

**APLICACIÓN DE APOYO PARA LA ENSEÑANZA DEL HABLA EN PERSONAS
CON DISCAPACIDAD AUDITIVA**

JUANITA BUITRAGO ARDILA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

DIRIGIDO POR:

GERMAN YAMHURE KATTAH



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BOGOTÁ D.C

2023

RECTOR DE LA UNIVERSIDAD : P. Luis Fernando Múnera Congote.

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA: Sc.D. Lope Hugo Barrero Solano.

DIRECTOR DE LA CARRERA: Ph.D. Julián David Colorado Montaña.

DIRECTOR DE PROYECTO: Ing. Msc German Yamhure Kattah.

Artículo 23 de la resolución No. 13 de junio de 1946

“La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque los trabajos no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vea en ellos el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

Resumen

El proyecto se centra en abordar la comunicación de personas con discapacidad auditiva, específicamente en el rango de 5 a 14 años, reconociendo la importancia de la retroalimentación sensitiva y visual en el desarrollo del habla. Dado que la terapia del habla debe ser un proceso continuo, se propone una solución que permita un entrenamiento constante y autónomo.

La iniciativa consiste en el desarrollo de una aplicación para dispositivos Android que utiliza transductores vibro-táctiles para proveer retroalimentación háptica a los usuarios, facilitando la percepción de vibraciones y la producción de su propia voz. Esta herramienta se estructura en secciones para familiarizar al usuario con la retroalimentación háptica y entrenar el habla a través de ejercicios que exploran la intensidad y durabilidad tanto larga como corta .

Además, se establece un sistema de niveles para medir el progreso del usuario, respaldado por retroalimentación visual que refuerza el reconocimiento del avance en cada ejercicio. La aplicación también recopila datos de cada usuario de manera confidencial, permitiendo a terapeutas y profesionales acceder a estos datos para monitorear el progreso individual.

El enfoque se basa en la necesidad de una solución que funcione como un apoyo a la terapia, brindando la oportunidad de practicar y reforzar el trabajo terapéutico durante las numerosas horas en las que el usuario no está en sesión. El objetivo final es mejorar y complementar el sistema de comunicación para personas con discapacidad auditiva, fomentando un desarrollo más eficaz del habla y la percepción sensorial.

Tabla De Contenidos

1. Introducción	6
1.1 Objetivos	6
1.1.1 Objetivo General	6
1.1.2 Objetivos Específicos	6
2. Marco Teórico	7
2.1 Conceptos y principios fundamentales	7
2.1.1 La Voz	7
2.1.2 El oído	7
2.1.4 Rehabilitación	9
2.1.5 Sensibilidad de la Piel	15
2.2 Descripción del problema	16
2.3 Necesidades del cliente	16
2.4 Antecedentes	17
2.5 Justificación	24
3. Especificaciones de Requerimientos	25
3.1 Descripción General de la Solución	25
3.2 Requerimientos Funcionales	26
3.3 Requerimientos No Funcionales	26
3.4 Restricciones	26
3.5 Estándares de la solución	27
4. Diseño Arquitectónico	27
4.1 Descripción General del Diseño	27
4.2 Modelo Arquitectónico	28
5. Diseño de Detalle	29
5.1 Diseño de Software	29
5.2 Selección de Componentes	48
5.3 Protocolos de pruebas	49
6. Implementación	49
6.1 Interacciones Con Usuarios	56
7. Evaluación	58
7.1 Análisis de Resultados	58

7.2	Especificaciones Finales	67
7.3	Validación con el Usuario	67
8.	Conclusiones	68
8.1	Mejoras Futuras	69
9.	Bibliografía y Fuentes de Información	71
10.	Anexos	72
	Tabla de protocolo de pruebas:	72

Lista De Ilustraciones

<i>Ilustración 1. Anatomía del oído humano. [5]</i>	<i>7</i>
<i>Ilustración 2. Representación de una otoscopia [10]</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 3. Audiómetro [11]</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 4. Proceso para diagnóstico de paciente con discapacidad auditiva y búsqueda de ayudas [9]</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 5. Visualización de la implementación del sistema</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 6. Representación gráfica variación de intensidad en la sección de intensidad para el entrenamiento del habla.</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 7. Retroalimentación visual para sección de tono en el entrenamiento del habla.</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 8. Visualización de datos tomados en Firebase</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 9. Altavoces para la implementación de vibro-táctiles</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 10. Interfaz final de la ecualización en la aplicación</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 11. Interfaz de discriminación en tiempo en la aplicación</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 12. Interfaz de discriminación en frecuencia en la aplicación</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 13. Interfaz sección discriminación de orden</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 14. Retroalimentación visual de sección de duración larga</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 15. Retroalimentación visual de sección de duración corta</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 17. Interfaz de la sección de intensidad del entrenamiento del habla</i>	<i>56</i>

Lista De Tablas

<i>Tabla 1. Rangos de audición con asociación a los grados de pérdida: Criterio de Brad Stach. [8]</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2. Principales receptores involucrados en la sensibilidad vibratoria y sus propiedades. [21]</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3. Variables modificables por el usuario administrador</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4. Validación experimental para ejercicio de discriminación temporal</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 5. Validación experimental de sección discriminación en frecuencia, con los mismos sujetos de la experimentación de la sección de discriminación en tiempo</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 6. Frecuencias usadas en cada nivel para discriminación en frecuencia</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 7. Variables enviadas a la base de datos</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 8. Procedimiento de protocolos de pruebas por sección a partir de diagramas de flujo</i>	<i>75</i>

1. Introducción

Se conoce que el lenguaje y la capacidad de comunicación y expresión juegan un papel importante entre la sociedad para el intercambio de información. Uno de los mayores facilitadores de comunicación es la voz, cuya producción consta de un proceso complejo que abarca diferentes órganos, músculos y cavidades. El trabajo en conjunto del oído y el aparato fonador permite tener una retroalimentación auditiva de los sonidos que se producen al hablar. De hecho, así es como aprendemos a hablar, por medio de la imitación de sonidos que se presentan a nuestro alrededor, por lo que se llegaría a entender que cualquier pérdida auditiva implicaría una falencia en el desarrollo del lenguaje.

Por ende, la percepción de los sentidos en la población con discapacidad auditiva procede a reorganizarse diferente, aumentando la sensibilidad en el resto de sentidos. Uno de los más presentes a la hora de realizar una rehabilitación al paciente, además de la vista, es el sentido del tacto . Según la OMS (2023)[1], en una de sus notas descriptivas, 430 millones de personas en el mundo padecen algún tipo de pérdida auditiva discapacitante y requiere rehabilitación, donde 34 millones de ellos son niños. Según el Instituto Nacional para Sordos [2] plantea que los miembros de las asociaciones de sordos de la ciudad de Bogotá, que más del 50% de la población sorda en Colombia pertenecen a estrato 2. Según el DANE [3], 5 personas de cada 1.000 tienen problemas auditivos en Colombia de los cuales 8 de cada 100 corresponden a la población de 0 a 14 años de edad. Cabe resaltar que de manera preventiva el uso de alternativas de rehabilitación de bajo costo y a temprana edad podría incentivar la enseñanza y entrenamiento del lenguaje, dado que la mayor permeabilidad cerebral se encuentra en los primeros años. Así el presente documento se encarga de describir las diferentes alternativas, apoyos y nuevos métodos de comunicación desarrollados desde trabajos de grado anteriores, y cuyas bases sirven para dar continuidad a una solución que permita a niños con discapacidad auditiva entrenar el habla de forma constante.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

A partir de proyectos de grado anteriormente realizados mejorar y complementar un sistema de comunicación bilateral para personas con discapacidad auditiva en el rango de 5 a 14 años, mediante una aplicación en Android OS y el uso de transductores vibro-táctiles.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Establecer y evaluar una vía de retroalimentación sensitiva y visual con dos transductores para el entrenamiento del habla y la percepción de las vibraciones en la piel
- Desarrollar ejercicios de entrenamiento de la sensibilidad y entrenamiento del habla que permitan evaluar el aprendizaje y entendimiento del usuario
- Obtener la aprobación del comité de ética para la realización de pruebas del proyecto en la fundación CINDA
- Diseñar experimentos para probar el correcto funcionamiento de la aplicación con al menos 20 usuarios con y sin discapacidad auditiva de la fundación CINDA

- Facilitar la disponibilidad global de la aplicación en dispositivos móviles y emuladores Android para PC, superando los filtros y políticas para desarrolladores de Google Play Store.

2. Marco Teórico

2.1 Conceptos y principios fundamentales

2.1.1 La Voz

Se sabe que la voz, es una gran herramienta en el desarrollo de la comunicación, pero ¿Cómo nace? Primero es necesario conocer a que hace referencia el concepto de voz, la RAE lo define como “un sonido producido por la vibración de las cuerdas vocales” acompañado de lo anterior describe el sonido como una “sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire” [4]. A partir de lo anterior, se reconoce que la producción del habla es un proceso ligado inicialmente a la percepción de sonidos percibidos por el oído, el proceso recae en una retroalimentación continua que está relacionada con la producción de sonidos y con la percepción de estos sonidos. Un claro ejemplo que explica lo anterior, se puede evidenciar en los primeros años de edad de una persona cuando intenta imitar los sonidos que escucha a su alrededor, esto con el transcurso del tiempo y de la práctica se va convirtiendo en lenguaje, perfeccionándose a medida que el individuo va adquiriendo experiencia y conocimiento.

2.1.2 El oído

Ya con lo anterior, es preciso entender inicialmente el funcionamiento del oído. El oído se divide en tres partes como se muestra en la siguiente ilustración:

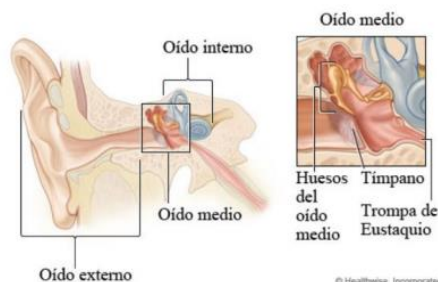


Ilustración 1. Anatomía del oído humano. [5]

En un primer momento se observa el oído externo, el cual está encargado principalmente de la captación y conducción del sonido, este está compuesto por el pabellón y por el canal auditivo finalizando con el tímpano. Consiguiente al anterior se encuentra el oído medio que comienza con el tímpano y luego lo siguen los osículos (martillo, yunque y estribo). Principalmente se puede reconocer que el tímpano cumple la función de realizar un cambio de presión de las ondas para convertirlas en vibraciones mecánicas que pasaran al oído interno a través de los huesecillos, estos así mismo protegen el oído interno de sonidos muy altos y cambios de presión. Por último, se aprecia el oído interno, compuesto por los canales semicirculares y la cóclea. La cóclea está encargada de transformar variaciones de presión en impulsos nerviosos; está compuesta de dos tipos de líquidos: perilinfa y endolinfa, que son los fluidos encargados del movimiento de las células ciliadas y en consecuencia la transformación en señales eléctricas.[6]

2.1.3 Pérdida de la Audición

A partir de lo anterior, es preciso reconocer que las diferentes pérdidas auditivas se deben a un daño ya sea en cualquiera de las tres zonas del oído, de manera general se puede asociar como pérdida de la sensibilidad auditiva a la incapacidad del oído por detectar sonidos a una intensidad normal. El oído humano es capaz de percibir sonidos entre 0 y 120 dB, por ejemplo, “desde un susurro hasta el despegue de un avión”. [7]

Antes de describir las diferentes alteraciones auditivas, se hace importante aclarar que una hipoacusia se entiende como la pérdida de la audición en distintos grados, como se observa en la siguiente tabla, mientras que la sordera hace referencia a afecciones graves que repercuten drásticamente en el entendimiento del habla, como hipoacusias severas o profundas. [8]

<i>Grado de pérdida</i>	<i>Rango en dB HL</i>
<i>Audición normal</i>	-10 a 10
<i>Hipoacusia mínima</i>	10 a 25
<i>Hipoacusia leve</i>	25 a 40
<i>Hipoacusia moderada</i>	40 a 55
<i>Hipoacusia moderada-severa</i>	55 a 70
<i>Hipoacusia severa</i>	70 a 90
<i>Hipoacusia profunda</i>	>90

Tabla 1. Rangos de audición con asociación a los grados de pérdida: Criterio de Brad Stach. [8]

Además de esta clasificación respecto al grado de pérdida auditiva, las hipoacusias se dividen en tipos de acuerdo a la parte del oído afectado. [8]

- Hipoacusia conductiva: si el sonido no se transmite correctamente por el oído externo o el oído medio. Una patología muy común en niños es la otitis.
- Hipoacusia neurosensorial: si no funcionan las células sensoriales o las conexiones al interior de la cóclea.
- Hipoacusia mixta: Cuando están comprometidos tanto la cóclea como mecanismos conductivos.

Entonces, ¿cómo abordar una evaluación audiológica en un niño?

Por medio de una historia de caso, se recoge la información necesaria sobre la naturaleza de la pérdida auditiva, la gravedad, la evolución del problema o si es unilateral o bilateral. Así, inicialmente debe consultarse a los padres sobre posibles eventos o problemas de salud antes, durante y después del nacimiento esto acompañado de pruebas de tamizaje, dará razón sobre trastornos genéticos y del desarrollo asociados a los recién nacidos. En segunda medida, es importante estar muy atentos al desempeño académico que tenga el niño para poder desarrollar las correctas estrategias de aprendizaje [8]

Según Northern y Downs, la pérdida auditiva que incapacita para entender el lenguaje es aquella que reduce la inteligibilidad del mensaje hablado a un grado inadecuado para la correcta interpretación o para el aprendizaje. Por ende, se han desarrollado diferentes técnicas médicas para el estudio de la vía auditiva. Técnicas complementarias entre sí y, para obtener una mejor valoración, se debe optar por varias de ellas para la coherencia de los resultados [9].

- **Otoscopia:** Se realiza mediante un otoscopio, instrumento que permite ver a través del conducto auditivo externo y ver la membrana timpánica

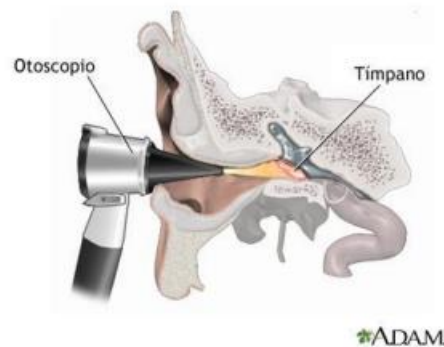


Ilustración 2. Representación de una otoscopia [10]

- **Audiometría tonal liminar:** Exploración de la sensibilidad auditiva en diferentes frecuencias usando tonos puros (250, 500, 1000, 2000, 4000, y 8000 Hz) generados por un audiómetro dentro del umbral auditivo y percibidos por el paciente por vías aéreas y ósea.



Ilustración 3. Audiómetro [11]

- **Audiometría supra liminar:** Exploración audio-métrica con intensidades superiores al umbral auditivo, cuando se padece de hipoacusias temporales.
- **Impedanciometría:** Creada para aumentar la precisión diagnóstica en las hipoacusias transmisivas. Se mide la facilidad con que el sonido atraviesa el sistema tímpano-osicular, cuándo mayor sea la rigidez del sistema, mayor será la impedancia.
- **Audiometría verbal:** Al ser la principal función de la audición, la comunicación, la mejor alternativa para evaluar esta afectación es el uso de palabras en lugar de tonos. Son palabras de una misma cantidad de sílabas que forman parte del vocabulario habitual y se evalúa la inteligibilidad de las mismas.

2.1.4 Rehabilitación

Ahora bien, entre tantas técnicas ¿cómo saber cuál usar en función del tipo de lesión aparente? ¿Son todas útiles para todos los rangos de edad? [9].

Una vez se tenga el diagnóstico de la pérdida auditiva, es posible buscar alternativas de comunicación o, en un trabajo más intensivo, diseñar un programa de entrenamiento muy estructurado y con la participación de profesionales y la familia de la persona. El sistema auditivo necesita una correcta estimulación y entrenamiento, como si se tratara de un músculo del cuerpo, es por esto que Montserrat Bonet Agustí [9] propone el siguiente organigrama del proceso rehabilitador auditivo:

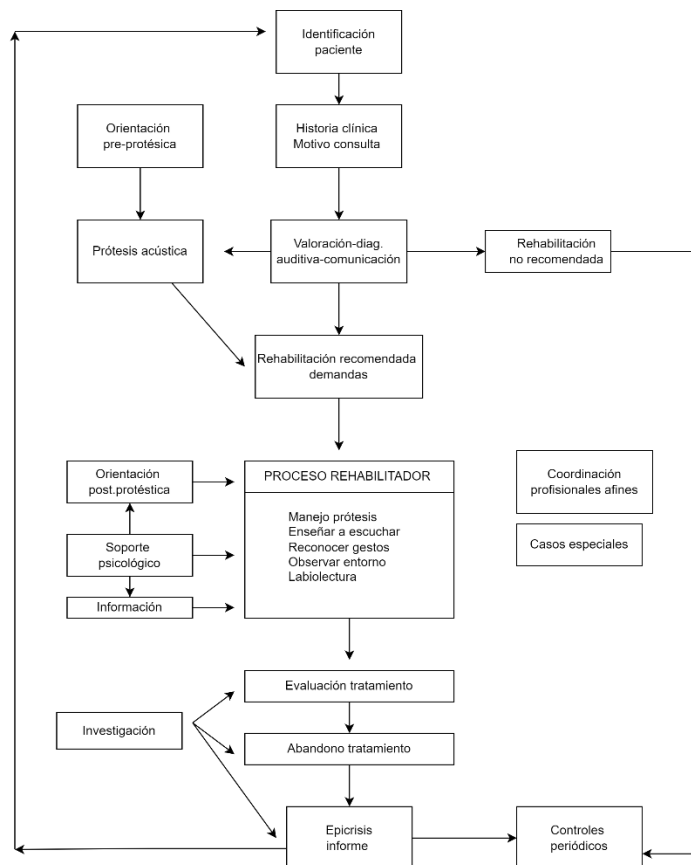


Ilustración 4. Proceso para diagnóstico de paciente con discapacidad auditiva y búsqueda de ayudas [9]

La prioridad en la rehabilitación, y vale la pena aclararlo, es que la persona llegue a la capacidad de escuchar y no solo oír. Escuchar se define como el proceso en el que la persona se hace cargo de aquello que oye, reacciona al mensaje y comprende el significado [9]. Siendo así, en pacientes que padecen sordera, no interesa que finalmente aprendan a discriminar entre tonos e intensidades, ni entre fonemas similares, sino que interesa puntualmente:

Aprender a reconocer los sonidos que discriminan mal (sin dejar de practicar aquellos que discriminan bien).

Se les preste ayuda orientativa de pre- escucha y post- escucha

Ante los ya mencionados impedimentos en la audición, es increíble observar como el sistema nervioso tiene la capacidad de adaptarse. El cerebro cuenta con la habilidad de reorganizar y modificarlos mecanismos bilógicos, bioquímicos y fisiológicos. Según Ramon y Cajal, “el cerebro cambia de forma permanente, lo que le da la oportunidad de adquirir y eliminar datos de manera continua, desde la concepción hasta la muerte”. Por ende, ante una pérdida auditiva, “las áreas del cerebro responsables del procesamiento de la visión o el tacto pueden reclutar o hacerse cargo de áreas que

normalmente procesa la audición” [12]. Gracias a esto, se han encontrado varias alternativas de comunicación, como la lectura labial, el lenguaje de señas, dentro de los más comunes. Otros métodos son [9]:

Método Rochester: Usa el alfabeto de señas y el habla simultáneamente, es decir deletreando cada palabra con los dedos siguiendo la sintaxis del idioma al mismo tiempo que es formulada en forma de habla.

Comunicación total: Este es adaptativo a las necesidades de cada individuo o al proceso cognitivo de cada ser, empleando herramientas como lenguaje de signos, alfabeto digital, audifonos, lectura labial y la palabra escrita, todos los anteriores de manera simultánea si esto es posible.

2.1.4.1 El Habla Y La Discapacidad Auditiva

Entonces, ¿Cómo aprende a hablar y comunicarse un niño con discapacidad auditiva?

Cómo ya se ha mencionado, la retroalimentación auditiva es un componente esencial del desarrollo del lenguaje y el no recibir tratamiento a temprana edad, hace que el niño no tenga acceso de los sonidos del habla ni pueda escuchar su propia voz y por ende le sea imposible poder corregir, por ejemplo, la forma en que está pronunciado las palabras. Sin embargo, las vías de retroalimenta no se limitan a la aérea u ósea para la audición, o a las visuales. El sentido del tacto abre las puertas a múltiples posibilidades para facilitar el entrenamiento del habla del niño.

Y aquí es importante hacer una claridad. El término háptico por definición se usa para describir todo lo relacionado con el sentido del tacto. Sin embargo, el tacto comprende características esenciales como la percepción de la temperatura, el peso, las vibraciones, las texturas, el contorno. Por ende, para este documento, la palabra háptico hará referencia netamente a la parte vibracional del tacto excluyendo el resto de características.

Si bien es cierto que la retroalimentación y, en consecuencia, la imitación de sonidos es fundamental en el aprendizaje del habla, con la debida constancia y la práctica en la discriminación de sonidos, sin la instrucción de un profesional que indique como gesticular, qué tanto abrir la boca o dónde apoyar la lengua se complica enormemente la labor de enseñanza. Son finalmente estos movimientos los que permiten al ser humano articular vocales, fonemas, palabras o frases complejas, es por esto que una visión física y matemática nos da un panorama claro y medible para poder detallar cómo se produce el habla.

2.1.4.2 El Habla

El proceso del habla consta de tres procesos conjuntos los cuales hacen parte del llamado aparato fonador el cual “por asimilación con un órgano ha sido dividido para su estudio en tres porciones: el vibrador, el fuelle y los resonadores” [13].

Este proceso inicia con el fuelle que se asocia la energía necesaria para la producción de la voz. El aire ingresa a través de la inspiración o inhalación a los pulmones, acompañados por el musculo diafragma (ubicado debajo de los pulmones). Este musculo realiza dos movimientos: se extiende o da espacio cuando los pulmones se hinchan y se relaja cuando se exhala. Otros involucrados en el proceso son la caja torácica y los músculos del abdomen y de estos depende el volumen o la intensidad de la voz, modificando la presión del aire.

La segunda parte del proceso se conoce como vibrador, conformado por la laringe, aquí se localizan las cuerdas vocales. La funcionalidad de estos pliegues es que cuando pasa el aire a través de ellas,

estas se aproximan y vibran, esto influye directamente en el sonido que se produce, este fenómeno se puede asociar como la vibración de una cuerda de guitarra, es decir, una onda estacionaria que oscila entre dos puntos nodales como se muestra en la ilustración 5. Por ejemplo, para obtener un sonido agudo estas cuerdas vibran más rápido.

Ahora bien, teniendo en cuenta lo anterior, es pertinente reconocer que el sonido rebota en unas cavidades dentro de la cabeza, conocidas como resonadores. Lo anterior es comprendido por: la cavidad nasal, oral y faringe. Es aquí donde “el sonido producido será modificado y se hará audible” [15].

Las cuerdas vocales vibran en diferentes modos de vibración produciendo armónicos que se propagan y amplifican en los espacios resonantes. Los resonadores desde un punto de vista técnico se describen como un filtro pasa banda que permiten seleccionar cierta banda de frecuencia y modificar sus valores de amplitud. Ahora bien, debido su acción sobre el sonido, obtenemos picos de intensidad o concentraciones de energía en algunas frecuencias [16]. Y el anterior, de hecho, es el concepto de formante, que en pocas palabras se pueden describir como esos armónicos de mayor intensidad.

Podemos reconocer que las formantes se originan en el tracto vocal. Los resonadores se pueden asociar como contenedores, el primer contenedor va desde la laringe hasta la base de la lengua y el segundo desde la base de la lengua hasta los labios. Cada uno de estos contenedores puede amplificar a diferentes frecuencias: el contenedor uno desde 250Hz hasta 1,4KHz y el contenedor dos desde 800Hz hasta 2,5KHz, es decir que esto permite tener una amplia gama de posibilidades en la producción de sonidos.

Aunque los dos mencionados son los principales implicados en el habla, pero no son los únicos espacios de resonancia que producen formantes [15].

Se puede afirmar que las formantes pueden agruparse y generar diferentes sonidos: “cuando las formantes de la voz están cerca unas de otras, la energía se potencia, cuando están alejados, se disipa” [15]; un ejemplo de lo anterior es que cuando se quiere realizar el sonido de la “i”, la frecuencia a la que oscila el formante uno esta alrededor de 250 Hz mientras tanto el formante dos se encuentra 2,2KHz. Es decir, estos dos intervalos se encuentran bastante alejados, por ende, la energía se disipa; caso contrario que ocurriría con una “a” ya que en el formante uno necesita alrededor de 800Hz y en el dos 1,2KHz, en este caso la energía se potencia.

2.1.4.2.1 Análisis Del Habla

Se tiene presente que existen diferentes características para el análisis de la voz y el habla como: entonación, duración, intensidad y velocidad. Para el análisis de estas, una variable a tener en cuenta es el pitch, el cual se puede definir como la frecuencia fundamental del modo de vibración de las cuerdas vocales. Así se puede obtener una expresión frecuencial del pitch como el inverso del tiempo entre patrones de la voz:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{L} \quad \text{Ecuación (1) [16]}$$

Donde L corresponde a la distancia en la que ha viajado la onda durante cierto tiempo T y con una velocidad v.

