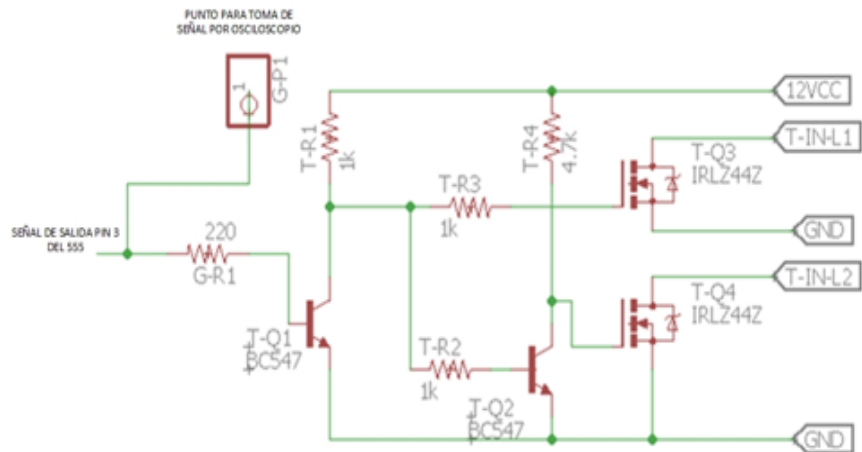


Figura 11. Acoplador de señal cuadrada

Fuente: Elaboración Propia

Esta fase se encarga de recibir la señal de tipo cuadrada, posteriormente se conmuta por medio de un transistor, dirigiéndose hacia dos Mosfet de referencia IRLZ44Z.

El Mosfet 1 etiquetado como T-Q3 permite obtener el flanco positivo de la señal, y el Mosfet 2 etiquetado como T-Q4 obtiene el flanco negativo de la señal, posteriormente cada uno se conecta con la línea de 6 voltios del transformador para en seguida realizar la etapa de amplificación.

### 3.4 ELEVACIÓN DE VOLTAJE

Esta sub-etapa se encuentra constituida por un transformador monofásico en configuración amplificador. Para ello la bobina secundaria debe poseer un número mayor de vueltas que la bobina primaria.

En la figura 12 se ilustran las conexiones realizadas a un transformador en dicha configuración.

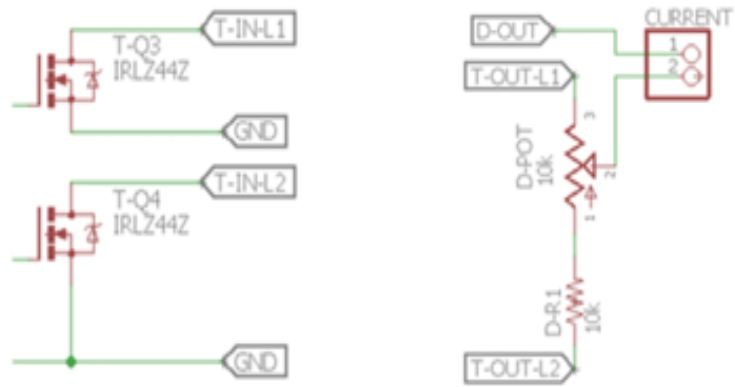


Figura 12. Elevación de voltaje por transformador  
 Fuente: Elaboración propia.

Tras la fase de acoplamiento de la señal, esta posteriormente ingresa a un transformador conectado por medio de borneras con etiquetas T-IN-L1 y T-IN-L2 que son las líneas a 6 voltios. Luego el transformador se encarga de elevar la señal a 110 voltios. Después de amplificar la señal cuadrada, se implementa un divisor de voltaje entre un potenciómetro de 10  $k\Omega$  y una resistencia de 5  $k\Omega$  con la finalidad de regular la intensidad de corriente que saldrá por D-OUT hacia un electrodo del actuador tipo matriz.

En la figura 13, se ilustran las placas PCB del sistema de electroestimulación sin ensamblar y posteriormente con los componentes electrónicos.

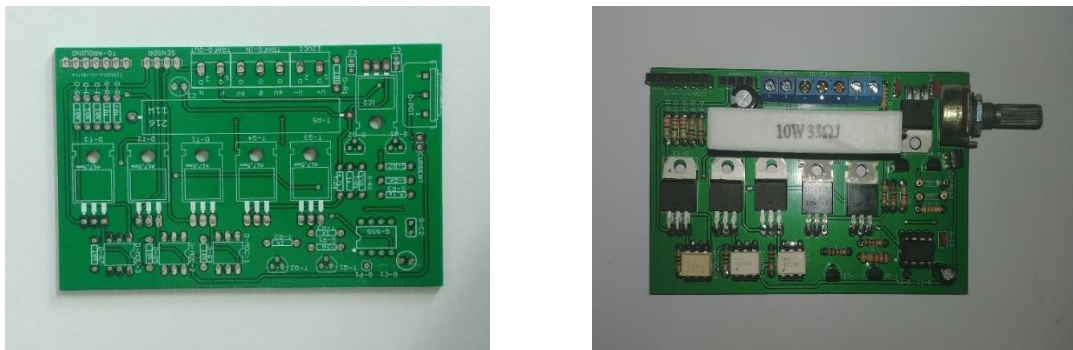


Figura 13. Placa PCB  
 Fuente: Elaboración propia

Tras definir las etapas de diseño, se consideró el aspecto referente a la seguridad del sistema para tener control en el manejo al implementarse en algún usuario, debido al riesgo que surge al implementarse corriente eléctrica en el cuerpo humano.

En primera instancia, se efectuó un estado de encendido y apagado en la etapa de generación de la señal portadora, independientes para cada línea de electrodos de la matriz.

Posteriormente en la etapa denominada elevación del voltaje, se consideró una regulación de corriente a través de un divisor de tensión con manipulación por potenciómetro, aspecto que permitirá de igual manera conocer y permitir el paso de corriente hacia la yema de los dedos, de manera gradual y constante para establecer rangos de percepción en cada usuario, es de notar que este parámetro se encuentra en la escala de microamperios.

Finalmente, en la etapa del actuador que corresponde a una matriz de electrodos, la cual estará en contacto con la yema de los dedos, cada pin electrodo se encuentra conmutado por medio de la interfaz propuesta y la tarjeta Arduino a través de optoacopladores. De esta manera se establece el encendido y apagado de manera independiente, aislando entonces voltajes no deseados que puedan introducirse en la matriz. Cada dispositivo de optoacopladores también permite proteger componentes de la tarjeta ya que se encuentran con vistas a tierra.

### **3.5 DISPOSITIVO ACTUADOR**

La matriz de electrodos construida consta de una distribución de 4 filas con 3 electrodos cada una, para un total de 12 pines, estos electrodos se dispusieron dentro de una cuadrícula en una baquela transparente y flexible; es de notar que el actuador tiene esa especificación debido a que en la actualidad no se cuenta con la

tecnología para fabricar una matriz de mayor dimensión sin verse afectada de igual manera por la separación entre ellos.

La matriz de electrodos se encuentra apoyada sobre una espuma que brinda soporte al dispositivo y permite ligeras deformaciones al aplicar presión.

