

APP DE AYUDA AL RECONOCIMIENTO DE
FORMAS PARA DISCAPACITADOS VISUALES
SHAPE RECOGNITION AID APP FOR THE
VISUALLY IMPAIRED



TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2023-2024

AUTOR
ÁLVARO MASA GONZÁLEZ

DIRECTOR
FERNANDO SÁENZ PÉREZ

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA
FACULTAD DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

APP DE AYUDA AL RECONOCIMIENTO DE
FORMAS PARA DISCAPACITADOS VISUALES
SHAPE RECOGNITION AID APP FOR THE
VISUALLY IMPAIRED

TRABAJO DE FIN DE GRADO

AUTOR
ÁLVARO MASA GONZÁLEZ

DIRECTOR
FERNANDO SAÉNZ PÉREZ

CONVOCATORIA: JUNIO

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA
FACULTAD DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

15 DE MAYO DE 2024

DEDICATORIA

A mis padres, gracias por vuestro apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado en cada paso que doy. A mis amigos, por los momentos que han hecho que este camino sea inolvidable. Y a ti Olvi, por proporcionarme ese equilibrio necesario entre el estudio y la vida universitaria.

RESUMEN

La app "FeelGraph" está diseñada para empoderar a las personas con discapacidad visual al permitirles interpretar gráficos mediante patrones de vibración y sonido. Al combinar técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes con una interfaz intuitiva, FeelGraph transforma la información visual presente en gráficos cargados por el usuario en formatos PDF en presentaciones accesibles sin requerir descripciones visuales o textuales.

La funcionalidad principal de FeelGraph es su habilidad para analizar gráficos, destacar sus elementos más importantes, y comunicar esta información a través de un sistema avanzado de retroalimentación. La aplicación produce distintos patrones de vibración y/o sonido según las características de las líneas detectadas (ya sean ascendentes, descendentes u horizontales), lo que permite a los usuarios comprender intuitivamente la estructura y dinámica del gráfico.

FeelGraph tiene como fortaleza su enfoque en la personalización, ya que permite a los usuarios ajustar las configuraciones de vibración y sonido según sus preferencias personales y necesidades sensoriales. Comprometerse con la accesibilidad y la usabilidad hace que FeelGraph no solo sea una herramienta valiosa para la inclusión tecnológica, sino que también promueva el acceso equitativo a información gráfica en entornos educativos, profesionales y cotidianos.

FeelGraph elimina una barrera más de acceso a la información visual, demostrando el compromiso con una sociedad más inclusiva donde la discapacidad visual no sea un obstáculo para explorar y comprender el mundo visual.

Palabras clave

App, gráfico, vibración, sonido, inclusión, accesibilidad, discapacidad visual.

ABSTRACT

The "FeelGraph" app is designed to empower visually impaired people by enabling them to interpret graphics through vibration and sound patterns. By combining advanced image processing techniques with an intuitive interface, FeelGraph converts the visual information present in graphs uploaded by the user in PDF formats into an accessible format without requiring visual or textual descriptions.

FeelGraph's main capability is its ability to process graphics, highlight their most important elements and report this information through an advanced feedback system. The application generates different vibration and/or sound patterns according to the characteristics of the detected lines (whether ascending, descending or horizontal), allowing users to intuitively understand the structure and dynamics of the graph.

FeelGraph's strength is its focus on personalisation, as it allows users to adjust the vibration and sound settings according to their personal preferences and sensory needs. A commitment to accessibility and usability makes FeelGraph not only a valuable tool for technological inclusion, but also promotes equitable access to graphical information in educational, professional and everyday environments.

FeelGraph removes another barrier to accessing visual information, demonstrating a commitment to a more inclusive society where visual impairment is no longer an obstacle to exploring and understanding the visual world.

Keywords

App, graphic, vibration, sound, inclusion, accessibility, visual impairment.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1 - Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Plan de trabajo	4
Capítulo 2 - Estado de la cuestión	7
2.1 Tecnologías asistivas para personas con discapacidad visual	7
2.1.1 Interfaces hápticas	8
2.1.2 Tecnología de sonido	9
2.1.3 Aplicaciones móviles con soporte táctil y auditivo	9
2.2 Avances en accesibilidad digital para personas con discapacidad visual.....	11
2.2.1 Tecnologías y estándares nuevos de accesibilidad web	11
2.2.2 Integración de asistentes virtuales y tecnología de IA.....	12
2.2.3 Adaptaciones innovadoras en dispositivos móviles y entornos virtuales.....	13
2.3 Desafíos y futuras direcciones en tecnologías asistivas para accesibilidad visual.....	14
2.3.1 Identificación de las brechas actuales en accesibilidad	15
2.3.2 Oportunidades para innovar en tecnología.....	15
2.3.3 "FeelGraph": ejemplo de estudio sobre innovación.....	16
2.3.4 Visión hacia el futuro: sostenibilidad e integración	17
2.3.5 Desafíos y limitaciones de las tecnologías emergentes	17
Capítulo 3 - Captura de requisitos.....	19
3.1 Entrevista a persona invidente	19
3.2 Conclusiones y requisitos.....	21
Capítulo 4 - Diseño e implementación.....	23

4.1 Diseño de la aplicación	23
4.1.1 Arquitectura del sistema.....	23
4.1.2 Diseño de la interfaz de usuario (UI)	27
4.1.3 Diseño de los módulos funcionales	32
4.2 Desarrollo e implementación	38
4.2.1 Implementación del módulo de carga de documentos PDF	38
4.2.2 Implementación del módulo de procesamiento de gráficos	39
4.2.3 Implementación del módulo de exploración y salida táctil/auditiva	42
4.2.4 Implementación del módulo de personalización de las configuraciones	46
4.3 Resumen de las tecnologías utilizadas	47
Capítulo 5 - Evaluación de la aplicación.....	49
5.1 <i>Diseño de la evaluación</i>	49
5.2 <i>Desarrollo de la evaluación</i>	50
5.2.1 Evaluación del primer gráfico. Gráfico básico	51
5.2.2 Evaluación del segundo gráfico. Gráfico medio.....	52
5.2.3 Evaluación del tercer gráfico. Gráfico complejo.	53
5.3 <i>Cuestionario SUS</i>	54
5.4 <i>Conclusiones de la evaluación</i>	55
Capítulo 6 - Conclusiones y trabajo futuro.....	57
6.1 Conclusiones.....	57
6.1.1 Dificultades y aprendizaje tecnológico	58
6.2 Trabajo futuro.....	59
Introduction.....	61
Conclusions and future work	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Gantt - Plan de trabajo.....	6
Figura 2. Línea Braille electrónica. (Acens Blog, 2012)	8
Figura 3. Aplicación móvil "Seeing AI". (CNET, 2023)	10
Figura 4. Aplicación móvil "Be My Eyes" (Be my eyes, 2023)	11
Figura 5. Diagrama ilustrativo asistentes virtuales e IA y su accesibilidad.....	13
Figura 6. Diagrama ilustrado proyecto NavCoa. (Lab, s.f.)	16
Figura 7. Arquitectura del sistema.....	25
Figura 8. Diagrama de clases de la aplicación.....	26
Figura 9. Mapa de navegación de la aplicación.....	28
Figura 10. Interfaz de bienvenida a la aplicación.....	29
Figura 11. Interfaz de selección del modo de retroalimentación.....	30
Figura 12. Interfaz de interacción con el gráfico.....	31
Figura 13. Interfaz de configuración de la retroalimentación.....	32
Figura 14. Diagrama de caso de uso del módulo de carga de documentos PDF.....	33
Figura 15. Diagrama de caso de uso del módulo de procesamiento de gráficos.....	35
Figura 16. Diagrama de casos de uso del módulo de exploración y salida táctil/auditiva.	36
Figura 17. Diagrama de uso del módulo de personalización de configuraciones.	37
Figura 18. Fragmento de código. Carga de documentos PDF.	38
Figura 19. Fragmento de código. Conversión de gráficos.....	39
Figura 20. Fragmento de código. Procesamiento de la imagen.....	40
Figura 21. Fragmento de código. Eliminación de los ejes.	41
Figura 22. Etapas del procesamiento de imágenes.....	42

Figura 23. Fragmento de código. Localización del punto de inicio.	43
Figura 24. Fragmento de código. Detección del toque cerca de las líneas.....	43
Figura 25. Fragmento de código. Clasificación de las líneas del gráfico.	44
Figura 26. Fragmento de código. Representación líneas mediante colores.....	45
Figura 27. Fragmento de código. Retroalimentación táctil.	45
Figura 28. Fragmento de código. Retroalimentación auditiva.....	46
Figura 29. Fragmento de código. Ajuste intensidad de la vibración.....	46
Figura 30. Evaluación primer gráfico. Gráfico real y detectado por la aplicación.	51
Figura 31. Evaluación segundo gráfico. Gráfico real y detectado por la aplicación.	52
Figura 32. Evaluación tercer gráfico. Gráfico real y detectado por la aplicación.....	53
Figura 33. Diagrama de Gantt - Plan de trabajo en inglés.....	66

Capítulo 1 - Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad la tecnología está integrada en todos los aspectos de nuestra vida. Es necesario que aquellas personas con discapacidad visual tengan acceso a esta. La carencia de este sentido ocasiona limitaciones significativas a estas personas en la interpretación de información visual, como pueden ser gráficos y diagramas, en contextos como en lo educativo, profesional y cotidiano.

"FeelGraph" es una herramienta creada para que aquellas personas con discapacidad visual puedan acceder de forma autónoma y efectiva a información gráfica utilizando el tacto y el oído, una aplicación innovadora de tecnología asistiva. Este proyecto surge de la necesidad de suplir las carencias de estas personas para enfrentarse a las limitaciones que experimentan en su día a día.

Manteniendo conversaciones con estudiantes con discapacidad visual, ratifican las situaciones que padecen al enfrentarse a exámenes cuando los educadores deben adaptar las preguntas para evitar el uso de gráficos. Aunque encuentran apoyos como la organización ONCE que adaptan gráficos a Braille, en innumerables ocasiones no son suficientes, ya que no se satisfacen sus necesidades de forma inmediata.

"FeelGraph" intenta satisfacer las necesidades de interpretación de contenidos visuales, gracias a este proyecto mejorará la calidad de vida de las personas con discapacidad visual. Este convertirá información visual en formatos táctiles y auditivos para superar estas limitaciones. Los usuarios podrán analizar y obtener conocimientos sin depender de la vista gracias a este proyecto.

Este proyecto se une a otros llevados a cabo en la Facultad con la finalidad de mejorar la accesibilidad para personas con discapacidades visuales. Uno de ellos se incluye en documentos en Docta Complutense¹, archivo académico que muestra el compromiso firme de la comunidad educativa con la inclusión y progreso tecnológico. Es necesario crear herramientas para todas las personas sin importar sus limitaciones, quedando así demostrado por esta línea de investigación y desarrollo.

Este trabajo de fin de grado combina técnicas de procesamiento de imágenes y tecnologías de sonido y vibración. Su objetivo final será satisfactorio para el usuario y este comprobará que tiene acceso a información antes inaccesible.

1.2 Objetivos

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG), el desarrollo de "FeelGraph" se inició con la ambiciosa visión de crear una innovadora aplicación asistiva que pudiera interpretar cualquier tipo de gráfico y proporcionar comentarios reales y detallados a usuarios con discapacidad visual.

Esta aplicación ideal incluiría funciones avanzadas para identificar y clasificar distintos tipos de gráficos, así como también para extraer y vocalizar datos específicos, valores de ejes y otra información importante. Esto promueve un entendimiento integral y accesible de información visual compleja.

Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo, los recursos tecnológicos, y las complejidades involucradas en las tecnologías avanzadas han obligado a ajustar y enfocar los objetivos para encajar en un marco de trabajo que pudiera implementarse dentro del periodo asignado al TFG. Por lo tanto, el objetivo principal de este proyecto es crear una aplicación de asistencia que ayude a personas con discapacidad visual a ganar independencia para entender gráficos y acceder a información visual compleja a través de vibraciones y/o sonidos.

¹ <https://docta.ucm.es/home>

Los objetivos específicos que se plantearon al inicio del proyecto y que han sido completamente alcanzados son:

1. Investigar y analizar: identificar los desafíos y oportunidades para mejorar la accesibilidad de personas con discapacidad visual a través de tecnologías asistivas en la interpretación de gráficos, comprendiendo sus necesidades específicas.
2. Diseño de la interfaz: asegurar que "FeelGraph" tenga una interfaz de usuario simple y accesible, con navegación fácil y utilizable por personas con discapacidad visual mediante la implementación de principios de diseño universal.
3. Procesamiento de imágenes: desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes que puedan reconocer y analizar la información importante en gráficos cargados por el usuario, eliminando elementos no relevantes y preparar los datos para una transformación a formatos táctiles y auditivos.
4. Desarrollo de patrones de vibración y sonido: programar patrones únicos de vibración y sonido que correspondan con varios tipos de líneas y figuras en los gráficos, para su distinción por parte de los usuarios mediante el tacto y el oído.
5. Pruebas y validación: evaluar la eficacia, precisión y usabilidad de "FeelGraph" a través de pruebas con usuarios finales.
6. Accesibilidad y personalización: mejorar la experiencia de usuario al brindar opciones de personalización dentro de la aplicación, que les permitan a los usuarios el ajuste de las características de vibración y sonidos según sus preferencias y necesidades.

El logro de estos objetivos refleja el éxito de "FeelGraph" en su cometido de facilitar acceso independiente a información visual para usuarios con discapacidad visual y promover una mayor inclusión y autonomía.

1.3 Plan de trabajo

El plan de trabajo ha sido estructurado para asegurar que todas las funcionalidades proporcionadas en la aplicación "FeelGraph" se desarrollen de manera eficiente y efectiva. El plan abarca desde la fase inicial de planificación hasta las pruebas finales, con un cronograma detallado desde el 15 de enero hasta finales de abril. Durante este periodo se llevaron a cabo numerosas actividades esenciales agrupadas en distintas fases: Planificación, Diseño, Desarrollo y Pruebas. Cada fase se ha planificado para permitir un flujo de trabajo eficiente y sin problemas. Este apartado cuenta con un diagrama de Gantt que muestra la secuencia y duración de cada tarea, proporcionando una hoja de ruta clara de las actividades involucradas en el proyecto.

Fase de planificación [15/01 – 05/02].

En esta etapa se sientan las bases para el desarrollo del proyecto, de manera que los objetivos y requisitos sean claros y estén alineados con las necesidades de los usuarios finales.

- Definición del alcance del proyecto (15/01 – 20/01). Los objetivos generales de la aplicación quedan definidos, así como las funcionalidades clave y el público objetivo.
- Investigación y análisis de requisitos (20/01 – 30/01). Analizar y recopilar las necesidades de los usuarios, así como las especificaciones técnicas esenciales para el desarrollo de la aplicación.
- Planificación del proyecto (31/01 - 05/02). Establecimiento de un cronograma detallado, asignando los recursos y estableciendo hitos críticos para monitorear el avance del proyecto.

Fase de diseño [31/01 – 15/02].

Durante esta fase se analiza la experiencia del usuario mediante la creación de interfaces intuitivas y accesibles que cumplan con los estándares de accesibilidad.

- Diseño de interfaces y experiencia de usuario (UX/UI) (31/01 – 15/02). Se planifica la experiencia de usuario y se desarrollan prototipos de la interfaz para asegurar que la aplicación sea accesible y fácil de usar por personas con discapacidad visual.

Fase de desarrollo [15/02 – 17/04].

En esta fase, se implementan las funcionalidades diseñadas y se integran tecnologías asistivas para garantizar la accesibilidad, siendo este el núcleo del proyecto.