Para conocer entonces los puntos máximos entre patrones reconocidos en la voz, se tienen diferentes técnicas, entre ellas la transformada rápida de Fourier (FFT), permitiendo “visualizar el análisis frecuencial la evolución del parámetro a estudiar, realizándolo sobre un determinado número de muestras temporales que siempre serán anteriores al proceso del cálculo sobre las mismas”[17], a partir de lo anteriormente nombrado, se tiene en cuenta que es preciso realizar un análisis espectral para encontrar el pitch , además es pertinente reconocer como otra variable igualmente está relacionada con “los formantes correspondientes a los fragmentos periódicos de la voz que se caracterizan por la elevación de los armónicos de una determinada zona del espectro”[17], teniendo en cuenta esto es posible determinar el tono de voz o frecuencia fundamental mediante la extracción de los armónicos superiores, de igual forma a partir de “la evolución de los armónicos se puede determinar una curva de entonación”. A partir de esta técnica se pueden mencionar otras como:

Función Cepstral: “El cepstro, puede ser visto como una información del ritmo de cambio de las diferentes bandas de un espectro se calcula determinando el logaritmo natural de la magnitud de la transformada de Fourier de la señal x , y de obtener la transformada inversa de Fourier de la secuencia resultante:” [18]

$$\hat{x} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log[X(e^{jw})] e^{jw} dw \quad \text{Ecuación (2)}$$

Autocorrelación: Es la comparación de la señal consigo misma para detectar características repetitivas y encontrar periodicidad en las señales, siendo útil en aplicaciones como la detección de características de la voz [6]. Se puede describir de la siguiente forma:

$$R_x(\tau) = \lim_{Ta \rightarrow \infty} \frac{1}{Ta} \int_{Ta}^{\cdot} x(t)x^*(t + \tau)dt = \langle x(t), x(t + \tau) \rangle \quad \text{Ecuación (3) [18]}$$

Otras técnicas de análisis recaen sobre la implementación de algoritmos de alto costo computacional como la implementación de diferentes algoritmos, modelos de predicción lineal , análisis de formantes y desarrollo de redes neuronales.

2.1.4.2.2 Terapia Auditivo-verbal

Desde una visión pedagógica, se han venido estructurando diversas técnicas de rehabilitación enfocadas a niños con discapacidad auditiva. Los profesionales coinciden en dos parámetros fundamentales: primero, que es de vital importancia que los tratamientos comiencen lo antes posible, preferiblemente desde la infancia temprana, facilitando así aprender y desarrollar las habilidades necesarias de comunicación, segundo, usar recursos visuales trae grandes beneficios en el tratamiento, siendo esta una vía de retroalimentación para la comunicación. Por ende, algunas de las técnicas usadas son [9]:

- **Terapia del habla y el lenguaje:** Implica en trabajar las habilidades de comunicación del niño, con actividades para desarrollar la comprensión del lenguaje, la expresión oral, la lectura y la escritura. Parte de los problemas identificados por los terapeutas y que son tratados en la rehabilitación incluyen problemas de pronunciación, fluidez, comprensión, expresión y problemas implícitos de la voz y producción de sonidos. Enseñar la pronunciación y además tener otros medios de comunicación para obtener retroalimentación, como el lenguaje de señas, e incluir el uso de recursos visuales, como imágenes y videos de la gesticulación, se hace primordial para esta terapia.

- Terapia auditiva-verbal: Se puede definir brevemente como la aplicación de la tecnología en conjunto a las estrategias de procedimientos del entendimiento del lenguaje. Esta terapia, además de la importancia de comenzarse a temprana edad, requiere de:
 1. Identificar los ambientes y espacios que favorezcan la adquisición del lenguaje y faciliten al niño la apropiación del habla.
 2. Integrar la escucha y el habla en cualquier ambiente del niño y la participación activa de los miembros de la familia.
 3. Constante proceso de evaluación.
 4. Realce acústico, que son estrategias para mejorar la audición, con herramientas como el canto y el susurro.
 5. Dado que no hay simetría en la audición de ambos oídos, el terapeuta debe ubicarse cerca del mejor oído del paciente.
 6. Preguntas para recibir retroalimentación constante de parte del niño. "¿Qué escuchaste?"
 7. Apoyos comunicativos mostrándole al niño mayor cantidad características en la descripción de un objeto.
 8. Uso del sándwich auditivo. Estrategia que comienza haciendo que el niño escuche sin apoyo visual, luego con apoyo visual y finalmente nuevamente solo con el estímulo auditivo.
 9. Condicionamiento auditivo que implica de determinar la presencia o ausencia del sonido, generando por parte del niño una respuesta.

Todo este proceso de entrenamiento del habla puede traer consigo una serie de retos que no deben pasarse por alto. Los niños con discapacidad auditiva pueden tener un bajo autoestima debido a su discapacidad, lo que puede afectar su motivación y capacidad para aprender a hablar. La falta de habilidades lingüísticas puede hacer que se sientan frustrados, ignorados e incapaces de comunicarse con los demás, llegando a sentir ansiedad social o inclusive depresión si no se trata a tiempo.

Para abordar estos retos, es importante que los niños con pérdida auditiva reciban un enfoque de entrenamiento del habla integral que incluya el apoyo de un equipo multidisciplinario compuesto por psicólogos, audiometristas, logopedas y educadores especializados en la enseñanza del habla. Además, es muy importante que los padres y cuidadores de los niños reciban apoyo y orientación para ayudar en el proceso de aprendizaje del habla y para fomentar su bienestar emocional.

2.1.4.2.3 Desarrollo Auditivo En Secuencia Lógica

Más conocido por sus siglas DASL [19], es un programa que está orientado a la terapia individual de cada niño. Este programa desarrollado en la Escuela para Niños Sordos de Houston por Gayle Stout y Jill Windle, el cual es usado en diferentes partes del mundo, uno de sus principales enfoques está relacionado en que los niños con discapacidad auditiva reconozcan el alcance que tiene su voz y las características de esta, a partir de esto estas dos expertas diseñan una serie de ejercicio secuenciales iniciando por un ritmo lento para ir aumentando el nivel hacia un habla normal más rápida. En las capitulos seis de este programa establecen la importancia de desarrollar sub - habilidades y actividades de escucha fonética, siguiendo el modelo de desarrollo normal de habilidad del habla en diferentes grados:

Grado 1: Vocalización Espontanea.

Grado 2: Control de Suprasegmentales: control de voz, el niño usa una voz que suena normal con variaciones en duración, intensidad y tono.

Grado 3: Desarrollo de vocales y secuencias vocálicas.

Grado 4,5,6 : Producción de sonidos de consonantes.

Grado 7: Producción de Secuencia consonánticas.

2.1.5 Sensibilidad de la Piel

Otro de los métodos recomendados para la rehabilitación es el método multisensorial, el usa el canal auditivo, visual y señales táctiles/cinestésicas . Según Coelho, Medved y Brasolotto [20] implementar este método ayuda a desarrollar y diferenciar parámetros como la frecuencia y la intensidad

2.1.5.1 Mecanorreceptores

A partir de lo mencionado anteriormente, donde la implementación de estímulos (vibraciones) puede ser usada como apoyo para las diferentes terapias, se cree pertinente conocer la fisiología de la piel que comprende la percepción sensorial. Según el Instituto Nacional de ciencias médicas de ciudad de México [21] , “El sistema sensorial táctil está mediado por mecanorreceptores cutáneos, los cuales participan en la sensibilidad al tacto, presión, sentido de posición y vibración”, teniendo en cuenta esto, los mecanorreceptores cutáneos se pueden clasificar según sus propiedades como su localización frecuencia y función, donde la siguiente tabla lo establece.

Tipo de receptor Encapsulado	Localización y frecuencia	Función	Adaptabilidad
Corpúsculos de Meissner	Piel Glabra 20-50Hz	Tacto y posición	Rápida /Lenta
Corpúsculo de Pacinni	Tejido Subcutáneo Membranas Interóseas Visceras 60-400Hz	Presión profunda Vibración	Rápida
Discos de Merkel	Superficie de la piel Folículo piloso 5-10Hz	Tacto Presión	Lenta

Tabla 2. Principales receptores involucrados en la sensibilidad vibratoria y sus propiedades. [21]

A partir de esto, con el trabajo de grado desarrollado por A. Fernández [22], se reconoce la sensibilidad de la piel en los estudios en la percepción de mensajes por medio de la vibración, la cual está ligada a los mecano-receptores táctiles llamados discos de Merkel, los cuales se dividen en: los corpúsculos de Meissner, las terminaciones de Ruffini y los corpúsculos de Pacini. Se conoce que “los discos de Merkel están densamente distribuidos en las yemas de los dedos y los labios”, responden al tacto ligero o toque discriminativo, el cual facilita la identificación de cierto estímulo. Los corpúsculos de Meissner también se observan en las yemas de los dedos, pero estos tienen respuesta a la presión y vibraciones. Cabe resaltar que el comportamiento de esta cavidad está asociado con diferentes factores como la temperatura, genero, edad, entre otros, que pueden afectar la sensibilidad de forma significativa [22].

2.2 Descripción del problema

La retroalimentación auditiva es un componente esencial del desarrollo del lenguaje, que, con constancia y práctica, permiten la discriminación de sonidos y la comunicación asertiva de la persona. Por ende, nacer con una discapacidad auditiva implicaría una limitación importante en la oralidad si no se trata desde muy temprana edad. A pesar de ser diferentes las metodologías y dispositivos a usar en función del tipo de pérdida auditiva, la atención temprana y continua por parte de un profesional se hace fundamental. Y hacer especial énfasis en la palabra "continua", puesto que la terapia del habla no debería limitarse a solo un par de horas a la semana dedicadas al tratamiento, sino que debe ser un proceso que haga partícipe a todo el entorno del niño y adolescente. Ahora bien, si cuantificamos el problema, hablamos de 2 horas de terapia versus las 112 horas de la semana en las que se está despierto, es decir, 110 horas a la semana en las que familiares del paciente podrían ayudar de forma activa y 110 horas a la semana en las que el adolescente podría aprovechar para reforzar el trabajo hecho en la terapia de forma autónoma. A partir de lo anterior se reconoce que existe una necesidad de implementar un sistema que se use como medio de apoyo para la terapia, así incentivar la práctica en las horas donde la persona no está en terapia y obtener mejores resultados en el proceso de rehabilitación.

2.3 Necesidades del cliente

A partir de visitas realizadas en la fundación CINDA intermediadas por el cliente formal el ingeniero José Ignacio Acevedo, a la doctora jefe Irma Carvajalino, se llega a la conclusión que las diferentes necesidades del usuario tienen que ver con tres aspectos importantes:

- **Herramientas para la Práctica del Habla:** Se busca una solución que permita a los niños practicar sus habilidades del habla fuera del entorno terapéutico. Esto implica la creación de una plataforma o aplicación interactiva que ofrezca ejercicios adaptativos, juegos o actividades que refuercen el progreso lingüístico. Esta herramienta debe ser intuitiva, motivadora y fácil de acceder, fomentando la autonomía del niño en su proceso de desarrollo del habla.
- **Comodidad y Motivación en el Uso de las Herramientas:** Es esencial considerar el diseño y la experiencia del usuario. Las herramientas deben ser atractivas, con interfaces amigables y elementos que motiven al niño a seguir practicando. Se podrían incluir recompensas visuales o sistemas de seguimiento de progreso para mantener el interés y la constancia en la práctica.
- **Retroalimentación Sensible para el Entrenamiento del Habla:** Esta necesidad implica la creación de un sistema que permita al usuario recibir *feedback* en tiempo real sobre su pronunciación, tono y otros aspectos del habla. Esto podría incluir ejercicios interactivos que respondan a la voz del niño, mostrando visualmente la mejora o áreas a trabajar. Asimismo, se podría considerar el uso de tecnologías de reconocimiento de voz para un entrenamiento más personalizado.
- **Familiarización Progresiva y Evaluación del Progreso:** Además de la retroalimentación inmediata, es importante desarrollar una progresión en la dificultad de los ejercicios, adaptándolos al avance del niño. Se pueden integrar herramientas de autoevaluación que permitan al niño ver su propio progreso a lo largo del tiempo, fomentando su independencia y autoconocimiento de las áreas a mejorar.
- **Facilidad de Uso y Accesibilidad Económica:** Las herramientas deben ser intuitivas y de fácil acceso, incluso para aquellos con poca experiencia tecnológica. La accesibilidad económica es crucial para garantizar que estas herramientas estén al alcance de la mayoría, posiblemente

considerando versiones gratuitas o de bajo costo, o la utilización de dispositivos comunes como teléfonos móviles

2.4 Antecedentes

Es preciso afirmar que en los últimos años se han venido realizando una serie de estudios, validados en proyectos de grados dirigidos por el ingeniero German Yamhure que, en compañía del Ingeniero José Ignacio Acevedo, con quien han realizado pruebas a personas voluntarias de la fundación CINDA que deseen aportar con estas investigaciones.

A partir de la teoría de la sensibilidad de la piel, la cual está ligada a los mecanos receptores, A. Fernández realizó pruebas sobre voluntarios con discapacidades auditivas para determinar un umbral de percepción táctil. Estas pruebas las realizó a “20 Hz, 40 Hz, 80 Hz, 150 Hz, 250 Hz, 450 Hz, 700 Hz y 1000 Hz y para cada una de estas frecuencias, en tiempos de 1300 ms de duración y se pidió al voluntario que oprimiera un botón al momento de sentir el estímulo.” Con lo anterior es pertinente reconocer que para percibir los sonidos a través de vibraciones se debe tener en cuenta dos factores directos: [22]

- El ancho de banda del sentido del tacto, que en comparación de los otros sentidos está por encima del gusto y el olfato; pero muy por debajo de la vista y el oído.
- Las propiedades del transductor que se elija para este fin.

A partir de esto, implementó una página didáctica y amigable en HTML para la adquisición de datos, que generaba tonos y combinaciones de tonos para buscar ser identificados por los usuarios. Luego del almacenamiento de las pruebas en una base de datos y el correspondiente análisis, se concluye que es posible usar un altavoz como un transductor para abrir un canal de comunicación con personas sordo y sordociegos, teniendo en cuenta que el lugar más usado para ubicarlo es en el dedo pulgar, dado la alta sensibilidad en esta parte del cuerpo, con un ancho de banda entre las decenas de Hz y 1,5kHz. [22]. Posteriormente, Y. Hernández[23] desarrolla un sistema de comunicación sensorial que cuenta con una aplicación implementada para celulares que permite conectarse a un dispositivo bluetooth que se implementa como vibro táctil ubicado en la mano. El proyecto consiste en el desarrollo de una interfaz sencilla, además de encontrar una función de transferencia para realizar una pre - ecualización del transductor con el objetivo de intensificar ciertas frecuencias que no pueden ser percibidas con la misma facilidad, con el fin de “obtener una función la transferencia más plana en un sistema completo que incluya el dispositivo vibro-táctil, el dispositivo móvil y la mano del usuario final” [23]. A partir de lo anterior se desarrolla la aplicación DEVISO (desarrollo vibro táctil orientado a sordociegos) desarrollada en Android Studio la cual comprende cuatro etapas, la primera ya mencionada, un “test de ajuste” donde se presenta la ecualización personalizada para cada usuario a partir del transductor usado y con este obtener una mejora en el ancho de banda del sistema. En este trabajo proponen el envío de tonos al transductor con aumentos progresivos y el usuario tendrá que ir presionando un botón en pantalla hasta que perciba la vibración. Finalmente, a modo de prueba, Y. Hernández realizó una serie de pruebas con respecto a la percepción de las frecuencias sin realizar una ecualización, obteniendo que “la respuesta en baja frecuencia es mala y las personas requieren de un estímulo muy fuerte para percibirlo, en frecuencias medias es mejor, y posteriormente en altas frecuencias vuelve a ser malo el desempeño”. Por otro lado, realizó pruebas usando el ecualizador, donde “se observa una respuesta en frecuencia más plana del sistema completo de las señales de audio enviadas al dispositivo vibro-táctil” [23]. Este filtro de ecualización utiliza una frecuencia central

calculada para cada banda, comprendido por un rango delimitado en frecuencias, y así con base a los datos anteriormente obtenidos en el test obtener la amplitud necesaria para cada banda. El autor desarrolla diferentes funciones en Android Studio para el proceso de extracción de datos de la frecuencia central, lectura de bandas del dispositivo y lectura de los valores almacenados en los promedios y como resultado asignar valores en Mb (Milibelio) a cada una de las bandas del dispositivo, como se muestra detalladamente en la siguiente expresión: [23]

Valuetoset = Valor definitivo a asignar a la banda

MaxValueBandLevelRange = Máximo nivel de amplitud permitido por el dispositivo móvil

MayorVal.GetValueCalculated = Valor más alto de amplitud calculado en el método

CalculateMillibels = Valor inicial de la amplitud calculado a asignar en cada banda

$$\text{Valuetoset} = \frac{\text{CalculateMillibels} * \text{MaxValueBandLevelRange}}{\text{MayorVal.GetValueCalculated}}$$

Así, el siguiente test que se realiza es de comprobación de la ganancia del sistema, es decir, comprobar que el filtro haya cumplido su función, esto mediante la reproducción de los tonos luego de haber implementado el filtro. Posterior a este se realiza una etapa de entrenamiento la cual el autor la describe en 4 pilares: comprensión, reconocimiento, identificación y discriminación de los mensajes enviados por el emisor y reproducirlos a través del dispositivo. La aplicación entonces permite la grabación de 6 audios para distinguir y discriminar diferentes frecuencias como vibraciones y relacionarlas con palabras. [23]

Por otro lado, con fin de realizar mejoras a esa primera versión, Ki Hyon Lee Chun[24] a partir de las sugerencias de la anterior autora extiende el objetivo general, dando paso a que las señales provenientes del micrófono o de una comunicación telefónica sean transmitidas al transductor, además propone el desarrollo de ocho actividades para la etapa de entrenamiento las cuales son: respuesta en tiempo, respuesta en frecuencia, respuesta a la entonación, repuesta a sonidos vocales, respuesta a secuencias de vocales, respuesta a sílabas que incluyan consonantes, respuesta a combinación de sílabas que formen palabras, y respuesta a combinación de palabras que formen oraciones. Las pruebas experimentales de este proyecto se realizan en la fundación CINDA, el autor menciona que se basa a partir del programa anteriormente nombrado DASL para el desarrollo de habilidades auditivas. El proyecto del autor se fundamenta en este método de aprendizaje e implementa cinco secciones de entrenamiento [24]:

- Respuesta en tiempo: se basa en desarrollar la capacidad de responder el numero correcto de sonidos que se reprodujeron en cierto tiempo.
- Respuesta en frecuencia: desarrolla la discriminación de la presencia de diferentes sonidos en diferentes frecuencias
- Respuesta a la entonación: tiene el propósito de desarrollar la capacidad del usuario de diferir entre diferentes formantes
- Respuesta a sonidos vocales y secuencias de vocales, respuesta a combinación de sílabas que formen palabras

- Respuesta a combinación de palabras que formen oraciones.

Dado que esta aplicación es un complemento de DEVISO, recibe el nombre de DEVISO II. Contiene las etapas de autenticación de usuario y prueba de vibrometría de la primera versión, sin embargo, implementa mejoras en el código puesto que su primera versión no detenía la reproducción luego de que se indicaba la percepción de la vibración, problema que S. Caro también intentará resolver, y mejoras en el filtro de ecualización quedando definido por el autor en los siguientes 5 pasos: [24]

1. Encontrar los valores mínimo y máximo de la ganancia para cada banda.
2. Encontrar el número de bandas disponibles que tiene el dispositivo móvil, en función de su ancho de banda.
3. Verificar la frecuencia máxima evaluada en la vibrometría con respecto a la frecuencia central de la banda que se está revisando.
4. Cálculo para el valor adecuado de la frecuencia central de la banda a partir de una linealización.
5. Se establecen valores de frecuencia central menores a la primera frecuencia evaluada.

A nivel de interfaz de esta segunda versión, en la sección de entrenamiento, se cuenta con dos grupos de ejercicios. En el primero se encuentra el entrenamiento en los fundamentos necesarios para la percepción de vibraciones, presentándose ejercicios de respuesta en tiempo, percepción ante sonidos vocálicos y secuencias de vocales. Ahora bien, en cuanto al segundo grupo, una sección más avanzada, se encuentran los ejercicios de respuesta a la entonación, respuesta a sílabas que incluyan consonantes, respuesta a combinación de sílabas que formen palabras u oraciones. [24]

El autor realiza pruebas experimentales a 10 usuarios con discapacidad auditiva cada uno con un tiempo en total de 5 horas, para luego ser recopilados en una base de datos. A partir de lo recolectado obtuvo que “los ejercicios de respuesta de tiempo tienen una alta asertividad, llegando casi al 90 % en la mayoría de los usuarios” y también se evidenció que “los usuarios que utilizaban el aplicativo por un tiempo mostraban un poco de desmotivación, posiblemente debido a la monotonía que puede generar los ejercicios” así que el autor sugiere para futuros proyectos realizar la aplicación de una manera más lúdica y entretenida.[24]

En paralelo, S. Caro desarrolla un proyecto con el mismo enfoque a los anteriores, pero en esta ocasión la aplicación será implementada en cuatro etapas: una primera a modo de configuración para el usuario, que incluye la ecualización personalizada de los transductores, una segunda etapa de entrenamiento para el uso del sistema; la etapa tres de entrenamiento verbo-tonal con varios ejercicios propuestos y finalmente la etapa de uso cotidiano. El autor igual que la anterior toma como referencia el test DASL (Desarrollo Auditivo en Secuencia Lógica) para seleccionar cuatro ejercicios que considera fundamentales para la percepción: diferenciación entre la percepción de 1 o 2 tonos separados por cierto tiempo, diferenciación de 2 sonidos a diferente frecuencia, diferenciación de fonemas vocales y autoevaluación de la pronunciación. [25]

Por otro lado S. Caro propone una nueva sección para la aplicación, la cual permite retroalimentar la voz del usuario por medio del vibro-táctil mediante el análisis del espectro de una grabación ingresada y posteriormente procesada. A partir de la implementación y de las pruebas realizadas procede a evaluar los resultados obtenidos donde evidencia que el ejercicio de discriminación temporal para los usuarios no presenta mayor dificultad, caso contrario se observa en el ejercicio de discriminación en

frecuencia donde los usuarios llegaron a tener un tiempo de respuesta entre 20 y 30 segundos, para la diferenciación de vocales se obtuvo un valor cercano al 50% de aciertos en todos los niveles y un porcentaje de desaciertos promedio del 27%; y por ultimo para la pronunciación obtuvo que esta implementación podría mejorar si se usa una mayor resolución en la FFT. [25]

Se mencionan entonces algunas mejoras que podrían realizarse en proyectos futuros, mencionando la sugerencia de rediseñar un algoritmo donde se busque la frecuencia de banda central más cercana menor a 1,8kHz, de esta forma solo realizar la vibrometría hasta uno de los valores en frecuencia predefinidos que sea mayor a esa última frecuencia central. También propone el guardar los valores de ecualización que se tomaron en un momento inicial, con la opción de volver a ecualizar si así se requiere o si es un nuevo usuario. Por otro lado, le parece pertinente evaluar el desempeño en dispositivos de audio más económicos y asequibles como audífonos y parlantes.

Luego de la revisión de las anteriores trabajos de grado, y con el objetivo de continuar con el proyecto que busca convertirse en un nuevo canal de comunicación para usuarios con discapacidades auditivas, es necesario reconocer los puntos de mejora y las funcionalidades que deben mantenerse.

Desde el trabajo realizado por A. Fernández[23], el método de caracterización del transductor, usando un acelerómetro y ciertos ajustes en ganancia de la función final de transferencia, resultó ser suficiente para explicar el comportamiento del transductor. Sin embargo, desde aquí se mencionan que puede haber diferencias con las mediciones experimentales debido condiciones físicas propias de la medida, factores como la presión sobre la membrana o inclusive la temperatura, pueden influir drásticamente en las medidas. Encontró de forma experimental el ancho de banda de sensibilidad de la piel, que se comprende entre decenas de Hz hasta los 1,5kHz.

Y. Hernández hace un aporte importante que, en los posteriores trabajos de grado, se seguiría implementando y mejorando. El uso de un ecualizador permite mejorar la respuesta en frecuencia puesto que, para bandas altas y bajas, la sensibilidad del usuario es mejor que en frecuencias medias. Sin embargo, tener en cuenta que la respuesta final de cada usuario puede variar por lo que es necesaria una ecualización personalizada, que todos los autores implementan en sus aplicaciones móviles con diferentes versiones. La autora hace una serie de sugerencias para proyectos futuros como el ingreso de señales auditivas a través de llamadas telefónicas y la posibilidad de responder mensajes con el uso de imágenes del lenguaje de señas, recomendación dada por los mismos usuarios. Los siguientes son aspectos concluidos por la autora importantes a tener en cuenta en la continuidad del trabajo:

- No hay diferencia importante en la sensibilidad entre zurdos y diestros.
- Personas del sexo femenino tienen mayor asertividad que el masculino.

Por su parte, K. Lee deja un importante punto de mejora identificado. Es necesario diseñar mejor la dificultad de los niveles en ejercicios que impliquen discriminar entre sílabas y entonaciones, puesto que el ejercicio no muestra una respuesta lineal a la dificultad, por lo que se cae fácilmente en niveles donde es imposible la discriminación. Y es de vital importancia evitar la monotonía en los ejercicios, para que la aplicación pueda volverse de uso autónomo y frecuente.

Finalmente, S. Caro hace un muy importante trabajo en la recopilación de comentarios de fonoaudiólogos y usuarios para futuras mejoras de la aplicación, dentro de las que destacan:

- Diseñar ejercicios de seguimiento de melodías, para evitar una pronunciación tan plana.

- Opciones de recompensas según el tiempo dedicado a la aplicación.
- Buscar método para correr la aplicación en computador, para usuarios que no cuenten con dispositivo Android.
- Diseñar ejercicios con sonidos cotidianos u onomatopeyas.

Con base a los comentarios de los autores previamente estudiados, se continuará con el diseño de la aplicación que se busca que esté disponible de forma gratuita en la Play Store.