Es de notar que cada pin electrodo tiene un diámetro de 3.0 milímetros, con una distancia entre centros de electrodos de 3.2 milímetros; los nueve electrodos superiores son utilizados para estimulación, siendo declarados por las letras A, B, C, D, E, F, G, H, I, y los tres electrodos restantes se utilizan como un sistema de tierra entre el pin y la yema de los dedos.

De igual manera esta matriz está desarrollada para que cubra una superficie de 1.5 centímetros por 2.5 centímetros, valores promedio de un dedo índice adulto.

En la figura 14, se ilustra la distribución de electrodos, así como las medidas de la yema de los dedos.

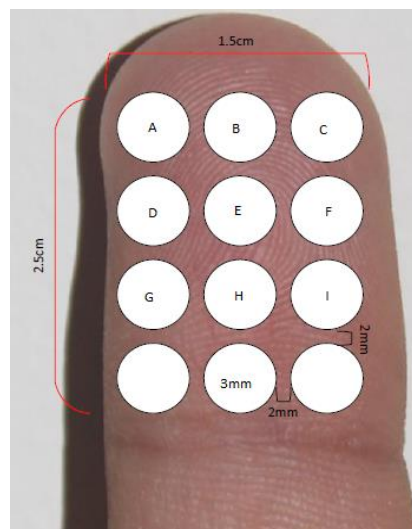


Figura 14. Distribución de los electrodos

Fuente: Elaboración propia.

Tras definir la distribución de electrodos, se procedió a diseñar la matriz de 4 por 3, en la figura 15, se ilustra la matriz de electrodos impresa sobre un acetato, posteriormente se ilustra la matriz de electrodos finalmente construida sobre el soporte de espuma.

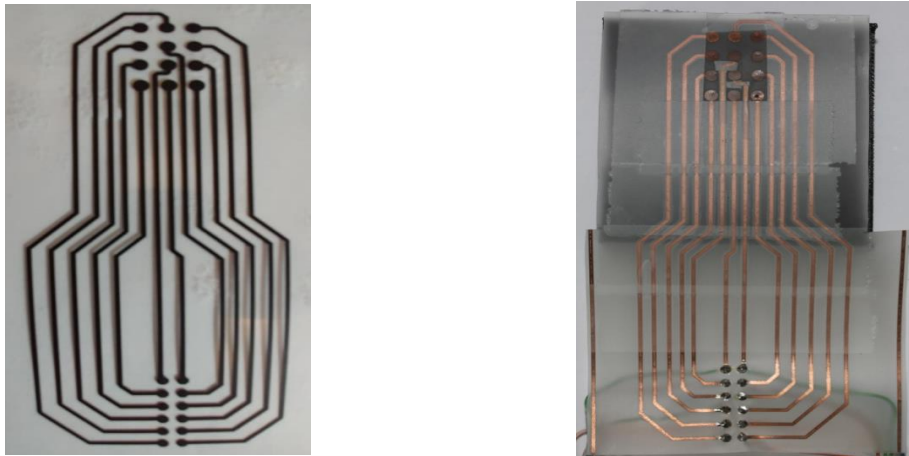


Figura 15. matriz de electrodos

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 DISEÑO FÍSICO DEL CHASIS EN SOLIDWORKS

Para el criterio de protección de los dispositivos, se realizó el diseño de un chasis en madera. El diseño se realizó en el programa SolidWorks y posteriormente fue recortada en una máquina de control numérico computarizado (CNC).

En la figura 16, se ilustra el diseño del chasis en la vista preliminar de SolidWorks.

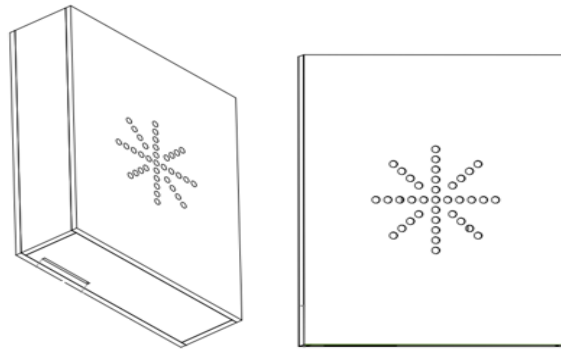


Figura 16. Esquemático del chasis.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 17 se ilustra el proceso de construcción del chasis en una maquina CNC.

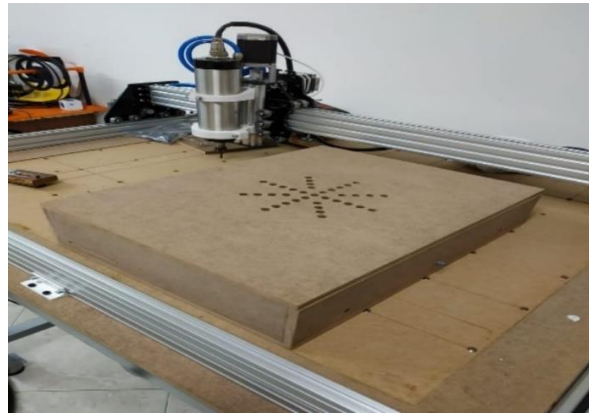


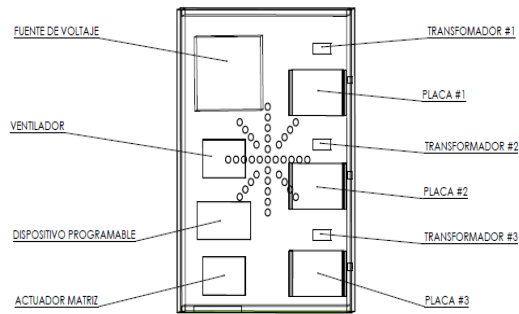
Figura 17. Chasis en construcción

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se organizó el hardware, con los siguientes dispositivos: fuente de alimentación, tarjeta Arduino Mega 2560, líneas de conexiones, transformadores y la regleta de conexión para el actuador tipo matriz.

En la figura 18, se ilustra la disposición de elementos, así como el prototipo ensamblado en su totalidad.

### Disposición de elementos



### Prototipo ensamblado



Figura 18. Prototipo  
Fuente: Elaboración propia

## 3.7 INTERFAZ SOFTWARE

Se desarrollo una aplicación software en Labview 2016 que permite interactuar de manera sincronizada con el prototipo de electroestimulación por medio del protocolo serial con la tarjeta Arduino Mega 2560.

La interfaz, cuenta con un menú constituido por dos pestañas; la primera pestaña se denomina inicio donde se encuentra la presentación del trabajo de investigación, en la figura 19 se ilustra la primera ventana.



