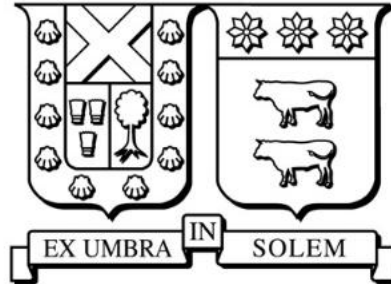


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
INGENIERIA EN DISEÑO DE PRODUCTOS
[VALPARAISO o SANTIAGO] – CHILE



Diseño y desarrollo de Xpa. Una experiencia de aprendizaje sobre las abejas

Sharay Gissela Robles Mixto

INGENIERO/A EN DISEÑO DE PRODUCTOS

Eduardo Piñones

JULIO-2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño y desarrollo de Xpa. Una experiencia de aprendizaje sobre las abejas

Nombre del candidato(a): Sharay Robles Mixto

Carrera / Grado: Ingeniería en diseño de productos

Campus: Valparaíso Departamento: Ingeniería en Diseño

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Eduardo Piñones Zuleta, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un período de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

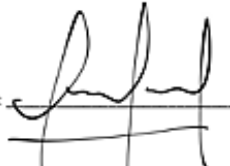
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 27/07/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27/07/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos es la parte más difícil de escribir en el informe, si bien no fue fácil poder realizar este documento, los agradecimientos son algo que no tiene una referencia o una manera buena o mala de hacerse. Es el comienzo del fin de una de las etapas más linda, estresantes, entretenidas y comprometidas de mi vida.

Quiero agradecer a la universidad Federico Santa María, por dejarme realizar mis estudios aquí y mas que el aprendizaje duro , fue el aprender a conocerme a mi misma, a llevarme a mis limites, a tratar de dar lo máximo posible, si bien en los momentos de más estrés era un arrepentimiento pero cuando salía de la tormenta y veía los resultados , en ese momento es cuando dices: "si no me hubieran puesto en esa situación no podría saber de lo que soy capaz", gracias por ser una institución inflexible en la que por primera vez me hizo toparme con la realidad de ser adulto, asumir mis consecuencias y crecer como persona.

Quiero agradecer al profesor Eduardo Piñones (profesor guía), es un hombre muy resolutivo que esta a cargo de muchas cosas, ya que además de ser jefe de carrera, es muy participativo en otras actividades y aun así se daba el tiempo de revisar exhaustivamente mi avance, nunca fue

pesimista con mi trabajo (siendo que hasta yo misma lo era) y trata de sacar lo mejor de las cosas, nunca dudo de mi sin siquiera conocerme.

Agradezco al profesor Santiago de física por enseñarme lo que es el no rendirse, que ninguna pregunta es tonta y tenerme tanta paciencia.

Quiero agradecer a mis dos pilares de vida, mis apoyos incondicionales que nunca han dudado de mí, mi hermana Alexandra, gracias por ser mi pilar de apoyo, por levantarme cuando me quería render, por aguantar mi mal humor en épocas de certámenes, gracias, solamente por estar ahí preparada para apoyarme en lo que fuera. Y mi pareja de vida, Rodrigo, siempre estarás marcado en mi vida, por apoyarme desde que estábamos en el liceo y mi mayor aspiración era estudiar en lo que quedara en cualquier universidad, gracias por darme aspiraciones, por darme ganas de superarme día a día, gracias a ti elegí esta universidad y esta carrera, te agradezco infinitamente tu apoyo a lo largo de esta etapa, cada vez que sentía que esta universidad me iba a ganar, tu creíste en mí, me apoyaste y me hiciste entender que cualquiera se puede caer pero no todos se levantan y en cada momento que me caí tu te aseguraste de que pudiera levantarme,

me siento profundamente agradecida de poder pasar esta etapa contigo y seguir a la siguiente juntos.

Le agradezco infinitamente a mi amiga Lali por llevarme todos los días que podía de la universidad, por hacer los trabajos conmigo y hacerlos mucho más entretenidos y no una carga, por cada café en los que nos planteábamos ¿habremos escogido bien? ¿podremos con esto? Y siempre seguimos adelante apoyándonos, gracias a mi amiga Cassidy por siempre ser la persona que me mostraba cuando estaba mal y me encamino a seguir adelante, a siempre apoyarme y estar ahí para mí. Agradezco a mi hermana Mirian por siempre ser una presencia oculta, ya que si bien no estábamos activa siempre que tuve algún problema tu estabas allí para apoyar cuando lo necesitaba, muchas gracias mamá por siempre apoyarme y nunca quejarse, cuando me equivocaba solo se preocupaba de que aprendiera de la lección y nunca enojarse conmigo, agradezco a Wilfredo Robles por ser la persona que nunca me freno, siempre me insito a crecer y que junto a mi mamá siempre me insistieron que “el límite es el cielo”, agradezco a mis perros por siempre estar conmigo y lamerme las lágrimas cuando estaba triste, a la chiqui por portarse tan mal que me hacía olvidar mis problemas, a mi viejita por estar siempre conmigo, y que

ojala pueda ver cuando me titule, ya tiene 16 años.

Y agradecerle infinitamente a Polo Sebastián por enseñarme el amor más sincero que puedas conocer, por estar conmigo en todo momento y ser el perro perfecto.

Mención honorifica a Antonio, muchas gracias por ser parte de mi etapa, si bien te fuiste antes siempre recordare que esta gran etapa la pasaste conmigo.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de **XPA: Experiencia de Aprendizaje Accesible**, un dispositivo de mediación biotecnológica orientado a la inclusión educativa en ciencias. El objetivo principal de este estudio fue diseñar y validar un prototipo multisensorial que permita a estudiantes con discapacidad visual explorar y comprender de manera autónoma la morfología de la abeja melífera obrera.

En primer lugar, se llevó a cabo una revisión de la literatura sobre neurociencia cognitiva y percepción háptica, utilizando la metodología del **Doble Diamante**. A través de un enfoque de co-diseño con usuarios del Colegio Santa Lucía, se identificaron las barreras de acceso a la información biológica impuestas por la predominio visual.

Posteriormente, se implementó un modelo físico a escala aumentada que integra manufactura aditiva, texturas codificadas y electrónica embebida para ofrecer respuesta auditiva inmediata. Los resultados obtenidos revelaron que la sincronía háptico-auditiva reduce la carga cognitiva, permitiendo a los usuarios construir imágenes mentales complejas sin dependencia de terceros.

En conclusión, este trabajo contribuye al campo del diseño inclusivo al establecer un estándar de calidad museográfica y replicabilidad técnica. Se espera que estos

resultados sirvan como base para la implementación de nuevas herramientas de alfabetización científica en el contexto del BeeLab.

Palabras clave: Diseño Inclusivo, Aprendizaje Multisensorial, Percepción Háptica, abeja melífera.

ABSTRACT

This paper presents the development of XPA: Accessible Learning Experience, a biotechnological mediation device aimed at educational inclusion in science. The main objective of this study was to design and validate a multisensory prototype that allows students with visual impairments to independently explore and understand the morphology of the honeybee worker.

First, a review of the literature on cognitive neuroscience and haptic perception was conducted using the Double Diamond methodology. Through a co-design approach with users from Santa Lucía School, barriers to accessing biological information imposed by visual dominance were identified.

Subsequently, an enlarged-scale physical model was implemented that integrates additive manufacturing, coded textures, and embedded electronics to provide immediate auditory feedback. The results revealed that haptic-auditory synchrony reduces cognitive load, allowing users to construct complex mental images without dependence on third parties.

In conclusion, this work contributes to the field of inclusive design by establishing a standard of museographic quality and technical replicability. It is hoped that these results will serve as a basis for the

implementation of new scientific literacy tools
in the context of the BeeLab.

Keywords: Inclusive Design, Multisensory
Learning, Haptic Perception, honeybee.

GLOSARIO

1. **Affinity Diagram:** es una herramienta visual que organiza una gran cantidad de ideas o datos en grupos basados en sus similitudes o relaciones naturales. Se utiliza para identificar patrones, simplificar problemas complejos y fomentar la colaboración, siendo útil tanto para procesar información de investigaciones como para estructurar los resultados de lluvias de ideas.
2. **Benchmark:** Es una técnica de análisis comparativo que se utiliza para medir y evaluar el rendimiento de un sistema, proceso, producto o incluso una inversión, tomándolo como "punto de referencia".
3. **Scamper:** Es una técnica creativa de lluvia de ideas que ayuda a generar ideas nuevas y a resolver problemas mediante la aplicación de siete acciones a un producto, servicio o idea existente. Las siglas significan: **S**ustituir, **C**ombinar, **A**daptar, **M**odificar (o Magnificar/Minimizar), **P**oner otro uso, **E**liminar y **R**eordenar.
4. **Ocelos:** Un ocelo en una abeja es un ojo simple, y hay tres de ellos ubicados en la parte superior de la cabeza, entre los ojos compuestos

más grandes. Estos ojos no forman imágenes detalladas, pero son cruciales para ayudar a la abeja a detectar la luz y mantener la estabilidad en el vuelo.

5. **Tiflotecnología:** Estudio de la adaptación de procedimientos y técnicas para su utilización por los ciegos
6. **Neuroplasticidad:** es la capacidad del cerebro para reorganizar su estructura y función en respuesta a la experiencia, el aprendizaje, la estimulación o una lesión.
7. **Apiologia:** La apiología es el estudio científico de las abejas melíferas, un subcampo de la melitología y la entomología. Esta disciplina examina diversos aspectos de la biología de las abejas, incluyendo su evolución, comportamiento social, reproducción y funciones ecológicas.
8. **Alcance Anterior:** Es un ejercicio que imita cómo una persona se movería para alcanzar objetos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	6
ABSTRACT	8
GLOSARIO.....	10
ÍNDICE	12
INTRODUCCIÓN	15
1.1 Educación Inclusiva y Brecha de Acceso	16
1.2 Inclusión Aparente y Desafíos en América Latina.....	17
1.3 Consecuencias Educativas y Sociales .	17
1.4 Limitaciones de las Herramientas Tradicionales.....	18
1.5 Referentes e Innovaciones Internacionales.....	18
1.6 Nacimiento del Proyecto Xpa	19
1.7 Metodología de Desarrollo y Validación	19
1.8 Objetivos	22
2 METODOLOGÍA.....	23
3 DESCUBRIR.....	27

3.1 Identificación del problema y análisis bibliográficos.....	27
3.2 Perspectiva del usuario.....	31
3.2.1 Perspectiva teórica del usuario ..	31
3.2.2 Perspectiva del usuario	33
3.2.3 Mapa de empatía	37
3.3 Análisis del contexto BeeLab	39
3.4 Perfil y caracterización del usuario	39
3.5 Objetivo del benchmark	40
3.6 Benchmark.....	40
3.7 Aportes al proyecto y posicionamiento de XPA.....	46
3.8 Análisis FODA.....	47
3.9 Conclusión de etapa descubrir	50
4 DEFINIR	52
4.1 Definición del Problema y Oportunidad de Diseño	52
4.2 Propuesta de Valor: Superando la Barrera del Riesgo.....	53
4.3 Principales partes de la abeja	54
4.4 Requerimientos y criterios de diseño ...	58
4.5 Análisis final de la etapa Definir	61
4.6 Estrategia de Validación y Evaluación..	62
5 DESARROLLO.....	64

5.1 Metodología de Ideación (SCAMPER) .	65
5.2 Interacción	68
5.3 Textura	70
5.4 Sonido.....	71
Diseño del Contenido Narrativo	71
5.4.1 Componentes sonido:	76
5.4.2 Electrónica y morfología.....	78
5.5 Arquitectura:.....	79
Estructura:	79
5.5.1 Componentes:.....	82
5.5.2 Estructura de la superficie	88
5.5.3 Costo de materialización	92
6 ENTREGAR.....	94
6.1 Validación técnica y funcional.....	94
Checklist de Validación del Prototipo XPA	95
6.2 Estrategia de validación con usuarios ..	96
6.3 Resultados obtenidos.....	98
7 CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS	106
ANEXO A – Antecedente prototipo	108
ANEXO B – normas.....	109
.....	110
ANEXO C- Procesos	110

INTRODUCCIÓN

El proyecto **Xpa** nace como una respuesta a la necesidad de crear experiencias de aprendizaje inclusivas que permitan a personas con discapacidad visual acceder a información sobre la anatomía y relevancia de las abejas de manera autónoma. Esta herramienta se concibió inicialmente en los cursos de Taller V y VI de Ingeniería en Diseño de Productos y, a partir de los avances obtenidos, se retoma ahora como tema de memoria para perfeccionar su diseño y validar su efectividad pedagógica.

Esta memoria documenta el proceso de rediseño, fabricación y validación del prototipo, detallando las decisiones de diseño, la metodología utilizada y los resultados de los tests con usuarios y los resultados. El proceso de ideación inicial del proyecto se encuentra documentado en el Anexo C. Asimismo, busca dejar establecida una base sólida para que Xpa pueda integrarse en entornos educativos como el de BeeLab, fortaleciendo la experiencia de aprendizaje y la inclusión de estudiantes con discapacidad visual.

1.1 Educación Inclusiva y Brecha de Acceso

El derecho a una educación inclusiva es un fundamento esencial para alcanzar sociedades equitativas y sostenibles. La Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad (ONU, 2006) establece que ningún estudiante debe quedar excluido del sistema educativo. Este compromiso se refuerza en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (ODS 4), que promueve una educación inclusiva, equitativa y de calidad para todos.

Aunque estas metas son ambiciosas, los datos revelan una realidad diferente para estudiantes con discapacidad visual. A nivel global, la Organización Mundial de la Salud estima que casi 285 millones de personas viven con discapacidad visual, una cifra que subraya la magnitud de la necesidad de soluciones educativas accesibles (Ibarra-Cabrera et al., 2025).

En un contexto local como Chile, el desafío es evidente: la Endide (2022) indica que alrededor del 13,7 % de los niños, niñas y adolescentes tiene algún grado de discapacidad visual, lo que representa a 1 de cada 7 estudiantes (Melian, 2023). A pesar de que la asistencia escolar es notablemente alta —93,3 % en ciegos y 98,7 % en personas con

baja visión—, solo un 35,7 % y 21,1 %, respectivamente, reciben los apoyos educativos necesarios (Melian, 2023). Esto demuestra con claridad que el acceso físico no garantiza el acceso real a una educación de calidad.

Este fenómeno ha sido denominado por UNESCO y UNICEF como “inclusión aparente”, que ocurre cuando los estudiantes asisten a clases, pero carecen de los recursos y estrategias pedagógicas que les permitan participar plenamente (UNESCO-UNICEF, 2021). En América Latina, la situación actual es preocupante: ningún país de la región ha alcanzado el 70 % de avance en inclusión educativa (OEI, 2023), lo que evidencia profundas deficiencias estructurales y de implementación de políticas inclusivas.

Las repercusiones de estas barreras se extienden más allá de la escolarización. Según la Fundación Luz (2023), solo el 7,8 % de las personas ciegas completan estudios superiores, cifra que sube al 15,9 % en personas con baja visión. Aún más alarmante es que el 71,2 % de las personas con ceguera total está desocupado o inactivo laboralmente. Estos datos refuerzan que una educación inclusiva de calidad no solo es un derecho, sino una necesidad para asegurar la integración social y profesional futura de estas personas.

Los estudios sobre tecnologías educativas multisensoriales aportan evidencia clara sobre cómo estas pueden cambiar esta realidad. Por ejemplo, Ibarra-Cabrera et al. (2025) desarrollaron un juego tangible multisensorial con retroalimentación auditiva que alcanzó un interés del 92 % y fue considerado altamente valioso por un 83 % de los participantes (Ibarra-Cabrera et al., 2025). Asimismo, investigaciones como la de Cho et al. (2021) indican que la interacción multisensorial mejora el aprendizaje, la inclusión y la colaboración, al integrar diversos canales sensoriales (Cho et al., 2021)

1.2 Inclusión Aparente y Desafíos en América Latina

Este fenómeno se enmarca en lo que UNESCO y UNICEF denominan “inclusión aparente”, en la que los estudiantes asisten a clases, pero no cuentan con los entornos, recursos ni metodologías necesarios para participar de forma autónoma y enriquecedora (UNESCO-UNICEF, 2021). La situación no es exclusiva de Chile: a nivel regional, ningún país de Iberoamérica supera el 70 % de avance en inclusión educativa (OEI, 2023), lo que refleja la necesidad urgente de implementar políticas que no solo integren a

los estudiantes a las aulas, sino que aseguren su participación activa en el proceso de aprendizaje.