Por otro lado, se han desarrollado diferentes proyectos que tienen que ver con la adquisición de sonidos del ambiente, los cuales son importantes de reconocer para cualquier persona, en este caso se enfocan a personas con discapacidad auditiva y visual, donde estas señales podrán ser transformadas en un rango de frecuencias para la percepción de la piel, es decir, por medio de transductores la personalización vibro táctil. En un primer momento se reconoce el proyecto “Identificación vibro táctil de sonidos procesados por señales de eventos ambientales”[26] donde se puede apreciar la realización de un estudio por parte Borg et al.’s[27] a personas sordas y sordo-ciegas, en la cual los voluntarios expresaron la necesidad del uso o la práctica de la actividad sensorial o sentidos cutáneos para percibir las vibraciones en medio de ciertos eventos cotidianos de sus vidas. Como ya se conoce el ser humano al presentar una discapacidad en un sentido, los demás sentidos se agudizan (neuro plasticidad), en este estudio también los voluntarios plantean que esto ocurre no solamente con el tacto sino también con el olfato, con este último pueden llegar a detectar temperaturas y corrientes de aire, así que el interés de ellos recae en una ayuda portátil para monitorear el medio ambiente o entender lo que sucede a su alrededor. Se han realizado diferentes estudios para el desarrollo vibro táctil en estas discapacidades, como la desarrollada por Johnson and Higgins[26] Una ayuda para ciegos que utiliza la sustitución sensorial táctil-visual, la cual permite a través de una cámara convertir la información visual en una señal táctil, igualmente Bach y Rita[26] han realizado estudios sobre la parte vibro táctil con pruebas en la lengua y dedos. Los estudios sobre la percepción vibro táctil se han reflejado principalmente en las personas con discapacidad auditiva, donde se puede apreciar que en personas con deficiencia auditiva post lingüística mejora al realizar la combinación de lectura labial con la ayuda vibro táctil, algunos ejemplos de estas ayudas son Tactaid II, tactaid VII y Sentiphone.

Uno de los obstáculos de la percepción vibro táctil está relacionado con el angosto ancho de banda que posee el tacto. Para hablar de esto es preciso conocer los 4 tipos de mecanorreceptores de la piel:

- Adaptación rápida, la cual esta dividida en dos secciones, en una primera parte donde los receptores perciben vibraciones por debajo de los 50Hz y en la segunda parte vibraciones arriba de los 50Hz, cabe recalcar que esta parte es más sensible a cambios en la piel fricción y vibraciones ortogonales
- Adaptación lenta, esta igualmente se divide en dos partes, en la primera registra presiones cerca de la superficie de la piel, por otro lado la segunda parte registra presiones profundas en la piel

Cabe recalcar que el umbral de sensibilidad de la piel también puede estar afectado por factores tales como la edad, el género, la ubicación de las personas, el clima, entre otras

El autor menciona un ejemplo desarrollado en la eminencia tenar, es decir, la parte pronunciada de la base del pulgar, donde el umbral de detección a 200Hz con un contacto de $0,28\text{cm}^2$ teniendo de referencia un estímulo de $1\mu\text{m}$ es de -8db mientras que en la yema del dedo medio está en -18db y en el antebrazo +18db. también cabe recalcar que la sensibilidad incrementa cuando se aumenta la

duración de la señal . Así se puede definir el rango dinámico de la detección de las vibraciones en la piel, que se define como la diferencia entre el nivel de sensibilidad más bajo y el nivel de sensibilidad más alto, el cual es de 55dB, en comparación con el rango dinámico de detección de sonido en el oído, que es aproximadamente 113dB , también se aprecia una relación de la sensibilidad con la temperatura donde la piel es más sensible a las vibraciones a temperaturas de 30°C que a temperaturas de alrededor de 15°C , por último la presión también es un factor importante, es decir, mayor presión puede reducir los umbrales de detección para las vibraciones de alta frecuencia .

A partir de lo anterior y de la comparación que se ha venido mencionado del tacto y la audición, es preciso reconocer el umbral de detección de estos, el del sistema auditivo es de 3milisegundos y el de la piel 10 milisegundos para señales sinusoidales de 100hZ , con respecto a esto se menciona que la sensibilidad vibratoria máxima para modulaciones de amplitud, es decir, usando señales sinusoidales como portadoras, se produce en frecuencias de modulación de 20 a 40Hz.

A partir de la información anterior se espera el desarrollo del proyecto Identificación vibro táctil de sonidos procesados por señales de eventos ambientales, el cual espera que la persona que presenta esta discapacidad pueda interpretar las vibraciones generadas y obtener información del ambiente en el que esta, esto mediante tres tipos de principios para el procesamiento de señales para la identificación de sonidos del ambiente : transposición, modulación y filtrado

Para la implementación se seleccionaron los diferentes sonidos más importantes que deben ser informados según Borg ,en estos las componentes espectrales estaban por debajo de los 2kHz , los sonidos que se encuentran son 45 y van desde el sonido de un helicóptero hasta el timbre de una casa. En un primer momento se realizan pruebas con el transductor, en este caso un vibrador con la referencia (Brüel & Kjær shaker type 4810 [Nærum, Denmark], weighing 1.1 kg) y un acelerómetro el cual es ubicado en la membrana del vibrador para medir la aceleración de las vibraciones, también se añadió un tubo de metal que hacía contacto con la persona con discapacidad.

Para el procesamiento de la señal se realizó mediante Matlab, primero se tiene la transposición que se puede dividir en tres:

- TRHA(*Transposing Highest Amplitude*) Transposición de componentes de frecuencia con la amplitud más alta en el rango de 100 a 8,000 Hz al rango de 30 a 800 Hz, mediante el uso de la transformada de Fourier
- TR1/3(*Transposing One-third Octave*) “Transferencia de la suma de componentes de frecuencia compleja en cada 1/3 de octava en el rango de 100 a 8,000 Hz al rango de 200 a 800 Hz”, la señal de entrada se introduce a un banco de filtros , es decir, 13 filtros pasa-banda Butterworth de tercer orden con diferentes bandas de paso, así para obtener una señal envolvente para cada banda de paso . Luego, estas 13 señales se utilizaron para modular en amplitud 13 ondas portadoras. Además, se realizó modulación en frecuencia en las portadoras (con una desviación típicamente del $\pm 50\%$ de la frecuencia de la portadora) utilizando ruido distribuido uniformemente e independiente para evitar efectos de interferencia. Finalmente, se obtuvo la salida total del algoritmo sumando la señal transpuesta (50-200 Hz) y las 13 señales moduladas descritas anteriormente
- TR : Transposición del rango de frecuencia de 1,200 -2,400 Hz a 100 -700 Hz.

- Modulación: utiliza una onda portadora de 250 Hz para la modulación de amplitud (AM); utiliza una onda portadora de 250 Hz para la modulación de amplitud y frecuencia (AMFM); y utiliza modulación de amplitud con múltiples canales (AMMC).
- Para AM se transfirió un patrón temporal de un sonido ambiental a una frecuencia baja para su posterior análisis y reconocimiento auditivo. Para lograr esto, los autores utilizaron una señal sinusoidal de 250 Hz que fue modulada en amplitud con la envolvente del sonido ambiental original. La envolvente fue extraída mediante la rectificación de la forma de onda del sonido y su posterior filtrado con un filtro Butterworth de tres polos y paso bajo con una frecuencia de corte de 10 Hz.
- AMFM, El propósito de este algoritmo fue transferir la información temporal y espectral de los sonidos ambientales al rango de baja frecuencia mediante la modulación de amplitud y frecuencia de los sonidos. Primero, se extrajo la envolvente de la señal de entrada mediante rectificación y luego la aplicación de un filtro paso bajo a 10 Hz, como en el algoritmo AM. Después, se moduló en frecuencia una señal portadora de 250 Hz por la derivada de la envolvente, lo que realza las variaciones de tiempo, especialmente los transitorios. Finalmente, se moduló en amplitud la señal portadora resultante modulada en frecuencia por la envolvente.
- AMMC(*amplitude modulation with minimal Carrier*), este se usa principalmente para extraer características de una señal de entrada mediante la separación de las diferentes bandas de frecuencia y la modelación de las señales resultantes. primero se filtra usando 6 filtros pasa banda Butterworth de tercer orden con diferentes bandas de paso, así extrayendo la envolvente mediante la rectificación y con un filtro pasa bajo a 10 Hz, con la envolvente se procede a realizar la modulación en amplitud de 6 señales, para así realizar la sumatoria de estas para la obtención de la señal de salida

A partir de la realización de pruebas sobre 19 personas en un cuarto silencioso, para el análisis de estas se usan diferentes métodos tales como los coeficientes de correlación intraclass, la prueba de *Spearman*, estos para evaluar las tendencias de los resultados y los umbrales vibratorios. Para la comparación de los algoritmos se realiza mediante la prueba de Friedman y la prueba de Wilcoxon

En el análisis de resultados se observa que el algoritmo mejor adaptado por los usuarios fue AMFM luego AMMC, TRHA, AM, TR, TR1/3 y EQ teniendo el menor porcentaje. Los principios de transposición y modulación tuvieron mejores resultados que los principios de filtrado y los algoritmos EQ. El bajo desempeño de EQ puede deberse a que los sonidos ambientales tienen una parte más pequeña de su espectro después de que los componentes de frecuencia superiores a 1,000 Hz han sido eliminados. Esto significa que los sonidos ambientales que tienen su espectro por encima de 1,000 Hz, como el canto de los pájaros son eliminados por completo. también se puede apreciar que el desempeño de AMFM fue mejor debido a que este uso una gama más amplia de frecuencias que la piel es capaz de detectar

En otro estudio “*Monitor, a Vibrotactile Aid for Environmental Perception: A Field Evaluation by Four People with Severe Hearing and Vision Impairment*” [28] donde tiene un objetivo similar también se llega a la conclusión que los algoritmos de transposición y modulación suelen ser más efectivos para estas aplicaciones, a diferencia del anterior este monitor portable tiene como objetivo principalmente que la persona con discapacidad auditiva o visual, pueda reconocer la dirección del sonido en ciertos eventos. Para esto se vale de la transformación de los sonidos al rango de frecuencia

de la sensibilidad de la piel . Este monitor por medio de un micrófono capta sonido y lo adapta la frecuencia necesaria para la piel por medio de algoritmos basados en la modulación, filtrado y transposición . Con lo anterior se evalúa el monitor en personas sordociegas en un ambiente natural después de cierto periodo de entrenamiento, cabe resaltar que realizan tres tipos de prueba

- 1) La habilidad de detectar eventos en curso en la casa y en ambientes de tráfico sin el monitor
- 2) Las situaciones anteriores pero con el monitor usando un micrófono omnidireccional, es decir, que es capaz de recibir señales en todas las direcciones
- 3) Y el monitor con un micrófono direccional

El monitor consiste en un teléfono con sistema Android el cual contiene una aplicación, además está conectado a un micrófono externo, un amplificador y un vibrador .

La aplicación contiene cuatro algoritmos que obtuvieron buenos resultados en pruebas anteriores

- El primer algoritmo mencionado es "AM", que trasladó la información temporal de la señal de entrada en el rango de frecuencia de 0-5500 Hz utilizando una sola onda portadora de 250 Hz.
- El segundo algoritmo es "AMMC", modulación en amplitud con múltiples canales, el cual también transpuso la información temporal de la señal de entrada en el rango de frecuencia de 0-5500 Hz, pero esta vez utilizando seis ondas portadoras.
- El tercer algoritmo es "TR", que trasladó tanto la información temporal como la espectral de la señal de entrada en el rango de 0-5500 Hz al rango de 0-290 Hz. Sin embargo, este algoritmo no se utilizó en el estudio de campo porque no mostró el puntaje de identificación más alto en ningún punto.
- El cuarto algoritmo mencionado es "TRHA", que transfirió la información espectral de la señal de entrada al rango de frecuencia de 50-470 Hz seleccionando los 10 componentes de frecuencia con la energía más alta cada 100 milisegundos en el rango de 0-5500 Hz.

El micrófono usado es de referencia Phonac MM8 y tiene la opción omnidireccional y direccional, el vibrador es de referencia C2-Tactor y tiene un rango de frecuencia entre 10 y 250Hz

A la hora de la realización de pruebas se le dio a personas con discapacidad para su diario vivir y una de las grandes desventajas que encontraron fue que en lugares con mucho ruido, por ejemplo viajes en carro o tren, el monito vibra todo el tiempo y no se puede distinguir entre voces y ruido, además que el acelerómetro solo tiene carga para 13 horas, igualmente persiste la dificultad de tener muchos cables.

2.5 Justificación

La retroalimentación auditiva desempeña un papel fundamental en el desarrollo del lenguaje, permitiendo a las personas la discriminación de sonidos y la comunicación efectiva. La importancia de abordar esta problemática desde temprana edad es innegable, ya que cuanto antes se proporcione apoyo, mayores serán las posibilidades de éxito en el proceso de rehabilitación. El proyecto se basa en la premisa de que el desarrollo del habla en personas con discapacidad auditiva no debe limitarse a las horas de terapia., además que no debe limitarse el acceso a las herramientas necesarias para esta rehabilitación. Por otro lado se cree pertinente la consideración del entrenamiento gradual , por etapas y con los herramientas necesarias para que este proceso sea fructífero, como lo menciona el DASL, programa el cual se basa en el desarrollo de habilidades individuales de cada niño. A partir de lo

mencionado anteriormente la población que se tiene en cuenta para este proyecto son niños entre 5 y 14 años de edad con discapacidad auditiva, ya que reconoce que la curva de aprendizaje en edades tempranas es mayor, además como se mencionaba anteriormente, la rehabilitación auditivo verbal tiene más éxito si se realiza lo más pronto posible. A partir de entrevistas con otros expertos ajenos a la fundación CINDA como la fonoaudióloga Liliana Ardila, se tiene presente que la implementación de esta terapia no está limitada a personas con discapacidad auditiva, sino que también podría ser un buen recurso para personas con problemas de habla, ya que también les permite realizar ejercicios para el entrenamiento en el proceso de su rehabilitación con respecto a diferentes dificultades que posea la persona para hablar. El impacto de un proyecto que interfiera o que apoye este proceso de rehabilitación a largo plazo, si se da la debida continuidad a diferentes proyectos que aporten con esta terapia, podría contribuir en las diferentes etapas de la rehabilitación de una persona que necesita entrenamiento del habla, por otro lado incentivando su confianza en sí mismo mediante la practica independiente con diferentes herramientas que le permitan reconocer su avance por sí mismo.

3. Especificaciones de Requerimientos

3.1 Descripción General de la Solución

A partir de proyectos de grado realizados anteriormente, dirigidos por en el ingeniero German Yamhure donde el planteamiento principal es el desarrollo de un sistema de comunicación para personas con discapacidad auditiva. Se realizará una aplicación la cual permita a personas en el rango de 5 a 14 años con estas condiciones entrenar o desarrollar el habla mediante la implementación de una serie de ejercicios que le permitan reconocer las características de su voz con el apoyo del uso de dos altavoces que se establecen como una vía de comunicación háptica usado para la percepción de las vibración para la percepción de la duración y secuencias de la producción de la voz que está realizando el usuario, lo que le permite al usuario realizar una comparación sensorial.

Con respecto a lo anterior, uno de los recursos usados de los proyectos anteriores, es establecer una primera sección en la aplicación que le permita al usuario conocer o familiarizarse con la retroalimentación háptica. Esta sección consta de diferentes subsecciones tales como discriminación en tiempo y frecuencia, a la anterior sección se le añade la subsección de discriminación de orden, teniendo en cuenta que en este caso se hará el uso de dos transductores, por lo tanto, se reconoce que es indispensable que el usuario diferencie entre las vibraciones que se le han enviado tanto por el transductor A como por el transductor B. Para el entrenamiento del habla se elabora una segunda sección que le permitirá al usuario conocer el alcance de su voz por medio de ejercicios relacionados con el reconocimiento de la intensidad de su voz y la duración que puede producir su voz. A partir de la formulación de las anteriores secciones se tiene en cuenta el planteamiento de una serie de niveles con diferentes dificultades que le permitirán al usuario conocer su proceso de avance. La aplicación está apoyada igualmente por retroalimentación visual que le permite al usuario tener un segundo apoyo que le ayuda con el reconocimiento del progreso en cada ejercicio. Por último, se tiene en cuenta que la aplicación realiza una constante recopilación de datos por cada usuario, que serán enviados a una base de datos, donde los terapeutas o personas especializadas en el tema, podrán tener acceso al avance de cada usuario, teniendo en cuenta la confidencialidad de los datos.



Ilustración 5. Visualización de la implementación del sistema

3.2 Requerimientos Funcionales

- La aplicación debe ser compatible con dispositivos Android
- La aplicación debe admitir la conexión Bluetooth con dos altavoces configurados como vibro táctiles.
- Debe proporcionar ejercicios de entrenamiento del habla que permitan a los usuarios de 5 a 14 años con discapacidad auditiva desarrollar sus habilidades de comunicación.
- Debe recopilar datos de rendimiento de cada usuario y enviarlos a una base de datos para su revisión por parte de terapeutas y profesionales de la salud.
- La aplicación debe permitir el acceso de dos tipos de usuarios: administradores (terapeutas) y usuarios finales (niños con discapacidad auditiva).
- Los administradores deben poder personalizar ciertas variables de los ejercicios según las necesidades individuales de los usuarios.

3.3 Requerimientos No Funcionales

- La aplicación debe ser intuitiva y fácil de usar, con una interfaz de usuario amigable para niños.
- Debe garantizar la privacidad y seguridad de los datos del usuario, cumpliendo con las regulaciones de privacidad aplicables.
- La aplicación debe ser estable y libre de errores, con un tiempo de respuesta rápido para garantizar una experiencia fluida del usuario.
- Debe ser compatible con dispositivos Android de diversas especificaciones técnicas.

3.4 Restricciones

- La aplicación debe cumplir con las regulaciones de privacidad y seguridad de datos vigentes en el desarrollo de aplicaciones para la salud y el bienestar de los niños.

- El desarrollo de la aplicación se realizará en el entorno Android Studio y en el lenguaje de programación Java.
- La conexión Bluetooth y la funcionalidad de retroalimentación háptica deben ser probadas y funcionar de manera confiable en una variedad de dispositivos Android.
- Se debe establecer un sistema de gestión de datos eficiente y seguro para la recopilación y revisión de los datos del usuario por parte de los administradores (terapeutas).

3.5 Estándares de la solución

Para garantizar la integridad y la calidad del proyecto, se siguen las Directrices de Desarrollo de Android proporcionadas por Google, que establecen las mejores prácticas para crear aplicaciones de alta calidad y rendimiento en la plataforma Android e igualmente se tienen en cuenta los filtros establecidos por Google para la publicación de una aplicación en la play Store . Además, el cumplimiento del Reglamento General de Protección de Datos (GDPR), lo que implica que cualquier recopilación y manejo de datos personales estará en estricta conformidad con las regulaciones de privacidad. Esta medida se toma no solo como un estándar de cumplimiento legal, sino también como un acto ético para garantizar la privacidad y el consentimiento de los usuarios que participarán en nuestro proyecto. Cabe destacar que el proyecto ha sido aprobado por el comité de ética de la Pontificia Universidad Javeriana, lo que avala o respalda la integridad y la seguridad de las personas que participarán en las pruebas y el desarrollo de la aplicación.

4. Diseño Arquitectónico

4.1 Descripción General del Diseño

Se realiza el diseño de una aplicación en el lenguaje de programación Java en el entorno de desarrollo de Android Studio, esta aplicación acompañada de la conexión bluetooth de dos altavoces usados como vibro táctiles. La aplicación se basa en el diseño realizado por proyectos de grado anteriores, donde en un primer momento, se tiene en cuenta el proceso de “personalización de ecualización” y la primera sección planteada por S.Caro “Entrenamiento de la sensibilidad”. Teniendo en cuenta que en este caso se hace uso de dos vibro-táctiles, se complementa el diseño presentado para la personalización de la ecualización, añadiendo la ecualización en un segundo transductor. Posterior a esto igualmente se complementa la sección de entrenamiento de sensibilidad basándose en la implementación de los vibro táctiles, incluyendo una sección adicional que permita realizar una discriminación entre la información que se le ha enviado por un altavoz A y la enviada por un altavoz B. En el diseño de una segunda sección se tiene la sección de entrenamiento del habla, la cual se plantea con respecto al sistema de enseñanza DASL diseñado por la Universidad de Houston, donde a partir de este se establecen diferentes ejercicios relacionados con características de la voz como: la intensidad, durabilidad y tono, los cuales el DASL menciona que son indispensables reconocer para que una persona aprenda a hablar y tenga conocimiento del alcance que puede llegar a tener su voz. Estos ejercicios se plantean con una primera etapa que establece que el usuario intente en un primer momento realizar el ejercicio y reproducir el sonido que se espera que se diga el cual es enviado por uno de los transductores. La dinámica de los ejercicios radica en tres pilares: imitar, producir y comparar, esto acompañado de la retroalimentación visual brindada por la aplicación. Para la aplicación se diseñan dos tipos de usuario, un usuario administrador quien podrá ser un experto como un terapeuta o fonoaudiólogo, el cual tiene la posibilidad de modificar ciertas variables en los ejercicios, esto con el objetivo de que el proceso de entrenamiento se base en el progreso y las

dificultades que tenga el paciente, así el segundo tipo de usuario es el usuario final, el cual es el niño entre 5 y 14 años que desee hacer uso de la aplicación. Por último, se cree pertinente el diseño de una base de datos para la recolección de datos por usuario para conocer el progreso de este y obtener un informe que sea útil para su proceso de terapia.

4.2 Modelo Arquitectónico

A partir de la anterior descripción se diseñan dos diagramas, uno que comprende el hardware del proyecto y un segundo diagrama que comprende como tal el software del proyecto

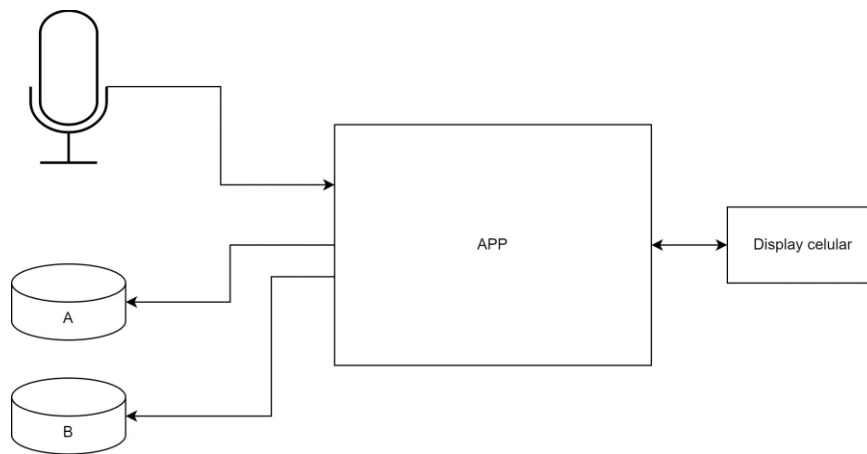


Diagrama 1. Bloques del Sistema

El diagrama uno “Bloques del sistema” , se basa en una aplicación la cual se implementa para que sea compatible desde celulares Android gama baja, primeramente se evidencia un bloque principal el cual hace referencia a la aplicación. La entrada principal es la señal de voz, la cual se adquiere mediante el micrófono del celular para luego ser procesada con la implementación de la función de reconocimiento de voz de Google *SpeechRecognizer*, cabe resaltar que este proceso solo realiza en las secciones del entrenamiento del habla . Como segunda entrada se tienen las respuestas que da el usuario en la pantalla del celular, esto a partir de cada ejercicio . Como salidas, se tiene la reproducción de la adquisición de voz por un altavoz A, esto para la retroalimentación sensitiva de la producción de su voz y en el altavoz B se tiene de salida la reproducción de los ejercicios que la persona debe imitar, los cuales están representados en tonos con diferentes características dependiendo cada ejercicio. Cabe resaltar que el posicionamiento de los dos altavoces depende de la comodidad de cada usuario, se sugiere que sean colocados en áreas de alta sensibilidad como las manos.