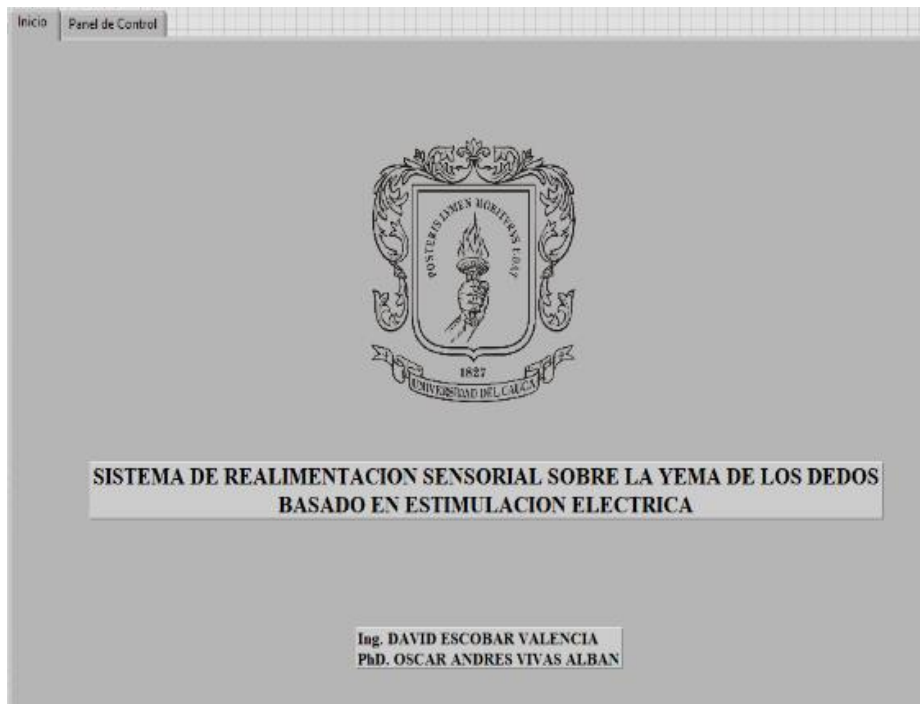


Figura 19. Ventana de inicio

Fuente: Elaboración propia

La segunda ventana se denomina panel de control, en donde se encuentran los paneles de selección de frecuencia, panel de electrodos, panel de señal portadora, visa y stop.

En la figura 20, se ilustra el panel de frecuencias, consta de tres botones por fila de electrodos, debido a que cada placa de electroestimulación habilita y deshabilita la generación de señal cuadrada se tiene el botón encender línea, posteriormente los botones de frecuencias conmutan la resistencia equivalente en la placa PCB para obtener dicha frecuencia, cada botón está equipado con una representación lumínica para indicar que la transmisión es correcta.

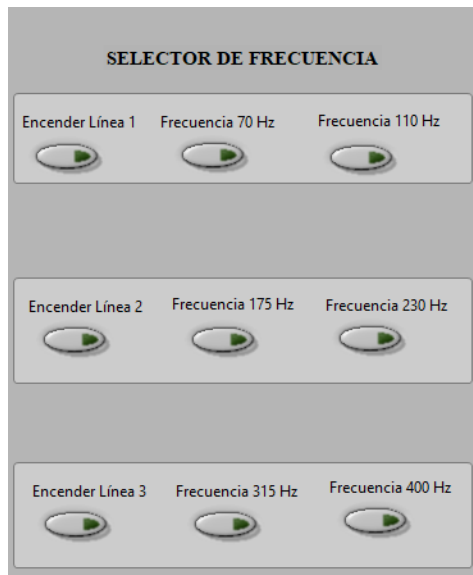


Figura 20. Panel de frecuencias.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 21, se ilustra el panel de electrodos, este panel representa la distribución de pines de activación sobre la yema de los dedos; es de notar que cada botón habilita la señal proveniente de la etapa de elevación de voltaje, por lo que habrá un estímulo cuando el indicador este en verde, esta configuración permite estimular un punto focal o realizar las combinaciones deseadas.

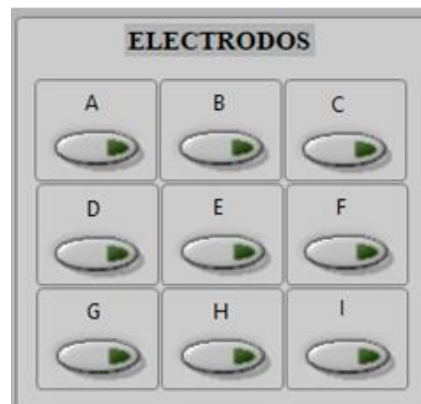


Figura 21. Panel de electrodos.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 22, se ilustra el panel denominado señal portadora, este panel cuenta con tres visualizadores de la señal cuadrada proveniente del integrado 555, cada visualizador corresponde a una placa PCB.

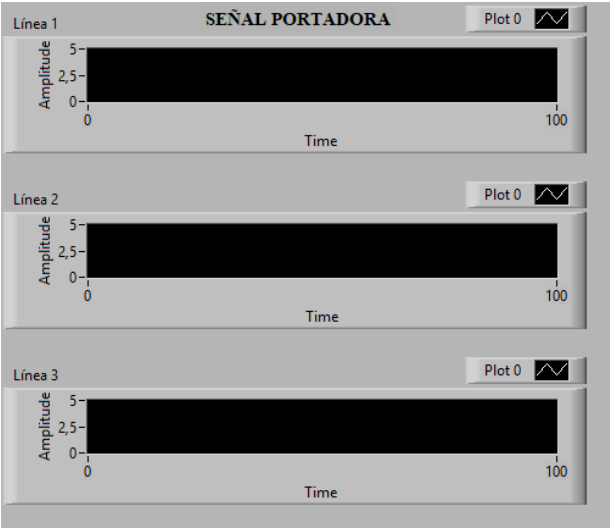


Figura 22. Panel de señal portadora.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la figura 23, se ilustran los diagramas de visa y stop; el primero de ellos permite la selección del puerto de comunicación entre el computador y la tarjeta Arduino Mega 2560, el segundo de ellos es un botón que detiene la interfaz y además evita el paso de señal eléctrica hacia la yema de los dedos por si se presenta alguna falla en el sistema.



Figura 23. Visa y stop

Fuente: Elaboración propia

## **4. ADAPTACIÓN DEL PROTOCOLO PSICOFÍSICO PARA LA EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO**

La adaptación psicofísica propuesta, se basa en el diagrama descrito en la sección 2.7, lo cual permite establecer la tipología de las pruebas y procedimientos previos al análisis de los experimentos planteados.

### **4.1 SELECCIÓN DE LA POBLACIÓN**

Se realizó una selección de una muestra poblacional de un total de 20 personas, los sujetos se encuentran en edades comprendidas entre los 20 y los 69 años, manteniendo la misma proporción de las edades establecidas entre 5 grupos:

Grupo 1: 20-29 años

Grupo 2: 30-39 años

Grupo 3: 40-49 años

Grupo 4: 50-59 años

Grupo 5: 60-69 años

La muestra total se encuentra dividida entre 10 hombres y 10 mujeres. En la tabla 4, se ilustra las características de los usuarios que realizaron posteriormente las pruebas.

Tabla 4. Características de los usuarios.

<b>Usuario</b>	<b>Sexo</b>	<b>Edad</b>	<b>Ocupación</b>
P1	Masculino	68	Ingeniero
P2	Masculino	57	Abogado
P3	Masculino	45	Ingeniero
P4	Masculino	33	Algebrista
P5	Femenino	66	Ama de casa
P6	Femenino	54	Economista
P7	Femenino	46	Ama de casa
P8	Femenino	30	Ama de casa
P9	Masculino	27	Laboratorista
P10	Masculino	60	Administrador
P11	Masculino	51	Ingeniero
P12	Masculino	40	Ingeniero
P13	Femenino	26	Abogada
P14	Femenino	60	Ingeniera
P15	Femenino	50	Nutricionista
P16	Femenino	44	Medica
P17	Masculino	24	Ingeniero
P18	Masculino	28	Ingeniero
P19	Femenino	28	Abogado
P20	Femenino	29	Abogado

## 4.2 ETAPA DE ADECUACIÓN

Esta etapa contempla inicialmente un proceso de limpieza por parte de cada uno de los usuarios, para ello deben lavarse las manos con agua y jabón, posteriormente deben frotarse la yema del dedo índice por medio de un algodón que contiene alcohol etílico.