La falta de herramientas accesibles genera sentimientos de exclusión, ya que el entorno educativo no está pensado en función de sus necesidades. Esto afecta la motivación, el sentido de pertenencia y la autonomía de los estudiantes, repercutiendo directamente en su desarrollo académico y social.

1.3 Consecuencias Educativas y Sociales

Las brechas en el acceso a la educación inclusiva tienen efectos de largo plazo. En Chile, solo el 7,8 % de las personas ciegas alcanza a completar estudios superiores, frente al 15,9 % de quienes tienen baja visión. Además, la tasa de inactividad o desempleo llega al 71,2 % en personas con ceguera total, lo que limita sus oportunidades de integración social y económica (Fundación Luz, 2023).

Estas cifras demuestran que mejorar la calidad y pertinencia de los recursos educativos no solo es una necesidad pedagógica, sino una herramienta

fundamental para favorecer la inclusión laboral y social de este grupo en el futuro.

1.4 Limitaciones de las Herramientas Tradicionales

Históricamente, la educación para personas con discapacidad visual ha dependido de recursos como lectores de pantalla, material en braille o audiolibros. Si bien estas soluciones facilitan el acceso a la información escrita, no siempre estimulan la exploración activa ni favorecen la comprensión de contenidos que requieren representación espacial, como la anatomía o la biología.

Diversos estudios han demostrado que el aprendizaje multisensorial, que involucra la combinación de estímulos táctiles, auditivos y cinestésicos, mejora la comprensión y la retención de información (Hatira et al., 2024). La integración de experiencias lúdicas y participativas contribuye a reforzar la curiosidad, el interés y el compromiso de los estudiantes con el contenido.

1.5 Referentes e Innovaciones Internacionales

En el ámbito global se han desarrollado iniciativas que buscan superar estas

limitaciones. El Talking Tactile Tablet (figura 1) permite explorar gráficos mediante el tacto y obtener información audible al presionar distintas áreas (Landau et al., 2003; IDSA, 2006). Por su parte, proyectos como StreetScape emplean piezas modulares en 3D que los estudiantes ensamblan para construir entornos urbanos, promoviendo la colaboración entre niños con y sin discapacidad visual (Khalaila et al., 2025).



Figura 1: Talking Tactiler

Fuente: [Industrial Designers Society of America](#)

Estos referentes demuestran que es posible crear herramientas inclusivas e interactivas que faciliten el acceso a conceptos complejos, y evidencian la importancia de incorporar el diseño centrado en el usuario en el ámbito educativo.

1.6 Nacimiento del Proyecto Xpa

En este contexto surge **Xpa**, un prototipo educativo diseñado específicamente para estudiantes con discapacidad visual de entre 10 y 15 años . ya que corresponde a uno de los grupos que frecuentemente participa en visitas escolares y actividades educativas desarrolladas por BeeLab. Su propósito es representar la anatomía de la abeja melífera a escala, integrando piezas móviles con texturas diferenciadas, relieves accesibles y botones que reproducen audios explicativos y trivias para evaluar el aprendizaje.

La propuesta busca aprovechar los beneficios del aprendizaje multisensorial y convertir la experiencia educativa en algo lúdico, autónomo y accesible, especialmente en entornos como apiarios, laboratorios educativos o programas de divulgación científica, donde las actividades suelen estar basadas en la observación visual, lo que genera una oportunidad.

1.7 Metodología de Desarrollo y Validación

El diseño de Xpa se basa en un enfoque iterativo y centrado en el usuario, que ha permitido recolectar retroalimentación en distintas etapas del proceso. La participación de expertos en entomología y de usuarios con discapacidad visual ha sido clave para refinar la materialidad, la ergonomía de las piezas y las características del audio (volumen, claridad y velocidad). Asimismo, el proyecto considera el cumplimiento de normativas internacionales de seguridad para productos educativos (ISO 8124 y EN 71), asegurando su integridad, durabilidad y usabilidad.

Como resultado de este proceso, se desarrolló un prototipo funcional que integra botones interactivos, sistema de audio y piezas móviles que representan la anatomía de la abeja melífera. Se diseñaron audios explicativos y trivias para cada sección del insecto, con el fin de fomentar un aprendizaje activo y autónomo. No obstante, se identificaron áreas de mejora relevantes: aunque los botones cumplen su función de activar los audios, no generan una interacción continua ni un flujo narrativo completamente integrado, lo que podría afectar la experiencia de inmersión del usuario. La distribución actual de los botones se definió de manera arbitraria, debido a limitaciones de tiempo

para realizar testeos en esa etapa, por lo que será necesario en la fase de rediseño evaluar distintas configuraciones y secuencias de interacción para determinar cuál es más intuitiva y efectiva para el público objetivo.

Respecto al contenido auditivo, si bien la información transmitida es clara y cumple su función educativa, se ha detectado que podría estructurarse de manera más atractiva y dinámica. Considerando que el rango de atención de un niño de 10 a 15 años suele ser de 15 a 20 minutos en un contexto escolar, pero en espacios como museos, apiarios o exposiciones la interacción es más breve y fragmentada, resulta importante ajustar la duración, el orden y el nivel de detalle de los audios para adaptarse tanto a actividades educativas más prolongadas como a experiencias de exploración rápida, de forma que mantengan el interés y faciliten la retención de conceptos clave.

En cuanto a las texturas, estas cumplen con el objetivo de diferenciar las partes del insecto, pero no alcanzan un nivel de alta fidelidad, por lo que en el rediseño se deberán considerar factores como la durabilidad de los materiales, la resistencia al uso repetido, la facilidad de limpieza y la fidelidad a las características táctiles de la abeja melífera, manteniendo siempre un equilibrio entre realismo y seguridad.

El proyecto se encuentra en una etapa ideal para iterar y perfeccionar estos aspectos críticos. La presente memoria abordará estas oportunidades de mejora con el fin de entregar una versión optimizada de Xpa que garantice una experiencia inclusiva, pedagógicamente efectiva y replicable en otros entornos educativos.

Para determinar cuál es más intuitiva y efectiva para el público objetivo. El registro fotográfico del prototipo original (figura 2 y 3) desarrollado en los talleres previos puede revisarse en el Anexo A.



Figura 2: Prototipo XPA



FIGURA 3: PROTOTIPO XPA

1.8 Objetivos

Rediseñar el prototipo interactivo Xpa optimizando su funcionalidad, usabilidad y efectividad pedagógica para estudiantes con discapacidad visual, asegurando que sea seguro, accesible y replicable.

Objetivos específicos:

- Analizar el estado actual del proyecto Xpa, identificando elementos que impiden su uso profesional.
- Definir los requerimientos y especificaciones del rediseño de Xpa.
- Proponer un nuevo diseño y materialidad del prototipo para una interacción segura y duradera.
- Fortalecer la experiencia de aprendizaje integrando material didáctico accesible para personas con discapacidad visual.
- Construir el prototipo considerando el nuevo diseño propuesto.
- Validar el prototipo con expertos y usuarios finales.

2 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto es Doble Diamante (ilustración 1), ya que ofrece un enfoque estructurado y flexible para proyectos de diseño centrados en el usuario. Esta metodología es especialmente adecuada en el contexto de Xpa, a metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto es Doble Diamante, un modelo de proceso de diseño desarrollado en 2005 por el Design Council del Reino Unido a partir del estudio de las prácticas de once empresas líderes en innovación (Design Council, 2005). Se seleccionó esta metodología porque ofrece un enfoque estructurado y flexible para proyectos de diseño centrados en el usuario. Esta metodología es especialmente adecuada en el contexto de Xpa... dado que permite explorar el problema en profundidad, idear soluciones creativas, materializarlas en prototipos y validarlas con usuarios reales.

El modelo del doble diamante se compone de cuatro etapas principales: Descubrir, Definir, Desarrollar y Entregar. Cada diamante representa un ciclo de divergencia (exploración de múltiples posibilidades) y convergencia (selección de las mejores opciones), asegurando que las decisiones de diseño se basen en evidencia y en la retroalimentación de los usuarios.

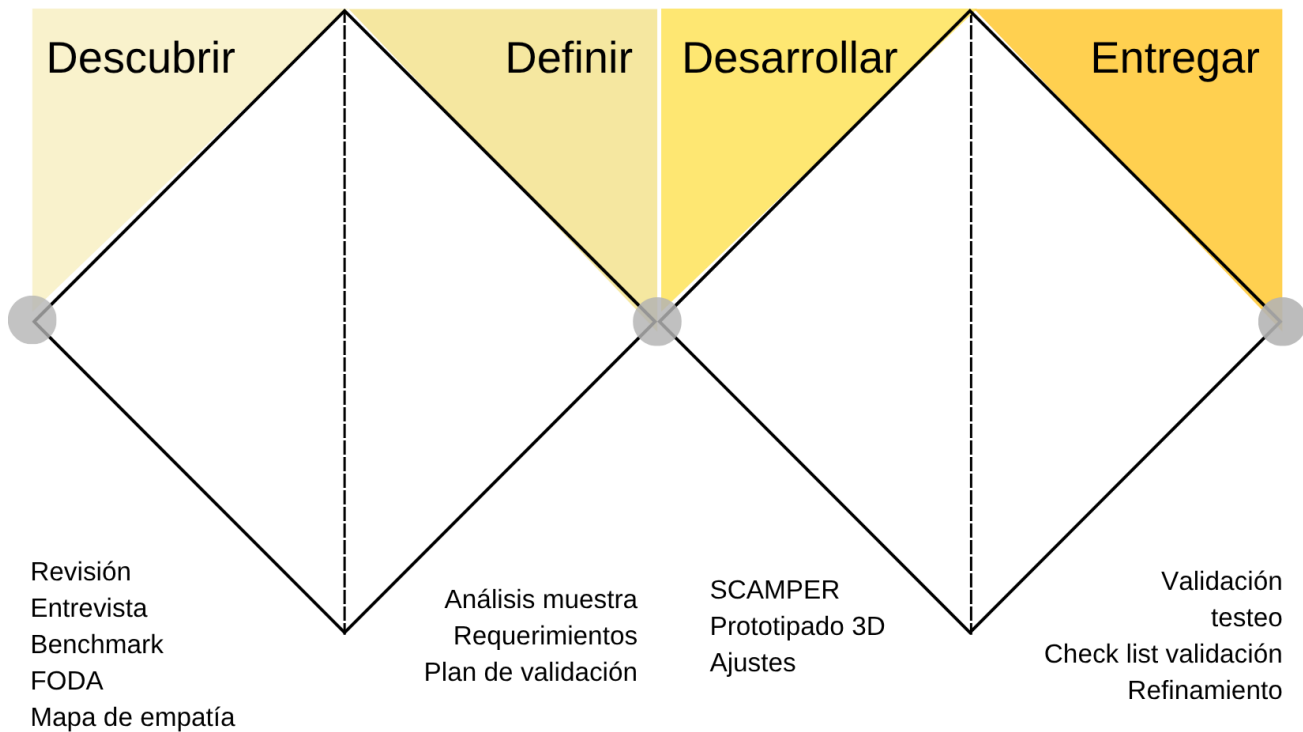


Ilustración 1 Doble diamante

Fuente: Design Council (2005)

1. Descubrir

Esta etapa se centra en la investigación del contexto y de los usuarios, buscando comprender en profundidad el problema y sus variables.

Actividades realizadas:

- Revisión bibliográfica sobre educación inclusiva y aprendizaje multisensorial en personas con discapacidad visual.
- Análisis del contexto del BeeLab y de su propuesta educativa.
- Entrevistas y observaciones a usuarios potenciales.
- Benchmark de productos y herramientas similares.

Aunque gran parte de la investigación inicial ya fue desarrollada en talleres anteriores, se considera que esta etapa sigue abierta. En la medida que se avanza en el rediseño, pueden surgir nuevos hallazgos como: necesidades no detectadas o mejoras técnicas que retroalimenten el proyecto y permitan profundizar en el conocimiento del usuario.

Resultado esperado:

Una comprensión cada vez más precisa del usuario y del contexto, que permita tomar decisiones de diseño fundamentadas.

2. Definir

En esta fase se sintetizan los hallazgos para convertirlos en requerimientos de diseño claros y alcanzables.

Actividades realizadas:

- Identificación de los problemas clave y oportunidades de mejora mediante Affinity Diagram.
- Priorización de requerimientos funcionales, sensoriales y pedagógicos mediante Proceso Analítico Jerárquico.

3. Desarrollar

Se exploran distintas alternativas de solución y se hicieron prototipos que pueden ser testeados y refinados.

Actividades realizadas:

- Ideación de nuevas soluciones de distribución de piezas, texturas y sistemas de audio.(Brainstorming)
- Desarrollo de prototipos de alta fidelidad.

- Testeo para evaluar ergonomía, comprensión y experiencia sensor

Ajustes esperados:

Si los testeos revelan nuevas oportunidades de mejora, el diseño puede volver a iterarse, manteniendo abierto el ciclo de descubrimiento y definición.

4. Entregar

Etapa final en la que se valida y documenta la versión optimizada de Xpa.

Actividades realizadas:

- Validación del prototipo final en entornos educativos.
- Ajustes finales de materialidad, disposición de piezas y parámetros de audio.
- Documentación del proceso y elaboración de recomendaciones de implementación.

Resultado esperado:

Un prototipo listo para ser utilizado en apiarios y espacios educativos, acompañado de su ficha técnica.

En síntesis, el doble diamante ofrece un marco estructurado que orienta el rediseño de Xpa desde la investigación hasta la validación. A continuación, se presenta la ejecución de

esta metodología, detallando las etapas y acciones realizadas en el desarrollo del proyecto.

3 DESCUBRIR

La etapa Descubrir de Diseño y desarrollo de Xpa."Una experiencia de aprendizaje sobre las abejas" inició con un proceso de análisis de referentes, entrevistas y benchmark de productos, cuyo propósito fue identificar, analizar y comparar diversas soluciones tecnológicas y pedagógicas orientadas a la enseñanza inclusiva exclusivamente enfocada en personas con discapacidad visual. Esta acción permitió contextualizar el proyecto dentro del campo de la educación multisensorial, reconociendo las tendencias actuales, las limitaciones de los recursos existentes y las oportunidades para el desarrollo de una propuesta diferenciada.

3.1 Identificación del problema y análisis bibliográficos

Tras el análisis de referentes, se profundizó en la comprensión del problema educativo y sensorial que motiva el desarrollo de XPA. A nivel global, la discapacidad visual continúa siendo una de las principales causas de exclusión en el acceso a la educación científica. Según la Organización Mundial de la Salud, existen más de 314 millones de personas con algún grado de pérdida visual, de las cuales un 85 % podría haberse prevenido (Suárez, 2011). Esta cifra pone en evidencia que el problema no es únicamente

médico o tecnológico, sino social y estructural: las instituciones educativas no han desarrollado metodologías ni recursos adecuados para incluir a los estudiantes con discapacidad visual en áreas que dependen fuertemente de la imagen, como la biología o la anatomía.

El aprendizaje de contenidos morfológicos exige la capacidad de percibir relaciones espaciales y estructurales, lo que representa un desafío para los estudiantes con baja o nula visión. Las soluciones más difundidas — como los lectores de pantalla, audiolibros o materiales braille— permiten acceder a información textual, pero no favorecen la comprensión tridimensional ni la exploración autónoma del conocimiento. Esta situación genera dependencia de mediadores visuales y reduce la participación activa de los estudiantes en su propio aprendizaje.

Cardona y Vásquez (2019) sostienen que “la mayoría de los dispositivos asistidos se diseñan desde laboratorios, sin incorporar la experiencia real de los usuarios” (p. 111), lo que genera una desconexión entre innovación tecnológica y necesidades educativas. De igual manera, Zamora y Marín (2021) enfatizan que la inclusión no puede limitarse a adaptar materiales, sino que debe entenderse como un proceso de diseño universal desde el

origen, capaz de integrar la diversidad sensorial como principio estructural.