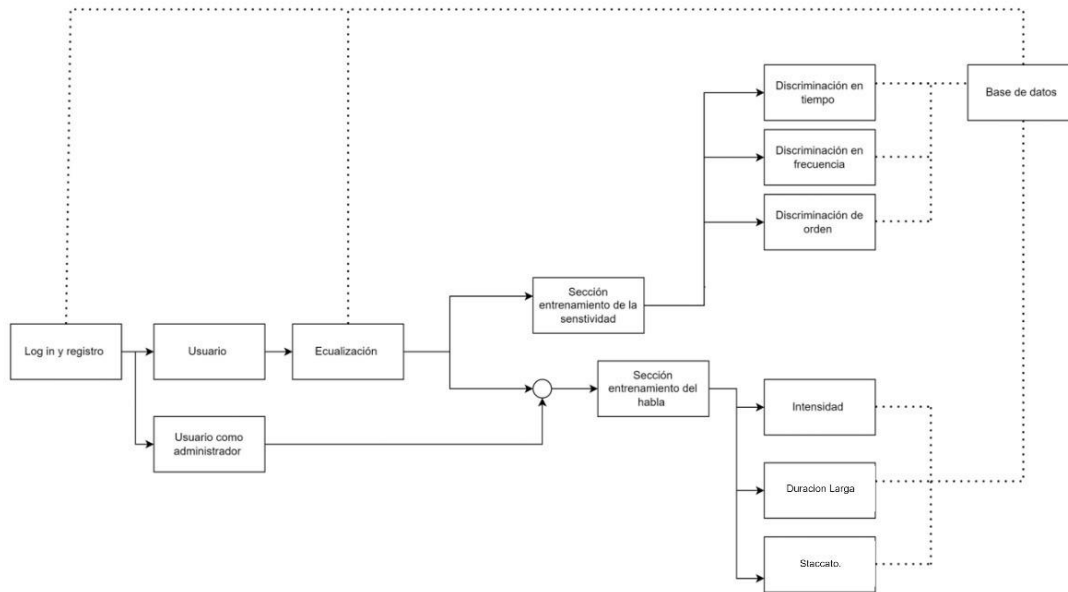


Diagrama 2. Bloques del funcionamiento de la aplicación

En este se describe de manera general, el seccionamiento secuencial que comprende la aplicación. En un primer momento se tiene el registro del usuario o el inicio de sesión, el cual consta de una contraseña y a este son asociados los datos recolectados a lo largo del uso de todos los ejercicios, cabe resaltar que los datos recolectados serán guardados en una base de datos para su análisis. Existen dos tipos de usuario, uno como administrador que tiene la posibilidad de modificar ciertas variables de los ejercicios implementados en la sección del entrenamiento del habla. Por otro lado el Usuario general tendrá acceso al uso de todas las secciones, la gran diferencia es que este no podrá modificar las variables de las secciones, sino solo hacer uso de las secciones. Al haber ingresado el usuario, este tendrá que realizar un test de ecuación primero en el altavoz A y luego en el altavoz B. El usuario tiene tanto la posibilidad de iniciar con la sección del entrenamiento de la sensibilidad como con la del entrenamiento del habla, pero se sugiere que inicie con la sección del entrenamiento de la sensibilidad. En esta se encuentran ejercicios que solo competen a la adaptación del usuario con las sensaciones vibro táctiles, por último se encuentra la sección de entrenamiento del habla la cual se vale de la estimulación vibro táctil y la retroalimentación visual para que el usuario reconozca mediante ejercicios de intensidad y duración las características y el alcance de su voz, estos ejercicios serán explicados a detalle en la sección 5.1.

5. Diseño de Detalle

5.1 Diseño de Software

Inicio de sesión : Se diseñan dos tipos de usuario uno como Administrador y el otro como Usuario final.

Usuario como administrador: en la siguiente se presentan las secciones y las variables que puede modificar este

Sección	Variables que modifica
Discriminación en tiempo	Duración de tono por nivel Frecuencia del tono Separación entre tonos por nivel
Discriminación en Orden	Frecuencia de tono Duración de tiempo del tono por nivel Cantidad de puntos a alcanzar por nivel
Discriminación en frecuencia	Valor del par de frecuencia para la diferenciación
Intensidad	Apertura del anillo (la intensidad que debe alcanzar el usuario) Ancho del anillo (el margen que tiene el usuario para fluctuar la intensidad) Tiempo en el que debe mantener esa intensidad
Duración Larga	Tiempo de duración de la voz. Tiempo de duración de los silencios. Número de veces que desea que se repita el ejercicio. Vocal que desea que el usuario imite durante el tiempo de duración de la voz.
Duración Corta	Fonema Número de veces que desea que se repita el ejercicio. Tiempo de duración de silencio entre cada vez

Tabla 3. Variables modificables por el usuario administrador

Por otro lado el usuario final hace referencia a la persona entre 5 y 14 años que a partir de las modificaciones que realice el fonoaudiólogo en el usuario administrador, podrá hacer uso de las secciones de la aplicación.

Para el inicio de sesión al registrarse primeramente deberá seleccionar si el usuario es administrador o no. Si es administrador deberá seleccionar si es fonoaudiólogo, acudiente o terapeuta, debe ingresar un nombre de usuario, si este ya está en uso, le pedirá otro, acorde al nombre de usuario deberá ingresar una contraseña.

Por otro lado para el Usuario final (usuario que hará uso de los ejercicios de la aplicación) deberá ingresar edad, genero, nombre completo , si tiene implante coclear, audífonos, si tiene otro elemento o ninguno, un nombre de usuario como identificador y una contraseña para este.

Ecualización: Esta sección se tiene en cuenta, igual que los anteriores autores debido a lo nombrado en la sección 2.4, Y.Hernandez estable una ecualización para intensificar ciertas frecuencias que no pueden ser percibidas con la misma facilidad , es decir, aumentar el ancho de banda en ciertas frecuencias. A partir de los últimos comentarios del autor S.Caro, se basa el diseño de esta sección. Se establece el mismo enfoque de los anterior, pero realizando el cambio del reproductor MediaPlayer al reproductor AudioTrack, en un principio se conoce que Audio Track permite tener mayor control de la trama de audio y el buffer del audio, además su compatibilidad con versiones anteriores de Android es mayor. Además del cambio de reproductor, como se mencionaba anteriormente en la sección 4.1 , la adición de un segundo transductor para la retroalimentación sensitiva, este de igual forma se debe realizar la ecualización, así que se añade este proceso para el segundo transductor.

En el siguiente diagrama de flujo se puede observar el proceso a seguir de esta sección:

A partir del diagrama 3 se puede evidenciar que mientras el botón este presionado se iniciara la reproducción de tonos, lo cual permitirá guardar los datos de las respuestas de cada usuario

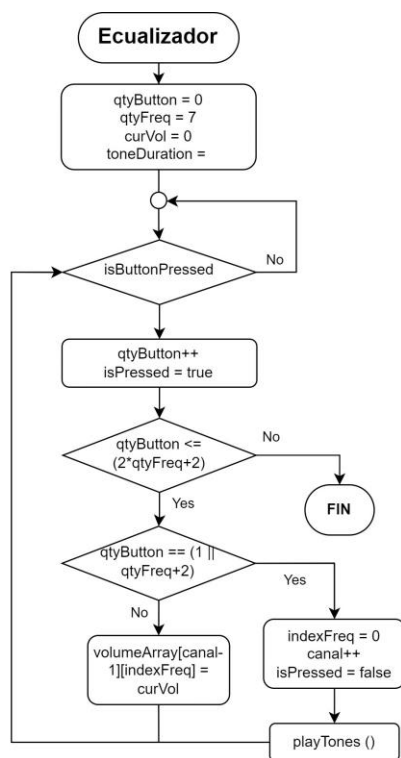


Diagrama 3. Flujo principal de ecualización

Existen dos hilos de fondo que se ejecutan en esta sección, uno para la reproducción del tono y otro para el control del volumen de la reproducción

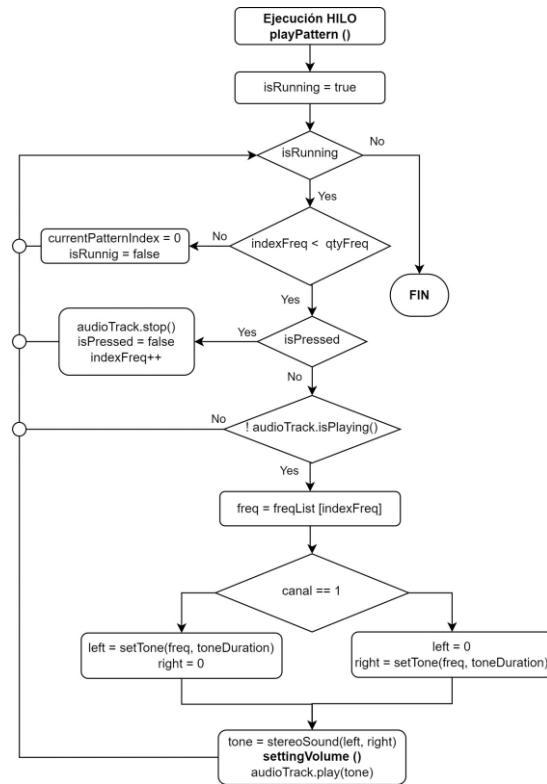


Diagrama 4. Flujo hilo secundario para reproducción de tonos en la ecualización

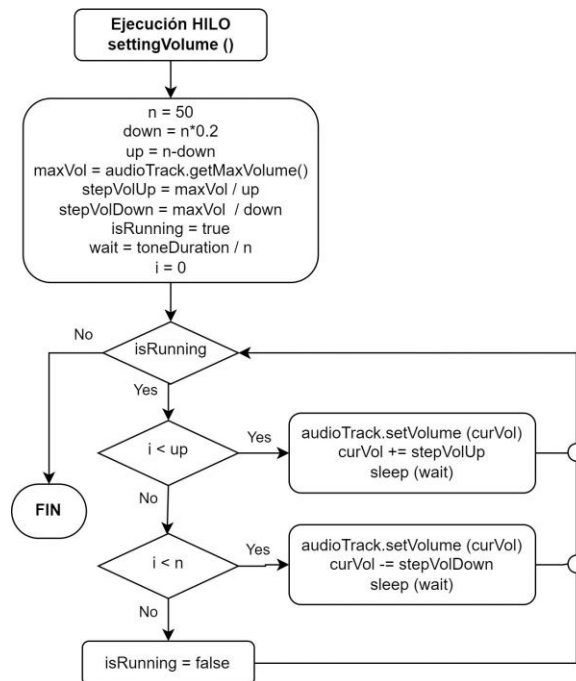


Diagrama 5. Flujo de hilo de fondo para nivel de reproducción en la ecualización

Sección de entrenamiento de la sensibilidad:

Esta sección fue propuesta y estructurada por el autor anterior S.Caro, la cual tiene como objetivo establecer una vía que le permita al usuario familiarizarse con el método vibro-táctil, a lo largo de esta sección, estableciendo diferentes ejercicios para la discriminación de diferentes variables. En los siguientes apartados se evidencia la explicación a detalle de cada uno de ejercicios.

1. *Discriminación en tiempo*: Esta sección pretende que el usuario aprenda a diferenciar entre tonos separados por cortas franjas de tiempo, con el fin de familiarizarse con el transductor y vibraciones secuenciales. Con base a la sección propuesta por el autor del proyecto de grado anterior, a su planteamiento se realiza una modificación en el diseño de los niveles. Así pues, se plantean 3 niveles y cada uno se diferencia por los 2 valores en específico: la distancia entre tonos y el tiempo de duración del tono.

La duración del tono disminuirá gradualmente en cuánto se aumente de nivel. Así mismo, la distancia entre pulsos se disminuirá, sin embargo, no será la misma distancia en un solo nivel. En el nivel 1, el usuario indicará por pantalla si detecta 1 o 2 pulsos. Para el nivel 2, la distancia entre estos pulsos será menor y de igual forma el usuario indicará la cantidad de pulsos que siente.

Ahora bien, los tonos serán enviados a una frecuencia de 300Hz. El valor fue escogido debido a un estudio realizado por investigadores de la universidad de Örebro [1]. Por medio de un dispositivo de estimulación vibro-táctil, se enviaba un tono a una frecuencia específica modificando su intensidad de ascendente y de forma descendente. El usuario debía presionar un botón indicando en qué momento comenzaba a sentir el tono. Así, se almacenaba ese valor de intensidad mínima para diferentes frecuencias. El experimento fue realizado en 19 sujetos y se logró así determinar que la banda entre 250 Hz y 350 Hz, es la de mayor sensibilidad.

En cuanto a la duración del pulso, en el experimento en mención se usan tonos de 1.3ms, sin embargo, no se relaciona información sobre el porqué de ese valor de tiempo. Por ende, se realiza una validación experimental con 6 sujetos, en la cual se busca determinar la duración de pulso adecuada. Entonces, se envía al transductor pulsos entre 0.01s y 2s de duración de forma ascendente y descendente, a una frecuencia de 300Hz, obteniendo lo siguiente:

<i>Rango Duración</i>	<i>Comentario</i>	<i>De acuerdo</i>
<i>0.01s - 0.1s</i>	Incomodidad al tacto, por ser un sonido tan corto	5 de 6
<i>0.1s - 1s</i>	Rango óptimo a usar en función de la aplicación	6 de 6
<i>1s - 2s</i>	Incomodidad al tacto, por la duración del sonido	4 de 6

Tabla 4. Validación experimental para ejercicio de discriminación temporal

De acuerdo a lo anterior, la duración del pulso podría variar en un rango de 0.1s a 1s y a menor duración, más se dificulta la distinción del tono, así, con el incremento de nivel puede disminuir este valor.

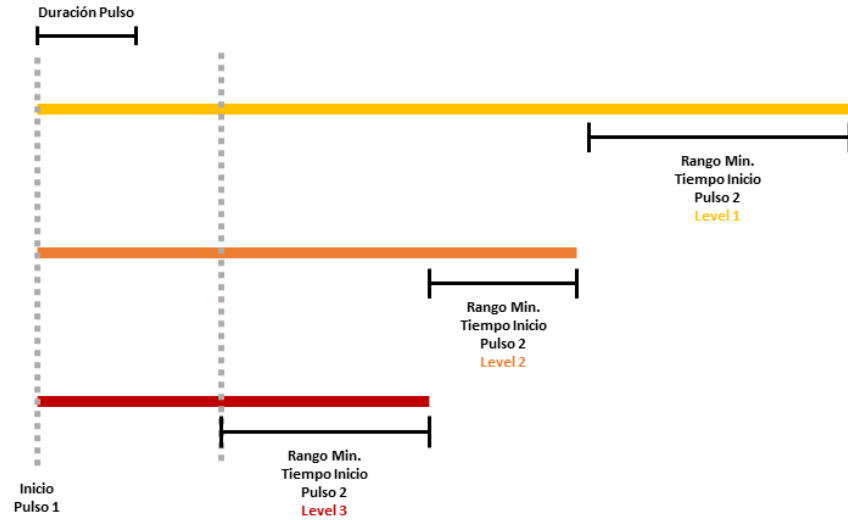


Diagrama 6. Rangos de separación de los pulsos por niveles

A partir de lo anterior se diseña el siguiente diagrama de flujo para la implementación en la aplicación:

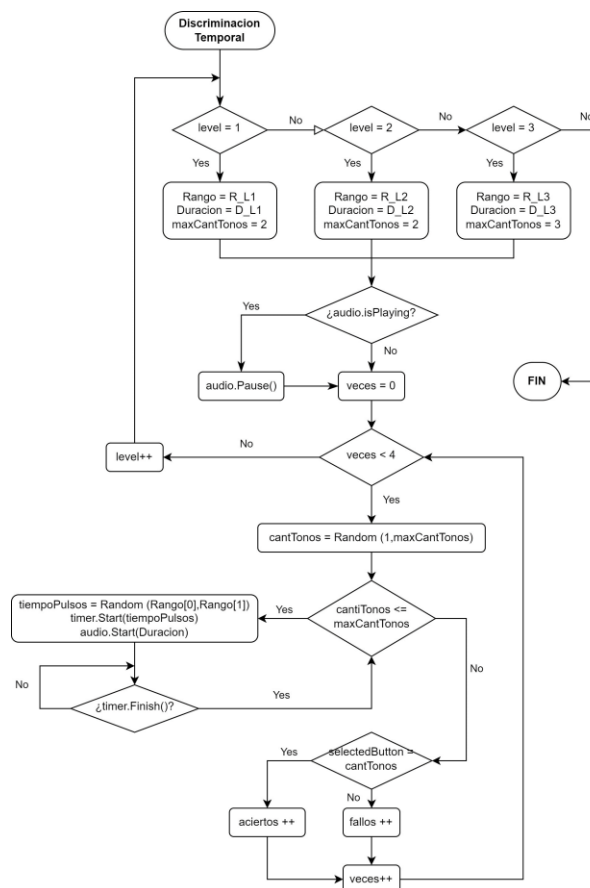


Diagrama 7. Flujo de la sección de discriminación temporal con modificaciones en cuanto a la división de niveles.

2. *Discriminación en frecuencia:* El objetivo de esta sección es que el usuario reconozca e identifique si los tonos que se le han enviado son iguales o diferentes, para esto se hace el uso de

un solo transductor. Los tonos serán enviados con un segundo de separación. Así, de acuerdo a la anterior revisión, se enviará un primer tono a una frecuencia fija de 300Hz. Luego, el segundo tono cambiará de acuerdo al nivel en el que se encuentre el usuario.

Se habían planteado inicialmente los siguientes valores (Min Freq y Max Freq) para ese segundo tono. Sin embargo, luego de una validación con los mismos 6 sujetos, se concluye lo siguiente

<i>Comentario</i>	<i>De acuerdo</i>
<i>Disminuir la diferencia entre ambas frecuencias, aumenta el nivel de dificultad.</i>	6 de 6
<i>De Center Freq a Max Freq es posible distinguir diferencia, con complejidad en función del nivel.</i>	5 de 6
<i>De Center Freq a Min Freq, no se nota diferencia.</i>	6 de 6

Tabla 5. Validación experimental de sección discriminación en frecuencia, con los mismos sujetos de la experimentación de la sección de discriminación en tiempo

A partir de lo anterior se decide dejar la posibilidad de que un usuario administrador pueda modificar los niveles, puesto que la propuesta inicial, encuentra falencias para las frecuencias bajas.

<i>Level</i>	<i>Dif Freq</i>	<i>Center Freq</i>	<i>Min Freq</i>	<i>Max Freq</i>
1	30	300	270	330
2	20	300	280	320
3	10	300	290	310

Tabla 6. Frecuencias usadas en cada nivel para discriminación en frecuencia

Una vez estipuladas las frecuencias, el ejercicio enviará por el transductor 3 tonos diferentes por nivel, con una probabilidad de 50% para la frecuencia central, 25% para la frecuencia baja (por definir) y 25% para la frecuencia alta.

Por lo anterior se diseña el siguiente diagrama de flujo que será aplicado a la implementación de la aplicación:

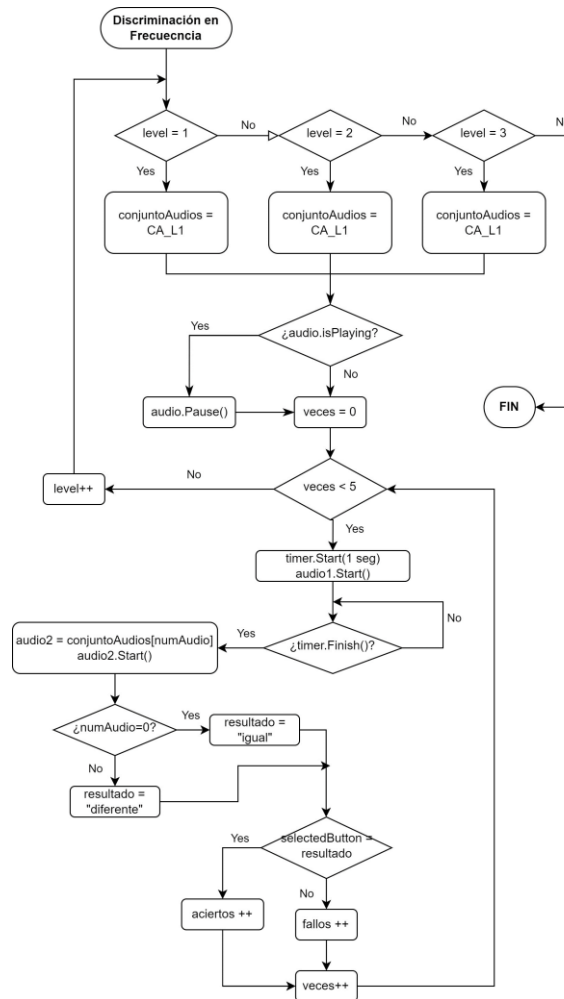


Diagrama 8. Flujo de sección de discriminación en frecuencia

3. *Discriminación de orden* : Debido a la implementación de dos transductores, uno para la percepción de las señales enviadas por la aplicación y el otro para la percepción vibro táctil de la adquisición de la voz del usuario, se cree pertinente realizar un ejercicio que permita discriminar que vibración se le han enviado, si la del transductor A la del transductor B. Para esto se hace uso de una señal generada en Matlab con las mismas características del ejercicio de discriminación de tiempo, una señal sinusoidal de 1 segundo de duración, 300Hz de frecuencia y amplitud unitaria. Se plantea una probabilidad del 50% de probabilidad de que el tono sea enviado primero al transductor A y viceversa, a partir de esto, el usuario debe indicar en la pantalla cual sintió primero el A o el B. A partir del principio planteado en la sección de discriminación de tiempo, se plantea el tiempo de separación entre el envío de los tonos de la misma manera, es decir, cada vez que vaya aumentando el nivel el tiempo de envío entre los tonos disminuirá, esto se puede apreciar en el siguiente diagrama de flujo.

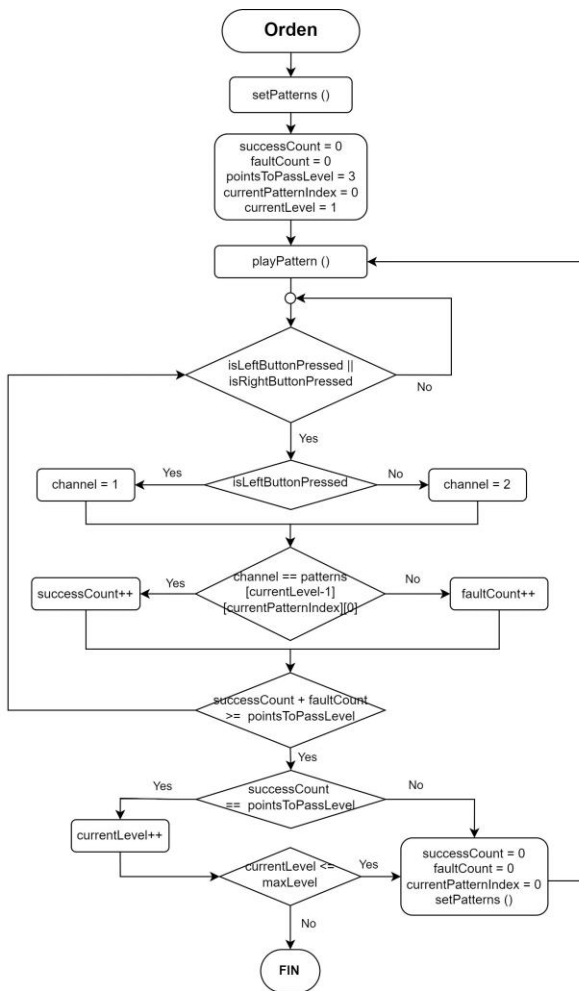


Diagrama 9. Flujo de la sección de discriminación de orden

En un hilo de fondo se ejecuta la reproducción del tono por cada uno de los canales, como se muestra a continuación :

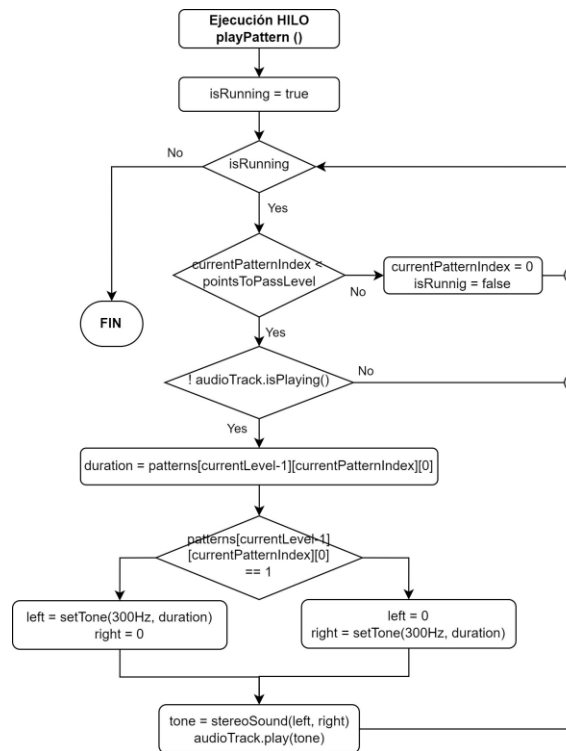


Diagrama 10. Hilo de fondo de discriminación de orden

Sección de entrenamiento del habla :

A partir del DASL se describen diferentes metas para el entrenamiento del habla, establece ejercicios de duración vocal y patrones sonoros con el propósito de “concientizar al niño de la gran variedad de patrones sonoros usados al hablar” [19]. Igualmente establecen que

“Los niños que son capaces de escuchar y producir diferentes patrones sonoros desarrollan un habla que suena más natural y que fluye de una manera más natural y fácil. Esto es muy importante! El control de la voz y del ritmo le dan significado a lo que el niño dice y su voz es más placentera para quien lo escucha.”[19]

Para el desarrollo de lo anterior establecen diferentes ejercicios para que en un principio el niño pueda reconocer la capacidad que tiene su voz y empiece a hacer variaciones con esta, por lo tanto se plantea el desarrollo de una sección que incluya diferentes ejercicios que abarquen ciertas variables a tener en cuenta para este reconocimiento de su voz. Estas variables radican en el volumen de su voz, la discriminación de la producción de sonidos cortos con sonidos largos y el tono vocal.

1. **Intensidad** : Esta sección tiene como objetivo entrenar la capacidad de comprensión del nivel de volumen de cada usuario, es decir, que el usuario sea consciente de la intensidad con la que está hablando y con la que puede hablar. Como ya se mencionaba anteriormente el DASL afirma la importancia de que el niño conozca “acerca de todas las formas que puede utilizar su voz en una variedad de situaciones”

Para esta sección se tienen en cuenta dos puntos:

- El usuario tiene la posibilidad de monitorear la intensidad de su voz a partir de la retroalimentación visual, la cual es representada por un círculo con relleno que aumenta su tamaño si su intensidad aumenta y viceversa.
- Se presentan un círculo el cual representa la retroalimentación de la variación de la intensidad de la voz del usuario y una circunferencia, la cual representa el tamaño que debe alcanzar el círculo. El objetivo del anterior proceso está ligado a darle la posibilidad al usuario de tener diferentes ejercicios de intensidades, rellenando círculos de diferentes tamaños para que el usuario establezca las diferentes formas en las que puede modular su voz.