- Desarrollo de la funcionalidad de carga y visualización de gráficos (15/02 – 22/02). Desarrollo de la funcionalidad para cargar y presentar gráficos de manera accesible.
- Desarrollo de la funcionalidad de procesamiento de imágenes (23/02 – 06/03). Se mejora la interpretación de las imágenes mediante el procesamiento de estas.
- Desarrollo de la funcionalidad de eliminación de ejes (07/03 – 16/03). Se han desarrollado algoritmos que borran los ejes de los gráficos para facilitar la interpretación.
- Desarrollo de la funcionalidad de gestión y clasificación de líneas (17/03 – 24/03). Desarrollo de funciones que identifican y clasifican las líneas en gráficos según su tipología.
- Desarrollo de la funcionalidad de vibración al tocar línea (25/03 – 03/04). Se integra retroalimentación táctil que responde a toques en las líneas del gráfico.
- Desarrollo funcionalidad de sonido al toque de línea (01/04 – 05/04). Integración de retroalimentación auditiva que responde al toque en las líneas del gráfico.
- Incorporación de tecnologías asistivas (04/04 – 08/04). Asegurar que la aplicación sea compatible con tecnologías asistivas, como lectores de pantalla y dispositivos Braille.
- Desarrollo de la funcionalidad de personalización – configuración (07/04 – 15/04). Desarrollo de métodos que brinden al usuario la posibilidad de personalizar los resultados según sus preferencias y necesidades específicas.

Fase de pruebas [15/04 – 25/04].

Durante esta etapa se comprueba que la aplicación funcione de manera correcta y sea completamente accesible, garantizando la calidad del proyecto.

- Pruebas unitarias (15/04 – 25/04). Cada elemento o funcionalidad de la aplicación se revisa para garantizar un desempeño e incorporación adecuados.

A continuación, en la Figura 1, se muestra el diagrama de Gantt del proyecto, que ilustra el orden y la duración de las tareas involucradas en el proyecto.

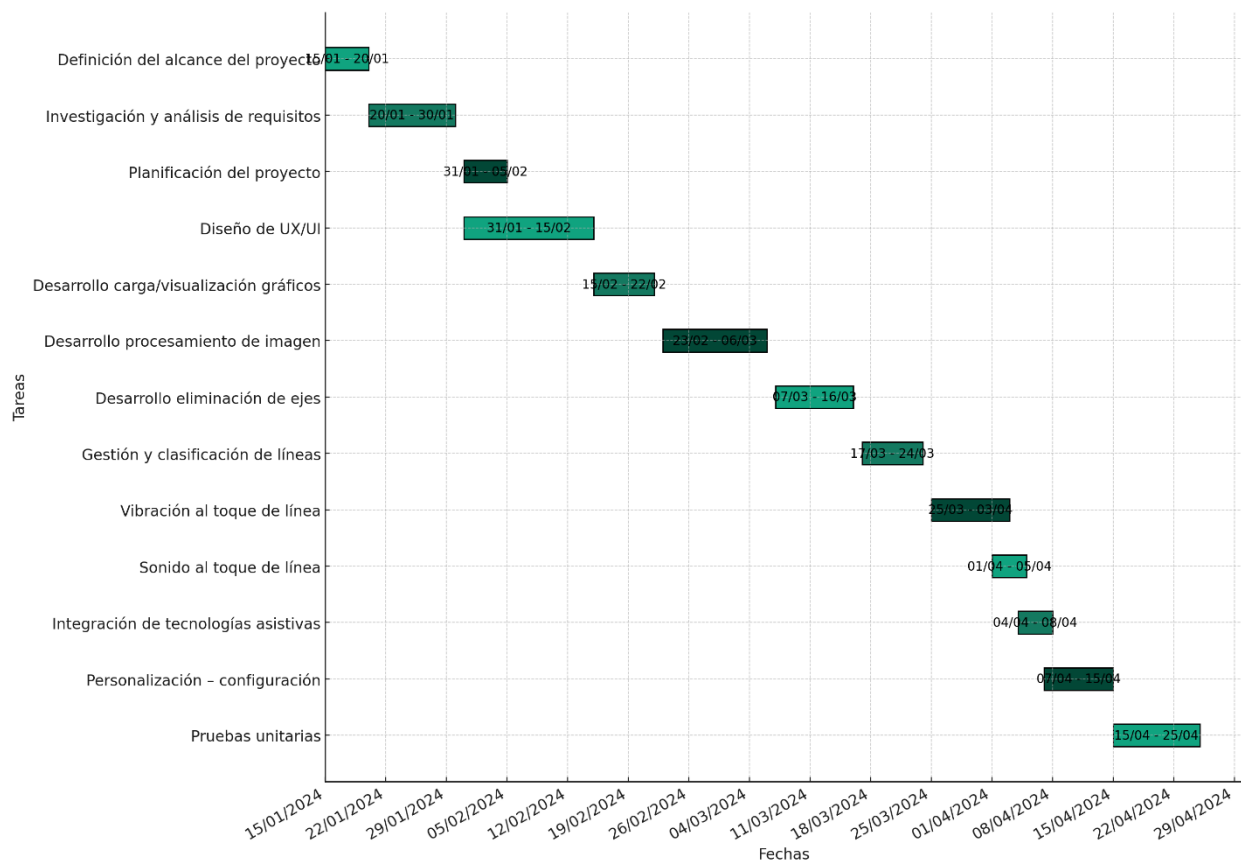


Figura 1. Diagrama de Gantt - Plan de trabajo.

Capítulo 2 - Estado de la cuestión

En la actualidad, se ha puesto el foco en la mejora de la calidad de vida de personas con discapacidad, así como su inclusión, con el desarrollo de tecnologías asistivas.

Tanto en la vida cotidiana como en la laboral, el acceso y la interpretación de información visual compleja es crucial. No obstante, las personas con discapacidad visual encuentran numerosas barreras al desempeñar esta tarea. El proyecto "FeelGraph", tiene como objetivo suplir esas barreras al convertir información visual presentada en forma de gráficos a un formato accesible a través de vibraciones y sonidos.

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo la investigación y la mejora de las limitaciones de las tecnologías asistivas, centrándose en aquellas tecnologías que ayudan personas con discapacidad visual a entender la información gráfica. Tras el estudio realizado de estas tecnologías, se llegó a la conclusión de los avances logrados en esta área, así como de las limitaciones existentes, destacando las mejoras significativas introducidas por "FeelGraph" en este contexto.

2.1 Tecnologías asistivas para personas con discapacidad visual

Las tecnologías de asistencia son fundamentales para las personas con discapacidad visual. Estas tecnologías les ayudan a acceder a información e interactuar con su entorno, impulsando así su independencia. El progreso tecnológico ha experimentado un significativo avance, generando nuevas oportunidades para la inclusión y asistencia en actividades diarias, educativas y laborales.

Dentro de "FeelGraph", este apartado trata sobre las tecnologías y métodos que posibilitan la transformación de información visual a formatos táctiles y auditivos, haciendo énfasis en las innovaciones que permiten interpretar gráficos sin depender de la vista.

2.1.1 Interfaces hápticas

Las interfaces hápticas, también conocidas como táctiles, han probado ser un recurso muy valioso en el desarrollo de tecnologías asistivas, posibilitando a los usuarios percibir y entender información mediante el sentido del tacto. Estas tecnologías tienen la capacidad de simular texturas, formas y movimientos, lo que proporciona una nueva dimensión de interacción para personas con discapacidad visual. El uso de interfaces hápticas en la interpretación de gráficos y datos visuales es un área de estudio con gran potencial, ya que se emplean vibraciones y otros estímulos táctiles para transmitir patrones y tendencias presentes en los datos (Bresciani, Drowing, & Ernst, 2012).

La línea Braille es un excelente ejemplo de tecnología táctil, ya que permite a las personas leer texto mediante patrones al tacto, mostrándose un ejemplo del dispositivo en la Figura 2. Proporciona a los usuarios con discapacidad visual una manera de acceder a contenido digital, incluyendo textos, mediante su adaptación en dispositivos electrónicos como las líneas Braille electrónicas.



Figura 2. Línea Braille electrónica. (Acens Blog, 2012)

2.1.2 Tecnología de sonido

La integración efectiva de la síntesis de voz y los sonidos del entorno en las soluciones tecnológicas permite transmitir información y alertas a usuarios con discapacidad visual. La traducción de información visual a narrativas auditivas y sonidos codificados permite una interpretación adicional de datos visuales y gráficos, transformando descripciones y datos en formatos auditivos comprensibles. (Department of CSA, 2024)

Es vital el uso de tecnologías de sonido para permitir que la información visual sea accesible sin necesidad de ver. Entre los ejemplos se incluyen "TalkBack" para dispositivos Android y "VoiceOver" para dispositivos iOS, los cuales narran el contenido visual y facilitan la navegación por interfaces, así como el acceso a información en dispositivos móviles y ordenadores.

2.1.3 Aplicaciones móviles con soporte táctil y auditivo

Las aplicaciones móviles para personas con discapacidad visual incluyen retroalimentación táctil y auditiva para proporcionar una gama de servicios de asistencia. Aprovechando tecnologías como las mencionadas anteriormente, estas aplicaciones mejoran la autonomía y movilidad de los usuarios al permitirles acceder a información, navegar por el entorno y reconocer textos mediante el uso del dispositivo móvil como intermediario.

"Seeing AI" es una aplicación de Microsoft relevante, la cual es gratuita y está diseñada para personas con discapacidad visual. Usa la cámara del smartphone para reconocer y describir el entorno que te rodea. La aplicación puede reconocer amigos y sus expresiones faciales, identificar productos mediante códigos de barras, leer textos impresos en tiempo real y describir escenas, ofreciendo información auditiva sobre elementos visuales. A pesar de que "Seeing AI" se centra principalmente en el soporte auditivo a través de la síntesis de voz, los usuarios también pueden beneficiarse de la retroalimentación táctil según la configuración de sus dispositivos gracias a su integración con las funcionalidades nativas de accesibilidad del teléfono. A continuación, en la Figura 3, se muestra la interfaz principal de la aplicación "Seeing AI".

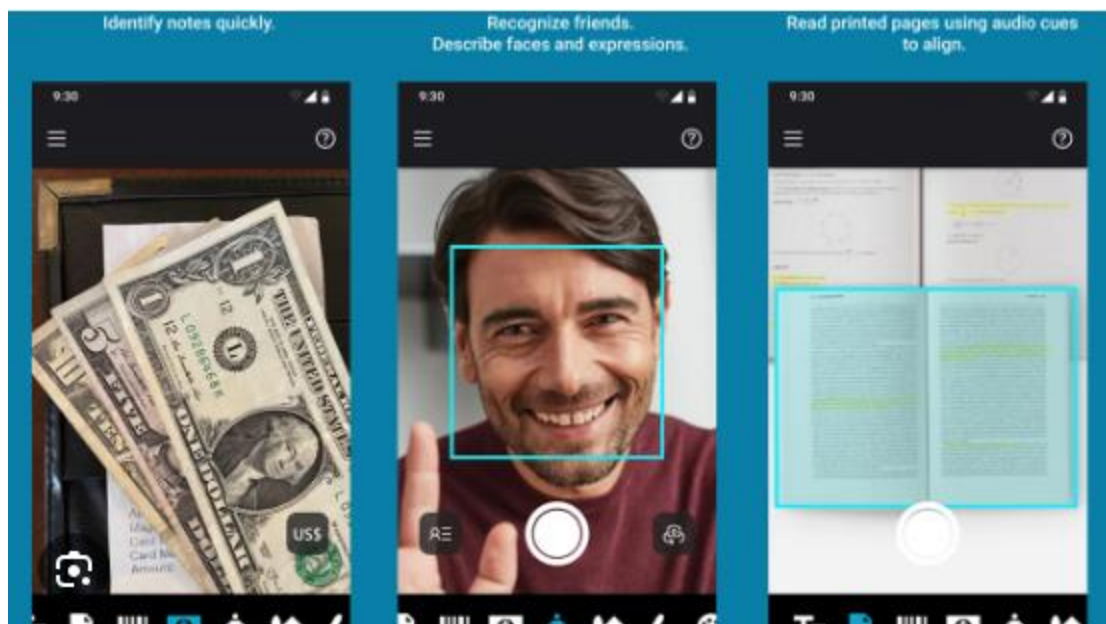


Figura 3. Aplicación móvil "Seeing AI". (CNET, 2023)

Otra aplicación destacable es **"Be My Eyes"**, véase la Figura 4, que ofrece soporte tanto táctil como auditivo. Con esta aplicación, personas con discapacidad visual pueden conectarse con voluntarios de todo el mundo mediante video en tiempo real. Los voluntarios asisten a los usuarios en la navegación de su entorno, la lectura de información impresa y la realización de tareas diarias que pueden resultar desafiantes sin ayuda visual. La tecnología de audio es utilizada por "Be My Eyes" para facilitar la comunicación entre usuarios y voluntarios, además las notificaciones y ciertas interacciones dentro de la app pueden emplear retroalimentación táctil con el fin de mejorar la experiencia de usuario.

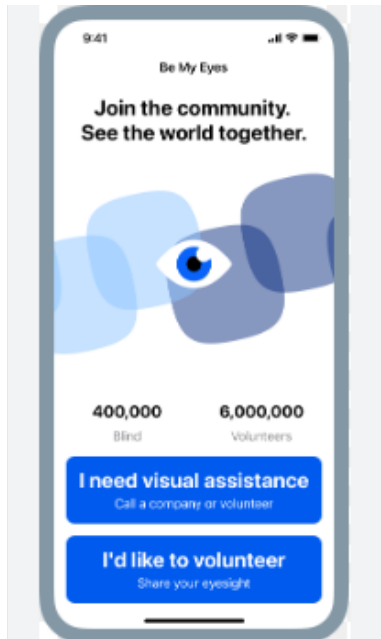


Figura 4. Aplicación móvil "Be My Eyes" (Be my eyes, 2023)

2.2 Avances en accesibilidad digital para personas con discapacidad visual.

La mejora de la accesibilidad digital para personas con discapacidad visual sigue siendo promovida por el avance tecnológico. Facilitar la inclusión y asegurar la mayor independencia y participación en la sociedad moderna de las personas con discapacidad visual se logra mediante la adaptación y creación de contenidos digitales accesibles. Algunos de los avances más significativos en este campo son explorados en este punto.

2.2.1 Tecnologías y estándares nuevos de accesibilidad web

Resulta imprescindible que las personas que presentan discapacidad visual naveguen por la web con tanta facilidad como el resto. De modo que, esto se consigue gracias a la accesibilidad web y los estándares de accesibilidad, como las WCAG 2.1 del World Wide Web Consortium (W3C) (W3C, 2023).

Estas pautas suponen la apertura de caminos para crear plataformas web y contenido digital que resulte accesible para todas las personas, incluidas aquellas con cualquier tipo de necesidad.

La interacción con elementos web complejos se hizo posible a partir de la inspiración de nuevas tecnologías como ARIA (Accesible Rich Internet Applications), herramientas que posibilitan que todos los usuarios tengan una experiencia accesible.

2.2.2 Integración de asistentes virtuales y tecnología de IA

El uso de asistentes virtuales y la inteligencia artificial (IA) ha modificado la utilización que hacemos de los dispositivos digitales y el cómo accedemos a ellos. Estas tecnologías no solo facilitan retroalimentación auditiva para la navegación de interfaces y acceso a información, si no que también han permitido el desarrollo de soluciones más intuitivas y adaptadas a las necesidades individuales de los usuarios. Por ejemplo, Siri y Google Assistant, a través de comandos verbales, pueden controlar dispositivos y obtener información. Por otro lado, se está explorando cómo optimizar la interpretación automática de imágenes y textos en entornos web y móviles a través de la tecnología IA. Estos avances tecnológicos suponen posibilidades de mejora significativa en la accesibilidad para los usuarios con discapacidad visual. El diagrama ilustrativo de la Figura 5 muestra cómo los asistentes virtuales e IA pueden ser utilizados para mejorar la accesibilidad, resaltando su utilidad práctica y sus aplicaciones en la mejora de la experiencia del usuario.



Figura 5. Diagrama ilustrativo asistentes virtuales e IA y su accesibilidad.

2.2.3 Adaptaciones innovadoras en dispositivos móviles y entornos virtuales.

El desarrollo de dispositivos móviles adaptados y la generación de entornos virtuales accesibles están abriendo nuevas posibilidades en materia de accesibilidad para individuos con discapacidad visual. Las pantallas táctiles adaptativas, como innovación, prometen convertir la información visual en formatos táctiles para que los usuarios puedan “sentir” imágenes mediante cambios en la superficie de la pantalla. Proporcionan una forma más intuitiva y directa de acceder a la información visual sin necesidad de intermediarios auditivos o terceros, por lo que representa un avance significativo en estas tecnologías.