La etapa de adecuación consiste en realizar una familiarización entre la yema de los dedos de la mano dominante de cada usuario y el actuador propuesto, por medio de un instructivo verbal para la adecuada posición de la extremidad, permitiendo una adecuada valoración de la interfaz táctil.

En la figura 24, se ilustra a dos usuarios familiarizándose con el actuador tipo matriz.

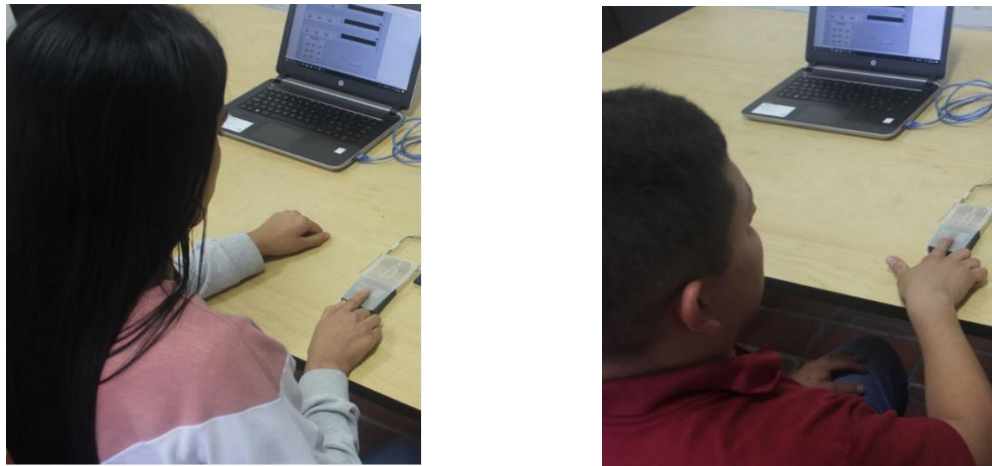


Figura 24. Usuarios en etapa de adecuación

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 electroestimulación.

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, este proceso tiene un tiempo de excitación inicial correspondiente a 3 segundos, 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, de igual manera en este tiempo se debe reposar la extremidad en una placa de vidrio.

En la figura 25, se observa a dos usuarios reposando la yema de los dedos después de la etapa de entrenamiento.

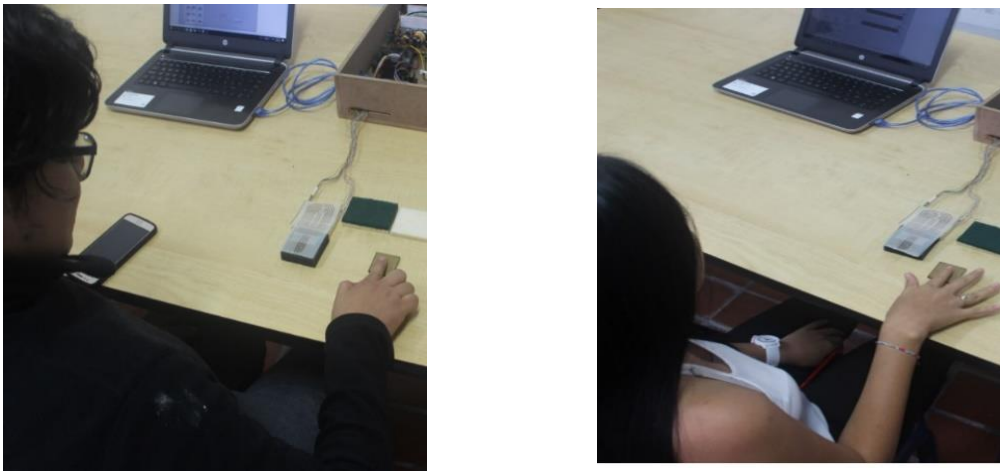


Figura 25. Usuarios en barrera de entrenamiento

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 ETAPA DE DIFERENCIABILIDAD

En la etapa de diferenciabilidad se le solicitó a cada usuario 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 por 4 centímetros, siendo estos: lija para carpintería, esponja de brillo y plástico.

En la figura 26, se ilustran los materiales seleccionados.



Figura 26. Materiales seleccionados  
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se le solicitó a cada usuario 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 27 se ilustra a dos usuarios realizando el proceso de reconocimiento entre texturas.

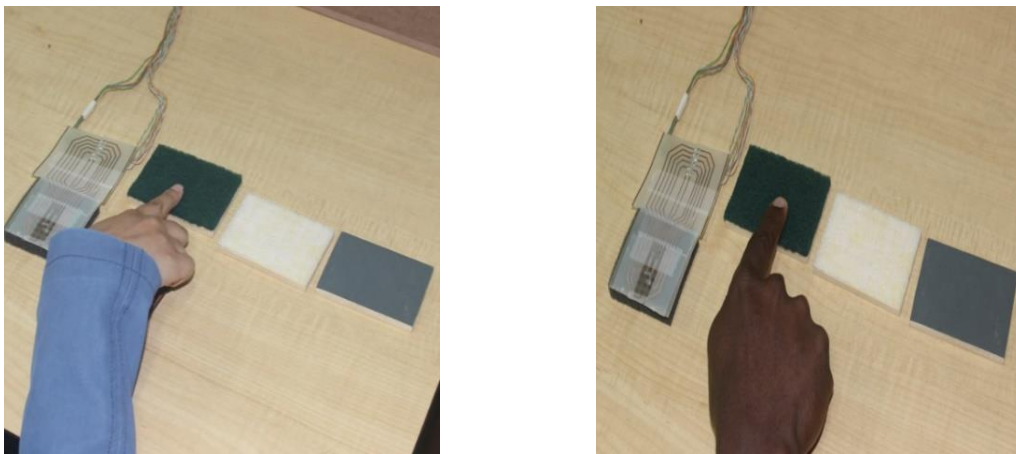


Figura 27. Usuarios en etapa de diferenciabilidad  
Fuente: Elaboración propia



#### 4.5 ETAPA DE EJECUCIÓN Y DE DIMENSIONES TÁCTILES

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 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 28 se ilustran a dos usuarios en las etapas de ejecución y dimensionalidad táctil.