Círculo con relleno se puede expandir o disminuir dependiendo de la intensidad de la voz



Círculo sin relleno que puede cambiar su forma dependiendo del ejercicio



Ilustración 6. Representación gráfica variación de intensidad en la sección de intensidad para el entrenamiento del habla.

A partir de lo anterior se cree pertinente que la configuración de las variables las realice el usuario administrador, como se había mencionado anteriormente, este modifica la apertura del anillo (la intensidad que debe alcanzar el usuario), el ancho del anillo (el margen que tiene el usuario para fluctuar la intensidad) y el tiempo en el que debe mantener esa intensidad. Entonces la retroalimentación sensitiva estaría relacionada con la adquisición de la voz del usuario al generar la intensidad del ejercicio, esto con el objetivo de que además de tener una retroalimentación visual, tengo un apoyo de reconocer la percepción de la intensidad que el está generando y así mismo con esta pueda alcanzar lo que le solicita el ejercicio (apertura del anillo).

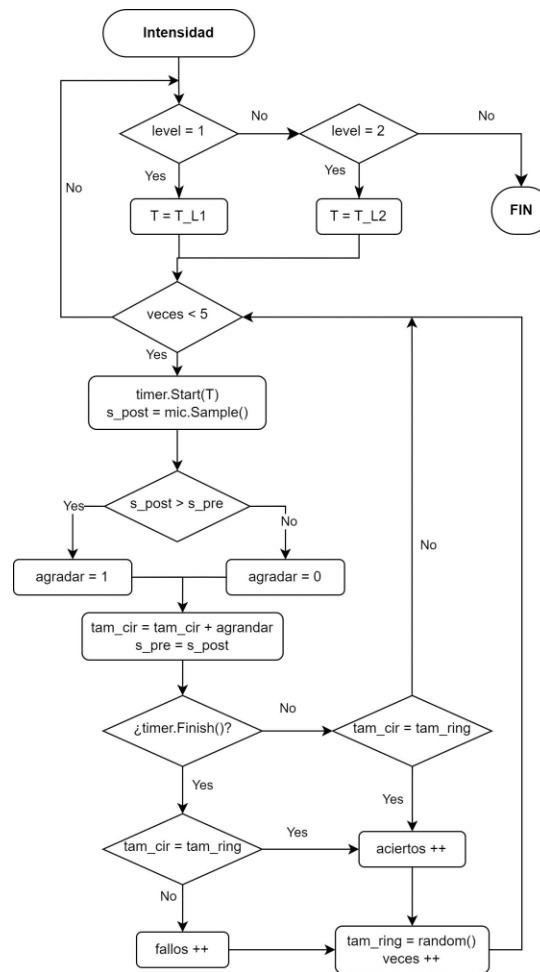


Diagrama 11. Flujo de reconocimiento de la intensidad en la sección del entrenamiento del habla.

2. *Duración* : Como se mencionaba anteriormente, el reconocimiento de un sonido corto y de un sonido largo , es decir , uno de menor duración con respecto a uno de mayor duración, es un pilar para la producción de la voz en una persona con discapacidad auditiva, la cual no tiene retroalimentación y no ha estado en constante practica en edades tempranas para que esto se reconozca fácilmente. A partir de ello se plantea una sección que permita al usuario reconocer la duración de su voz. La configuración de las variables de esta sección está ligada con las configuraciones del administrador, donde este indica el tiempo de duración de la voz, el lapso de duración del silencio existente entre cada espacio de duración de voz y el número de veces que desea que el usuario realice el ejercicio.

Este ejercicio se plantea con el progreso de un cronometro , es decir, si el cronometro inicia su conteo significa que el usuario está pronunciando la vocal que se le solicita, por otro lado, lo mismo ocurre en la existencia de un silencio, la barra se llena si la persona se mantiene en silencio cuando está en el lapso de silencio.

A partir de lo anterior se desarrolla el siguiente diagrama de flujo que compete al diseño de la sección en la aplicación :

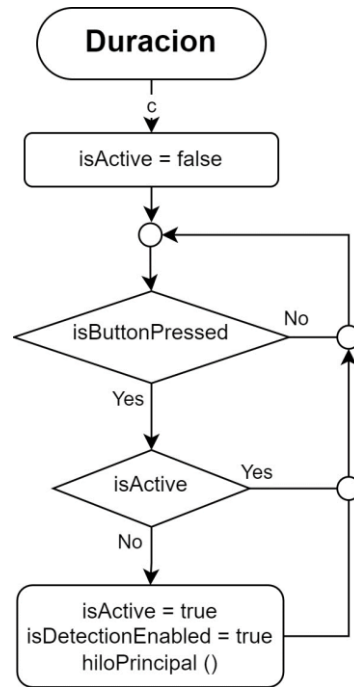


Diagrama 12. Flujo de inicio de la sección de duración del entrenamiento del habla.

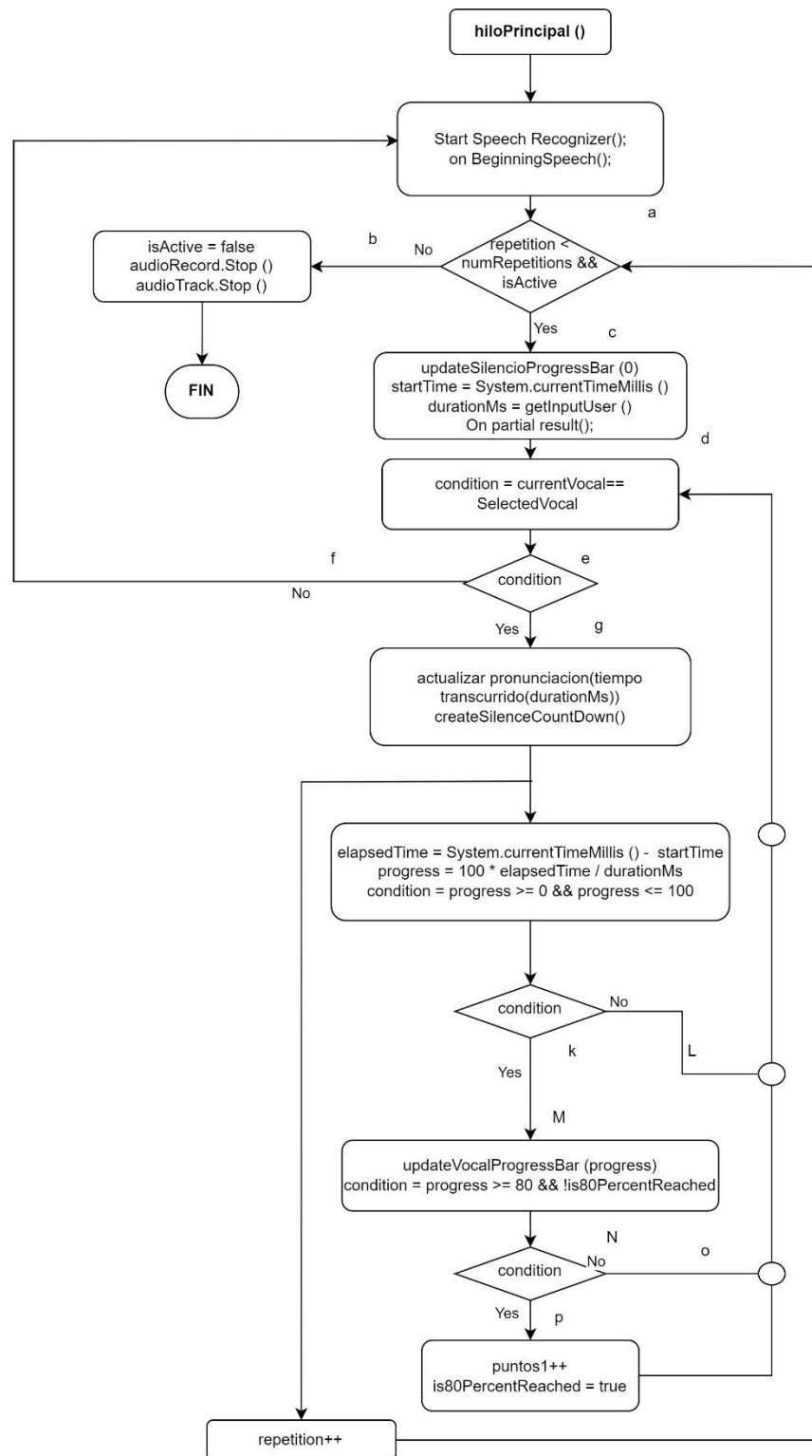


Diagrama 13. Flujo del hilo principal de la sección de duración del entrenamiento del habla

3. *Tono* : En el contexto de sub - habilidades para la percepción del tono en una persona con discapacidad auditiva, puede ser difícil para lo niños este reconocimiento, según el DASL, igualmente reconoce que es un proceso que se debe tener en cuenta para su aprendizaje. A partir de lo anteriormente mencionado y por comentarios de la fonoaudióloga Liliana Ardila, se establece que la producción del tono radica en dos: producción de un tono agudo y producción de un tono grave . A partir de esto se desarrolla el ejercicio de la siguiente manera: el usuario produce el tono propuesto, durante el lapso propuesto, incluyendo entre cada generación de tono un tiempo de silencio.

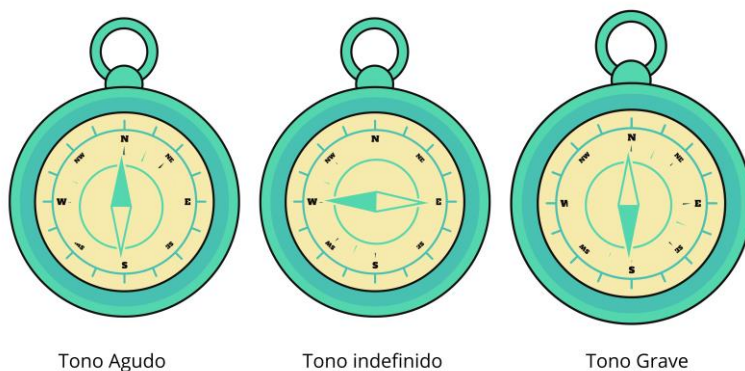


Ilustración 7. Retroalimentación visual para sección de tono en el entrenamiento del habla.

Con la anterior ilustración , se puede observar que la manecilla de la brújula cambia dependiendo de la adquisición de la voz , si el tono obtenido es agudo, la manecilla de la brújula ira hacia el norte y si el tono obtenido es grave la manecilla girara hacia el sur. Por consiguiente la retroalimentación sensitiva consistirá en el envío de un tono agudo por el transductor A y la reproducción de la adquisición de la voz por el transductor B. Es preciso mencionar que el usuario administrador tiene la posibilidad de configurar las variables de tiempo de duración del tono, el tono que desea que mantenga, el número de veces que desea que el usuario realice el ejercicio. En el siguiente diagrama de flujo se observa la lógica del ejercicio:

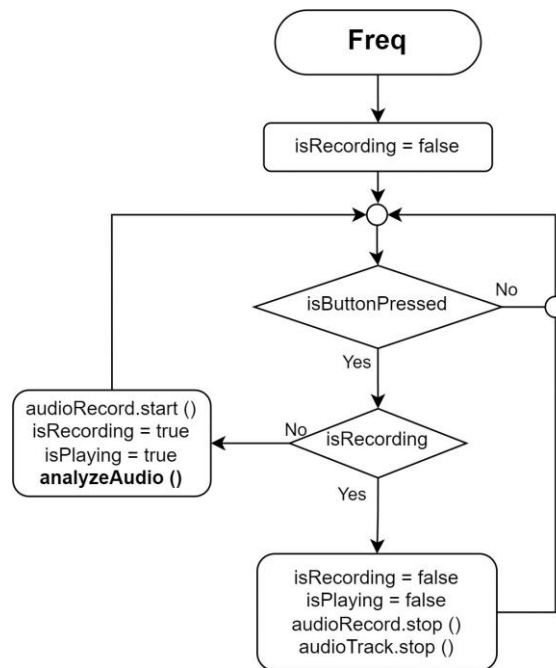


Diagrama 14. Flujo inicial de la sección de tono de entrenamiento del habla.

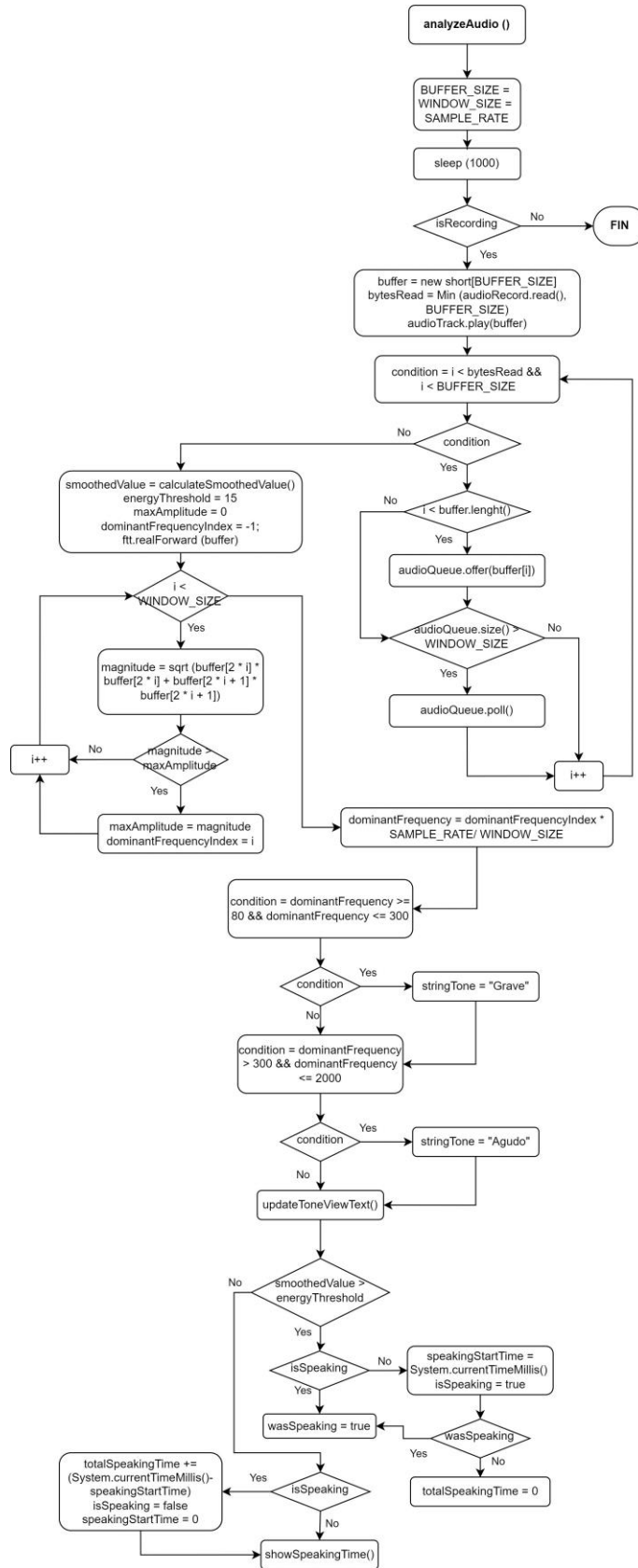


Diagrama 15. Flujo de la lógica del ejercicio de tono en la sección del entrenamiento del habla.

5. *Base de datos*: En el núcleo de nuestra aplicación de rehabilitación del habla para niños con discapacidad auditiva reside una base de datos alojada en *Firestore* de *Firebase*. Esta base de datos está diseñada para gestionar la información de cada usuario y optimizar la experiencia de rehabilitación de manera personalizada, como se aprecia en el diagrama 16.

Al registrar a los usuarios, recopilamos datos básicos esenciales, como el nombre, sexo y la edad, para establecer un perfil inicial. En paralelo, la estructura se extiende a través de colecciones que representan usuarios, niveles de ejercicios, y los intentos realizados. La eficacia de la base de datos radica en la capacidad de vincular estos elementos mediante campos de referencia, creando una red de datos que permite un seguimiento preciso del progreso de cada usuario. A través de esta infraestructura, los usuarios pueden establecer metas, acumular puntos y participar en ejercicios diseñados para mejorar su capacidad auditiva y habilidades de habla.

Por otro lado, la inclusión de un usuario administrador con privilegios especiales permite ajustar dinámicamente las variables de juego, brindando una adaptabilidad a las necesidades específicas de cada individuo. Así pues, se asegura la seguridad y privacidad de la información, y también se sienta las bases para una experiencia de rehabilitación auditiva personalizada y efectiva.

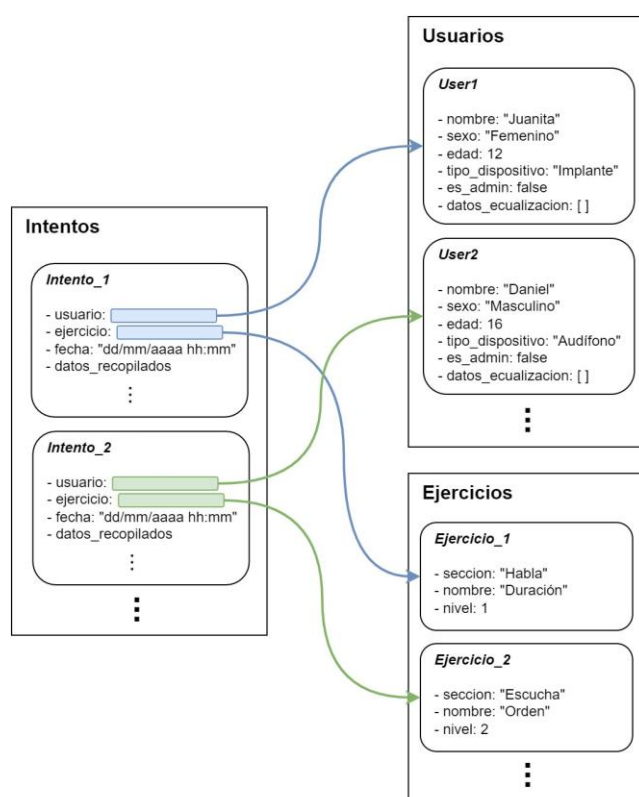


Diagrama 16. Diseño de la base de datos y su relación con las variables a guardar

Como ya se mencionó anteriormente, la aplicación debe recolectar datos del progreso de cada usuario relacionado con las variables que ingresa el usuario administrador, en la siguiente tabla se observan los datos que se recolectan por sección :

<i>Sección</i>	<i>Datos que recolecta</i>
<i>Discriminación de orden</i>	Variables modificadas por el usuario administrador Patrón de seguimiento Resultado por nivel Tiempo de respuesta
<i>Discriminación en frecuencia</i>	Variables modificadas por el usuario administrador Resultado por nivel Tiempo de respuesta Las frecuencias seleccionadas
<i>Discriminación de tiempo</i>	Variables modificadas por el usuario administrador Resultado por nivel Tiempo de respuesta
<i>Intensidad</i>	Variables modificadas por el usuario administrador Duración de la voz
<i>Duración Larga</i>	Variables modificadas por el usuario administrador Aciertos Tiempo de respuesta
<i>Duración Corta</i>	Variables modificadas por el usuario administrador Aciertos Tiempo de respuesta

Tabla 7. Variables enviadas a la base de datos

Así a partir de lo anterior, para efectos de visualización por parte de los expertos, se diseña una base de datos que permite realizar consultas por usuario , en la siguiente imagen se muestra el proceso para la realización de esta.



Ilustración 8. Visualización de datos tomados en Firebase

Teniendo en cuenta la ilustración 8 se realiza un ejecutable en Python, con un usuario y contraseña únicos, que permite acceder a una lista con todos los usuarios y al presionar algún usuario se despliega una ventana la cual contiene la información de cada usuario, la fecha y el tiempo de uso cada vez que el usuario accede a la aplicación, además de la información de cada intento de cada ejercicio en forma

de tablas. Lo nombrado anteriormente se puede visualizar en un enlace que se encuentra en la sección de anexos

Por otro lado se realiza un código en Python el cual permite realizar consultas globales y por usuario, esto se realiza mediante la unión de la base de datos establecida en *Firebase* a partir del archivo json, el cual es dado por la misma base de datos. Se generan distintas secciones globales como:

- Edad Vs Puntos ganados: permite extraer los datos en una tabla de todos los usuarios con su respectiva edad y los puntos obtenidos cada vez que ingreso a la aplicación
- Tiempo de uso Vs Puntos totales: permite extraer los datos en una tabla de todos los usuarios con el tiempo de uso y los puntos obtenidos cada vez que ingreso a la aplicación.
- Dispositivo Vs Puntos totales: permite extraer los datos en una tabla de todos los usuarios el dispositivo que usa y los puntos obtenidos cada vez que ingreso a la aplicación
- Filtrar por ejercicio: a partir de seleccionar ele ejercicio por el cual se requiere obtener información, se despliega una tabla con los usuarios, la edad de cada usuario y los tiempos de respuesta de cada usuario para ese ejercicio respectivamente.
- Filtrar información por usuario: permite hacer consultas por usuario, donde mostrara en un primer momento todos los intentos por ejercicio del respectivo usuario; en un segundo momento se puede realizar la consulta por usuario de las variables que se desean y generar una tabla con ellas, por ejemplo generar una tabla con todos los puntos o aciertos contra el tiempo de respuesta de esos puntos.

5.2 Selección de Componentes

Para la implementación de la aplicación es necesario el uso de dos vibro táctiles, los cuales son dos altavoces por conducción superficial que poseen comunicación bluetooth para facilitar su portabilidad y manejo . Estos transductores tienen la posibilidad de conexión estéreo y un rango de frecuencia de 120 Hz -16KHz según especificaciones

Tiene un micrófono incluido y su peso es de 35 gramos.



Ilustración 9. Altavoces para la implementación de vibro-táctiles

Para la aplicación se diseña en el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Android Studio, esto debido a que el enfoque del proyecto recae en el acceso a la aplicación en celulares gama baja, los cuales en su mayoría tienen sistema operativo Android.

5.3 Protocolos de pruebas

A partir de lo anterior se tiene en cuenta el protocolo a seguir con respecto a cada uno de los diagramas de flujo del diseño que se encuentran en la siguiente tabla. Esta pretende dar a conocer el procedimiento en cada uno de los diagramas de flujo, centrándose en las bifurcaciones o ramas principales, que en este caso hacen referencia a los hilos principales y secundarios en cuanto a programación, en el apartado de anexos se encuentra.

Para la toma de pruebas en la fundación CINDA se realizan pruebas con niños de los 5 a 17 años con discapacidad auditiva e implante, donde ellos atraviesan todos los ejercicios de la aplicación y experimentan con ella, cada usuario uso la aplicación al menos una vez. Las pruebas se realizan a lo largo de los días de terapia que los niños tengan en la fundación, por lo general los días martes, jueves y viernes, esto en compañía de las fonoaudiólogas a cargo de cada terapia. Cabe resaltar que estos niños ya tienen un proceso de rehabilitación avanzando y tienen conciencia de sonido y están en proceso de rehabilitación del habla. Por otro lado mediante el uso de audífonos con cancelación de ruido se hacen pruebas a personas sin discapacidad auditiva, estas personas tienen un rango de edad entre los 20 y 56 años de edad. Sugerencias sobre la toma de datos y la experiencia acerca del proceso de toma de datos se expresa en las secciones de mejoras futuras y conclusiones.

6. Implementación

A partir de los proyectos de grado anteriormente realizados y que se explican sus avances en la sección de antecedentes, se toman como referencia las secciones de entrenamiento de la sensibilidad de S.Caro, a partir de esta implementación y el diseño que se establece en el apartado anterior, la implementación de este proyecto de grado se rige en el desarrollo de la sección del entrenamiento del habla y de la mejora de diferentes secciones realizadas por los autores anteriores. Por lo tanto se describe la implementación de cada una de las secciones del entrenamiento tanto de la sensibilidad como del habla. Cabe resaltar que el código fuente de la aplicación se encuentra en la sección de anexos. Primeramente se tiene en cuenta que al establecer dos vías de retroalimentación sensitiva, es necesario realizar la separación de canales con el objetivo de que cierta información se envíe por un altavoz A y otra información se envíe por el altavoz B, así se desarrolla lo siguiente :

Separación de canales: Entendiendo la necesidad que el usuario con discapacidad auditiva, para iniciar el desarrollo del habla, requiere de un canal de comunicación por el cual pueda recibir una retroalimentación de lo que está diciendo, se hace importante el uso de transductores para un canal de comunicación sensitivo

Se usan 2 de estos dispositivos, en determinadas secciones de la aplicación. De forma simultánea, el usuario recibirá por un transductor lo que debe imitar con su voz y por el otro recibirá la retroalimentación de lo que está diciendo.

Esto implicó aprovechar la característica estéreo de los transductores, enviando información independiente hacia cada canal de audio.

Ahora bien, respecto a la solución, Audio Track, el método usado para la reproducción de audio, permite la salida de audio estéreo con la codificación 16 BITS PCM. Es decir, el buffer con cada trama de audio quedaría de la siguiente forma:



Diagrama 17. Distribución buffer de audio estéreo

En el diagrama 18 , por ende, teniendo como argumentos de entrada un array con elementos de 16 bits para cada canal, intercale las tramas y como salida genere un array con 2 veces la cantidad de elementos del canal con mayor número de elementos.