Además, están investigando nuevas maneras de recrear experiencias visuales para las personas con discapacidad visual mediante entornos virtuales y realidad aumentada, aprovechando otros sentidos. Esto abarca desde la mejora de la navegación en entornos físicos hasta el desarrollo de experiencias inmersivas de aprendizaje y entretenimiento, las cuales estaban fuera del alcance de este grupo demográfico anteriormente. No solo mejoran la accesibilidad y la inclusión, sino que también abren nuevas posibilidades para la educación, trabajo y el ocio prometiendo un futuro donde la tecnología elimina barreras en lugar de crearlas estos avances.

La accesibilidad digital para personas con discapacidad visual está en constante evolución debido a avances tecnológicos y al compromiso con el diseño inclusivo. Mientras estas tecnologías siguen evolucionando y encontrando usos prácticos, surgen nuevas posibilidades para mejorar la experiencia digital de las personas con discapacidad visual, lo que permite hacer que el internet sea más inclusivo y accesible para todos en términos de navegación, acceso a la información e interacción con el mundo digital.

2.3 Desafíos y futuras direcciones en tecnologías asistivas para accesibilidad visual

Los esfuerzos previos en el campo de las tecnologías de asistencia han sentado las bases y han supuesto una fuente de inspiración para proyectos como "FeelGraph".

Estos antecedentes son fundamentales para abordar los desafíos actuales, así como establecer el mapa de ruta en las direcciones futuras. Un ejemplo destacado es el Trabajo de Fin de Grado que mis compañeros realizaron el curso académico anterior, con la creación de una aplicación para convertir imágenes visuales en descripciones auditivas destinadas a personas con discapacidad visual (Amor, Chaves, & Ruiz, 2023). Los usuarios podían subir imágenes a la aplicación desarrollada y, a través de técnicas avanzadas de reconocimiento de imágenes y procesamiento de lenguaje natural, esta generaba descripciones sonoras detalladas de los contenidos visuales.

“FeelGraph” sigue una trayectoria similar a la integración de este tipo de tecnologías, con el propósito de potenciar y ampliar las capacidades de accesibilidad.

Sin embargo, a pesar de los importantes progresos para la inclusión de personas con discapacidad visual gracias a los avances en accesibilidad digital, todavía queda mucho por hacer para conseguir que esta sea plena y universal. Las tecnologías asistivas actuales se enfrentan a retos muy importantes, y se están considerando futuras direcciones para mejorar su vida.

2.3.1 Identificación de las brechas actuales en accesibilidad

Garantizar que todas las aplicaciones, sitios web y tecnologías sean completamente accesibles y cumplan con las directrices internacionales como las WCAG es uno de los mayores desafíos en la accesibilidad digital. Muchas veces, los desarrolladores pueden no estar completamente al tanto de estas pautas o enfrentar dificultades al implementarlas correctamente. Es necesario actualizar constantemente las directrices de accesibilidad para reflejar nuevas técnicas y prácticas de diseño, debido a la rápida evolución de las tecnologías web y móviles.

2.3.2 Oportunidades para innovar en tecnología.

La inteligencia artificial y la realidad aumentada permiten desarrollar soluciones asistivas más avanzadas y personalizadas, ofreciendo oportunidades hasta hace poco impensables. La inteligencia artificial, en particular, facilita la creación de interfaces intuitivas adaptadas a las necesidades individuales de los usuarios, suponiendo un salto cualitativo en la accesibilidad digital. Investigar cómo estas tecnologías pueden integrarse de manera efectiva en dispositivos y aplicaciones asistivas deviene en un reto clave para la innovación en el futuro.

A continuación, se presentan dos proyectos que ejemplifican la aportación de estas tecnologías emergentes a la accesibilidad digital:

- Inteligencia artificial (IA): el proyecto AI4Accessibility de Microsoft (Microsoft, s.f.), utiliza la realidad virtual para proporcionar descripciones del entorno, reconocer objetos y textos en tiempo real.
- Realidad aumentada: dispositivos de RA, como NavCog (Lab, s.f.), son utilizados para asistir a las personas con discapacidad visual en la navegación por entornos físicos complejos mediante señales auditivas y táctiles, lo que contribuye a mejorar su autonomía y seguridad. A continuación, en la Figura 6, se muestra un diagrama del proyecto NavCog:

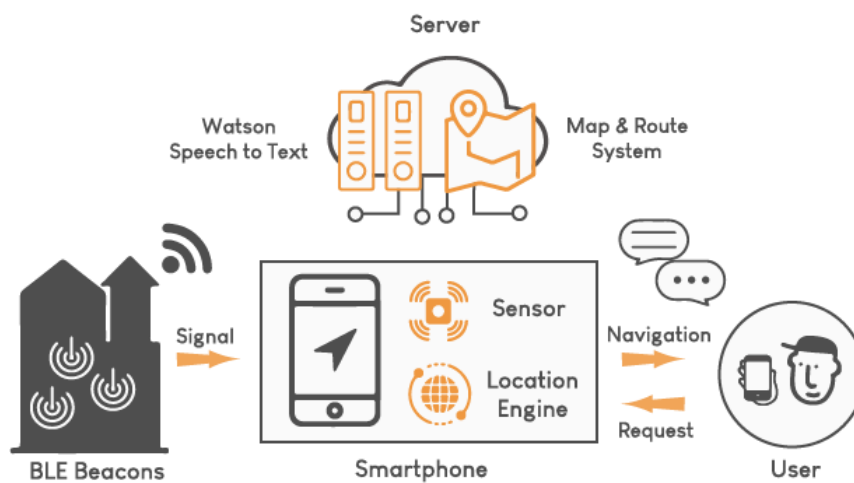


Figura 6. Diagrama ilustrado proyecto NavCoo. (Lab, s.f.)

2.3.3 “FeelGraph”: ejemplo de estudio sobre innovación

“FeelGraph” aporta una novedad en el campo de las tecnologías asistivas, al abordar el reto de traducir la información mostrada en diagramas o gráficos de manera accesible para personas con discapacidad visual. La aplicación facilita el acceso a la información visual y ofrece una nueva forma de interactuar con datos complejos al utilizar una salida táctil y auditiva para representar gráficos. Es importante resaltar la combinación de conocimientos en procesamiento de imágenes y diseño de interfaces para desarrollar tecnologías asistivas mediante este enfoque interdisciplinario.

2.3.4 Visión hacia el futuro: sostenibilidad e integración

El desarrollo de nuevas tecnologías asistivas centradas en la integración y la sostenibilidad se tiene que hacer mirando hacia el futuro. Los desarrollos tienen que estar centrados en su compatibilidad con diferentes tipos de dispositivos, así como en ser accesible para estos.

Es importante fomentar un entorno inclusivo que satisfaga de manera efectiva las necesidades cambiantes de personas con discapacidad visual, la colaboración de investigadores, desarrolladores, usuarios finales y organizaciones enfocadas en la discapacidad visual.

2.3.5 Desafíos y limitaciones de las tecnologías emergentes

A pesar de que la IA y la RA tienen soluciones prometedoras, se enfrentan a desafíos en cuanto a su adopción generalizada, accesibilidad económica y la necesidad de datos de alta calidad. Es necesario un enfoque integral que considere los aspectos técnicos, sociales, éticos y económicos para asegurar que los avances tecnológicos beneficien de manera justa a todos los usuarios.

Las tecnologías asistivas para la accesibilidad visual están en un punto crucial de evolución, con el potencial de transformar completamente la interacción de las personas con discapacidad visual con el mundo digital. El desarrollo de "FeelGraph" ejemplifica cómo la innovación puede cubrir las brechas existentes en accesibilidad, destacando así la importancia de seguir explorando y expandiendo los límites de lo posible en este campo crucial.

Capítulo 3 - Captura de requisitos.

La captura de requisitos es un paso fundamental en el desarrollo de una aplicación de gráficos accesibles. En este capítulo, se explica la forma en la que se han recopilado y analizado los requisitos y necesidades de los usuarios finales para poder diseñar una solución funcional e inclusiva. Este capítulo explora las múltiples caras y desafíos de desarrollar una tecnología accesible que responda a las necesidades reales de los usuarios, utilizando un enfoque metodológico que incluye entrevistas y colaboraciones directas.

3.1 Entrevista a persona invidente

Como parte fundamental de la investigación y recolección de requisitos, se ha llevado a cabo una entrevista exhaustiva con un usuario que tiene discapacidad visual. El objetivo de esta entrevista era comprender las necesidades específicas de accesibilidad y funcionalidad del usuario para garantizar que la aplicación no solo sea funcional, sino completamente accesible para todas las personas con discapacidades visuales. A continuación, se muestra la transcripción de la entrevista, que ha sido crucial para orientar las decisiones de diseño y desarrollo del proyecto.

- *Entrevistador:* Me gustaría saber primero qué tipo de discapacidad visual tienes. ¿Tienes ceguera parcial o total?
- *Usuario:* Estoy totalmente ciega.
- *Entrevistador:* ¿Utilizas algún tipo de tecnología de accesibilidad que te ayude a usar tu dispositivo móvil?
- *Usuario:* Utilizo los lectores de pantalla integrados, como TalkBack en mi dispositivo Android y a veces VoiceOver cuando utilizo iPhone. Otro dispositivo comúnmente utilizado por las personas que disponen de una discapacidad auditiva, son las líneas Braille que se conectan por Bluetooth para interactuar con el contenido de la pantalla.

- *Entrevistador:* Comprendo, por lo tanto, es fundamental que mi aplicación sea compatible con estos lectores de pantalla y la línea Braille. ¿Principalmente, qué tipo de gráficos necesitas que la aplicación interprete?
- *Usuario:* La interpretación de gráficos ya digitalizados sería perfecta para la aplicación, ya que principalmente nuestros profesores nos pasan el material educativo en formato digital para que nos resulte más sencillo su lectura mediante las tecnologías que te he comentado anteriormente.
- *Entrevistador:* Estupendo, nos enfocaremos en los gráficos digitales. Ahora, ¿cómo consideras que se debería transmitir la salida cuando la pantalla es tocada?
- *Usuario:* Creo que es buena idea que la retroalimentación se transmita mediante vibraciones o sonidos, que el usuario pueda elegir cuál de las dos opciones le conviene más. Es fundamental que estas alertas puedan ajustarse en intensidad o tipo de acuerdo con la información del gráfico, como un gráfico ascendente o descendente. Y muy importante es que los gráficos no contengan información que pueda distraer, es decir, como texto o similares.
- *Entrevistador:* ¿Tienes preferencia por algún tipo concreto de gráfico, como barras, líneas o sectores?
- *Usuario:* Inicialmente, todos son útiles, pero el gráfico de líneas es el que más utilizamos.
- *Entrevistador:* Entendido. ¿Crees que sería una buena idea incorporar un módulo de configuración para que el usuario pueda controlar la intensidad de la vibración o el volumen del sonido?
- *Usuario:* Es una idea excelente, de esta manera la aplicación se ajustaría a las necesidades específicas de cada usuario.
- *Entrevistador:* Estupendo, contamos con una sólida base para iniciar el desarrollo. ¿Tiene algo más que consideres necesario incluir o algún otro requisito esencial?

- *Usuario*: Pienso que eso incluye todo lo fundamental. Es importante garantizar que todas estas funciones sean accesibles y que funcionen de manera integrada con las tecnologías que utilizamos.
- *Entrevistador*: Estupendo, agradezco tu tiempo y por compartir estos detalles tan importantes. Se hará todo lo posible por integrar todos estos requisitos en la aplicación.

3.2 Conclusiones y requisitos

Tras la entrevista detallada para capturar los requisitos de la aplicación a desarrollar, se han extraído conclusiones valiosas y definido requisitos específicos que orientarán el desarrollo de la solución. A continuación, se presentan las principales conclusiones y los requisitos identificados a partir de la interacción con el usuario con discapacidad visual.

Conclusiones

1. Compatibilidad con tecnología de asistencia. La compatibilidad con tecnologías de asistencia ampliamente utilizadas, como VoiceOver para iOS y TalkBack para Android, así como dispositivos de línea Braille, es crucial para la aplicación.
2. Diversidad en la transmisión de información. Tener múltiples formas de recibir información es apreciado por los usuarios con discapacidades visuales y auditivas. La necesidad de incluir tanto sonidos como vibraciones para transmitir los datos de los gráficos se destaca con esto.
3. Precisión en la presentación de datos gráficos. Es esencial que la aplicación pueda interpretar y describir gráficos digitalizados de forma efectiva para usuarios con ceguera total o visión muy limitada, sin depender de la interacción visual directa.
4. Personalización de la experiencia de usuario. Los usuarios aprecian la capacidad de regular la intensidad de las vibraciones y el volumen de los sonidos para personalizar la aplicación según sus necesidades y preferencias personales.

Requisitos

- Interpretación de gráficos digitalizados. La capacidad de la aplicación debe incluir el reconocimiento e interpretación automática de gráficos en formatos digitales.
- Opciones de salida de información. Desarrollo de métodos para la transmisión de información mediante sonidos y vibraciones, lo que brinda a los usuarios la opción de personalizar cómo desean recibir los datos.
- Diferenciación de elementos gráficos. Desarrollar un sistema que emplee cambios en los sonidos o vibraciones para distinguir entre distintos tipos de componentes del gráfico.
- Compatibilidad total con lector de pantalla y línea Braille. Garantizar que todos los elementos de la aplicación sean accesibles mediante lectores de pantalla y líneas Braille, verificando su compatibilidad a través de pruebas.
- Configuración personalizable de salida. Agregar ajustes a la aplicación para que los usuarios puedan adaptar la intensidad de las vibraciones y el volumen de los sonidos según sus preferencias y necesidades específicas.

Capítulo 4 - Diseño e implementación

En este capítulo se trata el diseño e implementación de la aplicación "FeelGraph" que tiene como objetivo convertir los conceptos y requisitos detallados en los capítulos anteriores en una solución tecnológica funcional y accesible. El principal enfoque ha sido diseñar una interfaz de usuario clara y accesible, integrar características interactivas adaptadas a las necesidades específicas de los usuarios con discapacidad visual y garantizar la compatibilidad de todos los componentes de la aplicación con tecnologías asistivas. Durante este capítulo, se explicarán las etapas de diseño y desarrollo, resaltando las decisiones técnicas y soluciones utilizadas para crear una herramienta que mejore notablemente la interacción de los usuarios con información gráfica a través de retroalimentación táctil y auditiva.

4.1 Diseño de la aplicación

En el apartado de diseño de la aplicación, se expone la disposición general del sistema, los elementos principales que permiten que la aplicación funcione y la forma en que interactúa con el usuario. También se describe el diseño de la interfaz de usuario, abordando la disposición visual, la navegación y las adaptaciones específicas que garantizan la compatibilidad con estándares de accesibilidad y usabilidad.

4.1.1 Arquitectura del sistema

Este apartado describe la estructura general del sistema desarrollado. La arquitectura facilita el entendimiento del flujo de trabajo, así como la interacción de los componentes del sistema, y garantiza el cumplimiento de los requisitos previamente definidos en capítulos anteriores, tanto en accesibilidad como funcionalidad.

En la figura 7 podemos ver un esquema visual de cómo es la arquitectura del sistema.

Componentes principales

- Interfaz de usuario (UI). La interfaz está gestionada principalmente por clases como "MainActivity" y varios fragmentos ("WelcomeFragment", "SelectionFragment", "PrincipalFragment", "SelectionFragment") y ha sido diseñada para ser intuitiva y accesible, permitiendo a los usuarios interactuar eficazmente con la aplicación mediante lectores de pantalla y dispositivos de línea Braille.

A su vez, se han incluido controles adaptativos para ajustar tanto la intensidad de las vibraciones como el volumen de los sonidos.

- Módulo de procesamiento de gráficos. Este módulo está compuesto por clases como "ImageProcessor" e "ImageHandler", siendo este responsable de la carga, análisis y procesamiento de los gráficos digitales cargados en la aplicación. Se emplean algoritmos avanzados para analizar y extraer datos clave de los gráficos, facilitados por utilidades como "PdfUtils", que preparan los documentos para su análisis.
- Gestor de salida auditiva y táctil. Las clases "SoundManager" y "VibrationManager" son responsables de transformar la información visual de los gráficos en señales sonoras y vibraciones distintivas. Este módulo permite la personalización de diversas preferencias y necesidades de los usuarios.