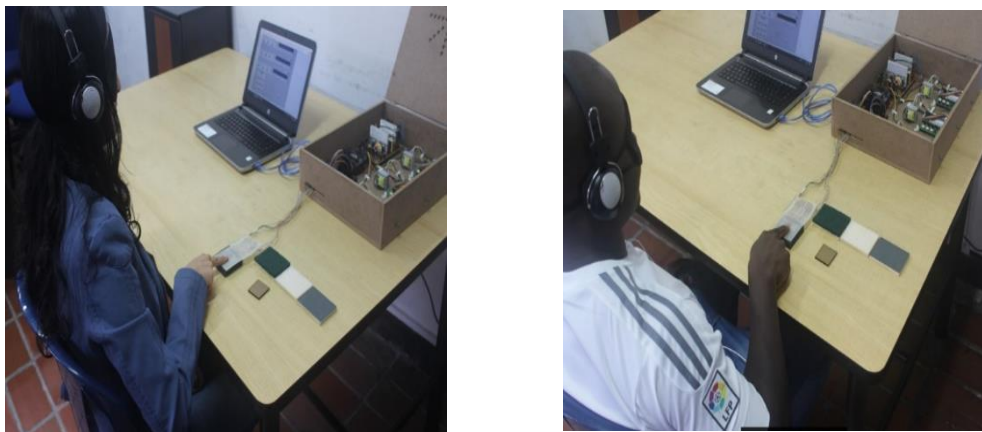


Figura 28. Usuarios en la etapa de ejecución.

Fuente: Elaboración propia

## **5. CRITERIO ESTADÍSTICO DE EVALUACIÓN DE LA INTERFAZ HÁPTICA**

El criterio estadístico de evaluación de la interfaz háptica propuesta se encuentra cronológicamente dividido en un estudio sobre la resolución de localización espacial háptica aplicando un método psicofísico. El estudio inicia con la selección de la población, este aspecto se diferencia frente al protocolo planteado en la separación de la muestra por sexo, seguidamente se procede a realizar una etapa de adecuación con las mismas características expuestas en la sección 4.2, por su parte la etapa de entrenamiento en este estudio radica en la activación de un electrodo aleatorio pero variando la intensidad de corriente para determinar un valor promedio que no produjera dolor en los usuarios, en contra parte de las características expuestas en la sección 4.3, que se enfocan en la enseñanza de focalización de estímulos con diversas secuencias de electrodos, finalmente se presenta una etapa de ejecución que radica en tres experimentos de localización espacial.

Seguido de un estudio para la reproducción de texturas en el cual se implementa la estructura de la sección 2.7.

### **5.1 EVALUACIÓN DE RESOLUCIÓN DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL**

El primer estudio, se aplicó sobre una población de 20 personas, con edades comprendidas entre 20 y 25 años, distribuyendo la muestra en dos grupos de igual cantidad separados por sexo; se implementó un protocolo psicofísico, en donde la etapa de ejecución está conformada por 3 experimentos.

El primer experimento consta de tres secuencias de estimulación, la primera secuencia consiste en habilitar el paso de señal eléctrica solo al electrodo A, habilitando y deshabilitando el pin 3 veces. La segunda secuencia está dirigida hacia

el electrodo D, y la tercera secuencia se ejecuta en el pin G; este experimento evalúa la percepción de estimulación en un solo punto de la yema de los dedos.

El segundo experimento consta de dos secuencias de estimulación, la primera secuencia habilita el paso de señal eléctrica en el electrodo A, posteriormente en el electrodo B, y finalmente en el electrodo C. La segunda secuencia está dirigida hacia el electrodo D, a continuación, el electrodo E y luego al electrodo F. Este experimento evalúa la percepción de izquierda a derecha en la extremidad.

El tercer experimento es una secuencia de estimulación aleatoria, en donde se habilita el paso de señal en el electrodo G, luego se dirige hacia el electrodo I y finalmente la señal retorna al electrodo G.

Para cada etapa de secuencias de estimulación se implementó un tiempo de 3 segundos, dejando un tiempo de descanso establecido en 5 veces el tiempo de excitación entre secuencias, cada proceso se realizó a frecuencias de 25 Hz, 50 Hz y 100 Hz.

La figura 29 muestra los resultados del experimento 1. El promedio de aciertos frente a la zona de estimulación se ilustra sobre el eje vertical, y las frecuencias aplicadas sobre el eje horizontal. La relevancia estadística con respecto a los aciertos al aplicar diferentes frecuencias fue probada mediante ANOVA (test que permite comparar las medias de una o más poblaciones), en la cual cada frecuencia implementada se utiliza como un factor para el análisis, obteniéndose ( $F = 5.89, p = 0.038, \alpha = 0.05$ ) en el grupo de los hombres y ( $F = 9.92, p = 0.012, \alpha = 0.05$ ) en el grupo de las mujeres, donde  $F$  representa la variación de las medias dentro de los grupos,  $\alpha$  establece el nivel de significancia para cada experimento y  $p$  establece la probabilidad de que ocurra la variación de muestras dentro del experimento.

A partir del análisis se llega a la conclusión para este primer experimento, que la aplicación de estímulos en una zona específica a frecuencias bajas mantiene un promedio de aciertos alto, pero a medida que se aumentan estas frecuencias es más difícil percibir en que región se encuentra la estimulación.

De igual manera se puede concluir que las mujeres presentan mayor número de aciertos en las 3 secuencias del experimento 1. También que se producen respuestas positivas en los electrodos ubicados en los extremos, como es el caso del A y el G, caso contrario con el electrodo D en donde los aciertos disminuyen en los dos grupos debido a que este electrodo se encuentra rodeado de otros electros.

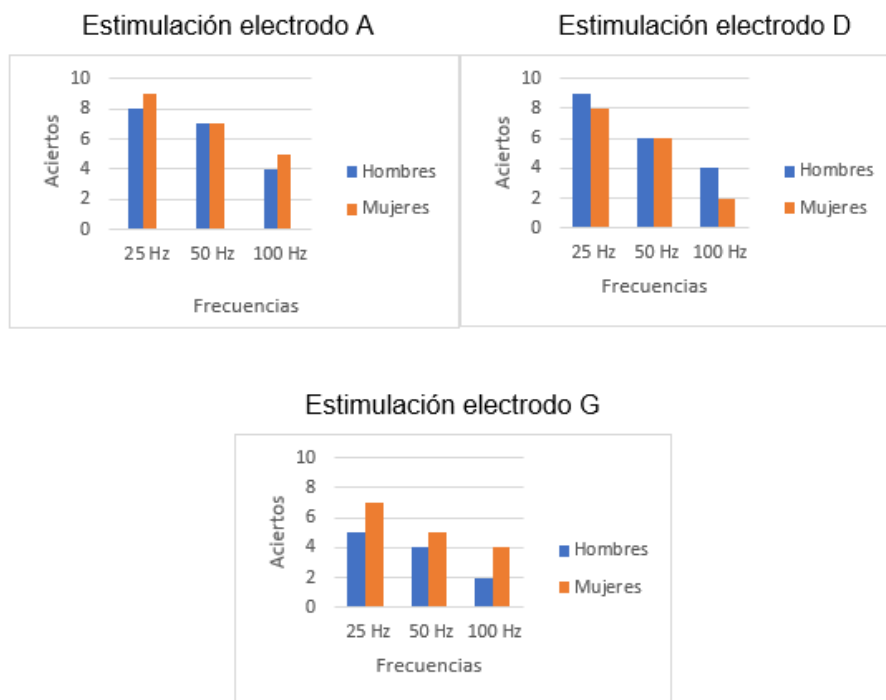


Figura 29. Resultados del experimento 1

Fuente: Elaboracion propia

Por su parte la figura 30 muestra los resultados del experimento 2. En este experimento al aplicar la misma técnica se obtuvo ( $F = 10.11, p = 0.046, \alpha = 0.05$ ) para el grupo de hombres y ( $F = 6.07, p = 0.088, \alpha = 0.05$ ) para el grupo de las mujeres.