A partir de esta separación de canales, la implementación se aplica tanto en las secciones de entrenamiento de la sensibilidad y entrenamiento del habla . Así la implementación de la ecualización se realiza primeramente en un transductor y luego en el otro. El código implementado en la clase “Vibrometria”, se enfoca en la generación y reproducción de tonos en frecuencias predefinidas desde 200Hz hasta 1,8kHz con intervalos de separación de 100Hz. Aquí el usuario deberá indicar en la pantalla cuando perciba la vibración en el transductor que tiene en la mano izquierda y luego para la mano derecha, en la siguiente ilustración se observa la interfaz de esta sección :



Ilustración 10. Interfaz final de la ecualización en la aplicación

Ahora bien teniendo en cuenta la ecualización se implementa la sección de entrenamiento de la sensibilidad de la siguiente manera :

Discriminación en tiempo: El código diseñado para Escucha_Tiempo está estructurado para permitir múltiples niveles de dificultad. Se hace uso de una variedad de frecuencias para desafiar la percepción auditiva del usuario a medida que avanza a través de los niveles.

La generación de niveles se establece a través de la función `startGame()` que inicializa y configura el nivel. Aquí, se definen parámetros como la cantidad de puntos necesarios para pasar al siguiente nivel y la cantidad de fallos permitidos.

El nivel comienza con una llamada a `startLevel()` que establece la reproducción de tonos y la secuencia de desafíos auditivos. El usuario se encuentra con tonos generados con frecuencias preestablecidas. La función `playTones()` es la encargada de reproducir estos tonos y manejar su alternancia, generando secuencias aleatorias con base en la configuración del nivel. Dentro de `playTones()`, las frecuencias se generan dinámicamente. Las variables `freqTone` y `durationInMs` definen la frecuencia y la duración de los tonos. La función `setTone()` se encarga de crear los tonos basados en las frecuencias definidas.

El código cuenta con un conjunto de parámetros, como la frecuencia del tono, su duración, la cantidad de tonos a reproducir y el intervalo de tiempo entre tonos. Estos valores se ajustan de manera dinámica con base en el progreso del usuario.

Por ejemplo, a medida que el usuario avanza de nivel, la frecuencia del tono, fundamental para definir el tono mismo, puede ser modificada. Esta alteración implica el uso de frecuencias más altas o más bajas, lo que resulta en tonos más agudos o graves, respectivamente, ampliando así la gama de frecuencias a identificar. Asimismo, el intervalo de tiempo entre tonos se reduce a medida que el juego progresa, lo que desafía la capacidad de respuesta y la velocidad de percepción auditiva del usuario. La selección de los tonos se hace de forma aleatoria dentro de ciertos límites, lo que genera secuencias auditivas únicas en cada intento. Esto implica una experiencia cambiante y desafiante para el usuario. Así como se observa en la siguiente ilustración, el usuario deberá elegir si sintió uno o dos tonos en la reproducción.

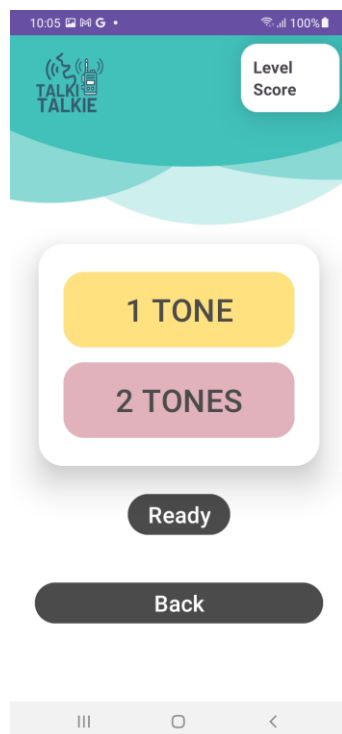


Ilustración 11. Interfaz de discriminación en tiempo en la aplicación

Discriminación en frecuencia: "Escucha_Frecuencia" se enfoca en el entrenamiento para discriminar entre diferentes frecuencias sonoras. La generación de tonos se realiza a través de la manipulación de ondas sinusoidales en el dominio del tiempo, fundamentales para representar frecuencias auditivas. La base de la creación de tonos radica en la generación de señales sinusoidales mediante la función `setTone()`. La generación de frecuencias se define con base en los parámetros de amplitud, duración, frecuencia y tasa de muestreo. Estos parámetros son esenciales para crear tonos que serán reproducidos por el dispositivo. La función `setTone()` opera mediante la siguiente fórmula:

$$\text{tono}[i] = \text{ganancia} \sin(2\pi \times \text{frecuencia} \times \text{tiempo} \times \text{tasa de muestreo})$$

- La ganancia determina la amplitud del tono, mientras que la frecuencia indica la frecuencia de la onda sinusoidal.
- La duración del tono se define por el tiempo en que se genera.
- La tasa de muestreo se fija en 8000 Hz, estándar para la reproducción de audio en dispositivos móviles.

Para la discriminación de frecuencias, se seleccionan y reproducen dos frecuencias, una central y otra variable que cambia dinámicamente. El desafío radica en identificar si la segunda frecuencia es igual, mayor o menor que la frecuencia central. La lógica subyacente en este proceso está definida por la condición de discriminación basada en la diferencia entre las frecuencias reproducidas. La generación de estas frecuencias se adapta de manera dinámica al progreso del usuario en los niveles, ajustando el rango de frecuencias para generar tonos acordes al nivel actual. Además, se incluye aleatoriedad en la generación de frecuencias, lo que añade complejidad al desafío auditivo presentado en cada nivel.

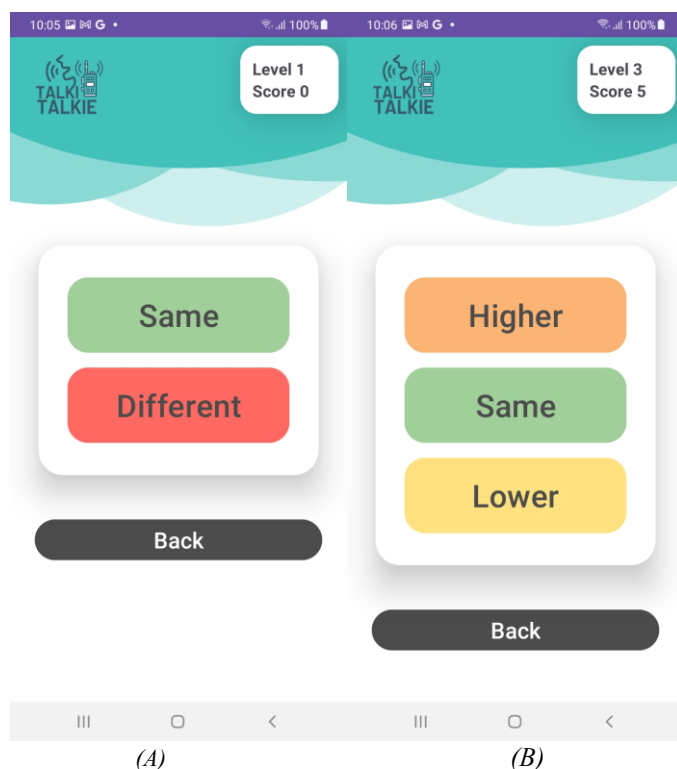


Ilustración 12. Interfaz de discriminación en frecuencia en la aplicación

En la imagen B de la ilustración 12, se observa una segunda parte de esta sección donde la dificultad aumenta y el usuario debe elegir ahora si los tonos enviados son los mismos o si en el caso de ser diferentes, el ultimo tono enviado era un tono con características frecuenciales altas o bajas.

Discriminación en orden: La actividad "Escucha_Orden" se enfoca en desafiar la capacidad del usuario de discriminar que sonido se le ha enviado primero entre los dos canales, esto a través de la reproducción de patrones sonoros. Estos patrones se generan aleatoriamente y constan de secuencias de tonos con variaciones en duración y distribución entre canales izquierdo y derecho. La complejidad se incrementa progresivamente con cada nivel, introduciendo variaciones más extensas en la duración de los tonos y en la alternancia entre canales. El usuario debe reconocer y recordar la secuencia de tonos para poder diferenciar entre canales y responder adecuadamente. El proceso de generación de patrones implica la configuración de tonos en los canales izquierdo y derecho, controlando la duración de cada uno. Estas duraciones varían de manera aleatoria en cada nivel, influenciando la dificultad de la actividad. Este aumento de nivel implica una serie de cambios en la generación de patrones sonoros. Las variaciones se presentan principalmente en la duración de los tonos reproducidos y en la distribución de los mismos entre los canales izquierdo y derecho.

En niveles superiores, se introducen secuencias más largas, con una mayor cantidad de tonos a recordar y, a menudo, una mayor alternancia entre los canales auditivos. Esto desafía significativamente la capacidad del usuario para mantener y reproducir en su memoria secuencias más complejas. Además, el tiempo de espera entre tonos puede ser más corto, agregando dificultad al exigir una respuesta más rápida del usuario. Lo anterior se puede evidenciar en la siguiente formula:

$$Nivel = \frac{(Longitud\ de\ secuencia * Variación\ en\ canales) + (Tiempo\ entre\ tonos)}{(Cantidad\ de\ tonos)}$$

La longitud de la secuencia se refiere a la cantidad de tonos que se presentan. La variación en canales auditivos describe cómo se alternan los tonos entre los canales izquierdo y derecho. El tiempo entre tonos y la cantidad de tonos son factores que influyen en la velocidad de reproducción de la secuencia.

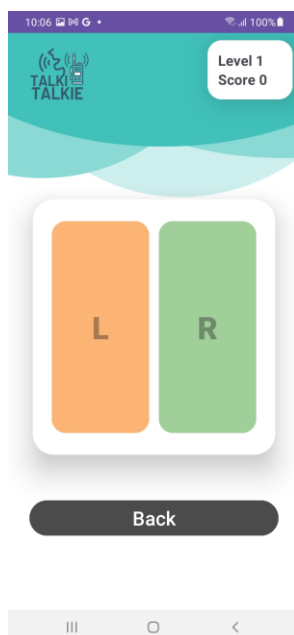


Ilustración 13. Interfaz sección discriminación de orden

Duración larga y Corta : El usuario tendrá que mantener cierto fonema por cierto tiempo e igualmente mantenerse en silencio durante el tiempo que se le indique, si lo anterior se cumple, con cada acción que realice bien, el usuario obtendrá un punto. Estas secciones fueron implementadas de la mano del reconocedor de voz de Google (*Speech Recognizer*), esta librería permite identificar el estado del habla de la persona, dando así detalles como el RMS, el inicio del habla y los resultados parciales del habla. A partir de esta se reconoce la vocal o fonema que está pronunciando y si este es concurrente o no, teniendo en cuenta los niveles de RMS se identifica si la persona está en silencio en los lapsos de silencio, si esto se cumple la retroalimentación visual para esto corresponde al aumento de una barra de progreso.

- En duración larga la retroalimentación es un cronometro que indica el tiempo de pronunciación y en el lado contrario el tiempo que debe cumplir para obtener un punto

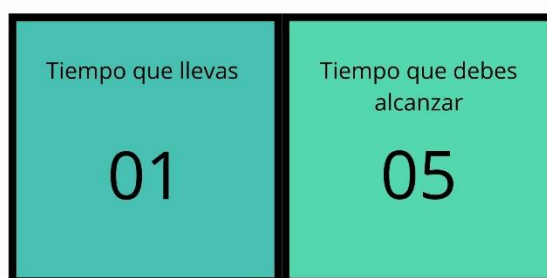


Ilustración 14. Retroalimentación visual de sección de duración larga

- En duración corta la retroalimentación visual se presenta como una escalera, donde cada pronunciación corresponde a un escalón

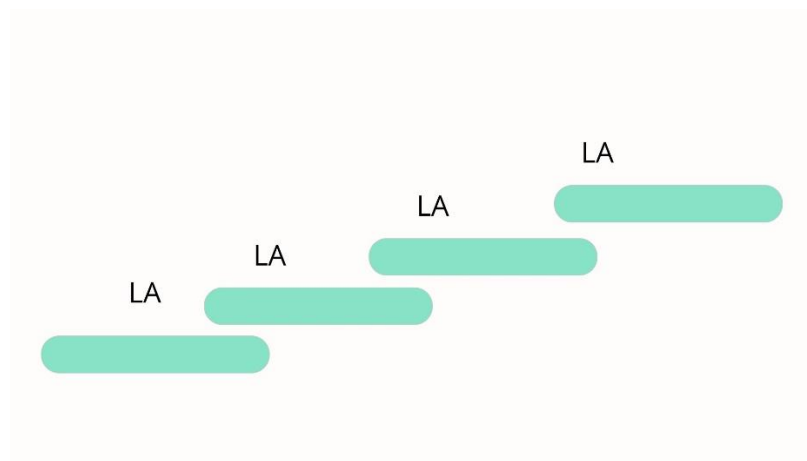


Ilustración 15. Retroalimentación visual de sección de duración corta

Tono: En este caso el administrador tiene la posibilidad de establecer que tono quiere que mantenga el usuario por cierto tiempo. En este caso el administrador puede modificar tres variables: la duración en que tiene sostenido el tono, cuantas veces desea que se repita el ejercicio y el tono que quiere que permanezca sostenido. El usuario tiene dos guías, una por la retroalimentación visual que se presenta todo el tiempo del ejercicio, implementando barras de progreso, indicadores del proceso del ejercicio,

es decir, si lo está realizando de manera correcta o no, la segunda guía consiste en la retroalimentación sensitiva, la cual como en el anterior caso el transductor A es el encargado de transmitir la adquisición de voz en tiempo real y el transductor B emite dependiendo el caso un tono agudo de onda sinusoidal de 1kHz y amplitud 0.5 y un tono grave de onda sinusoidal de 300Hz con amplitud de 0.5 . Para el análisis de la adquisición de voz se realiza el análisis de las frecuencias dominantes en la señal. Esto se logra mediante la Transformada de Fourier (FFT) para obtener el espectro de frecuencias. Se busca la frecuencia con la amplitud máxima en el espectro, lo que se traduce en la frecuencia dominante. La frecuencia dominante se calcula usando la siguiente fórmula:

$$f_{dominante} = \frac{f_{max}}{N}$$

Donde: fmax es el índice de la amplitud máxima en el espectro y N es el número de muestras en el búfer. Basado en la frecuencia dominante calculada, se clasifica el tono detectado como "grave" o "agudo" según un rango de frecuencias predefinido. Si la frecuencia dominante está dentro del rango [80 Hz, 300 Hz], se etiqueta como "Grave". Si está en el rango (300 Hz, 2000 Hz], se etiqueta como "Agudo". Dentro la retroalimentación visual se identifica como agudo la vocal "i" y como grave la vocal "o"

Cabe resaltar que la implementación de esta sección queda para estudios futuros debido a la comprobación de que es necesario realizar más pruebas para la validación de que el cálculo implementado identifica de manera adecuada el tono, ya que este se realiza a partir de los niveles de energía , igualmente se cree importante revisar una implementación más robusta para esta característica en especial,

Intensidad: La solución pretende que en usuario el usando su voz, agrande el diámetro de una circunferencia, en función de una guía representada por un anillo concéntrico. Para eso, por cada muestra de 16 bits que recibe desde el micrófono, se evalúa la intensidad y con ayuda de un factor establecido, se modifica el tamaño del círculo. El usuario debe mantener la intensidad de su voz por un determinado tiempo, para lo cual, se implementa un contador que inicia desde el momento en el que el usuario ha alcanzado la intensidad establecida por la guía (el anillo). El contador se reinicia si el usuario reduce o aumenta la intensidad de la voz y por ende, se sale de la guía.

Ahora bien, respecto a la guía, el diámetro podrá ser modificado solo en el modo administrador, por medio de un *scroll*, que irá mostrando en la interfaz el tamaño del anillo.



Ilustración 16. Interfaz de la sección de intensidad del entrenamiento del habla

Para el proceso de subir la aplicación a *Google Play Console*, el cual permitirá visualizar la aplicación en Play Store y descargar la aplicación. En un primer momento es necesario obtener el APK del archivo de Android Studio, se tiene en cuenta que para la primera versión de la aplicación el APK tuvo que pasar por revisión por parte Google aproximadamente 3 meses, esto donde establecía todas las credenciales permisos y demás para que esta fuera apta para sus uso, además que cumpliera las políticas y estándares establecidos por Google. Una vez aprobada esta primera versión se pueden realizar actualizaciones sobre esta misma versión, donde el tiempo estimado de aprobación son de 1 a 3 días.

6.1 Interacciones Con Usuarios

Para la debida interacción del usuario con la aplicación, en la ventana de registro e inicio de sesión se encuentra un video tutorial para el buen uso de esta, este video igualmente se encuentra en la ventana principal al iniciar sesión. El video consta de explicaciones por secciones como:

1. Registro e Inicio de Sesión: Antes de acceder a la aplicación, el usuario debe registrarse e iniciar sesión. Se proporciona un proceso de registro sencillo, solicitando información básica: usuario, contraseña, nombre, edad, sexo y tipo de dispositivo usado. La seguridad de la información del usuario se garantiza mediante credenciales seguras y almacenamiento de la información en la nube.
2. Inicio de la Aplicación: Al iniciar sesión, el usuario es dirigido a la pantalla principal de la aplicación. Se presenta una interfaz intuitiva con las tres secciones principales: "Configuración de dispositivo", "Escucha" y "Habla". A su vez, podrá visualizar los puntos acumulados del día.

3. Secciones Principales:

Configuración de ecualizador: La sección de configuración ofrece un ecualizador que permite a los usuarios ajustar el volumen para diferentes bandas de frecuencia, mejora la comodidad del usuario durante la ejecución de los ejercicios, adaptándose a las preferencias auditivas y sensitivas individuales. Los ajustes se guardan para garantizar una experiencia consistente en cada sesión. Así pues, el ecualizador comienza primero con el canal izquierdo de audio, una vez el usuario presione la pantalla cuando esté listo. Se reproducen 7 tonos diferentes y el usuario presionará la pantalla cuando empiece a sentir o escuchar cada uno de ellos. Luego, se repite la dinámica con el canal derecho de audio y se finaliza automáticamente la configuración.

Escucha: En esta sección, los niños se sumergen en ejercicios diseñados para familiarizarlos con diferentes sonidos y patrones auditivos. Los usuarios ganan puntos al identificar y discriminar correctamente los sonidos.

a. *Ejercicio de discriminación en tiempo:* Por defecto, el ejercicio tiene 4 niveles y 4 intentos por nivel. En el nivel 1 y 2, el usuario escogerá si sintió 1 o 2 tonos, usando los 2 botones de la interfaz. Por otro lado, en el nivel 3 y 4, el usuario escogerá si el segundo tono que sintió fue más largo, más corto o igual en duración que el primer tono, usando los 3 botones de la interfaz. Si el usuario tiene por lo menos un intento fallido, se repetirá el nivel.

b. *Ejercicio de discriminación en frecuencia:* Por defecto, el ejercicio tiene 4 niveles y 4 intentos por nivel. En el nivel 1 y 2, el usuario escogerá si los 2 tonos que sintió son diferentes o iguales. Por otro lado, en el nivel 3 y 4, el usuario escogerá si el segundo tono que sintió fue más grave, más agudo o igual que el primer tono, usando los 3 botones de la interfaz. Si el usuario tiene por lo menos un intento fallido, se repetirá el nivel.

c. *Ejercicio de discriminación en orden:* Por defecto, el ejercicio tiene 4 niveles y 3 tonos por patrón. Cada tono será reproducido aleatoriamente por el canal izquierdo (L) o por el derecho (R). La interfaz cuenta con 2 botones: "L" y "R". Luego de reproducido cada patrón, el usuario debe presionar los botones en el mismo orden en el fueron sentidos los tonos. Un ejemplo de patrón sería: L, R, R. Por ende, el usuario para pasar el nivel tendrá que presionar los botones L, R, R. Si el usuario tiene por lo menos un intento fallido, se repetirá el nivel.

• **Habla:** La sección de "Habla" ofrece una serie de ejercicios interactivos diseñados para mejorar la capacidad de habla de los niños. Cada ejercicio se centra en aspectos específicos, como el control de la intensidad de la voz, junto con la gestión de pausas y silencios. Los niños practican la pronunciación y la articulación, recibiendo retroalimentación inmediata y acumulando puntos a medida que avanzan.

a. *Ejercicio de Intensidad:* De forma general, el ejercicio consta de círculo que irá aumentando su tamaño en función de la intensidad de la voz. Y un anillo, que servirá como guía para que el usuario, con el volumen de su voz, alcance el tamaño del anillo durante determinado tiempo hasta visualizar la palabra OK!, cada vez que la visualice, obtendrá un punto.

b. *Ejercicio de Duración larga:* El usuario tendrá que pronunciar la vocal de concurrencia escogida mientras en la interfaz va aumentando el tiempo, así el usuario debe igualar el tiempo escogido con el tiempo alcanzado, por otro lado en cada lapso se encuentra un periodo de silencio o descanso, así que si el usuario permanece en silencio durante el tiempo se ira llenando una barra de progreso. Así, el usuario repetirá el ejercicio las veces previamente seleccionadas.

c. *Ejercicio de Duración corta*: El usuario debe pronunciar el fonema que le aparezca en la pantalla una sola vez y luego permanecer un lapso en silencio durante el tiempo escogido hasta completar la barra de progreso, lo anterior se repite las veces establecidas.

4. Sistema de Puntos y Metas Diarias: Cada ejercicio otorga puntos que se suman al puntaje global del usuario.

5. Agregar audios: Permite realizar grabaciones, guardarlas o eliminarlas, las cuales sirven de apoyo para reproducir las pronunciaciones que debe realizar el usuario en las actividades del habla.

6. Configuraciones de Administrador : El usuario puede cambiar los valores y características de cada actividad presionando el botón de. Estos ajustes permiten una personalización completa de la experiencia de rehabilitación, asegurando que cada niño reciba un tratamiento específico y efectivo. Las variables que pueden ser modificadas se encuentran en la tabla 4 ya mencionada anteriormente.

7. Navegación Intuitiva: La interfaz de usuario se mantiene simple y amigable. Navegación intuitiva para facilitar la accesibilidad y la comprensión de los niños con discapacidad auditiva. Iconos y colores suaves se utilizan para mejorar la experiencia visual, brindar una sensación de calma e incentivar la participación activa.

7. Evaluación

7.1 Análisis de Resultados

En el análisis de resultados para la aplicación, se ha evaluado el desempeño de 56 usuarios a través de los diferentes ejercicios. Para la configuración de cada ejercicio, se tienen en cuenta variables por defecto que, sin embargo, luego de las pruebas podrán ser ajustadas permitiendo optimizar la experiencia individual del usuario y alcanzar objetivos específicos en la rehabilitación.

Primero se realiza un análisis a nivel general de los usuarios, es decir, contemplando variables que comparten todos los usuarios:

- Relación entre Edad y puntos totales ganados

A partir de los puntos ganados por cada usuario se realiza una tabla que relaciona la edad del usuario con sus respectivos puntos. Para la siguiente gráfica podemos evidenciar que su normal esta centrada en la edad de 15 y los puntos tienden a ser más altos en esta edad, por ende se puede inferir que la edad donde prevalece el aprendizaje del usuario es en el rango de los 10 a 20 años.

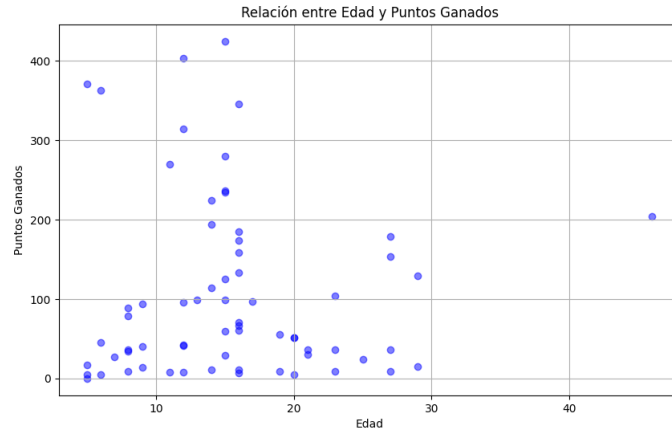


Diagrama 18. Relación General entre la edad de los usuarios y los puntos totales ganados al usar la aplicación

Ahora bien, teniendo en cuenta la anterior gráfica se genera un *box plot* para observar la distribución de los datos obtenidos, visualizando la media de puntos ganados en las edades junto con la desviación estándar, así se puede observar que hasta los 16 años los usuarios son capaces de ganar la misma cantidad de puntos, así el rango de aprendizaje recae en esta edad. La edad donde más se ganan puntos es de 10 a 17 años, además visualizando de que en estas edades se presenta la mayor varianza y la mayor desviación estándar, lo cual no sucede superior a este rango donde la varianza y la desviación estándar son menores, pese a que tiene una menor cantidad de puntos ganados.

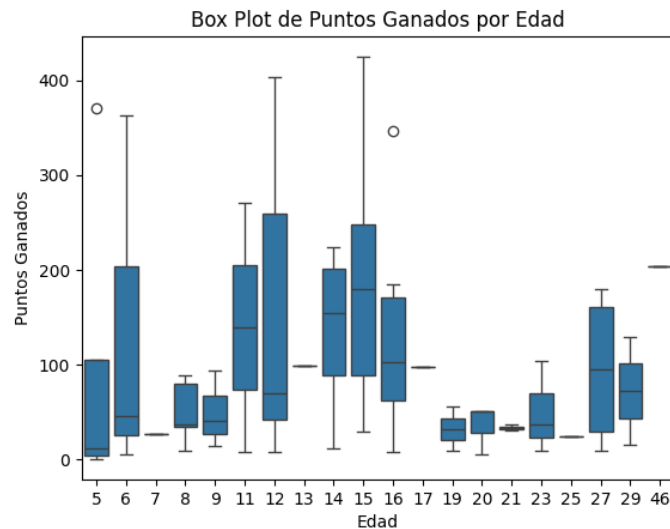


Diagrama 19. Distribución de la relación entre la edad y los puntos ganados totales

Lo anterior se puede relacionar igualmente con el tiempo de uso del usuario en la aplicación, así que de igual forma se realiza un gráfico de dispersión que permita comparar la edad con el tiempo de uso en segundos de cada persona. En esta se expresa un comportamiento alrededor de los 1000 segundos, observando que alrededor de este tiempo se presenta una pérdida de puntos, también se puede apreciar que la mayoría de los datos se encuentran en la media.