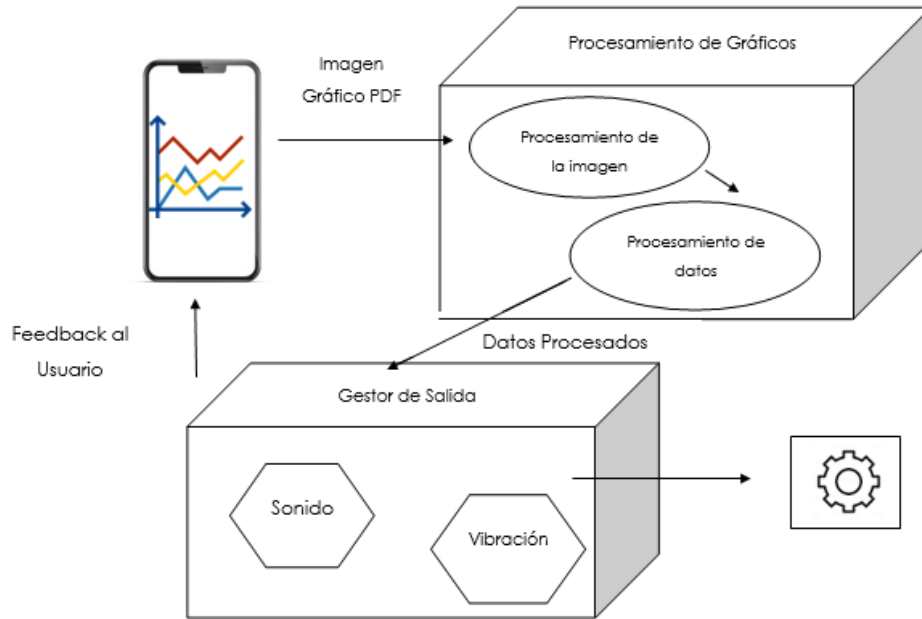


Figura 7. Arquitectura del sistema.

Flujos de trabajo.

- Carga y análisis de gráficos. Los gráficos son subidos por los usuarios en formato PDF a través de la interfaz, luego el módulo de procesamiento de gráficos los procesa para identificar y extraer datos relevantes.
- Transmisión de datos. Después de procesar los datos, el gestor de salida auditiva y táctil recibe la información y la convierte en el formato de salida elegido por el usuario (sonido o vibración).
- Interacción del usuario. Los usuarios reciben la retroalimentación en tiempo real y pueden ajustar las configuraciones de salida según sus preferencias personales al interactuar con la aplicación, facilitado por un sistema de control centralizado en "SettingsFragment".

La arquitectura ha sido diseñada de manera resistente y adaptativa, permitiéndose así futuras modificaciones siguiendo los avances de las tecnologías de accesibilidad y las necesidades de los usuarios.

El diagrama de clases de "FeelGraph" que se muestra en la Figura 8, ilustra cómo interactúan las diferentes clases que componen la aplicación. Este diagrama es esencial para entender la integración y el funcionamiento de los distintos módulos:

- ImageHandler e ImageProcessor: se encargan del procesamiento avanzado de imágenes, desde convertir PDF hasta mostrar los gráficos finales.
- PdfUtils: ayuda a convertir PDF en bitmap, un paso importante para procesar gráficos.
- PrincipalFragment: se desempeña como el gestor de la interfaz de usuario, manejando las interacciones principales.
- SoundManager y VibrationManager: se ofrecen métodos para transformar la información visual en retroalimentación auditiva y táctil.

Este diagrama aclara de qué manera cada clase contribuye a la funcionalidad general de la aplicación y apoya la accesibilidad y usabilidad del sistema.

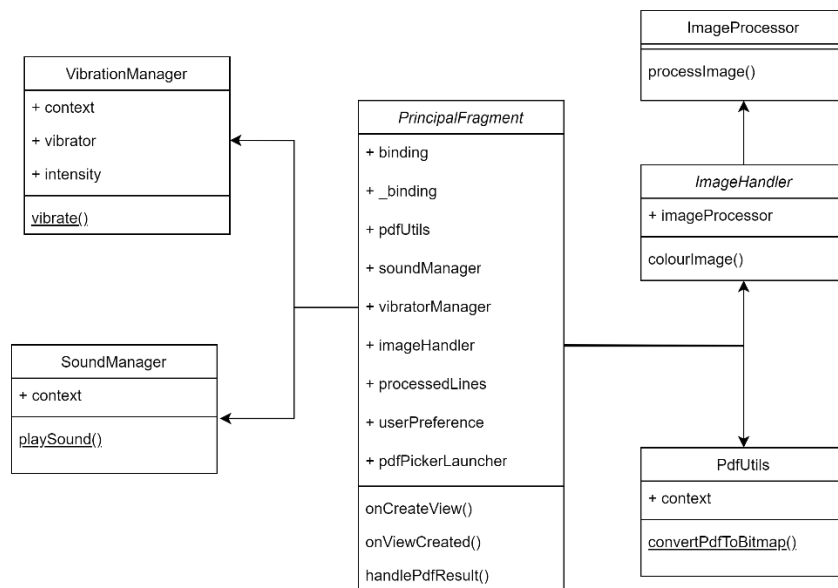


Figura 8. Diagrama de clases de la aplicación.

4.1.2 Diseño de la interfaz de usuario (UI)

El diseño de la aplicación se ha centrado en la accesibilidad. Todas las interfaces de usuario cumplen con los estándares WCAG 2.0, brindando así la mejor experiencia a los usuarios. Todos los elementos han sido elegidos persiguiendo la legibilidad y la facilidad de uso.

- **Colores.** Los colores elegidos mantienen un alto contraste. El fondo naranja (#FFA500) y el elemento en azul oscuro (#000080) proporcionan un ratio de contraste de 8.11:1, cumpliendo así las recomendaciones mínimas de WCAG 2.0 para el contraste visual.
- **Tipografía.** La fuente "Sans-serif" ha sido la elegida debido a su legibilidad en pantallas digitales. La ajustabilidad del tamaño de la fuente permite adaptarse a diferentes necesidades visuales, lo que hace que la lectura sea más fácil para los usuarios.
- **Compatibilidad con lectores de pantalla.** Se han provisto descripciones de texto detalladas para todos los componentes interactivos y visuales. Esto abarca botones, imágenes y cualquier otro componente de la interfaz. Al interactuar con la aplicación, un toque simple sobre cualquier elemento interactivo permite a los usuarios recibir una descripción audible del mismo, explicando su función. El usuario debe realizar un doble toque, para ejecutar la acción asociada a ese elemento. Este método de interacción garantiza que los usuarios con discapacidad visual puedan navegar e interactuar eficientemente con la aplicación, proporcionándoles una experiencia de usuario coherente y accesible.

4.1.2.1 Mapa de navegación

El mapa de navegación, véase la Figura 9, muestra la estructura y el flujo intuitivo de la aplicación. En este mapa visual se detalla cómo los usuarios transitan entre las diversas pantallas, garantizando una experiencia de usuario coherente y accesible.

- WelcomeFragment: muestra la pantalla de bienvenida desde donde los usuarios inician su interacción con la aplicación.
- SelectionFragment: los usuarios eligen entre los distintos modos de retroalimentación (vibración o sonido), destacando la personalización de la experiencia.
- PrincipalFragment: lugar principal donde los usuarios interactúan directamente con los gráficos, analizan y exploran los datos.
- SettingsFragment: proporciona opciones extra para personalizar la intensidad de la vibración y el sonido, mejorando así la accesibilidad y experiencia del usuario.

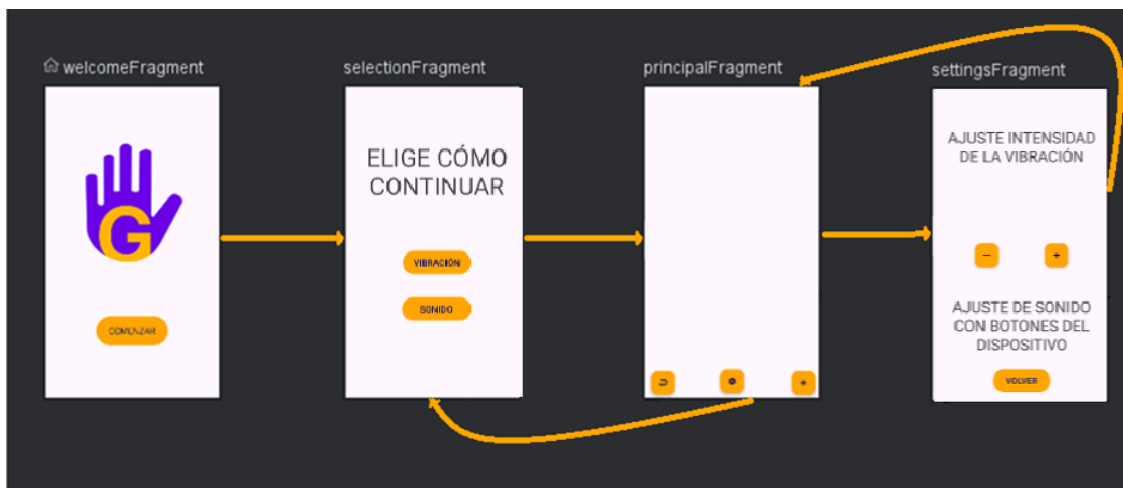


Figura 9. Mapa de navegación de la aplicación.

4.1.2.2 Interfaz de bienvenida

La interfaz de bienvenida de “FeelGraph”, ilustrada en la Figura 10, es una interfaz accesible y amigable que cuenta con un diseño limpio y con colores de alto contraste, garantizando así que todos los usuarios puedan comenzar su experiencia sin importar sus habilidades visuales.

El usuario se encuentra con el botón de “COMENZAR”, el cual es visible y accesible e invita a los usuarios a interactuar con la aplicación.

“FeelGraph” se compromete con la accesibilidad y la inclusión universal, demostrado por el hecho de que esta pantalla está completamente adaptada para su uso con lectores de pantalla.



Figura 10. Interfaz de bienvenida a la aplicación.

4.1.2.3 Interfaz de selección del modo de retroalimentación

La interfaz de selección del modo de retroalimentación permite a los usuarios seleccionar entre “Vibración” y “Sonido”, el modo que más se ajusta a sus preferencias.

El usuario se encuentra con dos botones, véase la Figura 11, los cuales disponen de colores contrastados, así como de una posición adecuada para su correcta selección. La aplicación garantiza la comprensión inmediata de cada opción al etiquetarlas claramente y asegura su accesibilidad mediante el soporte para lectores de pantalla.



Figura 11. Interfaz de selección del modo de retroalimentación.

4.1.2.4 Interfaz de interacción con el gráfico

La interfaz de interacción con el gráfico, mostrada en la Figura 12, tiene como objetivo proporcionar una sencilla visualización del gráfico, así como maximizar la accesibilidad.

Las líneas del gráfico identificadas son representadas con diferentes colores, según la tendencia de la línea. Esta opción permite a los usuarios con visión reducida una ayuda en la identificación de las líneas. Los colores elegidos cumplen con los estándares de accesibilidad WCAG para contrastes apropiados y garantizan una legibilidad excelente.

Los controles de la interfaz tienen un tamaño y posición adecuados, asegurando una manipulación sencilla del gráfico. También, todos los elementos de la interfaz son totalmente compatibles con lectores de pantalla, ofreciendo descripciones textuales claras para cada elemento y control.

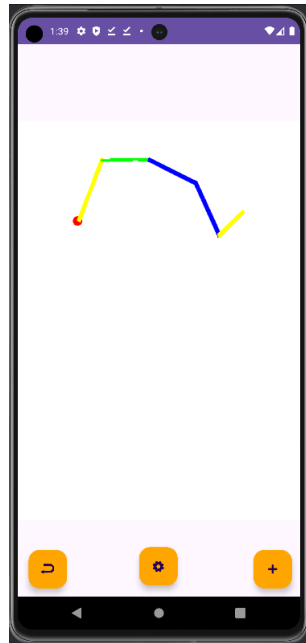


Figura 12. Interfaz de interacción con el gráfico.

4.1.2.5 Interfaz de configuración

La Figura 13 muestra la interfaz de configuración, la cual fue diseñada para garantizar que la personalización de las preferencias de retroalimentación, vibración o sonido, sea accesible y eficiente.

La pantalla cuenta con unos botones que ajustan la intensidad de vibración, siendo estos diseñados de manera que faciliten la tarea. A su vez, los usuarios tienen la posibilidad de controlar el volumen de audio, haciendo uso de los controles físicos del dispositivo.

Como en las demás interfaces, todos los elementos están completamente disponibles a través de descripciones detalladas y claras, lo cual ayuda a usuarios que utilizan tecnologías de asistencia.



Figura 13. Interfaz de configuración de la retroalimentación.

4.1.3 Diseño de los módulos funcionales

“FeelGraph” se enfoca en garantizar que los gráficos puedan ser transformados eficazmente a formatos accesibles para personas con discapacidad visual, al diseñar sus módulos funcionales. Cada módulo está destinado a gestionar aspectos concretos de este proceso, desde la introducción de datos hasta la interacción final del usuario. A continuación, se detallan los módulos principales y su funcionalidad:

Módulo de carga de documentos PDF.

El paso inicial de los usuarios es la carga de los documentos PDF con los gráficos. Este paso es fundamental, ya que permite a los usuarios transformar esos documentos en formatos accesibles. El módulo, que es accesible con tecnologías asistivas, se ha diseñado con el objetivo de permitir a los usuarios la navegación y elección de archivos de forma independiente.

La Figura 14 muestra las dos funcionalidades clave del módulo.

- Selección de archivo. La interfaz intuitiva ayuda a los usuarios a encontrar y elegir el archivo PDF que deseen en su dispositivo.

- Carga de archivo. Después de seleccionar un archivo, este se carga en el sistema para ser procesado. El proceso es administrado por la API "ActivityResultContracts.GetContent", lo que garantiza un manejo adecuado de los permisos y el acceso a archivos.

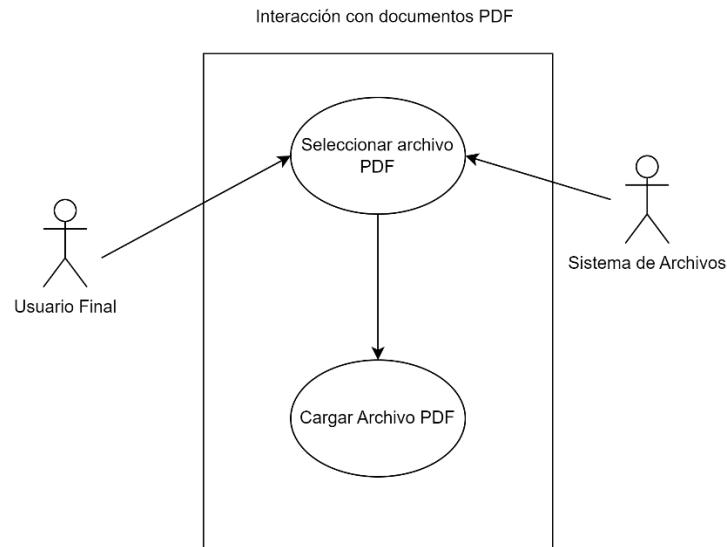


Figura 14. Diagrama de caso de uso del módulo de carga de documentos PDF.

Después de cargar el archivo, este módulo pasa el control al siguiente, el módulo de procesamiento de gráficos. Este módulo garantiza que la carga del archivo se procese sin problemas, manteniendo el flujo de trabajo eficiente.

Es importante que este módulo opere correctamente para prevenir fallos en la carga de documentos que puedan afectar la transformación de gráficos a formatos accesibles.

Módulo de procesamiento de gráficos.

La transformación de los gráficos en documentos PDF a un formato analizable y accesible es fundamental para este módulo. Justo después de la carga de los documentos, este módulo opera para extraer y procesar la información visual crítica que será utilizada posteriormente.