En este contexto, el proyecto XPA responde a una necesidad concreta: crear una herramienta educativa multisensorial que permita a los estudiantes con discapacidad visual comprender la anatomía de la abeja obrera a través del tacto y el sonido, generando una experiencia de aprendizaje activa, significativa y segura.

Educación inclusiva y tiflotecnología

La educación inclusiva se sustenta en el derecho de todas las personas a participar de procesos educativos de calidad, eliminando las barreras físicas, sensoriales y cognitivas que dificultan dicho acceso. En este marco, las tiflotecnologías (dispositivos y recursos que traducen la información visual a formatos táctiles o auditivos) son herramientas clave para garantizar la autonomía cognitiva y la igualdad de oportunidades.

Este enfoque se alinea directamente con el Principio I del Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA), el cual establece la necesidad de proporcionar “múltiples formas de representación” de la información (CAST, 2018). Bajo este prisma, la inclusión no consiste en realizar adaptaciones marginales,

sino en diseñar el currículo desde el origen para que sea accesible a través de diversos canales sensoriales.

Zamora y Marín (2021) plantean que las tiflotecnologías no deben ser entendidas como ayudas compensatorias, sino como lenguajes alternativos de aprendizaje, donde el cuerpo y los sentidos reemplazan la vista como vía principal de conocimiento. En esa línea, Sousa Varella et al. (2024) refuerzan que la aplicación de tecnologías asistidas en la educación debe considerar no solo la funcionalidad técnica, sino también su dimensión ética y pedagógica.

El proyecto XPA materializa estos principios, proponiendo que la inclusión educativa no consiste en "ver de otra manera", sino en aprender de otra forma, integrando los sentidos como mediadores cognitivos y afectivos del conocimiento.

Dispositivos asistidos y desarrollo tecnológico

El avance de las tecnologías asistidas ha generado herramientas cada vez más sofisticadas, pero no siempre accesibles o pertinentes para contextos educativos con recursos limitados. En su estudio sobre educación inclusiva en Nigeria, Adelakun et al. (2025) desarrollan el software Equation

Converter, que transforma ecuaciones matemáticas en formatos auditivos y táctiles para estudiantes ciegos. Su investigación demuestra que el bajo costo y la contextualización local son factores decisivos para la adopción de tecnologías inclusivas, ya que las soluciones importadas suelen ser inaccesibles económicamente o poco adaptadas a la realidad de los usuarios.

De manera complementaria, Berad (2025) analiza el impacto de la inteligencia artificial y los dispositivos portátiles inteligentes, como OrCam MyEye o Sunu Band, en la ampliación de la percepción sensorial. Si bien estas tecnologías representan avances notables en autonomía personal, su dependencia de hardware especializado y su alto costo las convierten en opciones poco viables para el ámbito educativo masivo. Este diagnóstico refuerza la decisión de XPA de optar por una tecnología simple, económica y reproducible, orientada a la exploración táctil y auditiva sin depender de infraestructura compleja.

Además, Nargisa (2025) destaca que el verdadero potencial de las herramientas digitales inclusivas radica en su multicanalidad y adaptabilidad, es decir, en la capacidad de combinar distintos estímulos sensoriales (visuales, auditivos, táctiles) para responder a la diversidad de estilos de aprendizaje. Bajo esta premisa, XPA se

plantea como un recurso que traduce los contenidos anatómicos visuales en representaciones táctiles tridimensionales acompañadas de retroalimentación sonora, permitiendo una comprensión completa y autónoma.

Estrategia de aprendizaje multisensorial

A través de la revisión literaria, se identificó un hallazgo crítico fundamentado en la Teoría de la Carga Cognitiva de John Sweller (1988). Esta teoría postula que la memoria de trabajo es limitada y que sobrecargarla impide el aprendizaje significativo. En el contexto de las personas con discapacidad visual, se detectó el fenómeno del "Efecto de Atención Dividida".

Este análisis teórico arrojó dos conclusiones determinantes para el diseño del proyecto:

1. La Ineficiencia de la Unimodalidad (El problema del Braille/Texto separado): Según los principios de Sweller, si se obliga al usuario a explorar un modelo táctil y, simultáneamente, a leer etiquetas en Braille o buscar información en una fuente externa, se fuerza una división de recursos cognitivos. El usuario debe interrumpir la construcción de la imagen mental táctil para decodificar el texto, causando una fragmentación de la información. Por lo que no deberíamos utilizar

el canal háptico para "leer" y "explorar la forma" al mismo tiempo; debe estar dedicado exclusivamente a la morfología.

2. La Potencia del Procesamiento de Doble Canal:

Como solución, la investigación derivó hacia la Teoría del Aprendizaje Multimedia de Richard Mayer (2001). Aunque originalmente planteada para el aprendizaje visual-auditivo, sus principios de "Codificación Dual" (Dual Coding Theory, Paivio, 1986) son aplicables al diseño inclusivo. Mayer sostiene que el aprendizaje se optimiza cuando la información verbal y la no-verbal se procesan por canales separados pero concurrentes. Por lo que al trasladar la información semántica (explicaciones, nombres) al canal auditivo, se libera el canal háptico para procesar la estructura espacial. Esto permite que el usuario integre el "qué es" (audio) con el "cómo es" (tacto) en una sola representación mental coherente, sin competencia entre sentidos.

La evidencia teórica recopilada establece que la multisensorialidad sincronizada no es una característica opcional, sino una necesidad ergonómica y cognitiva. Se concluye que el dispositivo debe evitar la dispersión de la atención y proporcionar feedback auditivo inmediato ("Principio de Contigüidad Temporal"), garantizando que la explicación suene exactamente en el momento en que el

usuario toca la zona de interés. Este requerimiento se trasladará a la fase de Definición como un pilar funcional del XPA.

Seguridad material y normativas internacionales

El desarrollo de XPA también consideró desde esta fase los aspectos normativos y de seguridad material, fundamentales en el diseño de productos educativos. De acuerdo con Stroie (2012), el Real Decreto 1205/2011 sobre seguridad de los juguetes, basado en la Directiva Europea 2009/48/CE, establece que todo producto destinado a menores o al uso educativo debe someterse a una evaluación exhaustiva de riesgos físicos, químicos, eléctricos y acústicos.

Estas normas fueron aplicadas en la selección de los materiales del prototipo (como la silicona, la resina y el polipropileno) para asegurar que sean no tóxicos, duraderos y térmicamente estables. Además, la aplicación de las normas ISO 8124 y EN 71 garantiza que el prototipo cumpla con estándares internacionales de seguridad y accesibilidad, validando su potencial de uso en contextos educativos inclusivos.

En síntesis, la revisión teórica y normativa confirmó la pertinencia del enfoque multisensorial del proyecto XPA, que se basa

en la integración de la neurociencia, la pedagogía inclusiva y el diseño accesible. Este marco conceptual constituye la base para comprender las dinámicas reales del usuario y su entorno educativo, desarrolladas en la siguiente sección.

3.2 Perspectiva del usuario

3.2.1 Perspectiva teórica del usuario

Para poder comprender al usuario, no solo realizamos entrevistas, sino que se necesita una investigación de como funciona biológicamente sus sentidos.

Neuroplasticidad y aprendizaje sensorial

La base científica del aprendizaje multisensorial se sustenta en la neuroplasticidad, es decir, la capacidad del cerebro para reorganizarse y reasignar funciones sensoriales. Estudios divulgados por Univisión (2023) indican que las personas ciegas no desarrollan una audición “más aguda”, sino una reorganización cortical que permite que el área occipital (habitualmente dedicada a la visión) participe en el procesamiento auditivo y táctil.

Esta evidencia explica por qué la estimulación simultánea de varios sentidos mejora la comprensión y la retención del conocimiento. Según los principios de la teoría del aprendizaje multisensorial, el tacto y el sonido

pueden actuar como vías cognitivas equivalentes a la vista, al permitir representar relaciones espaciales, morfológicas y funcionales de los objetos. En consecuencia, el diseño de XPA busca activar estas capacidades cerebrales, ofreciendo al usuario una experiencia de aprendizaje que no depende de la visión, sino de la percepción corporal integrada.

Percepción de mecanismo háptico

Durante el levantamiento de información nos pareció importante indagar en los procesos de exploración táctil para comprender cómo el usuario decodifica la información física. Durante esta revisión bibliográfica, se identificó como pilar teórico el trabajo de Lederman y Klatzky (1987) sobre los Procedimientos Exploratorios (EPs).

Este hallazgo permitió redefinir la comprensión del tacto, pasando de considerarlo una recepción pasiva de estímulos a entenderlo como un sistema de percepción activa. Según las autoras, el sistema háptico es "experto en la percepción de propiedades materiales" y depende intrínsecamente de la ejecución de movimientos manuales estereotipados para extraer información específica de un objeto. Como señalan Lederman y Klatzky: "Los movimientos de la mano no son arbitrarios;

son ventanas a través de las cuales el sistema háptico busca y procesa información sobre el objeto" (1987).

El análisis profundo de esta teoría reveló que, para que un usuario con discapacidad visual pueda construir una imagen mental coherente de un espécimen complejo como una abeja, el diseño del artefacto debe invitar y facilitar la ejecución de los siguientes procedimientos específicos:

Movimiento Lateral (Lateral Motion): Lederman y Klatzky identifican este movimiento (frotar los dedos sobre una superficie) como el procedimiento óptimo y necesario para determinar la textura. Las autoras sostienen que "la textura es una propiedad material que no puede ser percibida con precisión mediante el mero contacto estático" (1987).

Implicancia para XPA: Esto valida la necesidad de evitar superficies homogéneas (comunes en la impresión 3D estándar) e integrar variaciones texturales (pelo, suavidad, rugosidad) que obliguen al usuario a realizar este barrido lateral para diferenciar las zonas del insecto.

Seguimiento de Contorno (Contour Following): Descrito como el deslizamiento dinámico sobre los bordes del objeto. Según

la investigación, este es el movimiento requerido para acceder a la información geométrica precisa y la forma exacta. Debemos considerar en el diseño que debe poseer bordes definidos y transiciones claras entre las extremidades (patas, alas) y el cuerpo central, permitiendo que el dedo trace la silueta sin ambigüedades.

Envolvimiento (Enclosure): Consiste en rodear el objeto con la mano adaptándose a su forma. Lederman y Klatzky destacan que este procedimiento proporciona una "impresión global tosca" del volumen y el tamaño relativo del objeto. Esto nos lleva a considerar que el tamaño del prototipo debe ser abarcable por las manos del usuario, permitiendo un entendimiento volumétrico inmediato del aguijón a la cabeza antes de pasar a los detalles finos.

Construcción del Mapeo Cognitivo y Secuencialidad

Adicionalmente a los movimientos exploratorios, es fundamental comprender cómo se procesa esta información. Autores como Ungar (2000) destacan una diferencia crítica en la construcción de imágenes mentales: mientras la visión ofrece una percepción holística inmediata (el "todo" de un vistazo), el tacto es intrínsecamente

secuencial. El usuario construye la imagen de la abeja parte por parte (pata, luego tórax, luego ala) y debe realizar un esfuerzo cognitivo para integrar estos fragmentos en una estructura coherente. El diseño de XPA debe facilitar esta "navegación anatómica", asegurando que las conexiones entre las partes (ej. unión ala-tórax) sean lógicas y fáciles de seguir, ayudando al estudiante a ensamblar mentalmente el rompecabezas biológico.

Umbrales de Discriminación Táctil

Finalmente, para garantizar que los *Procedimientos Exploratorios* sean efectivos, se consideraron los umbrales de percepción táctil. La investigación sugiere que, para evitar la fatiga cognitiva y el error en la identificación, las diferencias texturales deben ser **supra-umbrales** (altamente contrastantes). Para el diseño de XPA no basta con que los materiales sean "algo distintos"; deben ser opuestos en sus características de fricción y dureza (ej. metal frío y rugoso vs. resina cálida y lisa). Este alto contraste asegura que el *Movimiento Lateral* arroje información inequívoca al usuario, validando la selección de materiales realizada para el prototipo.

3.2.2 Perspectiva del usuario

Entrevista y observaciones del usuario

Como parte del trabajo empírico del proyecto XPA, se realizó una sesión de entrevista y testeo exploratorio con **estudiantes del Colegio Santa Lucía**, institución especializada en educación para personas con discapacidad visual. La actividad se llevó a cabo con un grupo de niños entre **10 y 12 años**,. La mayoría de los participantes presentaba pérdida de visión total, mientras que algunos contaban con restos visuales funcionales en niveles muy reducidos.

La dinámica se estructuró en dos partes: primero, una entrevista semiestructurada orientada a conocer sus experiencias, preferencias sensoriales y estrategias de exploración; y posteriormente un pequeño testeo con prototipos preliminares, con el fin de observar su comportamiento, dificultades y posibilidades de comprensión háptica.

Durante la entrevista, los estudiantes manifestaron un alto interés por actividades que les permitan tocar, manipular y explorar objetos tridimensionales, señalando que la posibilidad de relacionar lo que escuchan con lo que perciben táctilmente les facilita comprender conceptos abstractos o propios de ciencias naturales.



Figura 4 : Entrevista/testeo

Fuente: Fotografía propia

En el testeo (figura 4), se evaluó la distancia entre las piezas del modelo anatómico. Cuando se les presentó una maqueta táctil con separación de aproximadamente 4 cm entre las piezas, los estudiantes indicaron que esa distancia era “muy cómoda” para reconocer las partes, ya que permitía no confundir los elementos y ubicarlos con facilidad. Sin embargo, también comentaron

que si todas las piezas estuvieran unidas (como en una representación anatómica real), igualmente lograrían comprender la estructura general, porque la referencia espacial se mantiene si el modelo completo está presente.

Un hallazgo significativo surgió cuando comentaron que nunca habían dimensionado el tamaño real de una abeja, por lo que sugirieron incluir dentro de la experiencia una abeja de tamaño real para comparar escalas. Este comentario evidencia la importancia de integrar recursos que permitan comprender la relación entre escala real y escala aumentada, considerando que los modelos accesibles suelen ser más grandes para facilitar la exploración táctil.

Durante la interacción, ocurrió un episodio especialmente relevante: uno de los estudiantes, aunque tenía pérdida de visión casi total, acercó uno de los prototipos (que no formaba parte directa de la interacción, pero estaba disponible en la mesa) a su ojo. Señaló que, si un objeto se acerca mucho a su ojo, puede distinguir texturas y algunos contrastes de color. Este hallazgo demuestra la diversidad de estrategias sensoriales entre los usuarios con discapacidad visual y refuerza la necesidad de diseñar experiencias que no se limiten únicamente al tacto, sino que también consideren contrastes de color y relieve

cuando sea pertinente, sin depender exclusivamente de ellos.

Como conclusión general del testeo, los estudiantes destacaron que:

La distancia de 4 cm entre piezas facilita la exploración inicial, pero no dificulta comprender un modelo unificado.

Incorporar tamaños reales junto a escalas aumentadas mejora la comprensión anatómica.

Las texturas diferenciadas son esenciales para identificar partes pequeñas.

Algunos usuarios con visión residual pueden beneficiarse de contrastes visuales, incluso si su percepción es mínima.

Aumentaría potencialmente la interacción con el usuario piezas móviles.

Testo prototipo

De manera paralela al trabajo con usuarios finales, se realizó un testeo técnico (figura 5) exploratorio en el Laboratorio de Experiencia de Usuario (UX) de la Universidad Técnica Federico Santa María. La muestra consistió en seis participantes (rango etario: 20-29 años), evaluados de manera individual para evitar sesgos y asegurar la independencia de los datos. Cabe señalar que este testeo no fue realizado con el usuario objetivo final del proyecto, correspondiente a usuario con discapacidad visual entre 10 y 15 años. Esta decisión responde a que la evaluación tuvo un carácter exploratorio y de baja fidelidad, cuyo propósito principal fue validar aspectos técnicos preliminares del sistema, tales como la inteligibilidad de los audios, el volumen de reproducción y la percepción general de la experiencia auditiva. Asimismo, se requería realizar las pruebas en un tiempo acotado y con una muestra accesible y homogénea, razón por la cual se seleccionaron estudiantes universitarios de entre 20 y 29 años pertenecientes a la Universidad Técnica Federico Santa María.