A partir del análisis se llega a la conclusión que al aplicarse una secuencia de estímulos de izquierda a derecha el promedio de aciertos en el grupo de los hombres disminuye considerablemente al aumentar la frecuencia. No obstante, el grupo de mujeres pudo percibir las secuencias con mayor número de aciertos tanto en la parte superior y central de la extremidad. Es de notar que cada grupo manifestó que este experimento recrea la sensación de desplazamiento en un objeto.

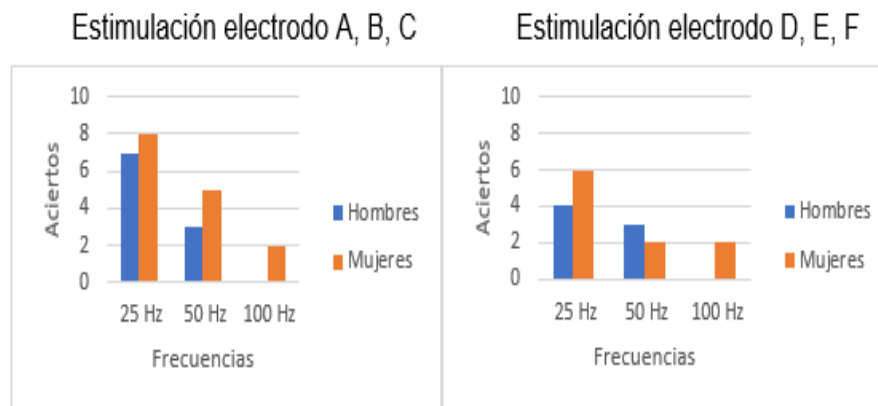


Figura 30. Resultados del experimento 2.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para el último experimento, la figura 31 muestra los resultados obtenidos. En este experimento se obtuvo ( $F = 0.13, p = 0.88, \alpha = 0.05$ ) para el grupo de hombres y ( $F = 0.10, p = 0.90, \alpha = 0.05$ ) para el grupo de las mujeres.

Se llega a la conclusión que al aplicarse una secuencia de estímulos aleatoria en los electrodos inferiores que abarcan la yema de los dedos, las respuestas de

aciertos son similares entre los dos grupos. Sin embargo, sigue prevaleciendo que a aumentos en la frecuencia las respuestas tienen a disminuir sin importar la población a la que se aplica la secuencia.

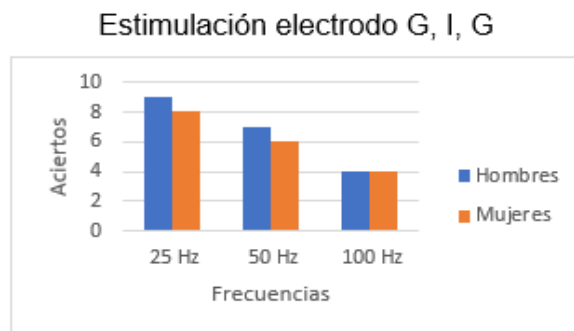


Figura 31. Resultados del experimento 3.

Fuente: Elaboración propia

En este estudio se ha desarrollado un procedimiento de evaluación que combina el sentido del tacto con interpretaciones psicofísicas, para la percepción de estímulos en diversos puntos focales.

Se puede concluir que la resolución espacial seleccionada de 3.2 milímetros entre los centros de los electrodos arroja resultados positivos a la hora de reconocer estímulos, presentando mayores aciertos en regiones extremas de la yema de los dedos que en áreas centrales, debido a que este tipo de electrodos se encuentra rodeado por electrodos vecinos; es de notar que, en este primer estudio, al realizarse una selección de la población por sexo, las mujeres presentaron un mejor desempeño en los aciertos con respecto al grupo de los hombres. Se concluye que esto se debe a que presentan mayor sensibilidad, así como una estructura más fina en la yema de sus dedos.

## 5.2 EVALUACIÓN PARA LA REPRODUCCIÓN DE TEXTURAS

Al realizarse el reconocimiento de cada superficie de los materiales seleccionados se le solicitó a los usuarios que calificaran la diferenciabilidad entre pares de texturas, siendo estas: T 1-2 (esponja y plástico), T 2-3 (plástico y lija) y T 1-3 (esponja y lija), por medio de una escala de valores entre 1 y 10, donde 1 indica que no se percibe diferencia entre materiales y 10 que el par de materiales se perciben diferentes.

La figura 32 muestra los resultados de la etapa de diferenciabilidad. La escala de calificaciones se ilustra sobre el eje vertical, y el porcentaje de la muestra que interpuso cada calificación sobre el eje horizontal. La relevancia estadística con respecto al comportamiento de las calificaciones para cada par de texturas reales se analizó por medidas descriptivas como: mínimo, máximo, media, desviación estándar, mediana, rango intercuartílico y coeficiente de asimetría, descrito en la tabla 5.

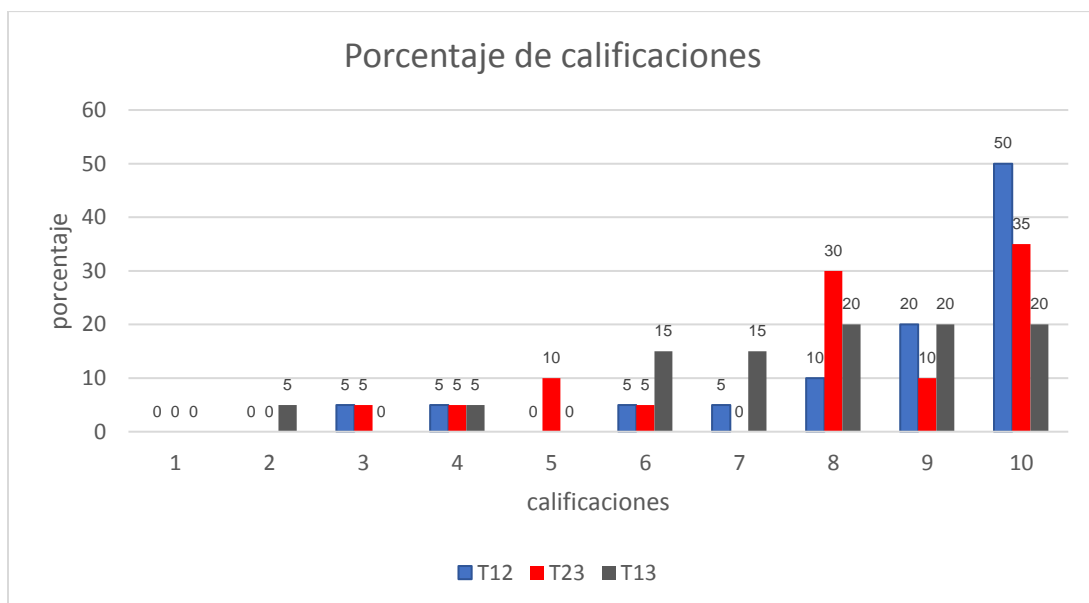


Figura 32. Distribución de las calificaciones en la etapa de diferenciabilidad

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Parámetros descriptivos

	Textura 1-2	Textura 2-3	Textura 1-3
Mínimo	3	3	2
Máximo	10	10	10
Media	8,6	7,95	7,65
Desviación Estándar	2,087557122	2,2118104	2,10950231
Mediana	9,5	8	8
Rango intercuartílico	2	3	2,5
Coefficiente de asimetría	-1,7186412	-0,967713	-1,12984106

Se concluye que el par de texturas T 1-2, presenta el mayor porcentaje de la muestra con un 50 % con una calificación de 10, reflejado en la media con un valor de 8.6, posteriormente se registra el par de texturas T 2-3 con una media de 7.95, y finalmente el par de texturas T 1-3 con un valor de 7.65.