La Figura 15 muestra las funcionalidades principales del módulo, así como interactúan entre ellas:

- Conversión de gráficos. Una vez que el documento PDF ha sido cargado, se utiliza la clase "PdfRenderer" para transformar cada página del documento en imágenes bitmap. Este paso es esencial para poder descomponer el contenido gráfico del formato PDF.
- Procesamiento de imágenes. Utilizando el gestor correspondiente, el módulo hace uso de diferentes técnicas de procesamiento de imágenes a través de "OpenCV". Esto significa convertir las imágenes a escala de grises para simplificar el análisis, aplicar un filtro gaussiano para disminuir el ruido, mejorar la calidad de detección de bordes, y utilizar el algoritmo de Canny para lograr una detección precisa de bordes.
- Preparación de datos para retroalimentación. Después de la fase inicial de procesamiento, el módulo prepara los datos para su uso en la generación accesible de retroalimentación, como sonido o vibración. En esta paso, se eliminan los ejes que no son necesarios y se simplifican los gráficos para resaltar únicamente la información esencial.

Después de analizar los gráficos, los datos obtenidos se trasladan al módulo de salida auditiva y táctil con el fin de generar una representación fácil y accesible para los usuarios.

Es fundamental que el módulo opere de manera precisa y eficiente para evitar errores en la interpretación de los datos. Este componente es una pieza fundamental en la aplicación, ya que convierte los datos visuales en formatos accesibles y comprensibles por usuarios con discapacidad visual.

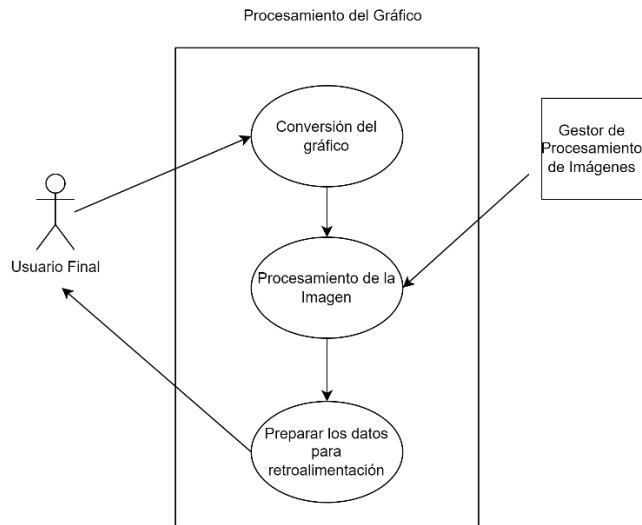


Figura 15. Diagrama de caso de uso del módulo de procesamiento de gráficos.

Módulo de exploración y salida táctil/auditiva.

Este módulo es crucial para interactuar con los gráficos transformados, lo que permite a los usuarios explorar y comprender los datos mediante retroalimentación multisensorial. Comienza con la identificación del punto de partida en el gráfico y se complementa con una salida detallada que mejora la experiencia sensorial del usuario. Las funcionalidades principales del módulo se observan en la Figura 16, así como su interacción entre ellas.

- Exploración del gráfico. Los usuarios deben identificar el punto de inicio. Este es el primer paso para entender la estructura y orientación del gráfico. Una vez que el punto de inicio ha sido encontrado, los usuarios pueden explorar e interactuar con los elementos del gráfico para obtener información sobre él.
- Retroalimentación auditiva. Mientras los usuarios exploran el gráfico, obtienen retroalimentación sonora que codifica información sobre las líneas, como su inclinación y puntos críticos. Los sonidos cambian según la naturaleza de los datos, dando una capa extra de información a la que se puede acceder sin necesidad de ver.
- Retroalimentación táctil. Además de la retroalimentación auditiva, el módulo proporciona vibraciones que se corresponden con distintas partes del gráfico.

Estas vibraciones mejoran la percepción espacial de los gráficos al ayudar a los usuarios a 'sentir' la forma y el movimiento de las líneas.

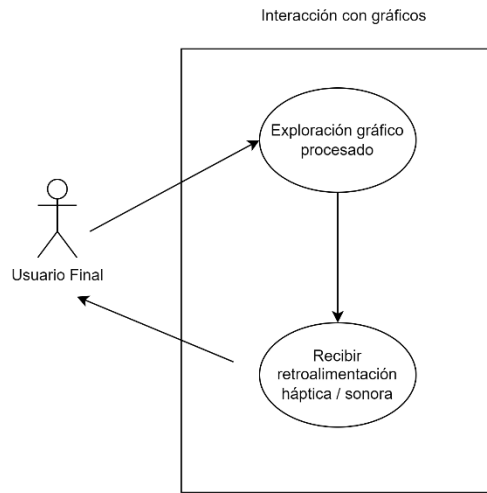


Figura 16. Diagrama de casos de uso del módulo de exploración y salida táctil/auditiva.

El módulo sirve de enlace entre la identificación del gráfico procesado y la interacción efectiva del usuario, permitiendo un flujo de trabajo continuo desde el análisis inicial hasta entenderlo detalladamente a través de señales auditivas y táctiles. Este diseño asegura que los usuarios puedan no solo visualizar gráficos, sino también recibir información continua y adaptada a sus necesidades sensoriales para lograr una experiencia de aprendizaje enriquecedora y acceso fácil a la información.

Módulo de personalización de configuraciones.

Este módulo ofrece a los usuarios la posibilidad de adaptar la aplicación a su gusto al permitirles personalizar los modos de retroalimentación.

El diagrama de caso de uso que se muestra en la Figura 17, detalla cómo los usuarios interactúan con el módulo.

El módulo está diseñado para ser intuitivo y accesible, desde la selección de ajustes hasta la aplicación efectiva de estos cambios. El módulo cuenta con las siguientes funcionalidades clave:

- Ajustar el volumen de audio. El usuario puede subir o bajar el volumen del sonido de acuerdo a sus necesidades personales.

- Ajustar la intensidad de vibración. Los usuarios pueden adaptar la intensidad de la retroalimentación táctil. Esta sección es necesaria para aquellos usuarios que dependen del tacto para una mejor interpretación gráfica.
- Aplicar configuración. Una vez realizados los cambios en la configuración, estos se aplican y se guardan, teniendo un impacto inmediato en la experiencia de los usuarios con la aplicación.

Los controles claros y accesibles de la interfaz responden eficientemente a las interacciones del usuario, permitiendo una fácil navegación entre ajustes de volumen y vibración.

Las preferencias de configuración de cada usuario se guardan automáticamente, asegurando que sus personalizaciones se mantengan entre sesiones sin necesidad de ajustes constantes.

La personalización contribuye a mejorar la accesibilidad y usabilidad de "FeelGraph", reflejando el esfuerzo de la aplicación por adaptarse a las necesidades del usuario.

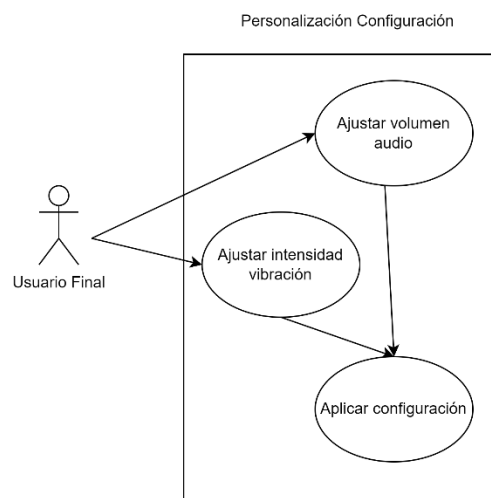


Figura 17. Diagrama de uso del módulo de personalización de configuraciones.

4.2 Desarrollo e implementación

En este apartado se presenta el desarrollo e implementación de "FeelGraph", transformando conceptos y planes detallados en una solución tecnológica concreta que responde a las necesidades de los usuarios. Durante este proceso, se dieron forma a las especificaciones y diseños en funciones reales y componentes interactivos. Se ha elegido Android Studio y Kotlin por su robustez y capacidad de adaptación, ideales para crear aplicaciones accesibles y funcionales, en la construcción del software. Los esfuerzos se centraron en desarrollar una interfaz clara y fácil de usar, así como en integrar características específicas para mejorar la interactividad y usabilidad, además de ser compatible con las herramientas asistivas disponibles.

4.2.1 Implementación del módulo de carga de documentos PDF

La aplicación está diseñada para permitir a los usuarios acceder a información gráfica presentada en documentos PDF. Este proceso se divide en varias etapas clave: la carga del documento, extracción de gráficos y procesamiento de la imagen para hacerla accesible.

El paso inicial es la carga de documentos PDF almacenados en sus dispositivos por parte del usuario. Este paso incluye un diálogo de selección de archivos, el cual es completamente accesible mediante tecnologías asistivas, asegurando la capacidad de los usuarios para desplazarse y seleccionar el archivo de manera autónoma.

La API "ActivityResultContracts.GetContent" maneja la carga de archivos, así como los resultados de actividades como la selección de archivos, como se muestra en la Figura 18. Cuando se elige un archivo, el sistema obtiene una URL que indica la ubicación del archivo seleccionado.

```
private val pdfPickerLauncher : ActivityResultLauncher<String!> =
    registerForActivityResult(ActivityResultContracts.GetContent()) { uri: Uri? ->
        uri?.let { it: Uri
            handlePdfResult(it) }
        }
}
```

Figura 18. Fragmento de código. Carga de documentos PDF.

4.2.2 Implementación del módulo de procesamiento de gráficos

4.2.2.1 Extracción y conversión de gráficos

Una vez se ha cargado el PDF, se debe convertir las páginas del PDF en imágenes bitmap. Para realizar esta conversión se utilizan una serie de bibliotecas y algoritmos de procesamiento de imágenes.

Después de obtener la URL del archivo PDF seleccionado, se emplea un PdfRenderer para abrir y representar visualmente cada página del PDF como un objeto bitmap.

Convertir los datos vectoriales de PDF a un formato de imagen rasterizada es parte del proceso, y luego se procesan para el análisis del gráfico. Este paso es esencial para la preparación del documento antes de ser procesado por imagen, en el cual será analizado y se identificarán los gráficos contenidos. Detalles de este proceso, se observan en la Figura 19.

```
fun convertPdfToBitmap(pdfUri: Uri): Bitmap? {
    return try{
        context.contentResolver.openFileDescriptor(pdfUri, mode: "r")?.use { parcelFileDescriptor ->
            PdfRenderer(parcelFileDescriptor).use { pdfRenderer ->
                val page: PdfRenderer.Page = pdfRenderer.openPage(index: 0)
                val bitmap:Bitmap = Bitmap.createBitmap(page.width, page.height, Bitmap.Config.ARGB_8888)
                page.render(bitmap, destClip: null, transform: null, PdfRenderer.Page.RENDER_MODE_FOR_DISPLAY)
                page.close()
                bitmap ^use
            }
        }
    }
}
```

Figura 19. Fragmento de código. Conversión de gráficos.

4.2.2.2 Procesamiento de la imagen

Después de que las páginas del PDF se convierten en imágenes bitmap, la aplicación utiliza la biblioteca "OpenCV" para aplicar una serie de técnicas de procesamiento de imágenes.

- Conversión a escala de grises. Convertir la imagen RGB a escala de grises es la primera etapa del procesamiento de imágenes. En esta fase, se procesa solo la intensidad de la luz en lugar de los componentes de color, reduciendo así la complejidad computacional para las siguientes operaciones.

- Filtrado gaussiano para eliminación de ruido. Se aplica un filtro gaussiano para mejorar la calidad de detección de bordes. Durante la detección de bordes, es crucial obtener líneas claras y precisas, para lo cual este filtro suaviza la imagen y reduce el ruido y las distorsiones.
- Detección de bordes usando el algoritmo de Canny. Identificar bordes con gran precisión es fundamental para el posterior proceso de reconocimiento de líneas y formas en los gráficos, por lo que este algoritmo es particularmente eficaz.
- Detección de líneas con la transformada de Hough. La transformada se aplica para identificar las líneas en la imagen. La técnica es una versión adaptada de la transformada de Hough clásica, lo que facilita la detección más eficiente de segmentos de línea al identificar características lineales representativas en los gráficos presentes en los documentos.

Estas técnicas se detallan en la Figura 20:

```

fun processImage(bitmap: Bitmap): List<Line>{
    //Convierte a escala de grises
    val mat :Mat = convertBitmapToGrayscaleMatHandlingTransparency(bitmap)
    //Eliminación de ruido mediante filtro gaussiano
    Imgproc.GaussianBlur(mat, mat, Size( width: 5.0, height: 5.0), sigmaX: 0.0)
    //Detectar bordes
    Imgproc.Canny(mat, mat, threshold1: 50.0, threshold2: 150.0)
    //Detección de líneas con HoughLinesP
    val líneas = Mat()
    Imgproc.HoughLinesP(mat, líneas, rho: 1.0, theta: Math.PI / 360, threshold: 15, minLineLength: 20.0, maxLineGap: 10.0)
}

```

Figura 20. Fragmento de código. Procesamiento de la imagen.

La eliminación de los ejes X e Y es uno de los aspectos críticos del procesamiento gráfico. Realizar esta operación es importante no solo para simplificar la visualización y hacerla más accesible para los usuarios, sino también para permitir una interpretación clara y directa de la información gráfica sin distracciones innecesarias.

Al suprimir los ejes, los usuarios pueden concentrarse solamente en las tendencias y patrones de los datos, lo cual es crucial para comprender de manera efectiva y autónoma el contenido gráfico.

Se utilizan técnicas avanzadas para identificar y eliminar los ejes del gráfico en el proceso de eliminación, como se muestran en la Figura 21. Mediante la detección de bordes y la transformada de Hough, primero se encuentran todas las posibles líneas en la imagen, lo que resulta en la detección duplicada de cada eje: una para cada borde del mismo debido a la naturaleza del algoritmo de detección de bordes.

La aplicación implementa un método específico para abordar este desafío, que verifica la duplicidad en la detección y las partes del gráfico que están sobre alguno de los ejes y elimina estas líneas redundantes. Se elimina doblemente cada eje detectado para asegurarse de que no queden trazas que puedan interferir con la interpretación de los gráficos por parte del usuario.

```
private fun filterAxis(lines: List<Line>): List<Line>{  
  
    //Ejes formados por doble linea  
    val notYAxis :List<Line> = excludeYAxis(lines)  
    val notAxis :List<Line> = excludeAxesLines(notYAxis)  
  
    val xAxis :Line? = identifyXAxis(notAxis)  
  
    val listPoints :List<Point> = findIntersectionPoints(notAxis, xAxis, threshold: 10.0)  
    val intersectionPoints :List<Point> = filterCloseIntersectionPoints(listPoints, distanceThreshold: 10.0)
```

Figura 21. Fragmento de código. Eliminación de los ejes.

La ilustración detallada del procesamiento de imágenes utilizado en “FeelGraph” se muestra en la Figura 22. Este collage visual muestra las etapas clave que transforman el gráfico desde su forma original hasta el resultado final apto para análisis: visualización del gráfico en su forma original (a); conversión a escala de grises y aplicación de un filtro gaussiano para reducir el ruido (b); detección de bordes mediante el algoritmo de Canny (c); identificación de las líneas utilizando la transformada de Hough (d); eliminación de los ejes para centrarse en los datos pertinentes (e); finalización y visualización de los datos (f).

Cada imagen en la figura ilustra claramente cómo cada paso impacta al gráfico, haciendo la visualización más simple y mejorando su accesibilidad para el análisis de los usuarios.

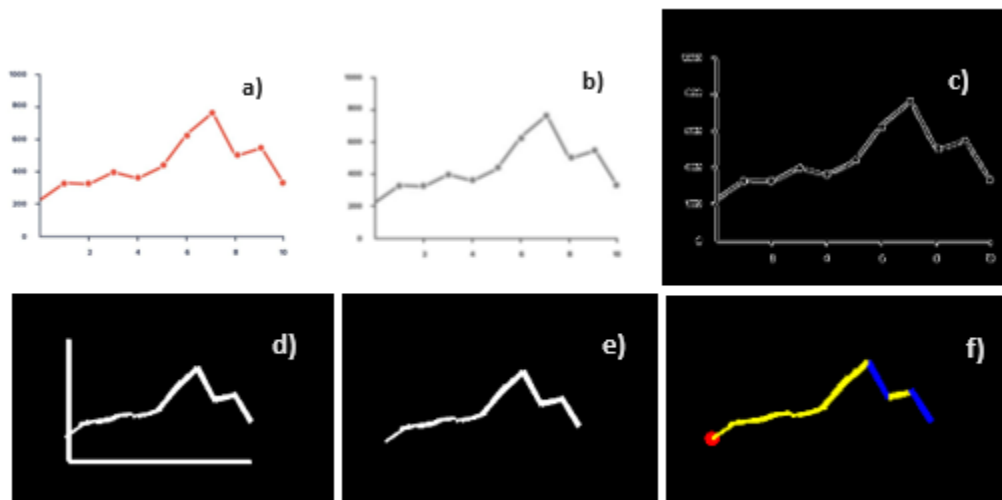


Figura 22. Etapas del procesamiento de imágenes.