Herramientas de Simulación: Para emular las condiciones de percepción del usuario objetivo, se utilizó un simulador de déficit

visual consistente en gafas modificadas (filtros de opacidad y distorsión). Esta herramienta restringió la visión a la percepción de sombras borrosas, obligando a los participantes a depender prioritariamente de sus canales auditivos y hápticos para la interacción (Ver Figura 6).

Evaluación del Sistema de Audio: El objetivo central fue determinar los parámetros acústicos óptimos para la inteligibilidad. Se sometieron a prueba dos configuraciones:

Audio A: Voz generada por síntesis artificial (TTS), a ~60 dB.

Audio B: Voz humana natural grabada, a ~70 dB.

Resultados y Decisiones Técnicas: El análisis comparativo arrojó las siguientes definiciones para el sistema de sonido del XPA:

Preferencia por Voz Artificial: Los participantes mostraron una clara inclinación hacia el Audio A (sintético). La voz artificial fue percibida como más nítida, con una dicción más uniforme y "fácil de procesar" cognitivamente en ausencia de pistas visuales. Como oportunidad de mejora, se sugirió una leve reducción en la velocidad de reproducción (WPM) para facilitar la retención.

Nivel de Presión Sonora (Volumen):

Respecto a la intensidad, la configuración de 70 dB fue la mejor valorada. Este nivel demostró ofrecer una relación señal-ruido óptima, garantizando una percepción clara sin llegar a ser invasiva o molesta para el usuario.

Fuente: Fotografía propia

3.2.3 Mapa de empatía

A partir de las entrevistas realizadas en el Colegio Santa Lucía, se construyó el siguiente mapa de empatía (figura 6). Su objetivo principal es visualizar el sentir del usuario y revelar aquellos aspectos o variables críticas que no se perciben a simple vista, pero que son determinantes para el diseño.



Figura 5: Testeo

Mapa De Empatía



Figura 6: Mapa de empatía

Fuente: Elaboración Propia [Oct 2025]

3.3 Análisis del contexto BeeLab

el proyecto XPA se desarrolla en el contexto del BeeLab, un apiario educativo y espacio de mediación científica vinculado a la Universidad Técnica Federico Santa María, orientado a la investigación, preservación y enseñanza sobre la importancia de las abejas dentro de los ecosistemas. Su propósito es fomentar la conciencia ambiental y la educación científica a través de experiencias participativas, conectando a la comunidad con la biología y la tecnología desde una perspectiva sostenible.

A diferencia de un laboratorio tradicional, BeeLab combina investigación biológica, innovación tecnológica y mediación educativa, transformando el apiario en un entorno de aprendizaje activo donde la observación, el diseño y la experimentación se utilizan para comunicar la ciencia. Su enfoque pedagógico se fundamenta en el principio de aprender haciendo y en la educación experiencial, promoviendo la comprensión del rol ecológico de las abejas mediante la exploración directa de su morfología, comportamiento y función dentro del ecosistema.

Desde este enfoque, la inclusión educativa se concibe como parte integral de la divulgación científica: hacer accesible el conocimiento sobre las abejas implica diseñar herramientas

y recursos que puedan ser comprendidos por todos los públicos, incluidos aquellos con discapacidad visual. Por ello, XPA se plantea como una extensión inclusiva del BeeLab, un dispositivo que traduce los contenidos visuales de la anatomía de la abeja obrera en experiencias táctiles y auditivas que permitan explorar, reconocer y comprender la estructura de estos insectos polinizadores.

El apiario, además de funcionar como espacio de observación y experimentación biológica, actúa como un laboratorio educativo de diseño biocentrado, donde se generan maquetas, modelos y dispositivos interactivos que integran ciencia y arte para acercar la biología a distintos tipos de público. En este contexto, XPA aporta una nueva capa de accesibilidad sensorial, abriendo la posibilidad de que las personas con discapacidad visual participen activamente en las actividades del BeeLab, explorando la anatomía y la importancia de las abejas a través del tacto, el sonido y la interacción.

3.4 Perfil y caracterización del usuario

El usuario principal del proyecto XPA: Experiencia de Aprendizaje Accesible corresponde a **niños, niñas y adolescentes con discapacidad visual total o parcial**, con un **rango etario de 10-15 años**. Este rango

etario se definió a partir de la observación de los grupos que frecuentemente participan en visitas escolares al BeeLab, donde la experiencia educativa se centra en la comprensión del mundo de las abejas y su rol en el ecosistema.

Desde el punto de vista cognitivo, los usuarios en este rango buscan **autonomía** y participación en el aprendizaje. Tienden a mostrar motivación cuando las actividades les permiten descubrir por sí mismos, tomar decisiones y manipular objetos reales.

3.5 Objetivo del benchmark

El objetivo del benchmark fue reconocer y analizar herramientas nacionales e internacionales que abordan el aprendizaje inclusivo desde la dimensión sensorial y tecnológica, con el fin de identificar los elementos que puedan inspirar, mejorar o diferenciar la propuesta XPA. Este análisis permitió comprender qué estrategias de mediación táctil, auditiva o háptica se han implementado en otros proyectos y cómo éstas influyen en la autonomía cognitiva de los usuarios.

Criterios de inclusión y exclusión

Para la selección de los referentes, se definieron criterios de inclusión y exclusión

que garantizaran la pertinencia y coherencia con los objetivos del proyecto:

Criterios de inclusión:

- Productos o proyectos orientados a la enseñanza o mediación de contenidos científicos o espaciales.
- Experiencias dirigidas a personas con discapacidad visual total o parcial.
- Herramientas que incorporen al menos un canal sensorial sin considerar el visual (tacto, sonido o movimiento).
- Iniciativas con base tecnológica, pedagógica o de diseño accesible.
- Casos que cuenten con documentación o estudios previos verificables.

Criterios de exclusión:

- Recursos centrados exclusivamente en la lectura braille sin componentes interactivos.
- Proyectos comerciales sin orientación educativa.
- Tecnologías orientadas solo a la movilidad o asistencia personal (bastones, GPS, etc.).

3.6 Benchmark

Con base en estos criterios, se seleccionaron ocho referentes que representan enfoques

complementarios en el ámbito de la accesibilidad sensorial, el diseño inclusivo.

i. TactileView

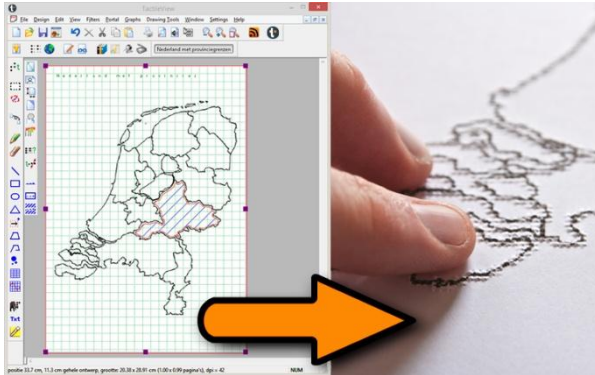


Figura 7: TactileView

Fuente: <https://www.tactileview.com/>

Software que permite crear e imprimir gráficos táctiles en relieve mediante impresoras braille o térmicas (figura 7). Facilita el acceso de personas con discapacidad visual a gráficos matemáticos, mapas y esquemas. Su fortaleza radica en la precisión del lenguaje táctil y su compatibilidad con dispositivos de lectura de pantalla. Sin embargo, su uso requiere equipamiento especializado y conocimientos técnicos previos, lo que limita su alcance en contextos educativos con menos recursos (Zamora & Marín, 2021).

ii. 3Doodler EDU



Figura 8: 3Doodler EDU

Fuente: <https://intl.the3doodler.com/products/start-learning-pack-12-pens>

Herramienta educativa que utiliza un lápiz 3D para crear figuras tangibles mediante filamentos plásticos (figura 8). Promueve la exploración manual y la creatividad al permitir construir modelos tridimensionales en tiempo real. Aunque no fue diseñada específicamente para discapacidad visual, su potencial háptico y didáctico la convierte en una herramienta de apoyo valiosa. Su principal debilidad radica en la falta de integración auditiva o guías de seguridad táctil.

iii. NVDA



Figura 9: Imagen referencial

Fuente:

<https://www.gob.mx/conadis/articulos/la-tecnologia-y-la-discapacidad>

Herramienta que permite navegar por Internet usando Internet Explorer o Firefox, por medio del proceso de síntesis vocal mediante la accesibilidad MSAa (figura 9). Permite explorar el sistema de archivos y utilizar cualquier aplicación de Windows al reproducir por los altavoces el título de las ventanas abiertas, las entradas de los menús y sus opciones o enumerar los elementos existentes en el interior de una carpeta. Permite la lectura y redacción de documentos usando Wordpad o el Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft

Power Point, Reproductor de Windows Media, Windows Live Mail, Skype, Facebook, Twitter, (a través de una aplicación que se llama Kwitter), Acrobat Reader (versiones 10 o 11, lectura de PDF), Panel de Control, Correos Gmail. Muy similar a Jaws en su funcionamiento, NVDA se diferencia de éste que es una aplicación de código abierto y, por tanto, gratuita (SENADIS, 2017).

iv. OrCam MyEye



Figura 10: OrCam MyEye

Fuente: <https://www.orcam.com/>

Dispositivo portátil de inteligencia artificial que se adhiere a lentes convencionales y convierte el texto y los rostros en información sonora (figura 10). Permite a las personas ciegas leer, identificar productos y reconocer entornos. Su fortaleza radica en su alto nivel de autonomía individual, pero su costo elevado lo hace poco viable en contextos educativos masivos (Berad, 2025).

V.Sunu Band



Figura 11: Sunu Band

Fuente:

<https://www.sightandsound.co.uk/case-study-sunu-band/>

Reloj inteligente con sensores ultrasónicos que traduce la distancia a vibraciones hápticas (figura 11), ayudando a la orientación espacial. Aunque su propósito es la movilidad, su principio de traducción sensorial háptica sirve como inspiración para desarrollar experiencias de aprendizaje basadas en el movimiento y la percepción del espacio.

vi. Equation Converter
Desarrollado por Adelakun et al. (2025), este software traduce ecuaciones matemáticas a

formatos accesibles para lectores de pantalla y pantallas braille. El estudio demostró que las soluciones de bajo costo y localmente desarrolladas pueden reducir significativamente la exclusión educativa en contextos con recursos limitados. Sin embargo, su aplicación se centra en el área matemática y no considera la dimensión táctil tridimensional.

vii. Tifloactivo



Figura 12: Tifloactivo

Fuente:<https://www.tifloactiva.com>

Laboratorio inclusivo orientado al diseño y desarrollo de estructuras accesibles para personas con discapacidad visual (figura 12).

Su trabajo se centra en la creación de entornos y mobiliarios táctiles que promueven la autonomía y orientación espacial. Destaca por su enfoque interdisciplinario que combina arquitectura, diseño y accesibilidad universal, aunque su implementación aún se limita a contextos institucionales y proyectos específicos.

viii. Proyecto TifloTEC



Figura 13: proyecto títloTEC

Fuente: <https://tiflotec.es/>

Programa chileno que enseña a escolares con discapacidad visual el uso de tecnologías digitales,(figura 13) promoviendo la alfabetización tecnológica y la autonomía. Si bien no produce materiales científicos tangibles, aporta un modelo educativo integral de inclusión digital, relevante para comprender las dinámicas de aprendizaje de los futuros usuarios de XPA.

Tabla 1:Comparativo de referentes educativos multisensoriales

Referente	País / Institución	Canal sensorial principal	Tipo de interacción	Ventajas	Limitaciones	Aportes a XPA
TactileView	Países Bajos	Tacto	Software gráfico	Precisión de relieve, inclusión visual-táctil	Requiere impresora braille	Referente en codificación táctil
3Doodler EDU	EE. UU.	Tacto	Manual / creativa	Potencia el aprendizaje activo	No incorpora sonido	Base para exploración manual
NVDA español	España	Auditivo	Lector de pantalla	Potencial interaccion autonoma, bajo costo	Solo lectura de pantalla, no interacción con el ambiente ni con otras personas.	Referentes de herramienta de aprendizaje
OrCam MyEye	Israel	Auditivo	Inteligencia artificial	Lectura y autonomía	Alto costo	Inspiración para retroalimentación sonora
Sunu Band	México / EE. UU.	Háptico	Vibraciones espaciales	Reconocimiento espacial	Uso limitado en educación	Referencia para percepción del entorno
Equation Converter	Nigeria	Auditivo / táctil	Software educativo	Solución de bajo costo	Limitado al ámbito matemático	Ejemplo de contextualización accesible
Tiflollab	Chile	Táctil	Impresión 3D	Inclusión en educación STEM	Acceso restringido	Base local de aprendizaje háptico
TifloTEC	Chile	Auditivo / digital	Formación educativa	Enfoque pedagógico inclusivo	No aborda contenido científico	Contexto educativo y social del usuario

Figura14: *Tabla comparativa de referentes educativos multisensoriales*

3.7 Aportes al proyecto y posicionamiento de XPA

El análisis comparativo de los referentes nacionales e internacionales (figura 14) permitió detectar una fragmentación en la oferta actual: la mayoría de las soluciones se especializan en un único canal sensorial (solo tacto o solo audio) o dependen de infraestructuras digitales complejas. Esta revisión evidenció un nicho de oportunidad para el proyecto XPA: la necesidad de un dispositivo híbrido que integre la tangibilidad del modelo físico con la profundidad informativa del audio, resolviendo la desconexión que existe entre "tocar" y "entender".

Sinergia entre Estándares Globales y Realidad Local :El posicionamiento de XPA surge de la convergencia de dos mundos:

La Precisión Internacional: De referentes como *TactileView* y *Equation Converter*, el proyecto rescata la rigurosidad en la codificación de la información y la validación de que las tecnologías de bajo costo pueden tener un alto impacto educativo.

La Pertinencia Local: De iniciativas chilenas como *Tifloactivo* y *TifloTEC*, se adopta la comprensión profunda del contexto escolar nacional, donde la durabilidad, la simplicidad

de mantenimiento y la independencia de conexión a internet son requisitos operativos críticos.

En este sentido, XPA no busca competir con la sofisticación de la IA de *OrCam MyEye* ni con la producción industrial de *TactileView*. Su propuesta de valor es democratizar el acceso al conocimiento biológico mediante una **tecnología intermedia**, que sea replicable en un BeeLab o en una escuela pública, pero que ofrezca una experiencia pedagógica superior a la de una maqueta estática tradicional.

Pilares Diferenciales de la Propuesta En síntesis, el benchmark permite cimentar la propuesta de XPA sobre tres pilares fundamentales que lo distinguen de las soluciones existentes:

1. **Multimodalidad Sincronizada (Reducción de Carga Cognitiva):** A diferencia de usar una lámina táctil y un audiolibro por separado, XPA ofrece una respuesta inmediata. Al integrar tacto, sonido y reactividad en el mismo objeto, se garantiza el principio de contigüidad temporal, facilitando la construcción de una imagen mental coherente sin dispersar la atención del usuario.
2. **Autonomía en la Exploración (Diseño Centrado en el Usuario):** Mientras que

herramientas como *3Doodler* requieren supervisión para evitar riesgos o explicar la forma, XPA está diseñado para la auto-gestión del aprendizaje. La inclusión de guías táctiles y audio-descripciones permite que el estudiante navegue el contenido a su propio ritmo, validando su independencia.

3. **Seguridad y Replicabilidad Contextual:** Frente a barreras de entrada como el alto costo (*OrCam*) o la seguridad térmica (*3Doodler*), XPA se posiciona como un dispositivo seguro, fabricado con materiales normados (no tóxicos, estables) y procesos de manufactura accesibles, asegurando su viabilidad de

implementación en el contexto educativo real de Chile.

3.8 Análisis FODA

Para establecer una visión estratégica sobre la viabilidad del proyecto, se elaboró una matriz FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas). Esta herramienta permitió identificar las condiciones endógenas (internas del diseño) y exógenas (del contexto educativo y mercado) que influyen en el desarrollo e implementación del XPA.