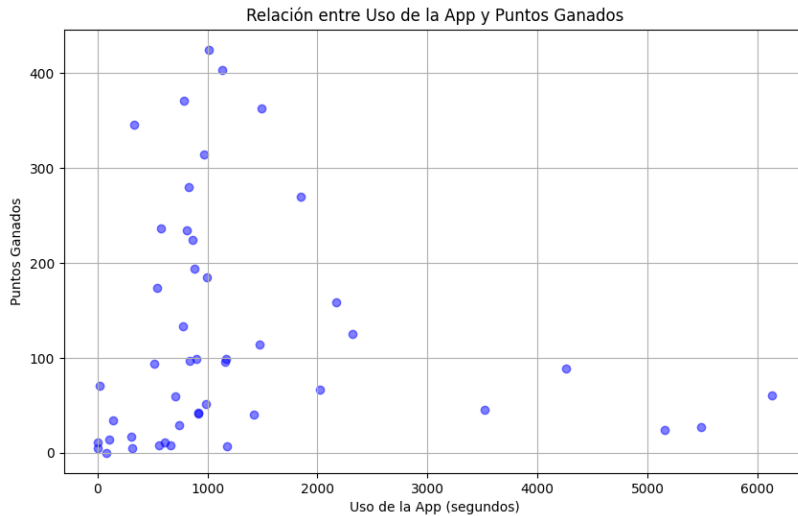


Diagrama 20. Relación entre el uso total de la aplicación por usuario con los puntos ganados

Teniendo en cuenta que se realizaron pruebas a personas con discapacidad auditiva y sin discapacidad auditiva, las personas sin discapacidad auditiva usaron la aplicación al menos una vez y las personas con discapacidad auditiva usaron la aplicación al menos dos veces. A raíz de esto se observa que las personas con discapacidad auditiva tenían de dispositivo de apoyo para la escucha un implante, así con respecto a los datos obtenidos se evidencia que esta población gana más puntos que los que no presentaban implante.

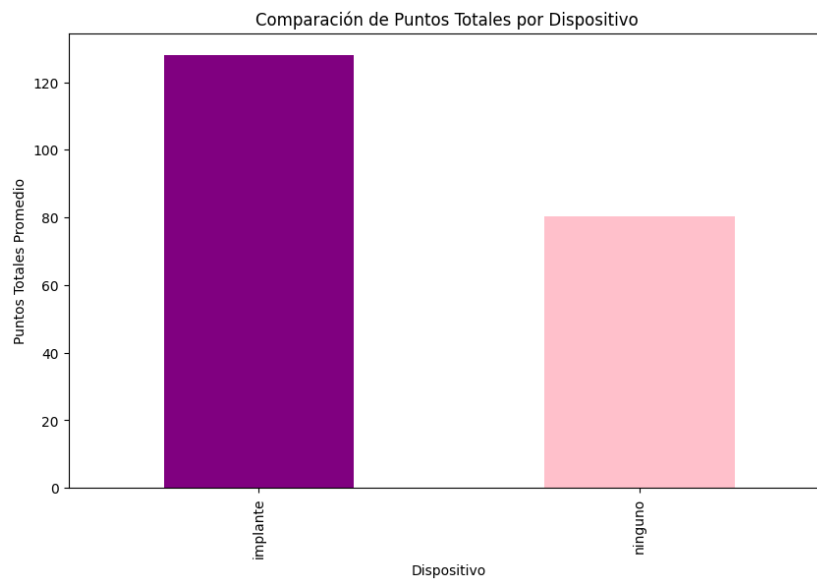


Diagrama 21. Comparación entre los puntos ganados por usuario, con respecto a si tenían dispositivo o no

- Ejercicios de discriminación en tiempo

Fueron evaluados los tres niveles descritos en secciones previas. Los datos recopilados proporcionan una visión detallada de la experiencia de los usuarios, centrándonos en métricas clave como el tiempo promedio por intento y el tiempo total de finalización por nivel. A través de este análisis, buscamos

entender cómo los usuarios responden a los desafíos auditivos presentados en cada nivel, así como identificar posibles patrones de mejora o áreas de dificultad.

Respecto a los datos categorizados por la edad, no se aprecia ningún patrón diferenciador que nos de información sobre el desempeño en función de la edad. Por ende, se hace necesario no solo ampliar el tamaño de la muestra, sino también abarcar usuarios de menor edad.

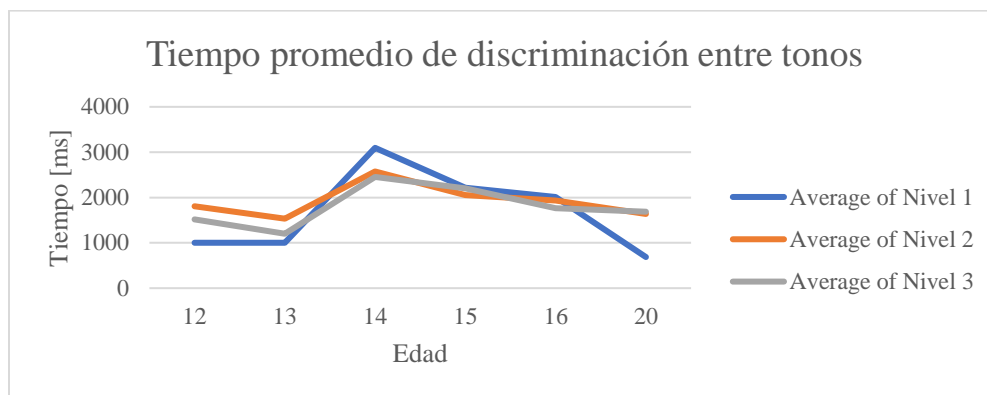


Diagrama 20. Relación tiempo de discriminación vs. edad del usuario.

En cuanto a la edad, destacar que el desempeño fue muy variable respecto a los niveles, por ende, una modificación con mayor margen de las variables de cada nivel, y una ampliación de la muestra, ayudaría a encontrar algún patrón de relación.

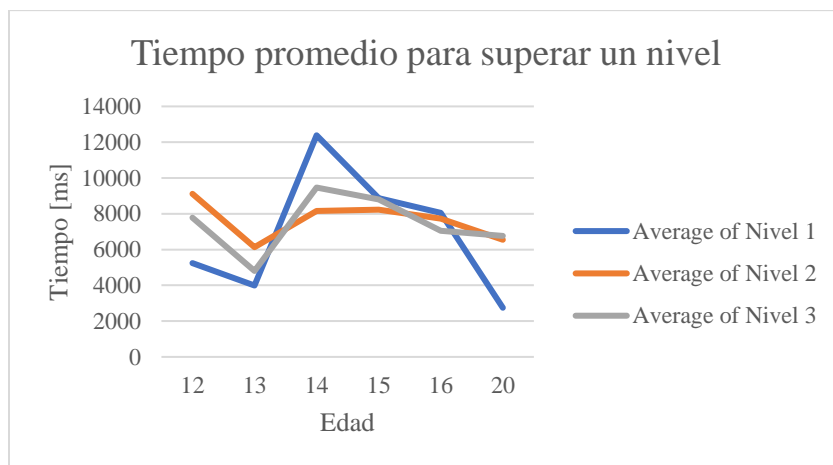


Diagrama 22. Relación tiempo de finalización vs. edad del usuario.

Uno de los factores que permitiría cambiar la dificultad considerablemente, sería el incluir una mayor cantidad de tonos por intento. Así, el usuario tendrá que discriminar si sintió 2, 3, 4 o más tonos.

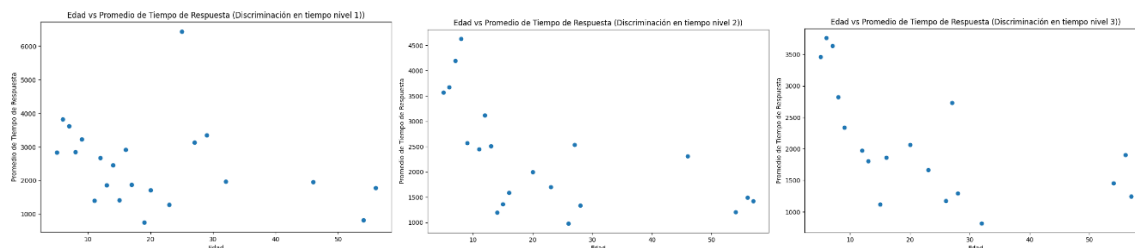


Diagrama 22. Discriminación en tiempo, relación entre los tres niveles teniendo en cuenta edad y tiempos de respuesta

En el Diagrama 22, se puede observar el tiempo de respuesta para tres ejercicios: 1, 2 y 3, los cuales generan tonos a través de los transductores. En cada ejercicio, se disminuye la separación entre los tonos. Es decir, en el ejercicio 1 se generan los tonos con la separación más larga, mientras que en el 2 se generan tonos con la separación más corta. Respecto a los datos obtenidos, se puede observar que existe una menor variabilidad entre los usuarios. Además, aquellos usuarios que presentan una mayor variabilidad son menores de treinta años. Cabe aclarar que estos ejercicios corresponden al nivel 1, 2 y 3 de la sección de discriminación en tiempo del entrenamiento de la sensibilidad. El promedio de tiempo de respuesta está en milisegundos y se realiza haciendo el promedio de los tiempos de respuesta de cada persona en un intento al usar esta sección. Se observa que el tiempo de respuesta en este ejercicio no tiene un patrón, es decir, que independientemente de su nivel de dificultad el tiempo de respuesta sigue en la misma brecha, si se puede apreciar que al aumentar la edad el tiempo de respuesta disminuye.

- Ejercicio discriminación en frecuencia

En el análisis de resultados para el segundo juego de la aplicación de rehabilitación auditiva, se enfoca en evaluar la destreza de los usuarios en discriminar la igualdad o diferencia de frecuencia entre dos tonos aleatorios. Se ha recopilado datos detallados de tres aspectos fundamentales: el tiempo promedio empleado en cada intento y el tiempo total de finalización por nivel. A lo largo de cuatro niveles progresivos, la diferencia en frecuencias entre los tonos se ajusta para aumentar la dificultad. Este análisis busca no solo cuantificar el rendimiento de los usuarios, sino también comprender cómo responden a niveles con variaciones de dificultad auditiva.

Mencionar que para este ejercicio, nivel 1 y 2 tenían 2 opciones de elección, tonos iguales o diferentes. Y nivel 3 y 4 tenían 3 opciones de elección, tonos iguales, más agudo o más grave. Es notorio que, para todas las edades, en promedio costó menos tiempo terminar el último nivel. Esto debido al aprendizaje del ejercicio ya adquirido de parte de los usuarios.

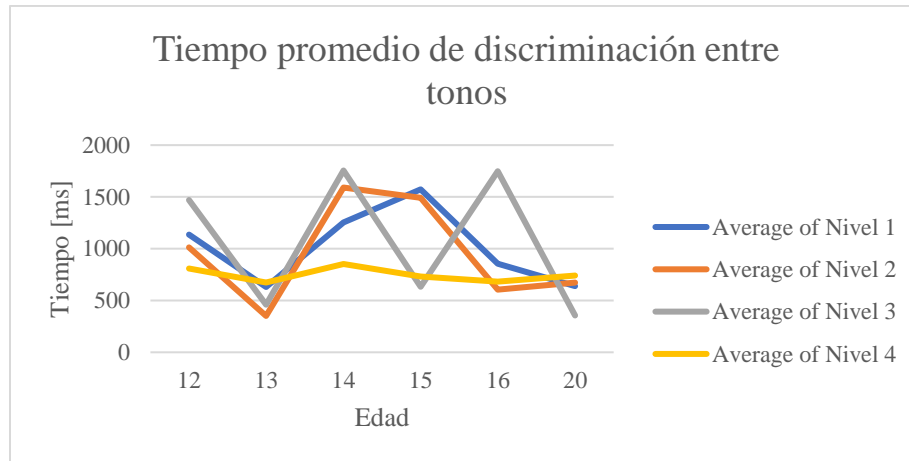


Diagrama 24. Relación tiempo de discriminación vs. edad del usuario.

Tal como sucedía con los tiempos de discriminación, los tiempos necesarios para superar cada nivel tienen una tendencia a la baja, demostrando la necesidad de ajustar aún más la dificultad desde el modo administrando, al modificar las frecuencias reproducidas.

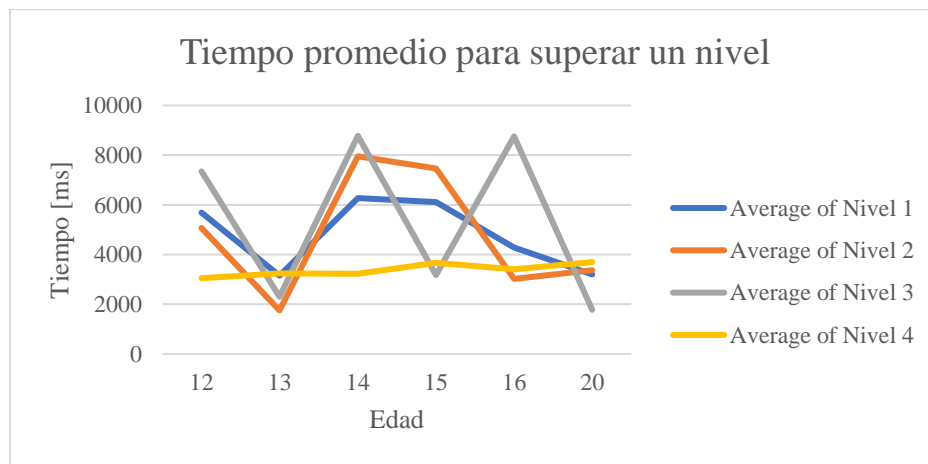


Diagrama 26. Relación tiempo de finalización vs. edad del usuario

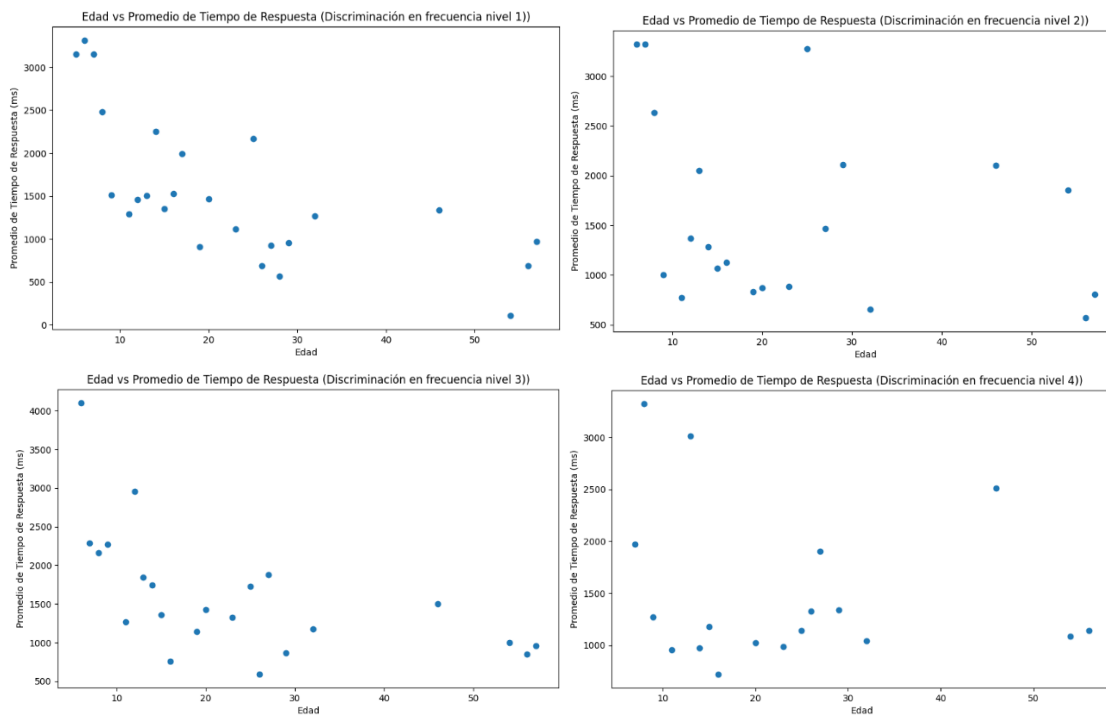


Diagrama 23. Discriminación en frecuencia, relación entre tiempo de respuesta y edad

En el diagrama 23 se presentan los resultados obtenidos para cuatro niveles de dificultad. Se observa un comportamiento muy similar a los demás ejercicios. En este, existe una mayor varianza en el tiempo de respuesta por parte de los usuarios menores de 30 años, se observa que el tiempo de respuesta en el nivel uno tiende a ser más alto, para luego disminuir en el nivel 2, así sucesivamente hasta observar que el promedio de tiempo de respuesta oscila en los 1000 y 1500 ms. Por otro lado, se espera que este tiempo se vea reducido con un mayor uso de la aplicación, ya que los usuarios se familiarizarán con la diferencia de frecuencia producida por medio de los transductores.

- Ejercicio de discriminación de orden

En el análisis detallado del juego de patrones estéreo en nuestra aplicación de rehabilitación auditiva, nos centramos en evaluar la capacidad de los usuarios para recordar y secuenciar tonos estéreo aleatorios. La recopilación de datos ha proporcionado una visión integral de la experiencia de los usuarios a lo largo de los cuatro niveles del juego, cada uno caracterizado por la complejidad creciente en la duración de los tonos. Se exploró la métrica del tiempo promedio necesario para pasar cada nivel, la precisión en la identificación del orden de los tonos y el tiempo total de finalización del juego.

Así como el ejercicio de discriminación en frecuencia, este también favorece a la memoria auditiva. El desempeño de los usuarios categorizados por sexo, no brinda información especializada, puesto que hay una diferencia notable.

En cuanto a categorización por edad, se ve que en promedio los tiempos de respuesta para cada nivel, rondan los 2700 ms, abriendo a la posibilidad de aumentar la cantidad de tonos por cada patrón para también aumentar la dificultad del ejercicio.

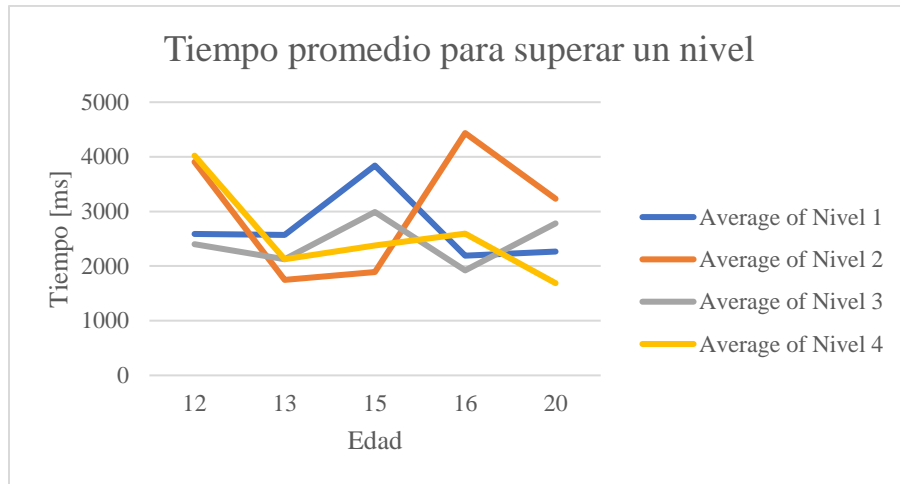


Diagrama 28. Relación tiempo de finalización vs. edad del usuario.

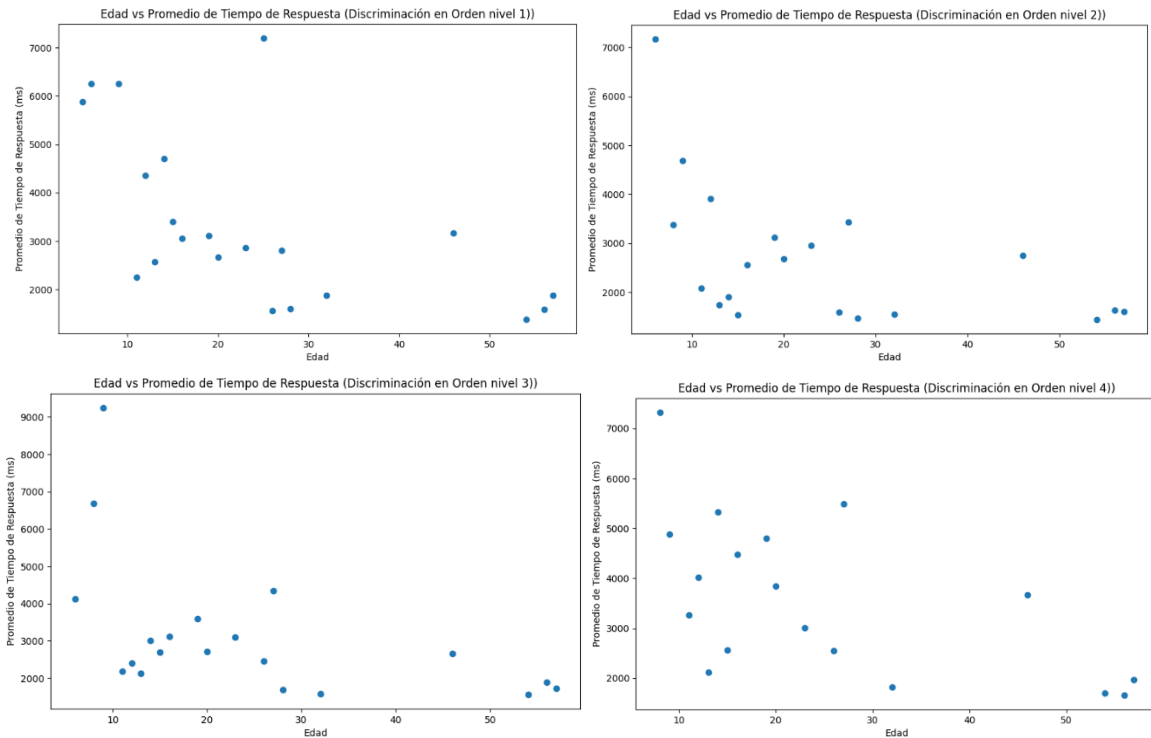


Diagrama 24. Discriminación de orden, relación entre tiempo de respuesta y edad

En el diagrama 24 se presentan los resultados correspondientes a cuatro niveles de dificultad diferentes. Se observa un comportamiento esperado, ya que, a mayor complejidad, dada por los transductores, existe un tiempo de respuesta más alto. Por otro lado, se observa un patrón consistente en los niveles, donde los usuarios menores de treinta años presentan una mayor variabilidad en los tiempos. Esto se atribuye a la amplia gama de funcionalidad que se encuentra en este rango de edades entre los sujetos de prueba.

- Ejercicio de Duración Larga

En el análisis hemos explorado el desempeño de los usuarios mientras se enfrentan al desafío de mantener la voz activa durante períodos específicos y alternar con fases de silencio. Los datos recopilados proporcionan una visión detallada de diversos aspectos, incluyendo el tiempo promedio dedicado a completar cada nivel y el desempeño a lo largo de las repeticiones del ejercicio. A lo largo de estas fases, la barra de progreso sirve como indicador visual del tiempo y de la capacidad del usuario para mantener la concentración.

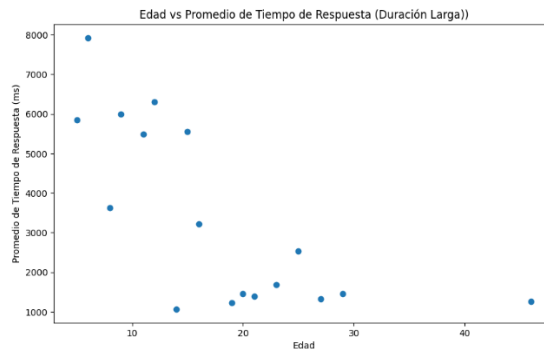


Diagrama 25. Duración larga, relación entre tiempo de respuesta y edad

A partir de los datos recopilados y presentados en el diagrama 25, se observa que el tiempo de respuesta en el rango de edad de menores de 10 años hasta aproximadamente los 15 años el tiempo de respuesta supero los 5 segundos, observando que este ejercicio puede ser un desafío mayor para los usuarios, por otro lado después de este rango el tiempo de respuesta se reduce considerablemente entre los 1000 y 2000 ms. Se espera que con el uso continuo de la aplicación, esta brecha se reduzca y los usuarios mejoren en este ejercicio específico.

- Ejercicio de Staccato

En cuanto al ejercicio de staccato de la sección del habla, se exploró el rendimiento de los usuarios mientras se enfrentan al desafío de producir sonidos de tonalidades específicas y mantener periodos de silencio intercalados. Los datos recopilados ofrecen una visión completa de varios aspectos, incluyendo el tiempo promedio dedicado a completar cada nivel, la precisión en la producción de sonidos.

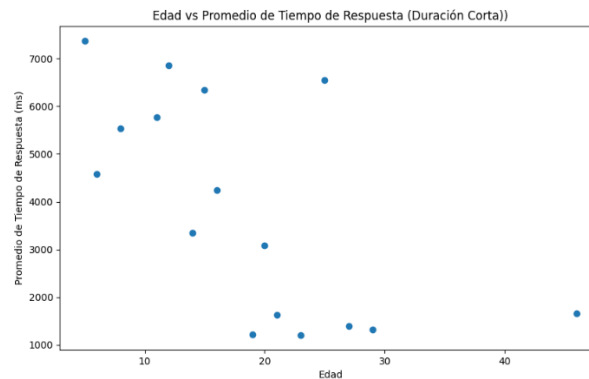


Diagrama 26. Duración de Staccato, relación entre tiempo de respuesta y edad

A partir del diagrama 26 y los datos presentados, se pueden observar dos comportamientos. En primer lugar, los usuarios menores de 30 años presentan una mayor dispersión en los tiempos de respuesta, comportamiento que se observa igualmente en el anterior ejercicio, observando que para las edades menores a 20 años el tiempo de respuesta es mayor en comparación con las edades superiores a esta.