4.2.3 Implementación del módulo de exploración y salida táctil/auditiva

4.2.3.1 Exploración del gráfico procesado

“FeelGraph” optimiza la experiencia de usuario mediante dos estados principales de interacción: buscar el punto de inicio e interactuar con las líneas del gráfico. Estos estados facilitan la comprensión de estructuras y datos complejos al permitir a los usuarios navegar e interpretar gráficos de manera intuitiva y accesible.

El punto de inicio de un gráfico es crucial para entender la orientación y la estructura de los datos. La app utiliza algoritmos para identificar automáticamente este punto una vez que el gráfico es procesado.

El punto de inicio se calcula usando técnicas de análisis de imagen para identificar ya sea el origen geométrico o el punto más bajo a la izquierda. Los detalles del código para localizar el punto de inicio se muestran en la Figura 23. Este punto sirve como un punto de referencia crucial para todos los análisis de datos del gráfico que siguen.

```

fun findStartOfGraph(lines: List<Line>): Point? {
    return lines.minByOrNull { it.p1.x }?.p1
}

```

Figura 23. Fragmento de código. Localización del punto de inicio.

Una vez que el punto de inicio es encontrado, los usuarios pueden interactuar con las líneas del gráfico. “FeelGraph” clasifica estas líneas según sean ascendentes, descendientes u horizontales, utilizando distintos patrones de retroalimentación sensorial para cada tipo.

“FeelGraph” tiene la capacidad de detectar con precisión si un toque del usuario ocurre cerca de una línea del gráfico. Para llevar a cabo este proceso, se utilizan técnicas de geometría computacional, que calculan la distancia más corta entre el punto tocado y la línea más cercana. Este método garantiza una retroalimentación precisa y relevante.

La proximidad se calcula en la aplicación al proyectar el punto de contacto sobre el vector que define cada línea detectada, véase la Figura 24. Si la distancia entre el punto de toque y la línea proyectada es inferior a un umbral predefinido, se clasifica como “cerca” el toque.

```

fun isTouchNearLine(touchX: Float, touchY: Float, line: Line, view: View, imageView: ImageView): Boolean {
    val touchPoint :PointF = transformTouchToBitmapCoordinates(touchX, touchY, view, imageView)
    val start :Point = line.p1
    val end :Point = line.p2
    val dx :Double = end.x - start.x
    val dy :Double = end.y - start.y
    val lengthSquared :Double = dx * dx + dy * dy

    // Asegurate de que la longitud al cuadrado no sea cero para evitar división por cero
    if (lengthSquared == 0.0) {
        // La línea es un punto; usa un cálculo de distancia punto a punto
        val distanceToPoint :Double = sqrt(x: (start.x - touchPoint.x) * (start.x - touchPoint.x) + (start.y - touchPoint.y) *
        return distanceToPoint <= 20f
    }
}

```

Figura 24. Fragmento de código. Detección del toque cerca de las líneas.

La clasificación de las líneas es realizada mediante el cálculo de su pendiente. Para esta operación se tienen en cuenta los puntos de inicio y fin de la línea. Este método destaca las características de la línea e indica qué tipo de retroalimentación se debe aplicar.

La clasificación de las líneas según su pendiente se muestra en la Figura 25.

```
fun getLineTypeBasedOnSlope(line: Line): LineType {
    val slope :Double = if (line.p2.x != line.p1.x) {
        (line.p2.y - line.p1.y) / (line.p2.x - line.p1.x)
    } else {
        Double.POSITIVE_INFINITY
    }

    return when {
        slope > 0 -> LineType.DECENDING
        slope == 0.0 -> LineType.HORIZONTAL
        else -> LineType.ASCENDING
    }
}
```

Figura 25. Fragmento de código. Clasificación de las líneas del gráfico.

4.2.3.2 Implementación de la salida táctil y auditiva

La aplicación ofrece a los usuarios la opción de elegir entre la retroalimentación que más se ajuste a sus preferencias o necesidades específicas, retroalimentación táctil y/o auditiva. Ambas opciones disponen de la posibilidad de ser personalizadas.

A su vez, la aplicación incluye un esquema de colores que distinguen los diferentes tipos de líneas del gráfico. Estos colores han sido elegidos respetando un alto contraste entre el fondo y las líneas detectas, mejorando así la visibilidad de aquellos usuarios con visión reducida. Con esta opción, se potencia la rápida distinción de los datos representados, mejorando así su comprensión.

A continuación, en la Figura 26, se muestra el código desarrollado para la representación de líneas mediante colores:

```
private fun paintGraphLines(bitmap: Bitmap, lines: List<Line>): Bitmap {
    val paintedBitmap :Bitmap = Bitmap.createBitmap(bitmap.width, bitmap.height, Bitmap.Config.ARGB_8888)
    val canvas = Canvas(paintedBitmap)
    canvas.drawBitmap(bitmap, left: 0f, top: 0f, paint: null) // Dibuja el bitmap original en el canvas

    val paintIncreasing :Paint = Paint().apply { this:Paint
        color = Color.YELLOW
    }
}
```

Figura 26. Fragmento de código. Representación líneas mediante colores.

La aplicación ofrece al usuario un sistema de retroalimentación táctil. Este sistema dispone de una serie de patrones de vibración, los cuales son diferentes según la naturaleza de la línea detectada. Gracias a este método, el usuario puede conocer las tendencias de los datos mediante el sentido del tacto. El código de esta funcionalidad se muestra en la Figura 27.

```
fun vibrateForLineType(lineType: LineType) {
    val pattern :LongArray = when(lineType) {
        LineType.ASCENDING -> LongArrayOf(0, 50, 25, 50, 25, 50, 25, 50)
        LineType.DESCENDING -> LongArrayOf(0, 150, 700, 150)
        LineType.HORIZONTAL -> LongArrayOf(0, 200, 200, 200)
    }
    vibrate(pattern, repeat: false)
}
```

Figura 27. Fragmento de código. Retroalimentación táctil.

“FeelGraph” complementa los métodos visual y táctil con una retroalimentación auditiva, que proporciona sonidos distintivos para diferentes tipos de líneas. Los detalles del código se muestran en la Figura 28. Proporcionar descripciones sonoras que reflejen las características de las líneas es esencial para usuarios que dependen principalmente de la audición para interpretar datos.

```

fun playForLineType(lineType: LineType){
    val soundResId :Int = when (lineType) {
        LineType.ASCENDING -> R.raw.fast_intermittent_tone
        LineType.DECENDING -> R.raw.profoundly_slow_intermittent_tone
        LineType.HORIZONTAL -> R.raw.ultra_slow_intermittent_tone
    }
    playSound(soundResId)
}

```

Figura 28. Fragmento de código. Retroalimentación auditiva.

4.2.4 Implementación del módulo de personalización de las configuraciones

“FeelGraph” ofrece a los usuarios una serie de opciones de configuración básicas, donde el usuario puede ajustar la intensidad de vibración según sus preferencias personales, véase la Figura 29. Esta funcionalidad reafirma el objetivo de “FeelGraph” de ser una aplicación accesible y con experiencia de usuario personalizable.

La API “VibrationEffect” disponible en Android es utilizada para controlar la amplitud de las vibraciones.

El valor seleccionado por el usuario escalará la intensidad de la vibración proporcionalmente, lo que permite una personalización entre el 10 % y el 100 % según las preferencias del usuario.

```

private fun vibrate(pattern: LongArray, repeat: Boolean){
    val effect :VibrationEffect! = VibrationEffect.createWaveform(pattern, IntArray(pattern.size) { i ->
        if (i % 2 == 0) 0 else intensity
    }, if (repeat) 0 else -1)
    vibrator.vibrate(effect)
}

```

Figura 29. Fragmento de código. Ajuste intensidad de la vibración.

El código completo del proyecto está disponible en un repositorio GitHub. Se puede acceder a todos los archivos del proyecto en la dirección: <https://github.com/alvaromglez/FeelGraph>

4.3 Resumen de las tecnologías utilizadas

Las tecnologías y herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto fueron cuidadosamente elegidas para una correcta ejecución de este. A continuación, se muestran y detalla la importancia de cada una de ellas:

- Kotlin: elegido como lenguaje de programación, Kotlin ofreció ventajas significativas para este proyecto debido a su interoperabilidad, seguridad y sintaxis concisa, lo que facilita la escritura de un código más limpio y comprensible.
- Android Studio: utilizado como el entorno de desarrollo integrado (IDE), Android Studio proporcionó herramientas esenciales para el diseño de la interfaz de usuario, la gestión del código y las pruebas. Para poder desarrollar y probar la aplicación, se tuvo que integrar el emulador Android y sus herramientas de depuración.
- OpenCV: esta biblioteca de visión por computadora se utilizó para procesar imágenes en la aplicación. Para poder utilizar las operaciones necesarias, como conversión a escala de grises o la detección de bordes, fue necesaria la incorporación de OpenCV
- PdfRenderer: esta API de Android se utilizó para transformar las páginas de documentos PDF en imágenes bitmap, las cuales posteriormente se procesaron para extraer gráficos. La capacidad de manejar documentos PDF directamente dentro de la aplicación fue esencial para la funcionalidad de "FeelGraph".
- ActivityResultContracts: se empleó para gestionar la elección de archivos dentro de la aplicación, lo que facilita a los usuarios cargar documentos PDF desde sus dispositivos.

- MediaPlayer y Vibrator API: se implementó retroalimentación auditiva y táctil en Android mediante estas API. La API MediaPlayer se empleó para reproducir sonidos que denotan distintas características de los gráficos, mientras que Vibrator fue esencial para ofrecer retroalimentación táctil basada en la interpretación de los gráficos.

El uso de este conjunto de tecnologías no solo permitió la implementación técnica del proyecto, sino que también garantizó que "FeelGraph" ofreciera una experiencia accesible y enriquecedora para los usuarios. Cada tecnología desempeñó un papel importante en la creación de una aplicación que convierte eficientemente gráficos visuales a formatos táctiles y auditivos.

Capítulo 5 - Evaluación de la aplicación

Este capítulo expone el procedimiento de evaluación de la aplicación, así como las conclusiones obtenidas. En la evaluación se midieron importantes aspectos, como la usabilidad y efectividad de la aplicación, y se realizó con un usuario y entorno real. El usuario aportó una serie de gráficos reales con los que había estudiado anteriormente. El rendimiento de la aplicación en diferentes escenarios ha sido medido con la evaluación, detectándose a su vez áreas de mejora.

5.1 Diseño de la evaluación

La metodología de evaluación de la aplicación se ha diseñado con el fin de determinar su capacidad para facilitar la interpretación de gráficos a personas con discapacidades visuales, y se evaluará su eficacia en un entorno práctico. Se optó por una estrategia con elementos cuantitativos y cualitativos para garantizar un análisis comprensivo de la experiencia del usuario.

A pesar de que inicialmente se realizaron las pruebas con un solo usuario debido a limitaciones en la disponibilidad y el alcance del proyecto, es importante mencionar que los resultados obtenidos dan una visión preliminar del potencial y las áreas de mejora de la aplicación. Es recomendable llevar a cabo futuras evaluaciones con un número de participantes mayor para validar y mejorar aún más los descubrimientos obtenidos.

En primer lugar, se eligieron varios gráficos que ya habían sido usados por el usuario con discapacidad visual en entornos académicos y laborales. Se han elegido estos gráficos por su diversidad en cuanto a complejidad y tipo de información mostrada, lo que ha permitido evaluar la versatilidad y adaptabilidad de la aplicación en distintas situaciones.

La evaluación se planeó para que se realizara en un entorno controlado, imitando las condiciones usuales de uso que los usuarios podrían enfrentar diariamente. Se estructuró la sesión de evaluación alrededor de tareas específicas que involucraban cargar gráficos, utilizar las funciones de retroalimentación sonora y táctil para navegar por los datos y, luego, interpretar la información presentada.

El participante concluirá la sesión respondiendo a un cuestionario SUS (System Usability Scale), una herramienta estandarizada y reconocida internacionalmente para evaluar la usabilidad de productos y servicios. Este cuestionario incluye una serie de preguntas que buscan evaluar la percepción sobre la facilidad de uso y el nivel general de satisfacción con la aplicación. Es crucial contar con las respuestas de los usuarios en este cuestionario para evaluar de forma objetiva la experiencia de usuario, lo que permite detectar tanto puntos fuertes como posibles áreas de mejora en "FeelGraph".

No solo se busca validar la eficacia de la aplicación en términos de accesibilidad y usabilidad, sino que también identificar oportunidades de mejora y refinamiento. En este enfoque de evaluación es vital incluir los comentarios de los usuarios finales, ya que garantiza que las modificaciones y mejoras futuras estén alineadas con las necesidades reales de quienes dependen de la aplicación para acceder a información visual crítica. El compromiso con el desarrollo de soluciones tecnológicas inclusivas que empoderen a los usuarios y mejoren su independencia y calidad de vida se refleja en este diseño de evaluación.

5.2 Desarrollo de la evaluación

La parte práctica de la evaluación de la aplicación se estructuró con el uso de tres gráficos con distintos niveles de complejidad, con ellos se pretendía poner a prueba la aptitud de esta en diferentes índoles. Gracias a esta evaluación se llega a la conclusión que "FeelGraph" emplea diferentes tipos de datos visuales, facilitando interpretaciones y navegaciones a aquellos usuarios con discapacidades visuales. Se ha tenido en cuenta que los gráficos omitieran textos o cualquier elemento que puedan ocasionar distracciones en la funcionalidad de la aplicación. La incorporación de textos en los gráficos ocasionaría confusión en su interpretación y dificultaría la accesibilidad. El texto no es procesado de la misma forma que los elementos visuales por las tecnologías de asistencia.

Todos los gráficos usados previamente se prepararon para mostrar tan solo datos visuales para así poder ser utilizados por la aplicación y garantizar descripciones claras, precisas para los usuarios.

Gracias a la previsión, se respeta la accesibilidad promovida por la aplicación, facilitando así la obtención de respuestas verbales por parte de "FeelGraph". Siendo estas respuestas complementadas por dispositivos de asistencia.

En los siguientes subapartados se describirá la evaluación específica con cada gráfico, comenzando por el más sencillo y progresando hacia gráficos más complejos, explicando cómo se utilizaron para demostrar las capacidades de "FeelGraph" en un entorno real.

5.2.1 Evaluación del primer gráfico. Gráfico básico

El primer gráfico utilizado en la evaluación ha sido un gráfico simple que representaba una única línea descendente. Se eligió este gráfico por ser simple y claro, lo que hace lo ideal para iniciar la evaluación y ayudar a los usuarios a familiarizarse con las funciones básicas de la aplicación. A continuación, en la Figura 30, se muestra el gráfico utilizado para la primera evaluación, con el detectado por la aplicación.

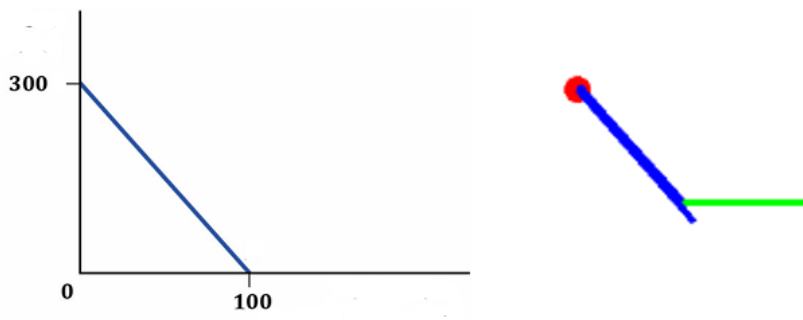


Figura 30. Evaluación primer gráfico. Gráfico real y detectado por la aplicación.

Observaciones del usuario

En la sesión, el participante empleó las funciones de retroalimentación táctil para reconocer la orientación y clasificación de cada línea. El usuario pudo entender perfectamente la composición del gráfico gracias a que la aplicación describió correctamente las líneas en términos de orientación. No obstante, el usuario comentó que, aunque identificó la línea horizontal de manera inmediata y precisa, la vibración para la línea descendente no fue tan distintiva como esperaba, demasiado lenta para su gusto.