Figura 15: Análisis FODA

Fuente: Elaboración propia [oct 2025]

El cruce de variables de la matriz (figura 15) arroja un diagnóstico estratégico que define el rumbo del proyecto:

1. Análisis Interno (Fortalezas y Debilidades): El principal activo del XPA reside en su rigurosidad técnica y validación humana. A diferencia de prototipos conceptuales, XPA cuenta con una fortaleza crítica: la validación empírica con usuarios reales (estudiantes del Colegio Santa Lucía) y el cumplimiento de estándares internacionales de seguridad (ISO 8124 y EN 71). Esto le otorga una ventaja competitiva en términos de seguridad y adecuación ergonómica. Sin embargo, esta calidad constructiva conlleva una debilidad inherente a su etapa de prototipo: la dependencia de una producción artesanal. La necesidad de mantenimiento de los componentes electrónicos y los costos asociados a materiales de alta durabilidad plantean un desafío para la escalabilidad masiva sin una inversión inicial significativa.

2. Análisis Externo (Oportunidades y Amenazas): El entorno presenta un escenario favorable impulsado por la creciente demanda de inclusión en espacios culturales. Existe una oportunidad clara de vinculación con museos, centros interactivos y universidades (como el contexto BeeLab) que buscan activamente cumplir con normativas de accesibilidad universal. No obstante, el proyecto debe

navegar en un ecosistema amenazante caracterizado por la escasa inversión pública en tecnologías inclusivas y la competencia desleal de dispositivos comerciales de alto costo o exhibiciones puramente digitales que, aunque visualmente impactantes, suelen carecer de accesibilidad táctil real.

El análisis FODA evidencia que la viabilidad del XPA depende de aprovechar su calidad certificada (Fortaleza) para mitigar la desconfianza en la inversión (Amenaza). La estrategia por seguir consiste en posicionar al XPA no como un producto de consumo masivo, sino como una herramienta institucional de mediación, donde su durabilidad y seguridad justifiquen la inversión inicial ante museos y centros educativos, diferenciándose de las soluciones digitales efímeras mediante una experiencia sensorial tangible y científicamente validada.

3.9 Conclusión de etapa descubrir

La etapa de Descubrir permitió construir una comprensión multidimensional del ecosistema en el que se inserta el proyecto XPA: Experiencia de Aprendizaje Accesible. Mediante la triangulación entre la revisión teórica, el análisis de mercado (benchmark) y la validación empírica con usuarios, se logró diagnosticar las brechas sistémicas que perpetúan la exclusión en la enseñanza de las ciencias, transformando una problemática general en oportunidades de diseño concretas.

1. Diagnóstico del Problema: La Hegemonía Visual Se confirmó que la barrera principal no radica en las capacidades cognitivas de los estudiantes, sino en un sistema educativo que privilegia la visión como única vía de acceso al conocimiento biológico. La investigación validó la necesidad de un cambio de paradigma: transitar desde la adaptación de contenidos (hacer un texto en Braille) hacia una transformación pedagógica basada en el Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA), donde el cuerpo y los sentidos se legitiman como canales primarios de construcción intelectual.

2. Fundamentación Científica del Usuario (El "Por qué") Uno de los hallazgos más críticos

de esta fase fue la validación neurocientífica y cognitiva de la propuesta.

A nivel háptico: Basado en Lederman & Klatzky, se concluyó que la "mera forma 3D" es insuficiente. El diseño debe facilitar procedimientos exploratorios específicos (frotar, seguir contornos) mediante contrastes texturales supra-umbrales.

A nivel cognitivo: La Teoría de la Carga Cognitiva evidenció que la exploración táctil silenciosa o acompañada de lectura Braille satura la memoria de trabajo. Esto define al audio integrado no como un accesorio, sino como un requerimiento funcional imperativo para liberar el canal háptico y permitir la codificación dual (forma + significado).

3. Oportunidad Estratégica y Contextual (El "Dónde") El análisis de referentes posicionó a XPA en un nicho desatendido: el "punto medio" entre las soluciones digitales inaccesibles económicamente (OrCam) y las soluciones artesanales carente de interactividad (maquetas estáticas). Además, el contexto del BeeLab se identificó como el entorno idóneo para la incubación del proyecto, al ofrecer un laboratorio de "aprender haciendo" que permite testear la tecnología en un escenario de mediación científica real, vinculando la innovación tecnológica con la conciencia ecológica.

4. Síntesis de Requerimientos Materiales
Empíricamente, se determinó que la combinación de materiales de alta durabilidad (silicona, resina, polipropileno) y la electrónica de bajo costo (Arduino/Audio) constituye la ruta viable para garantizar la replicabilidad del dispositivo en el contexto educativo chileno, cumpliendo con los estándares de seguridad normativa (ISO 8124).

Conclusión General y Paso a la Fase Definir
En síntesis, la fase de Descubrir ha sentado las bases conceptuales y técnicas del proyecto. A modo de cierre, los hallazgos se cristalizan en cuatro ejes rectores que alimentarán la etapa de Convergencia (Definir):

Dimensión Teórica: Adopción del enfoque multisensorial sincronizado para reducir la carga cognitiva.

Dimensión Tecnológica: Desarrollo de una tecnología intermedia, segura y replicable localmente.

Dimensión Empírica: Diseño centrado en la autonomía del usuario y en la navegación anatómica secuencial.

Dimensión Pedagógica: Validación del aprendizaje activo como medio para la comprensión de estructuras biológicas complejas.

Con estos cimientos, el proyecto avanza hacia la fase de Definición, donde estos "insights" se traducirán en requerimientos técnicos precisos, objetivos de diseño y lineamientos formales para la materialización del prototipo XPA.

4 DEFINIR

La etapa de Definición constituye la fase de convergencia estratégica del proyecto. Su propósito fundamental fue transformar la vasta información recopilada en la fase de Descubrimiento (teoría, contexto y empatía) en lineamientos de diseño precisos y ejecutables.

Mientras que la fase anterior buscó ampliar la comprensión del problema (divergencia), esta etapa se centra en la síntesis y estructuración: se delimita el alcance del proyecto, se formaliza la propuesta de valor y se traducen las necesidades del usuario en requerimientos funcionales y normativos. Es aquí donde los hallazgos abstractos se convierten en las reglas que regirán la materialización del prototipo XPA.

4.1 Definición del Problema y Oportunidad de Diseño

A partir de la triangulación de los antecedentes, se ha formulado el problema central que articula el desarrollo del proyecto:

¿Cómo diseñar un recurso educativo multisensorial que permita a estudiantes con discapacidad visual explorar de manera autónoma la anatomía de la abeja melífera obrera, integrando estímulos táctiles y auditivos bajo estándares de seguridad, comprensión morfológica y significancia pedagógica?"

De esta interrogante emerge una oportunidad de diseño clara: desarrollar una tecnología inclusiva intermedia que combine la interactividad física (tacto activo) con la codificación sonora (contexto semántico). El objetivo no es sustituir la visión, sino expandir el horizonte pedagógico integrando el cuerpo, el oído y el movimiento como lenguajes legítimos para la construcción del conocimiento científico en contextos con recursos limitados.

4.2 Propuesta de Valor: Superando la Barrera del Riesgo

El proyecto XPA trasciende la categoría de material didáctico tradicional para posicionarse como un dispositivo de habilitación sensorial. Su valor diferencial se sustenta en dos pilares que responden

a las necesidades latentes detectadas en el Mapa de Empatía:

Accesibilidad a lo "Intocable"

(Seguridad): Frente a la interrogante "¿Cómo podemos conocer realmente la textura de una abeja?", nos encontramos con una barrera física insalvable: la mayoría de las personas construye su idea de la textura de la abeja exclusivamente a través de la visión. La interacción táctil directa con el espécimen vivo es inviable debido a su velocidad, fragilidad y, sobre todo, al riesgo de picadura. XPA resuelve esta paradoja de seguridad: ofrece una experiencia que traduce la textura, la morfología y la estructura del insecto a un formato tangible y seguro. Permite "tocar lo intocable", otorgando al usuario el acceso a una realidad biológica que, de otro modo, le estaría vedada por razones de seguridad física.

Autonomía Cognitiva (Independencia): A diferencia de las adaptaciones convencionales que requieren de un tutor que describa lo que el estudiante toca, XPA incorpora un sistema de autonomía integrada. La inclusión de audios

explicativos y trivias activables por el usuario responde directamente al deseo de independencia manifestado en la investigación. El dispositivo actúa como su propio mediador, permitiendo que el estudiante controle el ritmo y el flujo de su aprendizaje, transformando una experiencia pasiva en una exploración activa.

4.3 Principales partes de la abeja

El proyecto centra su desarrollo en la abeja melífera obrera, seleccionada por ser la casta más abundante en el contexto de BeeLab y la encargada de las tareas de recolección y polinización, lo que la convierte en el eje educativo principal.

Para establecer los requerimientos formales y texturales del prototipo, se realizó un levantamiento morfológico directo mediante una salida a terreno a las colmenas del BeeLab. La metodología consistió en la observación a corta distancia de los panales y la recolección ética de una muestra (especimen en estado de deceso natural) para su análisis detallado. Posteriormente, la muestra fue sometida a una sesión de macro-fotografía

mediante endoscopio, permitiendo identificar texturas microscópicas imperceptibles a simple vista (Ver Figuras 16 a 21).

A continuación, se define la caracterización funcional y textural de cada segmento corporal:

Cabeza:



Figura 16: cabeza de abeja melífera

Fuente: fotografía tomada de abeja melífera obrera

Función Biológica: Centro sensorial y de alimentación. Aloja los ojos compuestos (visión de movimiento y color), los tres ocelos (sensores de intensidad lumínica) y las antenas, que actúan como el sistema principal de tacto y olfato. En la zona

inferior se ubica el aparato bucal (mandíbulas y probóscide).

Definición Textural (Requerimiento): La observación revela un contraste táctil evidente. La zona superior (vértex) presenta una base oscura con una pilosidad densa y fina. En contraposición, los ojos compuestos destacan por ser superficies lisas, brillantes y libres de pelo, similares a una textura resinosa o vítrea.

Decisión de Diseño: Se debe replicar el contraste entre la "suavidad lisa" de los ojos y la "rugosidad pilosa" de la frente para facilitar la orientación táctil que se encuentran en la cabeza (figura 16).

Tórax



Figura 17: Torax de abeja melífera

Fuente: fotografía tomada de abeja melífera obrera

Función Biológica: Es el motor locomotor del insecto. Sostiene los órganos de movimiento: dos pares de alas y tres pares de patas. Es una estructura robusta y muscular.

Definición Textural (Requerimiento): El tórax (figura 17) es la zona con mayor densidad de pelo. Presenta una base oscura cubierta por una pilosidad abundante y tupida (generalmente de tonos amarillentos/café), diseñada

evolutivamente para atrapar granos de polen.

Decisión de Diseño: La textura debe ser la más "peluda" y suave del modelo, diferenciándose claramente de la dureza del abdomen y la cabeza.

Abdomen



Figura 18: Abdomen de abeja melífera

Fuente: fotografía tomada de abeja melífera obrera

Función Biológica: Contiene los órganos viscerales, el estómago de miel (buche), las glándulas cereras y, en su extremo

posterior, el mecanismo de defensa. Está formado por segmentos articulados que permiten su expansión y movimiento.

Definición Textural (Requerimiento): A diferencia del tórax, el abdomen (figura 18) presenta una superficie más rígida y segmentada (quitinosa). Aunque posee pelos, estos son más escasos y rígidos. Visualmente destaca por sus franjas de advertencia.

Decisión de Diseño: Se priorizará una textura lisa pero anillada (con relieve escalonado) similar a la resina, incorporando pelos rígidos dispersos. Esto permitirá al usuario sentir la segmentación y diferenciarlo del tórax esponjoso.

Patatas



Figura 19: Patas de abeja melífera

Fuente: fotografía tomada de abeja melífera obrera

Función Biológica: Organizadas en tres pares (delanteras, medias y traseras) con funciones especializadas de limpieza, estabilidad y carga. Destaca el tercer par de patas (figura 19) por poseer la corbícula (canasta de polen), una concavidad vital para el transporte de recursos.

Definición Textural (Requerimiento): Son estructuras tubulares y articuladas de quitina dura. Presentan setas (pelos) rígidas y firmes, similares a cepillos, que sirven para limpiar y peinar el polen.

Decisión de Diseño: Deben sentirse como elementos duros y delgados, con texturas de "cepillo" en zonas específicas, facilitando su identificación al tacto.

Alas



Figura 20: Alas de abeja melífera

Fuente: fotografía tomada de abeja melífera obrera

Función Biológica: Dos pares (anteriores y posteriores) membranosos. Poseen un sistema de enganche (hamuli) que une ambas alas (figura 20) para formar una sola superficie aerodinámica durante el vuelo.

Definición Textural (Requerimiento): Son láminas extremadamente delgadas,

membranosas y reforzadas por venas rígidas.

Decisión de Diseño: La textura debe ser lisa, fría y flexible, con un relieve sutil que marque las venaciones, diferenciándose drásticamente de las partes corporales peludas o voluminosas.

Aguijón



Figura 21: cabeza de abeja melífera

Fuente: fotografía tomada de abeja melífera obrera

Función Biológica: Mecanismo de defensa retráctil situado al final del abdomen. Posee lancetas con micro-barbas (dientes invertidos) que actúan como un arpón,

impidiendo su extracción de la piel de mamíferos.

Definición Textural (Requerimiento): Debido a su escala microscópica, la textura aserrada es imperceptible al tacto humano en una abeja real.

Decisión de Diseño: Para efectos educativos, se aplicará una exageración háptica. La textura del aguijón (figura 21) en el prototipo incluirá un relieve dentado o rugoso perceptible, permitiendo que el estudiante comprenda físicamente por qué el aguijón se queda enganchado, transformando un dato visual en una experiencia táctil.

4.4 Requerimientos y criterios de diseño

Los requerimientos se organizaron en cinco categorías estratégicas: funcionales, materiales, ergonómicos, cognitivos y normativos. Esta clasificación responde a la evidencia levantada en el análisis de referentes, donde se identificó que la funcionalidad es un aspecto crítico a menudo descuidado en soluciones que no logran equilibrar la interacción táctil y auditiva.

Asimismo, basándose en la literatura neurocientífica revisada, se consideró que la estimulación multisensorial es el vehículo óptimo para el aprendizaje en personas con discapacidad visual, quienes reasignan recursos cognitivos para fortalecer la percepción háptica y auditiva. Finalmente, los aspectos normativos (ISO/EN) se establecen como innegociables para garantizar la seguridad en un contexto de uso infantil.

A continuación, se detallan los requerimientos específicos del prototipo XPA:

Tabla 3. Requerimientos del diseño del prototipo

Categoría	Requerimientos específicos	Justificación
Funcionales	→ El modelo debe emitir una respuesta sonora asociada a cada zona táctil. → Permitir exploración autónoma sin supervisión constante.	Principio de Contigüidad Temporal (Mayer) y reducción de carga cognitiva.
Materiales	→ Uso de materiales no tóxicos. → Resistencia al calor, humedad y manipulación constante.	Seguridad según EN 71 y teoría de Procedimientos Exploratorios (Lederman).
Ergonómicos	→ Dimensiones adaptadas a la manipulación con ambas manos. → Bordes redondeados y textura diferenciada por sección anatómica.	Adaptación física a las capacidades motoras del usuario objetivo.
Cognitivos	→ Asociación inmediata entre forma, textura y función biológica. → Inclusión de narraciones breves que refuercen el aprendizaje.	Refuerzo de la memoria de trabajo y creación de imágenes mentales coherentes del objeto.
Normativos	→ Cumplimiento de las normas ISO 8124 / EN 71. → Protección de componentes eléctricos y límites acústicos ≤ 80 dB. → Limitación de presión sonora máxima a 80 dB para evitar fatiga o daño auditivo.	Cumplimiento ético y normativos.

Estos requerimientos garantizan que el diseño sea accesible, seguro y pedagógicamente eficaz, alineando los principios del diseño universal con los estándares de seguridad internacional. El detalle de la normativa aplicada se encuentra en el Anexo B.

4.5 Análisis final de la etapa Definir

La culminación de la etapa Definir ha permitido consolidar la transición estratégica entre la exploración divergente y la ejecución convergente. Este proceso de síntesis ha logrado traducir una problemática educativa compleja en un conjunto estructurado de criterios de diseño que regirán el desarrollo del prototipo.

El análisis de cierre reafirma tres aprendizajes centrales que definen la identidad del proyecto:

Co-autoría en el Diseño Inclusivo: La inclusión efectiva trasciende la validación empírica; requiere diseñar "con" el usuario y no solo "para" él. Se establece que la

participación de las personas con discapacidad visual actúa como un mecanismo de co-autoría, donde su experiencia perceptiva directa garantiza que la propuesta sea pedagógicamente pertinente y sensorialmente lógica.