7.2 Especificaciones Finales

- La aplicación es compatible con Android desde la versión 7.0.
- Es funcional con dispositivos de audio bluetooth o alámbricos.
- Dispositivos de audio deben ser estéreo.
- Dispositivo móvil debe tener conexión a internet.
- Dificultad adaptable a las necesidades de cada usuario por medio de los privilegios de administrador.
- Sistema de puntuación y racha para motivar a los usuarios a participar diariamente.
- Base de datos escalable a un mayor número de usuarios.
- Acceso a consultas de los datos de cada usuario y globales por medio de dos ejecutables en Python.

7.3 Validación con el Usuario

Para la validación de la aplicación *Talkie-Talkie*, se realiza con el apoyo de la fundación CINDA en conjunto con cuatro fonoaudiólogas, las cuales están encargadas de la terapia de los niños de la fundación de edades entre los 6 y 17 años. En este caso los niños, con consentimiento informado y firmado por sus padres, accedían a hacer uso de la aplicación.

Las pruebas se realizan dentro de los espacio de terapia agendados por las fonoaudiólogas, en un primer momento ellas realizan la prueba de la aplicación, para así tener certeza de cuáles eran los ejercicios que debía hacer el niño y como ella podría explicárselo para que el entendiera la dinámica de la actividad. Así mismo las fonoaudiólogas dieron un resumen u opiniones acerca de la aplicación, esta información fue recopilada por medio de una encuesta al hacer la finalización de las pruebas. Cabe resaltar que las pruebas realizadas se distribuyeron en aproximadamente cuatro semanas, tres días de cada semana, donde por lo general mínimo se recolectaban 4 pruebas y máximo 8 pruebas.

Primeramente en charlas durante las pruebas con la expertas, manifiestan que los chicos que se capacitan en la Fundación auditivamente se van haciendo muy competentes gracias a los diversos dispositivos auriculares que utilizan y a la permanente capacitación que reciben para desarrollar las habilidades de escucha. Considera que uno de los puntos débiles en todo el proceso de enseñanza y aprendizaje tiene que ver con la tonalidad de la voz, ya que no tienen un control consciente y auditivo de la misma. Hay adolescentes que su tono de voz se parece más al de un niño consentido, percibiéndose cierta sensación de discapacidad cognitiva; pueden hablar muy bajo o muy alto, y en general la tonalidad e intensidad de todos los usuarios tienen demasiadas oscilaciones o vibraciones. Lo anterior se debe a que en muchos casos no tiene en el aprendizaje del habla un marco de referencia de diversidad de sonidos y los matices de su propia voz a causa de la discapacidad auditiva, teniendo en cuenta lo anterior desde la fundación, ayudarle a los usuarios a mejorar la tonalidad del habla los

llevan a laboratorios con habitaciones aisladas sonoramente y con equipos especiales, lo cual es una actividad dispendiosa y que no se puede hacer en todo momento, que sería lo ideal.

Así, a partir de las encuestas realizadas a las fonoaudiólogas, se obtuvo lo siguiente:

Teniendo en cuenta que la encuesta tuvo respuesta por dos fonoaudiólogas, se obtiene que la aplicación fue categorizada como útil para la rehabilitación del habla y las respuestas a la encuesta se mantienen en aprobación con la aplicación. Dentro de las sugerencias y comentarios con respecto a la funcionalidades de la aplicación se destacan la inclusión de nuevas actividades para el trabajo de más habilidades del habla, igualmente establecen que es una buena herramienta para el inicio del proceso de rehabilitación y que fortalece las habilidades esenciales de la comunicación de manera práctica. Cabe resaltar que la encuesta realizada y sus respuestas se encuentran en anexos.

Por otro lado a partir de la realización de las pruebas en la fundación se pudo observar, que el usuario tendía a cansarse después de realizar varios intentos de un mismo ejercicio y no obtener una buena puntuación, así que comenzaban a distraerse o a iniciar una actividad diferente de la aplicación.

Por último se cree pertinente primero realizar encuestas y estudios a diferentes expertos y padres de familia que puedan ayudar con la investigación para la mejora de la aplicación y los requerimientos adicionales u opiniones que ellos puedan tener ante su experiencia con la aplicación o que problema en cuanto la rehabilitación del habla les gustaría se abordara.

8. Conclusiones

A partir de los objetivos mencionados en la sección 1.1 se logró realizar mejoras en la implementación de la última versión del proyecto grado realizado en el año 2022 por J.S.Caro, gracias a los comentarios realizado por este autor con respecto a las mejoras y correcciones que necesita el proyecto, por ende se cree pertinente para la correcta continuación del proyecto basarse en estas mejoras futuras brindadas a lo largo de las mejoras que se vayan realizando con respecto al proyecto. Así partiendo desde una de las mejoras dadas, con respecto al cambio de reproductor de audio, al hacer esta mejora, se evidencia que es necesario realizar más investigaciones en cuanto al reproductor AudioTrack y la sección de ecualización para que este funcione de manera correcta en la ecualización en ambos transductores, aunque cabe resaltar que el cambio de reproductor evita el problema de compatibilidad con versiones antiguas de Android.

Teniendo en cuenta que se realiza una mejora de la interfaz de la aplicación, donde se observa que la gama de colores atrae más al usuario y tiene una mejor distribución, claro esta que se debe seguir mejorando para que la interfaz sea intuitiva, incentivando la independencia del usuario. En la realización de las pruebas en la fundación se evidencia que el reconocimiento de la puntuación por parte del usuario, al igual que el resumen del desempeño en cada actividad que realiza incentiva al usuario a retarse y superarse a el mismo y a sus compañeros.

En complemento a lo anterior se desarrolló una nueva interfaz que contempla ejercicios de sensibilidad y ejercicios de entrenamiento del habla. Por otro lado al no ser posible establecer una vía de retroalimentación sensitiva en la sección del habla por medio de dos transductores para el entrenamiento del habla, lo cual en un principio se realizó por medio de la implementación de canales con dos altavoces que se usan como vibro-táctiles, se dejan implementados los respectivos códigos para su estudio futuro, ya que se cree una herramienta importante de apoyo para que el usuario diferencie lo que debería decir con lo que está pronunciando en ese momento.

Los ejercicios desarrollados se enfocaron en que el usuario pudiera reconocer las características de su voz por medio de ejercicios implementados con el procesamiento de la adquisición de la voz, en paralelo la retroalimentación sensitiva por medio de los vibro táctiles y la retroalimentación visual. A partir de lo anterior se realizan pruebas en la fundación CINDA donde a partir de las pruebas realizadas se concluye que la aplicación no puede ser usada hasta que un experto explique su objetivo a los usuarios, así se reconoce que la aplicación no da una independencia total del usuario. Luego de la explicación dada por los expertos el usuario hace uso de la aplicación de manera individual tratando de superar los retos de cada ejercicio.

A partir del análisis de resultados se observa que la brecha de aprendizaje se encuentra entre los 12 y los 16 años, ya que al hacer una relación entre la edad y los puntos ganados se observa que la media se encuentra en estas edades, junto a esto el tiempo estimado que invierten los usuarios, en este caso en usar todas las secciones de la aplicación, oscila en los 10 minutos. A partir de la experiencia adquirida en la realización de pruebas se evidenció que si la persona excedía este tiempo empezaba a agotarse y a distraerse, por lo tanto se reconoce que las pruebas deben distribuirse para realizarse de manera más amigable con el usuario y realizar más de cinco intentos de uso distribuidos en diferentes días para cada usuario, o teniendo en cuenta el recurso que la aplicación ya está disponible en Play Store, incentivar al usuario que haga uso de la aplicación en su hogar. Por otro lado, a partir de la visualización de los datos gráficamente, se pudo apreciar que el tiempo de respuesta en cada uno de los ejercicios disminuye conforme aumenta la edad, reconociendo que el tiempo de respuesta más alto los usuarios lo obtuvieron en los ejercicios de habla.

En la fundación CINDA se evidencia la aceptación de la aplicación manifestando que es una herramienta adicional para la práctica constante por fuera de la terapia o en el acompañamiento de la terapia que fortalece el desarrollo del lenguaje, por lo que afirman que es el problema más grande que presenta la población con discapacidad auditiva. Por otro lado, los expertos manifestaron que la característica de la voz como el tono, es la más compleja de percibir por esta población. Al realizar pruebas con esta sección se evidencian dificultades para realizar los ejercicios, además se evidencian falsos positivos debido a la presencia de ruido, por ende se evalúa la necesidad de implementar un filtrado más robusto.

8.1 Mejoras Futuras

Esta sección da a conocer las correcciones y mejoras necesarias para la implementación en trabajos futuros, así mismo recomendaciones de los enfoques de este proyecto de grado. Cabe resaltar que estas recomendaciones igualmente se basan en las validaciones por los usuarios y los comentarios dados por los expertos de la fundación CINDA.

- Se evidencia la posibilidad de usar una nueva vía de retroalimentación, en este caso enfocada a los niños que tienen algún tipo de implante. Lo anterior fundamentado por las pruebas realizadas en la fundación CINDA se observa que en estos casos el estímulo de los otros sentidos como el háptico el cual fue implementado en el proyecto, añadiendo a este el uso de auriculares en donde se encuentran los implantes o las antenas, ya que a partir de añadir esta retroalimentación auditiva, el niño tiene la posibilidad de imitar sonidos que se le envíen desde la aplicación. A raíz de lo anterior se cree pertinente revisar un enfoque de la aplicación multisensorial.
- Se debe establecer una etapa previa en cada ejercicio, esta etapa debe permitir un periodo de entrenamiento para la familiarización del usuario con la actividad que desea realizar; así mismo

en cada actividad se debe dar la opción de visualización de un video a modo de manual del uso de la sección.

- Cabe aclarar que el reproductor de audio fue cambiado en esta versión del proyecto, exceptuando la sección de ecualización. Se cree pertinente hacer uso del reproductor Audio Track para esta sección, así mismo, que esta ecualización se pueda realizar para los dos transductores, añadiendo el reconocimiento por parte del usuario y de la aplicación cual de ellos usara en el lado derecho y cual usara en el lado izquierdo, esta información de que transductor se usara en cada lado igualmente se debe recalcar en la sección de orden. Claro está que la banda de ecualización debe ser almacenada en *Firebase* para cada usuario para así implementarla en cada actividad que se necesite.
- El enfoque de la retroalimentación visual se debe mejorar, en aspectos tales como indicar cuando el usuario puede contestar, la generación de un botón que permita volver a escuchar la reproducción dada, generación de avisos en situaciones tales como : el usuario se tome más tiempo en contestar el ejercicio, cuando se termina el ejercicio estableciendo un resumen de desempeño de la actividad y alertas de si el usuario está realizando bien el ejercicio o en qué aspectos puede mejorar.
- Es importante realizar más actividades basándose en el DASL que incentiven el reconocimiento de las características de la voz del usuario, esto igualmente enfocado a la implementación de juegos que fomenten la práctica diaria de estos. Así en cada una de las actividades se cree necesario realizar videos instructivos o animaciones instructivas previas a cada ejercicio para que el usuario pueda entender de una manera concisa lo que espera el ejercicio y los resultados que se espera que tengan.
- Para incentivar la independencia del usuario, pero aun así mantener el acompañamiento del fonoaudiólogo en el progreso de este, se cree pertinente contemplar la opción de que el experto pueda modificar las variables de las actividades desde la base de datos , es decir, así el niño no esté en acompañamiento con el terapeuta este pueda llevar un monitoreo e ir contribuyendo en la práctica en casa diaria.
- También es viable contemplar la implementación de algoritmos más robustos para la detección de las formantes y niveles de energía, teniendo en cuenta los algoritmos implementados que como la sección de tono, de igual forma la implementación de una vía de retroalimentación sensitiva revisando funciones tales como *threadLoop()*, la cual permite realizar la adquisición de voz y reproducirla, claro está revisando a detalle que los hilos de reconocimiento de voz y adquisición de voz junto con reproducción de esta misma estén sincronizados, protegiendo los recursos que usa la aplicación.
- Para la visualización de los datos se debe mejorar la interfaz del ejecutable, es decir, proponer una interfaz amigable donde los expertos puedan realizar todo tipo de consultas por ejercicios y a nivel general y que estas consultas se vean de manera ordenada y de fácil uso para las personas que desean ver el avance por usuario y a nivel general de sus pacientes.

9. Bibliografía y Fuentes de Información

- [1] “Sordera y pérdida de la audición”, Who.int. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>.
- [2] O. Social Colombiana, P. Sorda, y D. C. Bogotá, Gov.co. [En línea]. Disponible en: https://www.insor.gov.co/home/wp-content/uploads/filebase/publicaciones/boletin_observatorio02.pdf
- [3] “Buenas prácticas para promover la salud auditiva”, IPS Ical. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipsical.com/buenas-practicas-para-promover-la-salud-auditiva.html>.
- [4] Real Academia Española: Diccionario de la lengua española, 23.^a ed., [versión 23.6 en línea]. <https://dle.rae.es>
- [5] Y. Z. Hernández, “Desarrollo de un aplicativo de sistema vibro táctil para estimulación sensorial orientado a personas sordas y sordociegas,” Trabajo de grado para optar por el título de ingeniera electrónica, 2022.
- [6] T. Rossing, R. Moore y P. wheeler, The science of sound, 3a ed. Addison wesley, 2002.
- [7] Orientaciones pedagógicas para la atención y la promoción de la inclusión de niñas y niños menores de 6 años con discapacidad auditiva, Alcaldía mayor de Bogotá-Instituto colombiano de bienestar familiar ISBN978-958-623-104-6 Primera edición Agosto de 2010 tomado de <https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/cartilla-auditiva-4.pdf>
- [8] Repositorio Universidad Nacional.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7199/AudiologíaBásicaOGG.pdf?sequence=1>
(accedido el 22 de marzo de 2023).
- [9] M. Bonet Agustí, Manual de rehabilitación del sordo adulto. Barcelona: Masson, 1993.
- [10] "Examen con otoscopio: MedlinePlus enciclopedia médica ilustrada". MedlinePlus - Health Information from the National Library of Medicine. https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/8771.htm (accedido el 9 de febrero de 2023).
- [11] "Xavier Pardell". Tecnología-a Médica - Apuntes de Electromedicina Xavier Pardell. <https://www.pardell.es/audiometro.html> (accedido el 9 de febrero de 2023).
- [12] "El cerebro se "reorganiza" tras una pérdida de la audición". infosalus.com. <https://www.infosalus.com/salud-investigacion/noticia-cerebro-reorganiza-perdidaaudicion-20150519153033.html> (accedido el 9 de febrero de 2023)
- [13] Gallardo, B. T. (2013). La voz y nuestro cuerpo: un análisis funcional. Revista de Investigaciones en Técnica vocal, 1, 40-58
- [15] "¿Qué son los ARMÓNICOS y FORMANTES de la voz y cómo influyen?" Canto Sin Fronteras: Aprende a cantar desde cero. <https://cantosinfronteras.com/armonicos-y-formantes> (accedido el 22 de febrero de 2023).
- [16] "The science of sound : Rossing, Thomas D., 1929- : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive". Internet Archive.

<https://archive.org/details/scienceofsound0003ross/page/132/mode/2up?q=tone> (accedido el 21 de marzo de 2023).

[17] J. M. Roca, "FFT COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS EN FONÉTICA", Ww.ub.edu. [En línea]. Disponible en: https://www.ub.edu/journalofexperimentalphonetics/pdf-articles/EFE-III-JMarti-FFT_herramienta.pdf. [Consultado: 31-oct-2023].

[18] "IDENTIFICACION DEL HABLANTE EMPLEANDO CEPSTRO Y CURVA MELODICA", Garcia.C, pontificia universidad javeriana, 2015 <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/19612/GarciaGomezCarlosArturo2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[19] G. G. S. J. Van Ert Windle, DESARROLLO AUDITIVO EN SECUENCIA LOGICA. 2009.

[20] AC Coelho, DM Medved y AG Brasolotto, 'La pérdida auditiva y la voz', Actualización sobre la pérdida auditiva. InTech, 2 de diciembre de 2015. doi: 10.5772/61217.

[21] D. C. Malamud-Kessler, Revmexneurociencia.com. [En línea]. Disponible en: <https://previous.revmexneurociencia.com/wp-content/uploads/2014/05/Nm143-06-Fisio.pdf>.

[22] A. D. P. FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, "SISTEMA EXPERIMENTAL DE SUSTITUCIÓN SENSORIAL PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD AUDITIVA", trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2014.

[23] Y. Z. HERNANDEZ RODRIGUEZ, "DESARROLLO DE UN APLICATIVO DE SISTEMA VIBROTÁCTIL PARA ESTIMULACIÓN SENSORIAL ORIENTADO A PERSONAS SORDAS Y SORDOCIEGAS", trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2022.

[24] K. H. Lee Chun, "DESARROLLO COMPLEMENTARIO DE UN APLICATIVO DE SISTEMA VIBROTÁCTIL PARA ESTIMULACIÓN SENSORIAL ORIENTADO A PERSONAS SORDAS Y SORDOCIEGAS", proyecto de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2022.

[25] J. S. Caro Pachón, "Sistema de apoyo para personas con discapacidad auditiva o audiovisual, orientado a personas de bajos recursos", trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2022.

[26] Ranjbar, Parivash & Stranneby, Dag & Borg, Erik. (2009). Vibrotactile identification of signal-processed sounds from environmental events. Journal of rehabilitation research and development. 46. 1021-36. 10.1682/JRRD.2008.11.0150.

[27] Borg E, Rönnberg J, Neovius L, Möller K. Monitoring environmental events: Problems, strategies and sensory compensation. ISAC'00 Conference; 2000 May 23–26; Exeter, UK.

[28] "Monitor, a Vibrotactile Aid for Environmental Perception: A Field Evaluation by Four People with Severe Hearing and Vision Impairment". Publishing Open Access research journals & papers | Hindawi. <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/206734/> (accedido el 27 de abril de 2023).

10. Anexos

Tabla de protocolo de pruebas:

#de Prueba	Condiciones de la prueba	Camino activado	Secuencia de entradas	Salidas esperadas	Salidas obtenidas
Duración					
T1	Prueba del hilo principal de la sección de duración del entrenamiento o del habla	Hilo principal, a,c,d,e,g,h,j, m,n,p,d	1.Estado activo , la repetición es menor al número de repeticiones totales 2. El progreso de la barra y el tiempo están en cero 3. Si comenzó a correr el tiempo y está activo empieza el ejercicio 4. empieza la adquisición de audio, la reproducción del tono y se guardan los datos de la adquisición 5. Análisis de la vocal que está pronunciando el usuario 6. Si es la vocal la barra de progreso aumenta y se aumenta el puntaje 7. el proceso se repite hasta completar todas las condiciones	1. Se empieza a grabar de manera correcta y se guardan los datos de adquisición en micData 2. la vocal que pronuncia el usuario es la correspondiente a la indicada 3. la reproducción del tono se realiza de manera correcta 4. La adquisición de voz y la reproducción del tono se realizan en paralelo 5. el análisis de la adquisición de voz se hace en tiempo real 6. se aumenta el número de puntos 7. se inicia nuevamente el proceso	1. Grabación y reproducción al iniciadas al mismo tiempo 2. Análisis de voz en tiempo real 3. la barra de progreso se actualiza 4. se vuelve a iniciar el proceso
		Hilo principal,a,b	1. Estado inactivo y el número de repetición es mayor al número de repeticiones totales	1.No se empieza a grabar 2. No reproduce	1. No graba 2.No reproduce
		Hilo principal,a,c, d,e,f,Q,R,S, T,V,X	1.Estado activo , la repetición es menor al número de repeticiones totales 2. El progreso de la barra y el tiempo están en cero 3. Si no se cumple la condición de que esta activo y el tiempo transcurrido entonces reproduce un silencio 3. no aumenta la barra de progreso y se calcula la energía en la adquisición para saber si la persona está hablando cuando debe estar en silencio 4. aumenta la barra de progreso del silencio 5. se revisa nuevamente la condición de si está activo y el tiempo transcurrido es menor al lapso de silencio	1. Este activo en la segunda condición y se reproduzca el silencio 2. la persona no esté hablando en el lapso de silencio 4.la barra de progreso aumente conforme al tiempo de silencio	1. la barra de progreso de silencio aumenta
Tono					
T2	Prueba de función del análisis de la sección de tono del	está grabando, b,c,d,f,h,i,k	1. Está grabando 2. se guarda adquisición de datos y se reproduce 3. si la lectura de datos cumple las condiciones del tamaño del	1. se llena la cola que guarda los datos de adquisición	1.la cola se ha llenado con los datos de adquisición

	entrenamiento del habla		buffer, se va llenando la cola que guarda los datos de adquisición		
		está grabando, b, c, d, e, L, M, O, P, Q	1. No se ha llenado el buffer 2. se aplica la fft 3. se verifica si la magnitud es mayor al punto máximo de amplitud de la entrada de datos	1. La magnitud es mayor a la máxima amplitud de la adquisición de datos	1. La magnitud es mayor a maxAmplitude
		está grabando, b, c, e, L, M, N, s, U, V, W, Y	1. No se ha llenado el buffer 2. el número de iteraciones es mayor que la ventana de observación de la fft 3. Condición si el tono es grave o agudo	1. Se completa el número de iteraciones de acuerdo a la ventana de observación 2. Se determina si es un tono agudo o grave	1. Actualización del texto si es grave o agudo el tono
Discriminación temporal					
T3	Prueba de funcionamiento de hilo principal discriminación temporal	Nivel, a, c, d, f, h, i, j, N	1. Selección de nivel 2. Generación de variables 3. Reproducción 3. Si el número de veces de reproducción es menor a 4 se genera un tono aleatoriamente 4. empieza la reproducción del tono según el timer	1. La reproducción de los tonos se hace durante el tiempo establecido	1. reproducción de tonos correcta y la cantidad de tonos reproducida es correcta
		Nivel, a, c, d, f, h, i, k, M, L, f	1. Selección de nivel 2. Generación de variables 3. Reproducción 3. Si el número de veces de reproducción es menor a 4 se genera un tono aleatoriamente 4. la cantidad de tonos generados con random No es menor o igual a la cantidad de tonos por nivel, entonces si se selecciona el botón que tiene la misma cantidad de tonos aumentan los aciertos	1. Aumentan los aciertos 2. Reproducción correcta 3. se genera el tono aleatoriamente	1. aumentan los aciertos con respecto a la reproducción de tono aleatorio
Discriminación en frecuencia					
T4	Prueba de funcionamiento de hilo principal de discriminación en frecuencia	Nivel, a, b, c, d, e, f, g, h, i, j	1. Selección de nivel 2. Generación de variables 3. Si está reproduciendo entonces para 3. Si el número de repeticiones es menor a cinco empieza la reproducción del primer tono y el conteo con el timer 4. se reproduce el siguiente tono 4. se evalúa el resultado 5. se suman o	1. aumenta la variable acierto o la variable fallos 2. se genera primero un tono y luego el otro 3. inicia el timer	1. reproducción de tonos correcta 2. aumento de variables correcta

			número de fallos o número de aciertos		
Intensidad					
T5	Prueba de funcionamiento del hilo principal de intensidad del entrenamiento o del habla	Nivel,a,b,c,d,e,f,g,h,i,j	1.Si el conteo de número de veces del proceso es menor a cinco empieza el conteo del timer y la adquisición (amplitud de la muestra) 3. Comparación de la amplitud de la muestra 4. el aumento del tamaño del círculo será igual al tamaño del anillo 5. aumenta aciertos 6. se genera otro tamaño de anillo aleatorio hasta completar 5 veces el ejercicio	1. Aumenta el tamaño del círculo 2. se genera un nuevo tamaño de anillo 3. el ejercicio se repite 5 veces	1. el ejercicio se repite 5 veces con diferentes tamaños de anillo
Discriminación de orden					
T6	Prueba de funcionamiento del hilo secundario de discriminación de orden	a,b,c,d,e,f	1. está corriendo la sección 2. Índice del patrón es menor al número de punto requeridos para cambiar de nivel 3.Se establece la diferencia de tiempo de envío entre los tonos para cada uno de los canales 4. La reproducción se realiza en paralelo por el canal de derecho y por el canal izquierdo	1. Se establece una duración entre el envío de tonos 2. se reproduce en los dos canales	1.Reproduccion en los dos canales con diferencia de tiempo de envío

Tabla 8.Procedimiento de protocolos de pruebas por sección a partir de diagramas de flujo

- **Código fuente:** <https://github.com/j11buitragoa/AppTalkie-Talkie/tree/master>
- **Enlace para instalación de la aplicación en Play Store :**
<https://play.google.com/store/apps/details?id=uni.tesis.interfazfinal>
- **Respuestas de la encuesta realizada a las fonoaudiólogas:**
https://drive.google.com/file/d/1ozLG_5ltfquG6Z5OLkbTGN4BGQCb5Eb/view?usp=sharing
- **Encuesta realizada a las fonoaudiólogas:**
https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfXDCsuAvBtZzAGkv3yPSws-PimtUNUkQG3u_Gl0tQijJL3Ag/viewform?usp=sf_link
- **Carpeta que contiene el ejecutable de la base de datos y demás archivos de soporte:**
<https://drive.google.com/drive/folders/1U7Ak7NHskEaKa-Ml-sRITILwvMQEOLZg?usp=sharing>