5.2.2 Evaluación del segundo gráfico. Gráfico medio.

En la evaluación, se muestra en la figura 31, el segundo gráfico mostraba una línea ascendente con numerosos cambios en la pendiente y luego terminaba en una sección horizontal. Al incluir cambios en la inclinación y tendencia, este diseño agregó una mayor complejidad, lo que representó un desafío intermedio para "FeelGraph" y permitió evaluar la capacidad de la aplicación para manejar transiciones dentro de un mismo conjunto de datos.

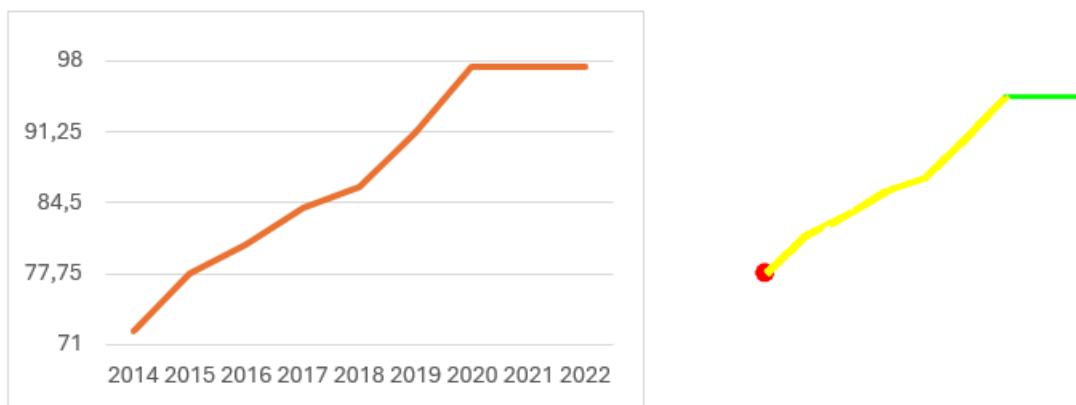


Figura 31. Evaluación segundo gráfico. Gráfico real y detectado por la aplicación.

Observaciones del usuario

El usuario encontró útil la precisión con la que "FeelGraph" identificó e informó sobre el cambio de inclinación, especialmente valorando cómo le ayudó la retroalimentación sonora a distinguir claramente cuándo se produjo la transición de ascendente a horizontal. Al pesar de eso, hizo algunos comentarios sobre la consistencia del volumen del sonido; aunque el cambio fue identificado correctamente, pareció que el volumen de la señal sonora para la sección horizontal disminuyó ligeramente.

5.2.3 Evaluación del tercer gráfico. Gráfico complejo.

El tercer gráfico utilizado en la evaluación mostraba una serie de líneas con varios cambios de dirección y color, incluyendo segmentos ascendentes, descendentes y estables. Se ha utilizado este gráfico para simular una situación de análisis de gráfico real compleja, poniendo a prueba al máximo las capacidades de la aplicación en un entorno que demandaba identificación precisa y rápida de múltiples elementos visuales y su correspondiente retroalimentación sensorial. A continuación, en la Figura 32, se muestra el gráfico utilizado para la tercera evaluación junto al gráfico detectado por la aplicación.

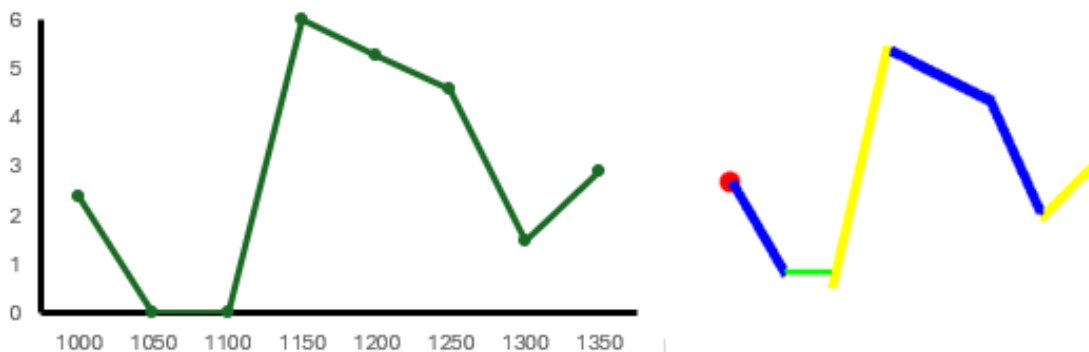


Figura 32. Evaluación tercer gráfico. Gráfico real y detectado por la aplicación.

Observaciones del usuario

El gráfico fue evaluado por el usuario utilizando tanto la retroalimentación por vibración como por sonido. Se informó de una experiencia satisfactoria con la capacidad de la aplicación para adaptarse a las diferentes secciones del gráfico con ambos modos de retroalimentación. Particularmente, resaltó la eficacia de las vibraciones al distinguir entre tendencias en ascenso y descenso, así como el uso de diferentes tonos para indicar cambios de tendencia. No obstante, dijo que si se pulsan muy rápido las diferentes líneas, la retroalimentación va un poco lenta, lo que podría causar algo de confusión.

5.3 Cuestionario SUS

El cuestionario SUS, también conocido como System Usability Scale², es una herramienta estándar para evaluar la usabilidad que ha sido diseñada con el fin de medir la percepción de los usuarios sobre la usabilidad de productos y servicios. Debido a su versatilidad y capacidad para proporcionar resultados confiables con solo diez preguntas, este cuestionario se utiliza ampliamente. Se califica cada pregunta en una escala del 1 al 5, indicando un fuerte desacuerdo con el número 1 y un fuerte acuerdo con el número 5. El cuestionario ha sido utilizado en varios campos y resulta especialmente útil para productos tecnológicos como "FeelGraph", ya que proporciona a los investigadores una medida comparativa de la usabilidad.

A continuación, se presentan las diez preguntas que conforman el Cuestionario SUS, aplicadas específicamente para evaluar "FeelGraph":

1. Creo que me gustaría usar esta aplicación frecuentemente.
2. Encontré la aplicación innecesariamente compleja.
3. Pensé que la aplicación fue fácil de usar.
4. Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para poder usar esta aplicación.
5. Encontré las diversas funciones de esta aplicación bien integradas.
6. Pensé que había demasiada inconsistencia en esta aplicación.
7. Imagino que la mayoría de la gente aprendería a usar esta aplicación muy rápidamente.
8. Encontré la aplicación muy difícil de usar.
9. Me sentí muy confiado usando la aplicación.
10. Necesito aprender muchas cosas antes de poder usar la aplicación.

Tras una evaluación de los resultados aportados por el usuario, la puntuación promedio de la app en el Cuestionario SUS fue de 75, lo que sugiere un nivel de usabilidad "bueno" según las métricas estándar de interpretación del SUS.

² <https://www.uifrommars.com/como-medir-usabilidad-que-es-sus/>

Este resultado indica que, aunque la aplicación suele ser bien recibida y considerada utilizable, todavía hay margen de mejora para hacerla más intuitiva para los usuarios finales.

5.4 Conclusiones de la evaluación

El uso del cuestionario SUS y las pruebas de usabilidad en un entorno controlado para evaluar la aplicación han ofrecido conocimientos importantes sobre la funcionalidad y accesibilidad de "FeelGraph". Aunque las evaluaciones con un único usuario han sido limitadas, han establecido una base sólida para comprender las fortalezas de la aplicación y las oportunidades que podrían optimizar aún más la experiencia del usuario.

Puntos a favor

- **Facilidad de uso general:** las altas puntuaciones en preguntas relacionadas con la facilidad de uso general del cuestionario reflejan la positiva valoración que los usuarios han dado a la interfaz intuitiva de la aplicación. Facilita la curva de aprendizaje menos empinada y permite una integración más rápida y eficiente en sus actividades diarias, lo que es crucial para una aplicación dirigida a usuarios con discapacidades visuales.
- **Precisión de retroalimentación:** se ha resaltado la precisión en la retroalimentación táctil y sonora como una fortaleza. El usuario afirmó que gracias a estas características pudieron interpretar los gráficos de forma efectiva, lo que confirma el éxito de "FeelGraph" en la comunicación visual a través de medios alternativos.

Oportunidades de refinamiento

- **Adaptabilidad con gráficos complejos:** el usuario se adaptó progresivamente al manejar gráficos más complejos. A pesar de que la aplicación maneja distintos tipos de datos visuales con efectividad, seguir simplificando y enriqueciendo las guías contextuales ayudará a mejorar aún más esta capacidad, garantizando que todos los usuarios puedan sacar el máximo provecho de la tecnología independientemente de la complejidad de los datos.

- Uniformidad en la retroalimentación: se reveló en la evaluación una buena recepción de las características de retroalimentación de la aplicación, con algunas sugerencias para mejorar la consistencia en la rapidez y claridad de las respuestas en diferentes situaciones. Contribuirá a una experiencia más coherente y satisfactoria para todos los usuarios al afinar estos detalles.

Capítulo 6 - Conclusiones y trabajo futuro

Este capítulo recoge las conclusiones alcanzadas después de realizar y analizar el proyecto “FeelGraph” y sugiere algunas actividades para mejorar la aplicación y ampliar su funcionalidad.

6.1 Conclusiones

“FeelGraph” es una aplicación que ayuda a visualizar gráficos mediante una retroalimentación accesible a personas con discapacidad visual.

El proyecto consistió en una serie de entrevistas con usuarios objetivo, así como de unas pruebas adicionales, que lograron como resultado una aplicación que satisface tanto los requisitos técnicos como las necesidades reales de los usuarios.

Un aspecto importante del proyecto ha sido la integración de tecnologías de retroalimentación táctil y sonora. Gracias a este tipo de tecnologías que promueven la independencia, los usuarios, sin el uso del sentido de la vista, pueden visualizar y entender gráficos. “FeelGrah” ha sido validado positivamente por su funcionalidad de ayuda en la interpretación de gráficos, a través de unas evaluaciones que destacaron el uso intuitivo de las interfaces y la retroalimentación proporcionada.

“FeelGraph” ha sido evaluado por las pruebas de usabilidad llevadas a cabo como una aplicación intuitiva y accesible. El participante pudo navegar y comprender de manera sencilla la información mostrada, quedando demostrado que la interfaz ha sido bien diseñada y las funciones clave han sido desarrolladas de manera efectiva.

Los comentarios del participante demostraron una mejora notable en su capacidad para acceder a información visual que antes era casi imposible de obtener. Con esta validación se respalda la eficacia de “FeelGraph” y su compromiso con mejorar la calidad de vida de los usuarios.

Las pruebas iniciales catalogan a "FeelGraph" como una aplicación efectiva, pero con el conocimiento de que se deben realizar evaluaciones con un grupo de usuarios más variado y extenso. Hay que asegurar que la aplicación sigue siendo efectiva y accesible en diferentes escenarios, así como que las necesidades y requisitos de los usuarios sean cumplidos en las adaptaciones futuras de la aplicación.

Se observa un gran potencial de "FeelGraph" para ser utilizado en contextos educativos y profesionales, allí donde los usuarios con discapacidad visual enfrentan numerosos problemas. Con futuras mejoras y evaluaciones, se espera que la aplicación mejore el aporte de estos usuarios en la interpretación de datos visuales.

A su vez, se conoce la necesidad de continuar colaborando con la comunidad de usuarios finales en las fases de investigación y desarrollo, con el objetivo de ajustar y adaptar las funcionalidades necesarias de la aplicación, pero sin perder la importancia y efectividad de esta, para seguir recorriendo el camino de un mundo accesible y autónomo para las personas con discapacidad.

6.1.1 Dificultades y aprendizaje tecnológico

El desarrollo de la aplicación "FeelGraph" ha supuesto un gran reto, tanto personal como técnico, ya que además de la adopción de nuevas tecnologías, supuso el estudio y entendimiento de las tecnologías asistivas utilizadas por usuarios con discapacidad visual. Entre los aspectos clave cabe destacar el entendimiento y el uso de herramientas de procesamiento de imágenes, así como la familiaridad con el lenguaje de programación Kotlin y el entorno de desarrollo Android. Este enfoque conllevó una curva de aprendizaje bastante exigente, pero necesaria para la correcta implementación del programa.

Hay que destacar uno de los desafíos más significativos del proyecto, la incorporación de la biblioteca OpenCV, encargada del procesamiento de imágenes. Fue necesario un previo análisis y estudio de esta herramienta, para poder utilizar y manipular sus funciones para el análisis y conversión de gráficos en información procesable.

A través de un análisis y entendimiento de las API de Android, se superó otro desafío técnico como fue la gestión de documentos PDF y su transformación a formatos útiles.

Dejando a un lado lo técnico, es importante destacar la necesidad de entender en profundidad las tecnologías asistivas que suelen utilizar las personas con discapacidad visual. Esto ha supuesto un estudio que comprueba la efectividad de las diferentes formas de retroalimentación en forma de vibraciones y/o sonidos y cómo estas pueden incorporarse en "FeelGraph". Tras el proceso de desarrollo, se aseguró la compatibilidad de la aplicación es compatible con tecnologías asistivas como lectores de pantalla y dispositivos Braille, persiguiendo y consiguiendo así su objetivo de aplicación accesible. Gracias al aprendizaje y la adaptación se han logrado los objetivos del proyecto, además de adquirir el razonamiento personal de cómo cualquier tecnología puede ser adaptada para ser accesible y satisfacer las necesidades de todo tipo de usuarios, sin tener en cuenta sus capacidades. Gracias al desarrollo de "FeelGraph" he adquirido habilidades para enfrentar desafíos tecnológicos y proyectos con un enfoque accesible e inclusivo.

6.2 Trabajo futuro

Teniendo en cuenta el progreso y el análisis de la aplicación, se ha detectado que hay áreas en las que se podría mejorar para obtener una mayor utilidad. Las mejoras previstas incrementarían la funcionalidad, así como proporcionarían al usuario una mejor experiencia de interacción con la información gráfica.

- Integración de la cámara para lectura de gráficos en papel. Incluir funcionalidades en la aplicación que permitan al usuario escanear gráficos en papel sería un avance importante hacia una mayor adaptabilidad. Los usuarios tendrían acceso a información gráfica impresa sin la necesidad de digitalizar esos documentos previamente, recogiendo y analizando esos datos.
- Incorporación de métodos que informan sobre los valores presentes en los ejes. La identificación y comunicación de los valores de los ejes de un gráfico mejoraría la retroalimentación proporcionada por "FeelGraph". Esto requiere el uso de técnicas de reconocimiento óptico para identificar y mostrar los valores de los ejes en gráficos, permitiendo así un entendimiento más completo de la información visual.

- Mejora en la personalización de la experiencia de usuario. Para lograr una mejora notable en la accesibilidad y comodidad del usuario, se debería incorporar más personalizaciones, como ajustes en la interfaz, siguiendo las preferencias del usuario y la elección detallada de audio. Ofrecer ajustes específicos como la selección entre diferentes tonos de audio y patrones de vibración podría mejorar la experiencia ofreciendo una más personalizada y satisfactoria.
- Expansión del reconocimiento de patrones en diversos tipos de gráficos. Ampliar las funcionalidades de "FeelGraph" para interpretar una mayor diversidad de gráficos, como gráficos de barras o circulares, mejoraría la utilidad de la aplicación en un espectro más amplio de disciplinas y aplicaciones, desde el análisis empresarial hasta la educación estadística.
- Implementación de patrones de reconocimiento más elaborados. Detección y clasificación de patrones complejos en la información gráfica mediante la utilización de nuevas tecnologías como inteligencia artificial más avanzada.
- Desarrollo para el sistema operativo iOS. La implementación de la aplicación en los dispositivos que funcionan con iOS permitiría que "FeelGraph" llegara a un mercado más amplio, debido al gran número de usuarios que disponen de este tipo de dispositivos.
- Realizar evaluaciones con un mayor número de usuarios. Elaborar una evaluación con un grupo mayor y más diverso conseguirá obtener información más relevante y significativa. La accesibilidad y usabilidad de una aplicación debe ser validada en una amplia gama de situaciones y escenarios para asegurar que la aplicación cumpla con las necesidades reales de los usuarios en sus adaptaciones futuras.