Robustez Técnica y Museográfica: Se concluye que la accesibilidad sensorial debe complementarse con una accesibilidad técnica. Para que la experiencia sea viable en entornos de uso intensivo como museos o centros interactivos (BeeLab), el diseño debe garantizar durabilidad. El artefacto no solo debe comunicar contenido, sino resistir el contacto continuo y ofrecer un mantenimiento sostenible, superando la fragilidad de los prototipos conceptuales.

Valor en la Fidelidad de la Experiencia: El valor diferencial del XPA radica en la calidad de la mediación sensorial y la fidelidad de la experiencia inmersiva. Si bien se busca la eficiencia en la producción, la prioridad estratégica es ofrecer una interacción táctil y auditiva de alta resolución capaz de transformar la relación entre el cuerpo y el conocimiento

científico. La propuesta se posiciona así por su eficacia educativa más que por una mera reducción de costos.

En conjunto, esta fase ha cimentado las bases conceptuales y técnicas del XPA, orientando la siguiente etapa (Idear) hacia la generación de soluciones que sean creativas, funcionales y rigurosamente validadas.

4.6 Estrategia de Validación y Evaluación

Para asegurar que el prototipo resultante cumpla con los estándares definidos, se abordará la validación desde un enfoque mixto, combinando métricas cuantitativas (desempeño técnico) con evaluaciones cualitativas (experiencia de usuario):

A. Validación Cuantitativa (Técnica):

Rúbrica de Cumplimiento: Aplicación de una matriz de control donde se calificará cada requerimiento (fidelidad de texturas, latencia de audio, seguridad de ensamblaje, ergonomía) en una escala de 1 a 5.

Métricas de Desempeño: Evaluación objetiva del porcentaje de cumplimiento de los parámetros técnicos críticos, tales como la resistencia mecánica de los materiales, la estabilidad de la conexión electrónica y la calidad acústica (db).

B. Validación Cualitativa (Experiencia):

Observación de Campo: Registro directo durante sesiones de uso con el equipo del BeeLab y voluntarios (usuarios de prueba), documentando comportamientos de exploración, tiempos de interacción y barreras de uso.

Juicio de Expertos: Retroalimentación formal por parte de docentes y profesionales del área biológica y educativa, evaluando la claridad de los contenidos, la pertinencia didáctica y la narrativa del guion auditivo.

5 DESARROLLO

Para garantizar la materialización exitosa y la funcionalidad integral del XPA, la etapa de desarrollo se estructuró en torno a **cuatro ejes fundamentales**. Esta división estratégica responde a la necesidad de articular la complejidad técnica del prototipo con la experiencia educativa del usuario, asegurando que cada dimensión del diseño cumpla un rol pedagógico específico:

Arquitectura: Constituye el soporte físico y estructural del dispositivo. Su función es garantizar la integridad mecánica y la representación morfológica fiel del espécimen, sirviendo de base estable para la integración de todos los componentes electrónicos y materiales.

Textura: Se enfoca en la fidelidad háptica y visual. A través de una selección meticulosa de materiales (como resina y fibras metalizadas), este eje busca proporcionar una **estimulación sensorial realista**, permitiendo al usuario comprender las características físicas del insecto mediante el tacto activo.

Interacción: Define la lógica de comunicación entre el usuario y el dispositivo. Este eje se centra en la usabilidad y la respuesta del sistema (entradas y salidas), asegurando que la exploración del prototipo sea intuitiva, dinámica y libre de errores operativos.

Sonido: Actúa como el canal narrativo y atmosférico. Su implementación es clave para complementar la experiencia táctil, entregando información auditiva ("etiquetas semánticas") que guía el aprendizaje, profundiza la inmersión y reduce la carga cognitiva.

5.1 Metodología de Ideación (SCAMPER)

Una vez definidos los ejes estratégicos, y con el objetivo de generar soluciones creativas para cada uno de ellos, se aplicó la técnica **SCAMPER**. Esta herramienta permitió cuestionar los enfoques tradicionales de la enseñanza biológica y proponer innovaciones específicas para la accesibilidad multisensorial.

Variable	Pregunta	Aplicación de Xpa
S - Sustituir	¿Qué podemos sustituir para mejorar la accesibilidad?	Se sustituye la lectura de textos en Braille (que requiere pausa y decodificación) por audio-descripciones inmediatas, permitiendo una exploración fluida y sin interrupciones cognitivas.
C- Combinar	¿Qué elementos podemos combinar para enriquecer la experiencia?	Se combina un modelo anatómico físico con una interfaz electrónica interactiva . La fusión de tacto + sonido crea una sinergia que supera a las maquetas mudas tradicionales.
A-Adaptar	¿Qué debemos adaptar del objeto real para el usuario?	Se adapta la escala del espécimen. Dado que una abeja real es demasiado pequeña para el tacto humano, se escala el modelo a dimensiones manipulables (50 cm) para hacer perceptibles sus detalles.
M - Modificar	¿Qué atributos debemos modificar o magnificar?	Se magnifican las texturas . Se exageran rasgos microscópicos (como las barbas del aguijón o la pilosidad del tórax) utilizando materiales de alto contraste para que sean detectables por el tacto (hiper-realismo háptico).
P - Poner en otro uso	¿En qué otro contexto se puede usar?	El dispositivo deja de ser solo una herramienta de biología para convertirse en un objeto de mediación museográfica en el BeeLab y en una herramienta de alfabetización sensorial para el reconocimiento de texturas.

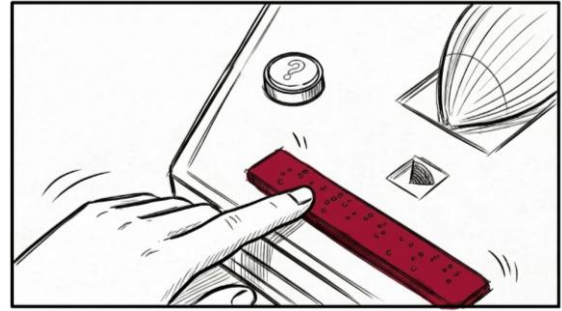
E-Eliminar	¿Qué elementos sobran o generan ruido?	Se eliminan los detalles visuales superfluos o decorativos que no aportan información táctil y que podrían confundir al usuario ciego (ruido táctil), priorizando formas limpias y funcionales.
R-Reordenar	¿Cómo reordenamos el proceso de aprendizaje?	Se invierte la lógica tradicional del aula (Escuchar teoría -> Ver dibujo). Aquí, el usuario toca primero (descubre la forma) y escucha después (recibe la explicación), fomentando el aprendizaje por descubrimiento activo.

5.2 Interacción

El modelo de interacción del XPA se fundamenta en una experiencia táctil-auditiva diseñada para facilitar la exploración autónoma de la anatomía de la abeja. El usuario navega por el dispositivo mediante el reconocimiento háptico de texturas, relieves y componentes físicos, activando simultáneamente (a través de pulsadores integrados) audios explicativos y trivias que contextualizan la información.

Esta dinámica promueve un aprendizaje multisensorial, donde la tríada de acciones (tocar, presionar, escuchar) permite la comprensión integral del contenido prescindiendo del apoyo visual. Cabe destacar que el desarrollo de la estructura y la lógica de interacción se ejecutaron de manera paralela e iterativa, asegurando que la morfología final del dispositivo respondiera funcionalmente a los requerimientos de la experiencia de usuario.

Storyboard



1. Usuario presiona el botón de inicio.



2. Botón da instrucciones de uso y datos importantes.



3.Interactua con las piezas.



5.3 Textura

Selección de Materiales y Componentes

La selección de materiales para la simulación biológica presentó desafíos significativos debido al vacío bibliográfico existente en torno a la replicación háptica de insectos. En respuesta a esto, el proceso se orientó a garantizar la fidelidad fenotípica y textural, validando las decisiones mediante una estrategia mixta: pruebas táctiles con expertos y una contrastación visual rigurosa frente al registro fotográfico obtenido en el trabajo de campo en el apiario

Estructura del modelo

El modelo fue desarrollado de manera modular, respetando la anatomía básica de una abeja obrera, compuesta por cabeza, tórax, abdomen, patas, alas y aguijón. Para su materialización, se seleccionaron insumos específicos capaces de simular los distintos acabados biológicos (liso, piloso y rugoso) bajo estrictos criterios de seguridad, durabilidad y usabilidad.

Hilo de nylon

Para representar la vellosidad característica presente en distintas zonas del cuerpo de la abeja se utilizó hilo de nylon. Este material fue seleccionado debido a su resistencia, flexibilidad y capacidad para aproximarse al espesor y rigidez percibidos en los pelos del insecto. Adicionalmente, su color natural permitió evitar procesos de pintura o recubrimiento, reduciendo posibles riesgos asociados al desgaste superficial y aumentando la seguridad del producto durante su manipulación.

Resina epóxica

La resina epóxica fue utilizada para representar aquellas zonas de la abeja que presentan una textura más lisa y rígida, principalmente los ojos compuestos y determinados sectores del abdomen.

Desde una perspectiva táctil, este material proporciona una superficie dura y lisa que genera contraste respecto a las áreas cubiertas por filamentos de nylon. Por otra parte, sus propiedades permiten obtener acabados brillantes que contribuyen a

reforzar la percepción de diferenciación entre las distintas estructuras anatómicas.

Además de sus características estéticas y táctiles, la resina epóxica cumplió una función estructural importante dentro del prototipo, actuando como elemento de fijación para los filamentos de nylon. Al encapsular parcialmente las fibras durante el proceso de curado, se obtiene una unión resistente que dificulta su desprendimiento durante la manipulación frecuente del dispositivo.

La combinación de estos materiales permitió generar una experiencia táctil diferenciada entre las distintas partes de la abeja, favoreciendo la exploración autónoma y el reconocimiento de sus componentes anatómicos por parte de los usuarios.

5.4 Sonido

El desarrollo del módulo de sonido en el **XPA** cumple una función narrativa esencial, actuando como la guía principal para el aprendizaje del usuario. Este capítulo aborda la implementación del sistema auditivo dividiéndose en dos etapas consecutivas y complementarias.

En primer lugar, se detalla la **estructuración del contenido**, donde se definieron y redactaron los guiones explicativos correspondientes a cada segmento morfológico de la abeja (cabeza, tórax, abdomen, entre otros). Esta etapa se enfocó en sintetizar la información técnica para lograr una narrativa fluida y didáctica.

Posteriormente, se presenta la **implementación técnica**, describiendo el circuito electrónico y los componentes seleccionados que permiten almacenar y reproducir estos audios con la claridad y autonomía requeridas por el prototipo."

Diseño del Contenido Narrativo (Guiones Auditivos)

Para la implementación del sistema de respuesta sonora, se elaboraron guiones específicos asociados a cada zona de interacción táctil. La redacción de estos textos se rigió por criterios de síntesis y claridad, con el objetivo de entregar información biológica precisa sin saturar la memoria de trabajo del usuario.

A diferencia de una lectura enciclopédica extensa, estos audios fueron diseñados

como "cápsulas de información" breves y directas, que actúan como etiquetas semánticas para dar significado a lo que la mano está tocando en ese preciso instante.

A continuación, se detallan los textos finales programados para cada módulo del prototipo: Para dotar de significado semántico a la exploración táctil, se desarrollaron guiones específicos asociados a cada zona de interacción del prototipo XPA. La redacción de estos textos se fundamentó en la literatura especializada de Mendizábal (2004) y el material gráfico del BeeLab (Anexo A).

Sin embargo, para garantizar la comprensión auditiva y reducir la carga cognitiva del usuario, se aplicó un criterio de adaptación de guion, transformando el lenguaje técnico-literario en una narrativa oral fluida, directa y concisa. A continuación, se detalla la estructura del contenido programado:

Mensaje de Bienvenida

Objetivo: Contextualizar al usuario e instruir sobre el modo de uso del dispositivo.

Guion de Audio: "

¡Bienvenido a XPA! Esta herramienta de aprendizaje te permitirá explorar las principales partes de una abeja de forma táctil y auditiva. El modelo representa una abeja a escala 1:10. Al presionar cada sección, escucharás una breve explicación sobre qué es y cuáles son sus principales características.

Al continuar por el costado, encontrarás una trivía para poner a prueba lo que has aprendido. ¡Comencemos la interacción!

Cabeza:

Fuente Bibliográfica: *"En la frente están las antenas, son articuladas y en ellas están los sentidos del tacto y el olfato, en la parte del centro están los 3 ojos simples a cada lado los enormes ojos compuestos y en la parte inferior de la cabeza esta la boca con sus glándulas."* (Mendizábal, 2004).

Adaptación para Audio: Se reestructuró para mejorar la fluidez narrativa y la ubicación espacial.

Guion de Audio: "La cabeza actúa como el principal centro de percepción de la abeja; en su frente encontramos las antenas, que son estructuras articuladas encargadas del tacto y el olfato. En la zona central superior se ubican tres pequeños ojos simples, rodeados a los costados por dos enormes ojos compuestos, mientras que en la parte inferior se sitúa la boca junto con sus glándulas, integrando así todos los sentidos necesarios para su orientación y alimentación."

Trivia de Refuerzo:

Pregunta: ¿Cuántos ojos simples tiene la abeja en la parte central superior de su cabeza?

Respuesta: Tiene 3 ojos simples.

Tórax:

Fuente Bibliográfica: "En el tórax se encuentran 3 pares de patas y 2 pares de alas" (Mendizábal, 2004).

Adaptación para Audio: Se añadió la analogía del "motor" para facilitar la comprensión funcional.

"El tórax es la sección central del cuerpo y funciona como el motor de la abeja, ya que en él se encuentran anclados sus tres pares de patas y sus dos pares de alas."

Trivia de Refuerzo:

Pregunta: ¿Cuántos pares de patas se encuentran en el tórax?

Respuesta: Contiene 3 pares de patas.

Abdomen

Fuente Bibliográfica: "Su forma es anillada. Está unido al extremo del tórax por una delgada cintura. El abdomen aloja la mayoría de los sistemas orgánicos: el aparato genital, los sacos aéreos, el corazón, el aguijón..." (Mendizábal, 2004).

Adaptación para Audio: Se ajustaron los conectores para mejorar la continuidad del discurso.

Guion de Audio: "El abdomen se caracteriza por su forma anillada y está unido al extremo del tórax por una delgada cintura; esta sección es fundamental porque en su interior aloja la mayoría de los sistemas orgánicos vitales, como el aparato genital, los sacos aéreos, el corazón, el aguijón, además de gran parte del aparato digestivo y la cadena nerviosa."

Trivia de Refuerzo:

Pregunta: ¿Por medio de qué se une el abdomen al tórax?

Respuesta: Por una delgada cintura.

Patatas

Fuente Bibliográfica: *"Posee 3 pares de patas... con el tercer par es el más grande, la parte final de esta presenta una concavidad con pelos duros su alrededor que ocupan para transportar el polen."* (Mendizábal, 2004).

Adaptación para Audio: Se clarificó la función de cada par para diferenciar la limpieza de la carga.

Guion de Audio: "La abeja cuenta con tres pares de patas, cada uno con una función específica: el primer par le sirve de sostén y para limpiar sus antenas, mientras que el segundo lo utiliza básicamente para la locomoción. El tercer par es el más grande y destaca porque en su parte final presenta una concavidad rodeada de pelos duros, diseñada especialmente para transportar el polen."

Trivia de Refuerzo:

Pregunta: ¿Para qué ocupan la concavidad que tienen en el tercer par de patas?

Respuesta: Para transportar el polen.

Aguijón

Fuente Bibliográfica: *"El aguijón se encuentra en la parte trasera... La punta del aguijón tiene un pequeño arpón, cuando lo clavan se engancha en el cuerpo de la víctima."* (Mendizábal, 2004).

Adaptación para Audio: Se dinamizó la redacción para enfatizar el mecanismo de defensa.

Guion de Audio: "en la parte trasera se encuentra el aguijón, el cual utilizan como mecanismo de defensa principal cuando perciben peligro para la colmena o para su propia vida; su punta cuenta con un pequeño arpón que, al momento de picar, hace que el aguijón quede enganchado en el cuerpo de la víctima, el aguijón está en escala 1:20."