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 determinar si estos datos son producto del azar o presentan un comportamiento.

En la tabla 6 se muestran los resultados al aplicar la prueba tales como: estadístico, significancia y muestra.

Tabla 6. Resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov

	Estadístico	Significancia	Muestra
<b>Textura 1-2</b>	0.35	0.05	20
<b>Textura 2-3</b>	0.35	0.05	20
<b>Textura 1-3</b>	0.50	0.05	20



Como se obtuvo un valor de significancia mayor a 0,05, se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, se concluye que al menos existe una diferencia estadísticamente significativa entre los pares de texturas reconocidos, indicando entonces que si se repitiera la prueba se obtendría un comportamiento similar no producto del azar.

Para comparar si existen diferencias estadísticamente significativas en las valoraciones de los usuarios, se aplicó la prueba de Friedman (test que verifica que los datos obtenidos sean parecidos entre sí). En la tabla 7 se muestra el resultado al aplicar la prueba.

Tabla 7. Resultados de la prueba de Friedman

<b>Estadístico</b>	<b>Valor</b>
Muestra (N)	20
Chi cuadrado	20.24
Grados de libertad	2
Asintótica	0

Al ejecutar una indagación verbal a cada uno de los usuarios, identificaron al estímulo presentado en la matriz a una frecuencia de 15 Hz como sensaciones de relieve asociándolo a la esponja.

Por su parte el estímulo presentado a 400 Hz en los electrodos A, B, C se refirieron a sensaciones lisas, asociándolo a la lija.

Finalmente, al presentarse frecuencias entre 70 y 115 Hz, en los electrodos centrales de la matriz, se refirieron a sensaciones senoidales, asociándolo al plástico irregular.

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 mostró un prototipo basado en electroestimulación para la generación de sensaciones en la yema de los dedos, que reprodujo la percepción táctil de texturas de tres materiales seleccionados, siendo estos esponja, lija y plástico.

Dicho prototipo de interfaz táctil consta de un hardware conformado por tres placas que generan una señal cuadrada con dos intercambios de frecuencias con intensidades de corriente variables; además consta de una interfaz desarrollada en Labview 2016, con el propósito de brindar comunicación del hardware con un Arduino Mega 2560. La interfaz cuenta con tres paneles, el primer panel denominado selector de frecuencia, permite encender o apagar el generador de señales cuadradas y de igual manera permite conmutar dos resistencias para variar las frecuencias; el segundo panel denominado electrodos, cuenta con nueve botones que representan cada pin dispuesto en el actuador, habilitando o deshabilitando los estímulos eléctricos en cada uno de ellos; finalmente el tercer panel denominado señal portadora visualiza la señal cuadrada proveniente de cada placa de manera independiente.

Se evaluaron las características de un actuador tipo matriz, determinando que para diversos puntos focales, un arreglo 4 por 3 permite cubrir el área de la yema del dedo de una persona adulta promedio. Igualmente se fabricó la matriz de electrodos en una baquela flexible para obtener un actuador ligero, de fácil transporte y a su vez adaptable a diversas presiones de contacto provenientes de los usuarios.

Se definió un protocolo estándar para la evaluación psicofísica de la reproducción de texturas a través del prototipo, iniciando desde la selección de la población hasta el reconocimiento de texturas a través de dimensionalidad táctil.

Se realizaron dos estudios, el primero de ellos se basó en la resolución de localización háptica aplicado sobre dos grupos con la característica de separación por sexo; en este estudio, los resultados mostraron que a diversas frecuencias comprendidas entre 25 Hz y 100 Hz, las mujeres presentan un mayor número de aciertos en los tres experimentos propuestos. De igual manera se determinó que una etapa de entrenamiento es necesaria en este tipo de estudios ya que facilita que el usuario reconozca los diversos puntos de estimulación.

En el segundo estudio, se realizó una selección de una población más amplia en rangos de edad comprendidos entre 20 y 69 años, separados por grupos para evitar el sesgo a la hora de evaluar el prototipo háptico aplicado en la reproducción de texturas. Se probó el sistema por medio de movimientos activos de la yema de los dedos sobre esponja, lija y plástico, siendo sometidos a una etapa de diferenciabilidad reproduciendo en los usuarios sensaciones enmarcadas como rugosas, lisas e irregulares.

## 7. TRABAJOS FUTUROS

Para los trabajos futuros, se debería tratar de fabricar una matriz de electrodos de mayor dimensión para así tener una distribución más amplia de puntos focales, que permitirán sensaciones y estímulos cercanos a los percibidos en los diferentes contactos.

Se debería de igual manera, implementar un entorno de tipo virtual para el reconocimiento de texturas con inmersión auditiva y visual por medio de un guante háptico.

Otro trabajo que podría realizarse es la implementación de la interfaz táctil propuesta con una interfaz de tipo cinestésica, aplicado en el estudio de percepción táctil en sistemas de palpación de órganos, procesos de rehabilitación motriz por medio de video juegos serios o en sistemas de navegación para personas con discapacidad visual.

## 8. REFERENCIAS

- [1] W. Barfield. "The use of haptic display technology in education". Themes in Science and Technology Education. Vol. 2, no. 1, 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 concepts". Haptics Rendering and Applications. 2012.
- [4] M. Mengoni, B. Colaiocco, M. Germani and M. Peruzzini. "Design of a novel human-computer interface to support HCD application". ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp. 15-17. 2010, Montreal, Canada.
- [5] C. Chapman. "Active versus passive touch: factors influencing the transmission of somatosensory signals to primary somatosensory cortex". Canadian Journal of Physiology and Pharmacology. Vol. 72, no. 5, pp. 558-570. 1994.
- [6] V. Chouvardas, A. Miliou, and M. Hatalis. "Tactile displays: overview and recent advances". Displays. Vol. 29, no. 3, pp. 185–194. 2008.
- [7] R. Johansson, and A. Vallbo, "Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin". The Journal of Physiology. Vol. 286, no. 1, pp. 283-300, 1979.

- [8] 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, Wollongong, Australia.
- [9] H. Culbertson, B. Schorr, and A. Okamura. "Haptics: the present and future of artificial touch sensation". Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems. Vol. 1, pp. 305-409. 2018.
- [10] T. Lim, G. Germanico, and H. Medellin. "Are you haptic a bad day". Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp. 1-9. 2014, Nueva York, Estados Unidos.
- [11] G. Hernández, and G. Berenice. "La percepción táctil: Consideraciones anatómicas, psico-fisiología y trastornos relacionados". Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas. Vol. 10, no.1, pp. 8-15. 2005.
- [12] L. Dellon. "Touch sensibility in the hand". Journal of Hand Surgery". Vol 9, no. 1, pp. 11-13. 1984.
- [13] C. Novak. "Evaluation of hand sensibility: a review". Journal of Hand Therapy. Vol. 14, no. 4, pp. 266-272. 2001.
- [14] F. McGlone, and D. Reilly. "The cutaneous sensory system". Neuroscience and Biobehavioral Reviews. Vol. 34, no. 2, pp. 148-159. 2010.
- [15] A. Contreras, and R. Labrador, "Dedos lectores, los exteroceptores de los discapacitados visuales", Acción Pedagógica. Vol. 23, no. 1, pp. 74-92. 2104.