Tras la implementación de estas mejoras, la aplicación ofrecería una herramienta aún más potente y accesible para sus usuarios, garantizando que todos ellos puedan acceder y analizar gráficos de manera independiente. Esto pondría a "FeelGraph" en una buena posición para poder expandirse y evolucionar de forma significativa.

Introduction

Motivation

Nowadays, technology is integrated in all aspects of our lives. It is necessary for people with visual impairment to have access to it. The lack of this sense causes significant limitations to these people in the interpretation of visual information, such as graphs and diagrams, in contexts such as educational, professional and daily life.

"FeelGraph" is a tool created so that visually impaired people can autonomously and effectively access graphic information using touch and hearing, an innovative application of assistive technology. This project arises from the need to address the shortcomings of these people to cope with the limitations they experience in their daily lives.

Having conversations with visually impaired students, they confirm the situations they suffer when facing exams when educators must adapt the questions to avoid the use of graphics. Although they find supports such as the ONCE organization that adapt graphics to Braille, in countless occasions they are not enough, as their needs are not immediately met.

"FeelGraph" tries to meet the needs of interpretation of visual content, thanks to this project will improve the quality of life of visually impaired people. It will convert visual information into tactile and auditory formats to overcome these limitations. Users will be able to analyze and obtain knowledge without relying on sight thanks to this project.

This project joins others carried out at the Faculty with the aim of improving accessibility for people with visual impairments. One of them is included in documents in Docta Complutense, an academic archive that shows the strong commitment of the educational community to inclusion and technological progress, and the need to create tools for all people regardless of their limitations is demonstrated by this line of research and development.

This final degree work combines image processing techniques and sound and vibration technologies. Its final objective will be satisfactory for the user and he will verify that he has access to previously inaccessible information.

Goals

In this Final Degree Project (TFG), the development of "FeelGraph" started with the ambitious vision of creating an innovative assistive application that could interpret any type of graph and provide real and detailed feedback to visually impaired users.

This ideal application would include advanced functions to identify and classify different types of graphs, as well as to extract and vocalize specific data, axis values and other important information. This promotes a comprehensive and accessible understanding of complex visual information.

However, due to time constraints, technological resources, and the complexities involved in advanced technologies have forced to adjust and focus the objectives to fit into a framework that could be implemented within the period allotted to the TFG. Therefore, the main objective of this project is to create an assistive application that helps visually impaired people gain independence in understanding graphics and accessing complex visual information through vibrations and/or sounds.

The specific objectives that were set at the beginning of the project and that have been fully achieved are:

1. investigate and analyze: identify the challenges and opportunities to improve accessibility for visually impaired people through assistive technologies in the interpretation of graphics, understanding their specific needs.
2. Interface design: ensure that "FeelGraph" has a simple and accessible user interface, with easy navigation and usability for people with visual impairment by implementing universal design principles.
3. Image processing: development of image processing algorithms that can recognize and analyze important information in graphics uploaded by the user, eliminating non-relevant elements and preparing the data for transformation to tactile and auditory formats.

4. Development of vibration and sound patterns: program unique vibration and sound patterns that correspond to various types of lines and shapes in graphs, to be distinguished by users by touch and hearing.
5. Testing and validation: evaluate the effectiveness, accuracy and usability of "FeelGraph" through end-user testing.
6. Accessibility and customization: enhance the user experience by providing customization options within the application, allowing users to adjust vibration and sound characteristics according to their preferences and needs.

The achievement of these objectives reflects the success of "FeelGraph" in its mission to provide independent access to visual information for visually impaired users and to promote greater inclusion and autonomy.

Work plan

The work plan has been structured to ensure that all functionalities provided in the "FeelGraph" application are developed efficiently and effectively. The plan covers from the initial planning phase to the final testing, with a detailed schedule from January 15th to the end of April. During this period, numerous essential activities were carried out, grouped into distinct phases: Planning, Design, Development and Testing. Each phase has been planned to allow for a smooth and efficient workflow.

This section features a Gantt chart showing the sequence and duration of each task, providing a clear roadmap of the activities involved in the project.

Planning Phase [01/15 - 02/05].

This stage lays the foundations for the development of the project, so that the objectives and requirements are clear and aligned with the needs of the end users.

- Project scope definition (01/15 - 01/20). The overall objectives of the application are defined, as well as the key functionalities and the target audience.
- Requirements research and analysis (01/20 - 01/30). Analyze and collect user needs, as well as the essential technical specifications for the development of the application.
- Project planning (01/31 - 02/05). Establishing a detailed schedule, allocating resources and establishing critical milestones to monitor the progress of the project.

Design phase [01/31 - 02/15].

During this phase the user experience is analyzed by creating intuitive and accessible interfaces that comply with accessibility standards.

- Interface design and user experience (UX/UI) (31/01 - 15/02). User experience is planned and interface prototypes are developed to ensure that the application is accessible and easy to use by people with visual impairments.

Development phase [02/15 - 04/17].

In this phase, the designed functionalities are implemented and assistive technologies are integrated to ensure accessibility, this being the core of the project.

- Development of the functionality to load and display graphics (02/15 - 02/22). Development of the functionality to load and display graphics in an accessible way.
- Development of the image processing functionality (02/23 - 03/06). Image interpretation is improved by image processing.

- Development of axis deletion functionality (07/03 - 16/03). Algorithms have been developed to delete the axes of the graphs to facilitate interpretation.
- Development of line management and classification functionality (03/17 - 03/24). Development of functions that identify and classify lines in graphs according to their typology.
- Development of vibration functionality when touching a line (03/25 - 04/03). Tactile feedback is integrated that responds to touches on the lines of the graph.
- Development of sound functionality when touching a line (01/04 - 05/04). Integration of auditory feedback that responds to the touch on the lines of the chart.
- Incorporation of assistive technologies (04/04 - 08/04). Ensure that the application is compatible with assistive technologies, such as screen readers and Braille devices.
- Development of customization functionality - configuration (07/04 - 15/04). Development of methods that provide the user with the ability to customize the results according to their specific preferences and needs.

Testing phase [04/15 - 04/25].

During this stage, the application is tested to ensure that it works correctly and is fully accessible, guaranteeing the quality of the project.

- Unit testing (15/04 - 25/04). Each element or functionality of the application is reviewed to ensure proper performance and incorporation.

Figure 33 below shows the Gantt chart of the project, which illustrates the order and duration of the tasks involved in the proje

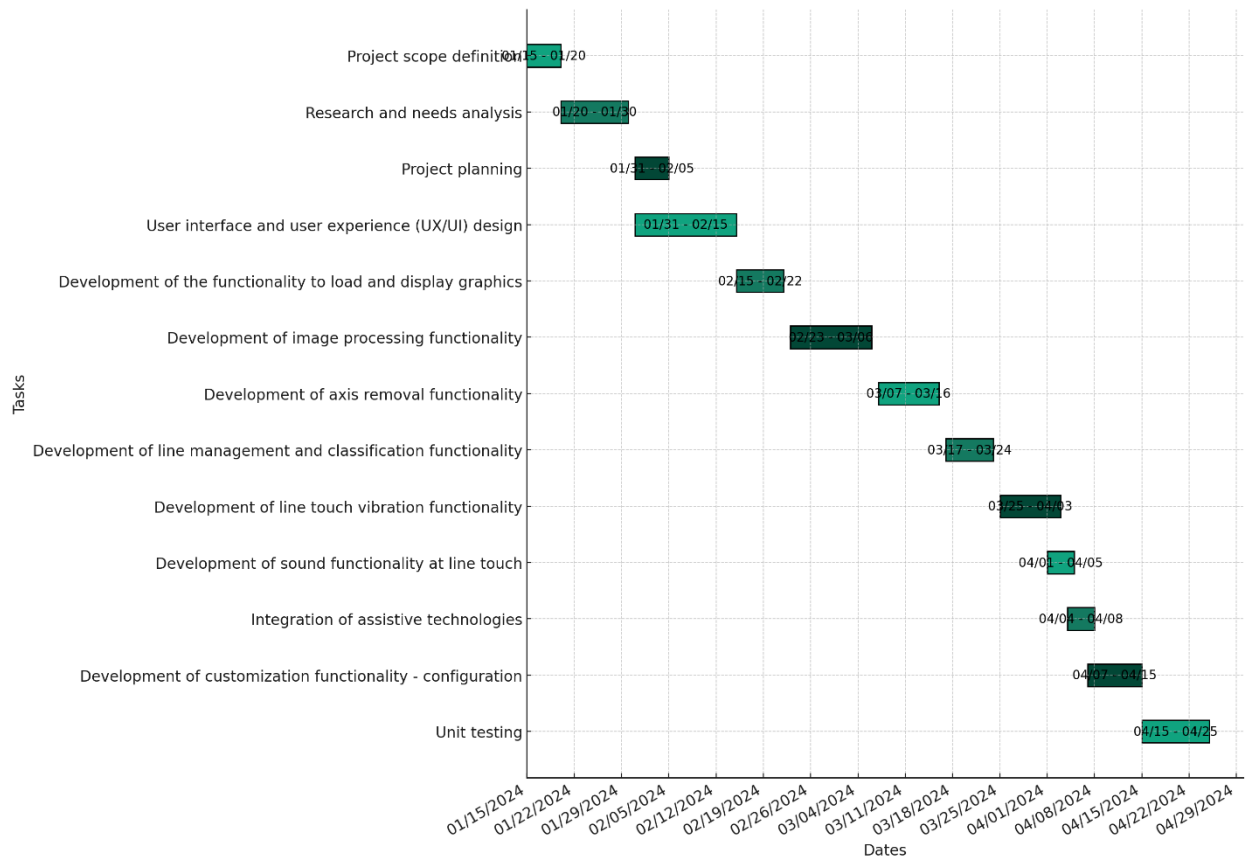


Figura 33. Diagrama de Gantt - Plan de trabajo en inglés.

Conclusions and future work

This chapter gathers the conclusions reached after carrying out and analyzing the "FeelGraph" project and suggests some activities to improve the application and extend its functionality.

Conclusions

"FeelGraph" is an application that helps to visualize graphs through accessible feedback to visually impaired people.

The project consisted of a series of interviews with target users, as well as some additional testing, which resulted in an application that meets both the technical requirements and the real needs of the users.

An important aspect of the project has been the integration of tactile and audio feedback technologies. Thanks to this type of technologies that promote independence, users, without the use of the sense of sight, can visualize and understand graphics. "FeelGrah" has been positively validated for its functionality to assist in the interpretation of graphs, through evaluations that highlighted the intuitive use of the interfaces and the feedback provided.

"FeelGraph" has been evaluated by the usability tests carried out as an intuitive and accessible application. The participant was able to easily navigate and understand the information displayed, demonstrating that the interface has been well designed and key functions have been effectively developed.

The participant's feedback demonstrated a marked improvement in their ability to access visual information that was previously almost impossible to obtain. This validation supports the effectiveness of "FeelGraph" and its commitment to improving users' quality of life.

Initial tests rate "FeelGraph" as an effective application, but with the knowledge that evaluations need to be conducted with a more varied and larger user group. There is a need to ensure that the application remains effective and accessible in different scenarios, as well as that user needs and requirements are met in future adaptations of the application.

There is great potential for "FeelGraph" to be used in educational and professional contexts, where visually impaired users face numerous problems. With future enhancements and evaluations, it is expected that the application will improve the input of these users in the interpretation of visual data.

At the same time, it is known the need to continue collaborating with the end-user community in the research and development phases, with the objective of adjusting and adapting the necessary functionalities of the application, but without losing the importance and effectiveness of this, to continue on the path of an accessible and autonomous world for people with disabilities.

Technological learning and difficulties

The development of the "FeelGraph" application has been a great challenge, both personal and technical, since in addition to the adoption of new technologies, it involved the study and understanding of assistive technologies used by visually impaired users. Key aspects included the understanding and use of image processing tools, as well as familiarity with the Kotlin programming language and the Android development environment. This approach entailed a fairly demanding learning curve, but necessary for the correct implementation of the program.

One of the most significant challenges of the project was the incorporation of the OpenCV library, in charge of image processing. It was necessary a previous analysis and study of this tool, to be able to use and manipulate its functions for the analysis and conversion of graphics into actionable information.

Through an analysis and understanding of the Android APIs, another technical challenge was overcome, such as the management of PDF documents and their transformation into useful formats.

Leaving aside the technical aspects, it is important to highlight the need to understand in depth the assistive technologies that are often used by people with visual impairment. This has involved a study that tests the effectiveness of different forms of feedback in the form of vibrations and/or sounds and how these can be incorporated into "FeelGraph". After the development process, it was ensured that the application is compatible with assistive technologies such as screen readers and Braille devices, thus pursuing and achieving its goal of accessible application.

Thanks to the learning and adaptation, the objectives of the project have been achieved, in addition to acquiring the personal reasoning of how any technology can be adapted to be accessible and meet the needs of all types of users, regardless of their capabilities. Thanks to the development of "FeelGraph" I have acquired skills to face technological challenges and projects with an accessible and inclusive approach.

Future work

Taking into account the progress and analysis of the application, it has been detected that there are areas in which it could be improved to obtain greater usability. The planned improvements would increase functionality, as well as provide the user with a better interaction experience with the graphical information.

- Integration of the camera for reading graphs on paper. Including functionality in the application that allows the user to scan paper charts would be an important step towards greater adaptability. Users would have access to printed graphical information without the need to previously digitize those documents, collecting and analyzing those data.
- Incorporation of methods that report the values present in the axes. The identification and communication of the values of the axes of a graph would enhance the feedback provided by "FeelGraph". This requires the use of optical recognition techniques to identify and display axis values in graphs, thus enabling a more complete understanding of the visual information.

- Improved personalization of the user experience. To achieve a marked improvement in user accessibility and comfort, more customizations should be incorporated, such as interface adjustments, following user preferences and detailed choice of audio. Offering specific settings such as selection between different audio tones and vibration patterns could enhance the experience by offering a more personalized and satisfying experience.
- Expansion of pattern recognition in various types of graphics. Expanding the functionality of "FeelGraph" to interpret a wider diversity of graphs, such as bar charts or pie charts, would enhance the utility of the application across a broader spectrum of disciplines and applications, from business analysis to statistical education.
- Implementation of more elaborate pattern recognition. Detection and classification of complex patterns in graphical information using new technologies such as more advanced artificial intelligence.
- Development for the iOS operating system. The implementation of the application on devices running iOS would allow "FeelGraph" to reach a wider market, due to the large number of users who have this type of devices.
- Conduct evaluations with a larger number of users. Conducting an evaluation with a larger and more diverse group will obtain more relevant and meaningful information. The accessibility and usability of an application should be validated in a wide range of situations and scenarios to ensure that the application meets the real needs of users in its future adaptations.

After implementing these improvements, the application would offer an even more powerful and accessible tool for its users, ensuring that all users can access and analyze graphs independently. This would put "FeelGraph" in a good position to expand and evolve significantly.

Bibliografía

1. Acens Blog. (2012).
2. Amor, M., Chaves, A., & Ruiz, V. (2023). Desarrollo de una aplicación móvil para la generación de descripciones de imágenes para personas con discapacidad visual.
3. Be my eyes. (2023).
4. Bresciani, Drewing, & Ernst. (2012). Human Haptic Perception and the Design of Haptic-Enhanced Virtual Environments. En K. D. Jean-Pierre Bresciani, *The Sense of Touch and its Rendering*.
5. CNET. (2023).
6. Department of CSA, S. S. (3 de 2024). An Auditory System Interface for Augmented Accessibility: Empowering the Visually Impaired.
7. Lab, C. A. (s.f.). Obtenido de CAL - NavCog: <https://www.cs.cmu.edu/~NavCog/navcog.html>
8. Microsoft, C. (s.f.). Obtenido de Microsoft AI: <https://www.microsoft.com/en-us/ai/ai-for-accessibility-projects>
9. uiFromMars. (2024). *Medir la usabilidad con el Sistema de Escalas de Usabilidad (SUS)*. Obtenido de <https://www.uifrommars.com/como-medir-usabilidad-que-es-sus/>
10. W3C. (12 de 11 de 2023). Obtenido de How to Meet WCAG: <https://www.w3.org/WAI/WCAG22/quickref/?versions=2.1>