Trivia de Refuerzo:

Pregunta: ¿Qué forma tiene la punta del aguijón que provoca que se enganche?

Respuesta: Tiene forma de un pequeño arpón.

Alas

Fuente Bibliográfica: *"Las alas son membranosas, poseen pequeños ganchos que permiten juntar las alas anteriores y las posteriores, formando una pala única..."* (Mendizábal, 2004).

Adaptación para audio: Se sintetizó la información para resaltar la eficiencia del vuelo.

Guion de audio: "Las alas son membranosas y cuentan con pequeños ganchos que permiten unir las anteriores con las posteriores; esta unión forma una pala única que aumenta la eficiencia del vuelo, algo especialmente útil cuando la abeja necesita transportar carga."

Trivia de Refuerzo:

Pregunta: ¿Qué permite que las alas anteriores y posteriores se junten?

Respuesta: Pequeños ganchos.

Abeja

Guion de audio: ¡Hola! Soy una abeja melífera y el modelo que estás tocando tiene el doble de mi tamaño real para que puedas conocerme mejor.

¿Sabías que nunca vivo sola? En una colmena pueden vivir entre 40 mil y 60 mil abejas. Cada una tiene un trabajo diferente: algunas cuidan a las larvas, otras construyen los panales, otras limpian la colmena y muchas, como yo, salen todos los días a buscar flores. Trabajando juntas

logramos que nuestra colonia siga creciendo.

Y ahora... escucha con atención. Este es el sonido que hacemos cuando movemos nuestras alas."

(Suenan las alas de una abeja.)

5.4.1 Componentes sonido:

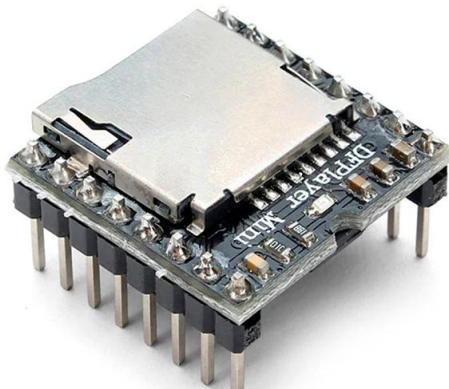


Figura 22 :DFPlayer mini

fuentes: <https://afel.cl/>

DFPlayer Mini(figura 22)

Se decidió ocupar DFPlayer como el componente principal del circuito reproductor de audio debido a sus propiedades:

Técnicas: El DFPlayer Mini es capaz de almacenar y reproducir archivos de audio directamente desde una tarjeta microSD, sin necesidad de contar con un microcontrolador complejo o sistemas adicionales.

Esto permite que el circuito sea estable, compacto y fácil de mantener, importante para entornos en el que se está desarrollando.

Bajo consumo energético: El módulo trabaja entre 3.2V y 5V, lo que permite integrarlo de manera segura con baterías pequeñas dentro del prototipo, sin riesgo de sobrecalentamiento ni requerimientos de alto voltaje.

Dimensiones: Su tamaño compacto permite su incorporación sencilla al prototipo ya que mide 20*20 [mm].

Alta durabilidad: es muy resistente a ciclos largos de operación además cuenta

con su fácil reemplazo si esta falla, ya que es **barato y fácil de reemplazar**.

Alimentación por pilas:

Se decidió utilizar una alimentación de pilas AAA, esta selección incorpora consideraciones importantes:

Seguridad: Las pilas AAA nos dan un bajo voltaje (1.5 V por celda) y corrientes muy bajas, lo que nos ayuda a evitar las descargas eléctrica, sobrecalentamiento del circuito además de reducir el riesgo de cortocircuitos accidentales.

Transportabilidad: Al no necesitar cables nos ayuda a tener una mayor facilidad de poder transportarlo a distintos lugares, además al no estar conectado a la corriente puede instalarse en lugares remotos.

Parlante pequeño circuito

Se utilizo un parlante pequeño el cual esta hecho para los circuitos debido a:

Seguridad auditiva: Considerando la normativa (no mayor a 90 decibeles) y nuestro testeo de prototipo , definimos que el volumen idóneo es 70 decibeles por lo

que con un parlante pequeño controlamos la precisión del volumen.

Dimensiones: Al ser pequeño no ocupa mucho espacio en el circuito nos ayuda a mantener un tamaño reducido.

Ahorro energético: Al ser pequeño consume menos energía, prolongando la duración de las pilas y esto evita sobrecargar el DFPlayer Mini.

Pulsadores

Los pulsadores se eligieron considerando los requisitos dimensionales y funcionales del dispositivo. Su tamaño actual es óptimo, ya que ofrece:

Ergonomía y Usabilidad: Permite una interacción precisa y controlada.

Prevención de Errores: Evita las pulsaciones accidentales (si fueran más pequeños).

Optimización del Espacio: Mantiene las dimensiones del XPA ajustadas, ya que un tamaño mayor incrementaría innecesariamente el volumen total del equipo.

5.4.2 Electrónica y morfología

Para la materialización del sistema de respuesta auditiva, se procedió a la integración del hardware electrónico centrada en el módulo de reproducción **DFPlayer Mini**. Este componente fue seleccionado por su capacidad de decodificación directa de archivos MP3 y su interfaz de control simplificada, ideal para la arquitectura del prototipo XPA.

Fase de Prototipado y Validación de Conexiones :La implementación inicial se llevó a cabo sobre una placa de pruebas (protoboard), lo que permitió validar la lógica de conexiones y la integridad de la señal antes del soldado final. Esta configuración modular facilitó la iteración en la disposición de los componentes y la verificación de la calidad de audio.

Topología del Circuito: El esquema de conexión se diseñó siguiendo estrictamente las especificaciones del fabricante (Datasheet), configurando el circuito de la siguiente manera:

Interfaz de Control (Pulsadores):Se implementó una matriz de pulsadores (push-buttons) para la activación de los audio.

Red de Resistencias: Siguiendo las especificaciones técnicas del manual del DFPlayer Mini, (figura 23) se implementó una configuración de control tipo ADKEY. En este esquema, se integraron resistencias de valores específicos en serie con cada pulsador.

La función de estos componentes es la discriminación de la entrada mediante tensión: cada resistencia genera un valor de voltaje único al cerrar el circuito. Esto permite que el módulo interprete esa señal eléctrica distinta como una "firma" para identificar inequívocamente qué botón fue presionado y determinar, en consecuencia, qué pista de audio específica debe reproducirse.

Resultado de la Implementación: Esta configuración de hardware, validada en la protoboard, demostró una reproducción de audio estable, con una latencia imperceptible al tacto y un volumen

adecuado para el entorno educativo, cumpliendo con los requerimientos funcionales definidos en la etapa anterior. Esto se puede entender mejor en la figura 23.

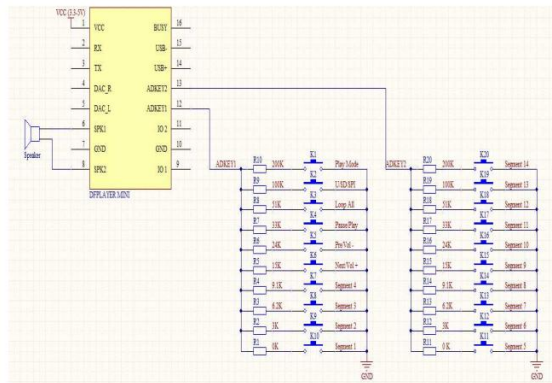


Figura 23: Circuito

fuelle:

<https://picaxe.com/docs/spe033.pdf>

5.5 Arquitectura:

La arquitectura del dispositivo XPA se ha configurado integrando criterios de biomimesis, ergonomía y teoría háptica, asegurando que la forma física responda tanto a la identidad del contexto (BeeLab)

como a las capacidades funcionales del usuario.

Estructura: Para el soporte principal, se adoptó una morfología **hexagonal**, inspirada directamente en la ingeniería natural de los panales observados durante la salida a terreno en el BeeLab (Ver Figura 23). Esta decisión de diseño trasciende lo estético y responde a principios de eficiencia estructural:

Optimización Espacial: Tal como las abejas maximizan el almacenamiento con el menor uso de cera, el hexágono permite modularidad y estabilidad estructural sin espacios muertos.

Coherencia Contextual: Esta forma vincula visual y semánticamente el dispositivo (figura 24) con el entorno del apiario educativo descrito en la sección 3.3, reforzando la narrativa biológica del proyecto.



Figura 24: Panal de abeja

*Fuente: fotografía tomada en
apiario Beelab*

Delimitación táctil: Se incorporaron bordes físicos elevados que delimitan el área de interacción. Esta característica no es decorativa, sino que se fundamenta estrictamente en la teoría de los Procedimientos Exploratorios de Lederman y Klatzky (1987), analizada en la fase de Descubrimiento.

Justificación: El borde actúa como una guía física que facilita el procedimiento de "Seguimiento de Contorno" (Contour

Following). Para un usuario con discapacidad visual, este límite físico es vital para generar un "marco de referencia espacial", evitando que las piezas se caigan o que el usuario pierda la orientación de la zona de trabajo.

Dimensiones:

Para definir la escala del dispositivo, se estableció una longitud operativa de **43 cm**. Esta medida se calculó cruzando el perfil del usuario objetivo (niños de 10 a 15 años, definido en la sección 3.4) con los datos de antropometría estática.

Según los estándares establecidos por Panero y Zelnik en "Las dimensiones humanas en los espacios interiores", la longitud promedio de la extremidad superior (alcance funcional anterior) en este rango etario oscila entre 55 y 65 cm.

Justificación: Al limitar la profundidad a 50 cm, se garantiza que el usuario pueda alcanzar el extremo más alejado del dispositivo manteniendo la espalda apoyada en el respaldo de la silla. Esto previene la fatiga postural y evita

movimientos compensatorios (como flexionar excesivamente el tronco), cumpliendo con el requerimiento de ergonomía definido en la Tabla 3 (Sección 4.4).

Selección del Espécimen: Abeja Melífera Obrera

En coherencia con el análisis morfológico presentado en la sección 4.3, el modelo representa específicamente a la **abeja melífera obrera**.

Justificación Biológica y Educativa: A diferencia del zángano o la reina, la obrera(figura 25) es la casta más abundante y funcionalmente diversa de la colmena (recolectora, limpiadora, defensora). Su morfología incluye estructuras educativas críticas como el aguijón y la corbícula (canasta de polen), elementos que permiten explicar roles ecológicos complejos. Esta elección asegura que el XPA sea una herramienta representativa de la realidad observada en el BeeLab.



Figura 25: Abeja obrera melífera

*Fuente: fotografía tomada de
abeja melífera obrera*

5.5.1 Componentes: Pulsador de trivias



Figura 26: Botón de trivia

Este componente (figura 26) actúa como la interfaz física de evaluación del dispositivo. Su función principal es detonar las preguntas de refuerzo (trivias) asociadas a cada sección anatómica, permitiendo verificar el aprendizaje y cerrar el ciclo cognitivo de la interacción.

Criterios de Diseño y Justificación:

Contraste Cromático (Accesibilidad Visual): Se ha seleccionado el color rojo para generar un alto contraste visual respecto a la base y al cuerpo de la abeja.

Esta decisión responde a los requerimientos de los usuarios con baja visión (remanente visual), facilitando la localización rápida del componente mediante la distinción de color.

Discriminación Háptica (Accesibilidad Táctil): Para garantizar su identificación sin apoyo visual, el botón se fabrica en un polímero rígido (PLA mediante impresión 3D) que presenta un acabado superficial y una temperatura térmica distinta al material de la base (recubrimiento/tela/madera). Esta diferenciación material permite que el usuario distinga inequívocamente entre la "zona de estructura" y la "zona de interacción" al deslizar la mano.

Especificaciones Técnicas:

Cantidad: 6 unidades (distribuidas según las zonas de aprendizaje).

Material: Plástico rígido (PLA/ABS) mediante manufactura aditiva (Impresión 3D).

Dimensiones:

Diámetro: 2.5 cm (Dimensionado para la yema del dedo de un adolescente).

Altura: 1.0 cm (Relieve suficiente para ser detectado al tacto rasante)

Botón de inicio



Figura 27: Botón de inicio

Este módulo constituye el punto de partida de la experiencia educativa (figura 27). Su función es activar la secuencia de bienvenida, reproduciendo el audio introductorio que contextualiza la actividad y presenta a la abeja melífera obrera.

Criterios de Diseño y Justificación:

Accesibilidad Visual (Jerarquía): Se ha aplicado un criterio de alto contraste mediante el uso del color **rojo**. Esta decisión cromática permite jerarquizar el componente respecto al resto del dispositivo, facilitando su identificación

inmediata por parte de usuarios con baja visión.

Accesibilidad Táctil (Braille): La superficie incorpora en alto relieve la palabra “**COMIENZO**” escrita en sistema **Braille**. Esta característica asegura la accesibilidad universal, permitiendo que los usuarios con ceguera total identifiquen la función del botón de manera autónoma antes de iniciar la interacción auditiva.

Ergonomía (Ley de Fitts): A diferencia de los pulsadores puntuales, este componente se diseñó con una **superficie de contacto extendida** (25 cm de largo). Esta dimensión facilita la localización y activación motora (incluso con la palma de la mano), reduciendo la precisión requerida para iniciar la actividad, lo cual es ideal para el inicio de la exploración.

Especificaciones Técnicas:

Cantidad: 1 unidad.

Material: Plástico rígido (PLA/ABS) compatible con relieve Braille.

Dimensiones:

Largo: 20 cm (Zona amplia de activación).

Ancho: 3 cm.

Altura: 5 cm (Relieve perceptible sobre la base).

Abeja a escala



Figura 28: Abeja obrera melífera

Fuente:

<https://www.thingiverse.com/thing:4900763/files>

El núcleo del dispositivo corresponde a una representación volumétrica de la abeja

melífera obrera (figura 28) (*Apis mellifera*). Este modelo ha sido diseñado bajo una lógica modular, interviniendo la estructura biológica original para permitir el despiece y el análisis individual de sus partes, facilitando así la comprensión de la segmentación del insecto.

Tecnología de Manufactura: Impresión 3D (FDM) Para la materialización de las piezas estructurales, se optó por la **Manufactura Aditiva** (Impresión 3D) utilizando filamento PLA . Esta elección tecnológica se fundamenta en tres propiedades críticas para el éxito del prototipo:

Fidelidad Morfológica (Versatilidad

Geométrica): La anatomía de la abeja presenta geometrías orgánicas complejas, curvas irregulares y detalles a micro-escala que son difíciles de replicar con métodos sustractivos tradicionales. La impresión 3D permite alcanzar una alta resolución formal, facilitando el ajuste preciso de las proporciones y asegurando que las "irregularidades biológicas" se mantengan fieles al modelo de referencia del BeeLab.

Ergonomía de Manipulación (Ligereza):

El PLA es un polímero termoplástico de baja densidad. Esto resulta en piezas estructuralmente rígidas, pero extremadamente ligeras. Esta cualidad es indispensable para el usuario objetivo (niños de 10-15 años), ya que permite sostener y rotar las piezas (como el abdomen o la cabeza) con una sola mano sin generar fatiga muscular, favoreciendo una exploración táctil prolongada y cómoda.

Adherencia superficial(Customización):

La naturaleza del material impreso ofrece una superficie óptima para el anclaje de recubrimientos secundarios. Su porosidad superficial facilita la adherencia química y mecánica de pinturas acrílicas, resinas epóxicas y adhesivos de contacto. Esto fue determinante para poder integrar las capas de texturización externa (pelos, rugosidades, acabados lisos) que definen la experiencia háptica del XPA.

Alzador

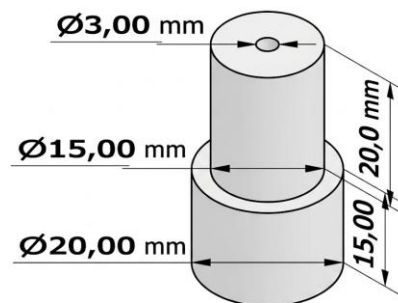


Figura 29: render alzador con medidas.

Este componente fue diseñado específicamente para segmentar y distanciar las diferentes capas operativas del producto (figura 29). Su función es doble: actúa como un separador físico que delimita las áreas de la estructura y, al mismo tiempo, sirve como un pilar de sujeción mecánica que sostiene de manera firme los niveles superiores, garantizando la integridad y el alineamiento del conjunto.