- [16] C. Malamud, B. Estañol, and A. Ayala. "Fisiología de la vibración". *Revista Mexicana de Neurociencia*. Vol. 15, no.3, pp. 163-170. 2014.
- [17] B. Varalakshmi, J. Thiriveni, 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.
- [18] N. Garcia, F. Bertolotto, F. Canella, N. Tsagarakis, and D. Caldwell. "How tactor size and density of normal indentation tactile displays affects grating discrimination tasks". *IEEE Transactions on Haptics*. Vol. 7, no.3, pp. 356-366. 2014.
- [19] Y. Yang. "Design and control of an integrated haptic interface for touch screen applications". Tesis Doctoral. 2013, Universidad de Lille, Francia.
- [20] H. Richter, B. Blaha, and A. Wiethoff. "Tactile feedback without a big fuss: simple actuators for high resolution phantom sensations". *Proceedings of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 85-88. 2011, Beijing, China.
- [21] F. Wang. "Haptic energy consumption". Application Report, pp. 1-17. 2014.
- [22] O. Bau, I. Poupyrev, and C. Harrison. "TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces". *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 283–292. 2010, Nueva York, Estados Unidos.
- [23] J. Lynette, and A. Singhal. "Perceptual dimensions of vibrotactile actuators". *IEEE Haptics Symposium*, pp. 307-312. 2018, San Francisco, Estados Unidos.
- [24] P. Strohmeier, and K. Hornbaek. "Generating haptic textures with a vibrotactile actuator". *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4994-5005. 2017, Denver, Estados Unidos.



- [25] 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.
- [26] K. Ito, S. Okamoto, H. Elfekey, and Y. Yamada. "The use of vibrotactile and variable friction stimuli in conjunction". International Asia Haptics Conference, pp. 125-130. 2016, Kashiwanoha, Japan.
- [27] T. Carter, S. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian. "Ultrahaptics: multi point mid air haptic feedback for touch surfaces". Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 505-514. 2013, Andrews, Reino Unido.
- [28] Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Yoshino, S. Inoue, and H. Shinoda. "HaptoMime: mid air haptic interaction with floating virtual screen". Proceedings of the 27th annual ACM symposium on user interface software and technology, pp. 663-667. 2014, Honolulu, Estados Unidos.
- [29] T. Kamigaki, K. Nanakatsuma, Y. Oshima, and I. Torigoe. "Detection of ultrasound pressure distribution for remote measurement of haptic surface roughness" Sensors, pp. 1-4. 2015.
- [30] E. Freeman, R. Anderson, J. Wilson, and S. Brewster. "Textured surfaces for ultrasound haptic displays". Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction, pp. 491-492. 2017, Glasgow, Escocia.
- [31] T. Ninomiya, Y. Okayama, Y. Matsumoto, X. Arouette, Y. Osawa, and N. Miki. "MEMS based hydraulic displacement amplification mechanism with completely encapsulated liquid". Sensors and Actuators. Vol. 166, no. 2, pp. 277-282. 2011.

[32] Y. Kosemura, S. Hasegawa, and N. Miki. "Surface properties that can be displayed by a microelectromechanical system based mechanical tactile display". IET Micro and Nano Letters. Vol. 11, no.5, pp. 240-243. 2016.

[33] J. Zarate, O. Gudozhnik, A. Ruch, and H. Shea. "Keep in touch: portable haptic display with 192 high speed taxels". Proceedings of the 2017 Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 349-352. 2017, Denver, Estados Unidos.

[34] M. Kawazoe, Y. Kosemura, and N. Miki. "Encoding and presentation of surface textures using mechanotactile display". Sensors Actuators. Vol. 261, pp. 30-39. 2017.

[35] H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, and M. Inami. "SmartTouch: electric skin to touch the untouchable". IEEE Computer Graphics and Applications. Vol. 24, no.1, pp. 36-43. 2004.

[36] K. Kaczmarek and P. Bach. "Tactile displays". Virtual Environments and Advanced Interface Design, pp. 349–414. 1995.

[37] J. Slopsema, J. Boss, L. Heyboer, C. Tobias, B. Draggoo, and K. Polasek. "Natural sensations evoked in distal extremities using surface electrical stimulation". The Open Biomedical Engineering Journal. Vol. 12, no. 1, pp. 1–15. 2018.

[38] N. Kitamura, J. Chim, and N. Miki. "Micro needle electrode array for electro tactile display". Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, the 17th International Conference on, pp. 106-107. 2013, Barcelona, España.

[39] N. Kitamura, J. Chim, and N. Miki. "Electrotactile display using microfabricated micro-needle array". *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Vol. 25, no.2, pp. 1-8. 2015.

[40] V. Yem, and H. Kajimoto. "Wearable tactile device using mechanical and electrical stimulation for fingertip interaction with virtual world". *IEEE Virtual Reality*, pp. 99-104. 2017.

[41] K. Shima, and R. Sato. "A novel haptic device design based on somatosensory superimposed stimuli". *Advanced Robotics*. Vol. 31, no. 3, pp. 135-142. 2017.

[42] 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.

[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] W. Ehrenstein and A. Ehrenstein. "Psychophysical methods". *Modern Techniques in Neuroscience Research*, pp. 1211-1241. 1996.

[45] W. Tiest. "Tactual perception of material properties". *Vision Research*. Vol. 50, no.24, pp. 2775-2782. 2010.

[46] G. Gescheider, S. Bolanowski, T. Greenfield, and K. Brunette. "Perception of the tactile texture of raised dot patterns". *Somatosensory and motor research*. Vol. 22, no. 3, pp. 127-140. 2005.

[47] W. Tiest, M. Bergmann, and A. Kappers. "Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility". *Acta Psychologica*. Vol. 121, no. 1, pp. 1-20. 2006.

[48] Y. Tanaka, M. Tanaka, and S. Chonan. "Development of a sensor system for measuring tactile sensation". *Sensors*, 5th IEEE Conference on , pp. 554-557. 2006, Daegu, Korea del Sur.

[49] T. Yoshioka, S. Bensmaia, J. Craig, and S. Hsiao. "Texture perception through direct and indirect touch: an analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration". *Somatosensory and motor research*. Vol. 24, no. 1, pp. 53-70. 2007.

[50] I. Summers, R. Irwin, and A. Brady. "Haptic discrimination of paper". *Human Haptic Perception: Basics and Applications*, pp. 525-235. 2008.

[51] S. Guest, J. Dessirier, A. Mehrabyan, F. McGlone, G. Essick, and G. Gescheider. "The development and validation of sensory and emotional scales of touch perception". *Attention, Perception, and Psychophysics*. Vol. 73, no. 2, pp. 531-550. 2011.