Alargador de botones

Este elemento fue diseñado para salvar la distancia vertical necesaria entre las diferentes capas estructurales,

garantizando que la fuerza ejercida por el usuario sea transmitida de manera correcta hacia los botones. Para responder a las distintas necesidades del dispositivo, se desarrollaron tres variantes de este componente:

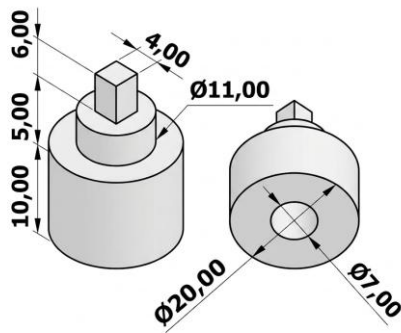


Figura 30: render extensor 1

Extensor 1 (figura 30): Es el más utilizada. Incorpora una geometría rectangular en su extremo superior que actúa como traba mecánica. Esta configuración bloquea los grados de libertad rotacionales, impidiendo que la pieza gire sobre su propio eje durante el uso y asegurando la estabilidad de la superficie de contacto.

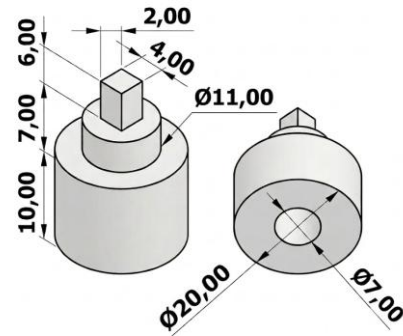


Figura 31: render extensor 2

Extensor 2 (figura 31): Presenta una modificación dimensional específica en su sección intermedia, incrementando su tamaño en 2 mm. Esta variación morfológica responde a que el botón de trivia se acciona directamente sobre la dimensión nominal del componente, prescindiendo del segundo corte que poseen los demás alojamientos, optimizando así la carrera de activación y la holgura necesaria para el correcto funcionamiento del juego.

Extensor 3: Presenta una modificación al extensor 1 ya que este no cuenta con el rectángulo en la parte superior. Esto debido

a que hay piezas que no necesitan sujeción.

Métodos de fijación y ensamblaje

Para la construcción se utilizaron distintos métodos de unión, seleccionados en función de los materiales empleados.

Unión de piezas impresas en 3D

La unión entre las piezas principales y sus respectivos alargadores se realizó mediante un adhesivo instantáneo de acción ultrarrápida (La Gotita). Este adhesivo fue seleccionado por su capacidad de generar uniones resistentes entre componentes plásticos, proporcionando una fijación rápida y permanente que permite soportar las manipulaciones frecuentes asociadas al uso del prototipo.

Unión de piezas acrílicas

Para el ensamblaje de los laterales con la base de acrílico se utilizó cloroformo como agente de unión. Este compuesto actúa mediante soldadura química, fundiendo superficialmente las piezas y generando una unión de alta resistencia y acabado

limpio, especialmente adecuada para estructuras fabricadas en acrílico.

Fijación mecánica de soportes estructurales

La unión de los soportes a la estructura principal se realizó mediante tornillos de 3 × 10 mm con cabeza redondeada. Este sistema de fijación permite asegurar los componentes estructurales de forma firme, facilitando además futuras tareas de mantenimiento o reemplazo de piezas en caso de ser necesario.

5.5.2 Estructura de la superficie

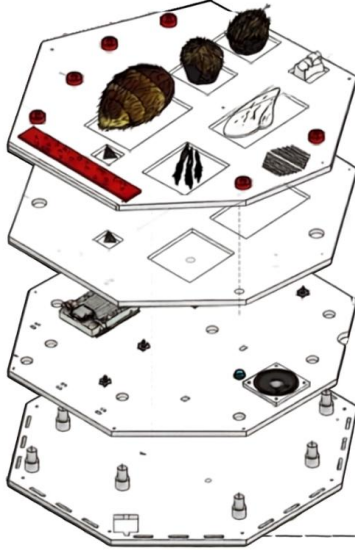


Figura 32: vista explosiva

La estructura principal del dispositivo (figura 32) se concibió como un sistema modular de superficies, dividido en cuatro capas superpuestas, cada una responsable de una función técnica o de interacción distinta.

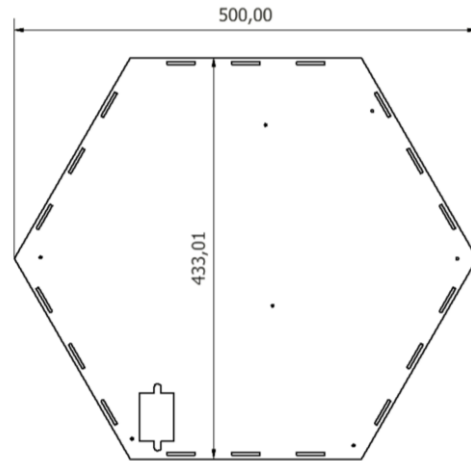


Figura 33: capa 1

Capa 1 (Base de Soporte, figura 33): Actúa como el plano de apoyo y fundación estructural de todo el conjunto. Esta base incorpora orificios de posicionamiento para la fijación de los paneles laterales y el alojamiento del interruptor de cambio de pilas además de los orificios de los cuales van sostenidos los alzadores.

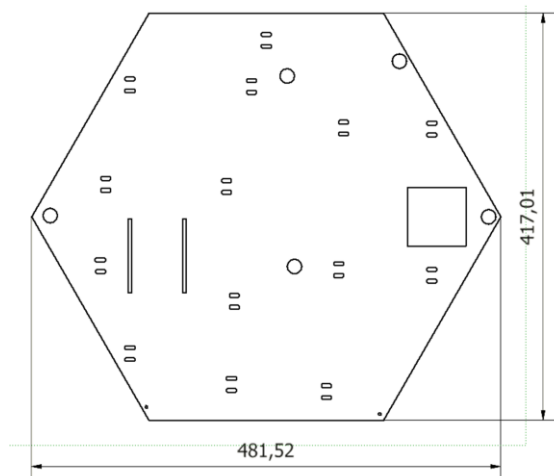


Figura 34: Capa 2

Capa 2 (figura 34): Ubicada a una altura de 20 mm respecto a la Capa 1, sirviendo de plano medio para alojar componentes críticos. En su cara superior se sitúan los pulsadores (switches) y en su cara inferior se adosa el circuito de control de emisión sonora.

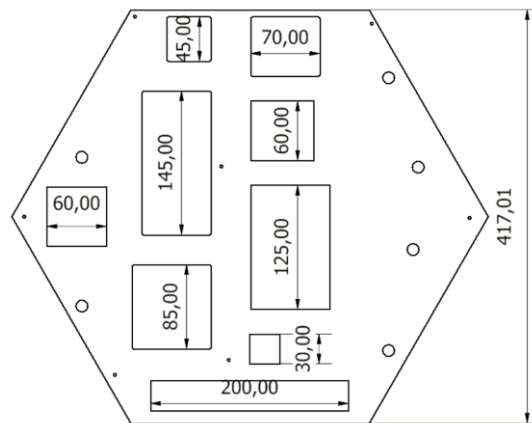


Figura 35: Capa 3

Capa 3 (figura 35): Nivel encargado de la alineación y guiado vertical de las extensiones de los botones, en esta capa irán los botones, con sus piezas correspondientes.

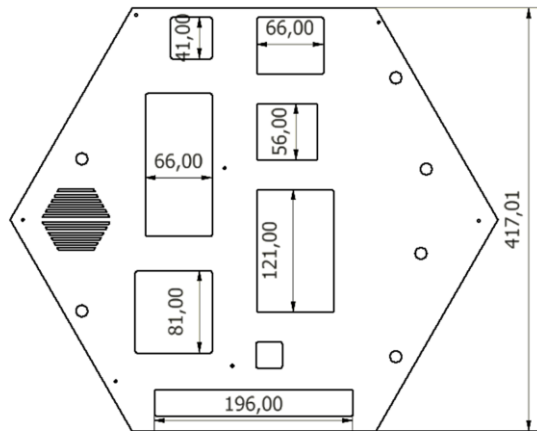


Figura 36: Capa 4

Capa 4(figura 36): Similar en morfología a la Capa 3, pero presenta orificios con un diámetro 2 mm menor. Esta reducción cumple una triple función de restricción y estabilidad mecánica: Impide la extracción accidental o malintencionada de los botones por la parte superior.

Reduce el "juego" o movimiento no deseado (guiñada y cabeceo) de los botones, restringiendo su desplazamiento solo al eje de accionamiento.

Laterales

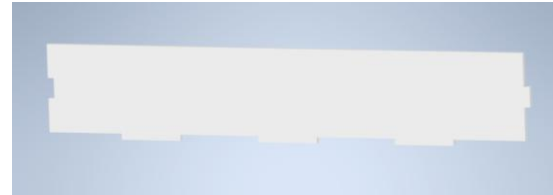


Figura 37: laterales

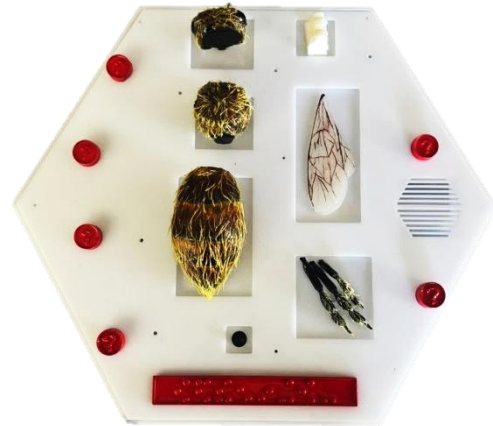
Los laterales (figura 37) funcionan como las paredes contenedoras del artefacto, conformadas por seis piezas de igual tamaño. Pero uno de los seis paneles cuenta con una perforación rectangular específica que permite embutir el interruptor de encendido y apagado, manteniendo las cinco caras restantes completamente lisas y uniformes.

Resultado de arquitectura



Figura 38: Render final

Fotos reales resultado final



5.5.3 Costo de materialización

Para la construcción del prototipo XPA se utilizó una selección de materiales e insumos disponibles comercialmente, priorizando su funcionalidad y su compatibilidad con los procesos de fabricación descritos anteriormente (impresión 3D, corte de acrílico y ensamblaje electrónico). La selección de estos insumos buscó cumplir con los requerimientos de materiales definidos.

Productos	cantidad	Precio unitario	Precio
Plancha acrilico 3mm	1	--	48760
Resistencias	14	250	3500
Pulsadores	14	250	3500
Botones (volumen)	2	1000	2000
Resina epóxica	1	--	15000
Parlante	1		2500
Filamento			14500
Pegamento La gotita 2ml	1		3990
Cloroformo	1		15000
Cables	1		3000
Pilas AAA			3450
Tornillos			1500
Protoboard			2500
total			124200

Tabla 4 :Tabla de costos

Tarea	Horas estimadas
Preparación y ajuste de archivos para impresión 3D	2
Corte y preparación de piezas acrílicas	2
Ensamblaje de estructura (4 capas + laterales)	4
Montaje y soldadura de electrónica (DFPlayer Mini, resistencias, pulsadores, parlante)	5
Aplicación de vello (hilo de nylon, pelo por pelo, sobre cuerpo de la abeja)	6
Preparación y vertido de resina epóxica sobre pulsadores/botones	1,5
Programación y calibración de audio	2
Pruebas y validación (checklist técnico/funcional)	2
Total horas	24,5

Tabla 5: Tabla de costos

Considerando las horas de trabajo detalladas en la Tabla 5 y una tarifa de referencia de \$8.000 por hora, el costo de mano de obra asciende a \$212.000. Sumado al costo de materiales de \$124.200 (Tabla 4), el costo total estimado de materialización del prototipo XPA es de \$336.200."

6 ENTREGAR

La fase final del proceso de diseño, Entregar, tiene como propósito evaluar el desempeño del prototipo XPA en un entorno real y medir su impacto en la experiencia de aprendizaje del usuario. En esta etapa, el artefacto deja de ser una hipótesis constructiva para convertirse en una herramienta de mediación activa, sometiéndose al juicio de la interacción con el usuario.

El objetivo de este capítulo es exponer los resultados de la validación empírica, analizar el cumplimiento de los objetivos pedagógicos y proyectar la escalabilidad del proyecto dentro del contexto del BeeLab.

6.1 Validación técnica y funcional

Como parte de la etapa y previo a la finalización del proyecto, el prototipo XPA fue sometido a una revisión técnica y funcional con el propósito de verificar el cumplimiento de los requerimientos

definidos durante las etapas previas de investigación y desarrollo.

Para ello, se elaboró un Checklist de Validación, orientado a evaluar aspectos relacionados con la seguridad, la funcionalidad, la accesibilidad y la experiencia educativa del dispositivo. Este instrumento permitió identificar el grado de cumplimiento de los criterios establecidos y reconocer aquellos aspectos que deberán ser profundizados en futuras validaciones con usuarios objetivos.

Checklist de Validación del Prototipo XPA

Para asegurarnos de que se cumplan con todos los requerimientos definidos, se validaron respecto a su función:

Validación técnica

- ☐ Las piezas presentan bordes redondeados y sin aristas cortantes.
- ☐ Los materiales son resistentes al uso repetido y la limpieza.
- ☐ El ensamblaje es estable y las partes no se sueltan con facilidad.
- ☐ Cumple con criterios básicos de seguridad según ISO 8124 / EN 71.

- ☐ Las dimensiones son adecuadas para manipulación infantil.

Validación funcional

- ☐ Todos los botones funcionan correctamente.
- ☐ Los audios se reproducen sin interferencias ni cortes
- ☐ Las piezas móviles conservan su movilidad sin perder estabilidad.
- ☐ Los mecanismos responden al tacto sin requerir fuerza excesiva.
- ☐ El encendido/apagado del sistema es claro e intuitivo.

Validación de accesibilidad y ergonomía

- ☐ Las texturas se distinguen claramente al tacto.
- ☐ La disposición de los botones es ergonómica.
- ☐ El tamaño y relieve de las piezas favorece la exploración táctil.
- ☐ La experiencia genera comprensión sin necesidad de guía constante.

Validación educativa

- ❑ Los audios explican correctamente cada parte anatómica.
- ❑ El lenguaje es claro, breve y adecuado para niños (10–15 años).
- ❑ El usuario demuestra comprensión del contenido tras la interacción.
- ❑ El prototipo promueve curiosidad y aprendizaje autónomo.

Los resultados de esta verificación confirman que el prototipo XPA es un dispositivo funcional, seguro y robusto. Habiendo superado las pruebas técnicas y de seguridad (ISO 8124), el artefacto se declara apto para la fase de validación empírica y medición de impacto.

6.2 Estrategia de validación con usuarios

Para evaluar la efectividad del prototipo XPA en un escenario real, se diseñó un protocolo de validación experimental. El objetivo de esta instancia es medir el desempeño del dispositivo en tres dimensiones críticas: usabilidad (facilidad de uso), comprensión cognitiva (aprendizaje biológico) y experiencia de usuario (satisfacción/autonomía).

Adicionalmente, considerando que XPA fue desarrollado como una herramienta de aprendizaje accesible para espacios educativos como BeeLab, la validación busca determinar si la experiencia es capaz de despertar interés por las abejas, promover la curiosidad científica y favorecer la percepción de aprendizaje en niños con discapacidad visual.

La validación se estructura como una actividad de interacción guiada en contexto controlado, permitiendo la recolección de datos tanto cualitativos como cuantitativos

Protocolo de testeo

Muestra y Participantes: La validación se llevo a cabo con una muestra de 5 participantes.

Perfil: Estudiantes del Instituto Antonio Vicente Mosquete

Los participantes corresponden al usuario objetivo definido para el proyecto, es decir, niños y adolescentes con ceguera total o baja visión, pertenecientes al rango etario de 10 a 15 años. La selección de este grupo responde tanto a las características

pedagógicas del proyecto como al perfil de usuarios que potencialmente podrían participar en actividades educativas relacionadas con BeeLab y la divulgación científica sobre las abejas.

Instrumentos de Recolección de Datos:

Para objetivar la observación, se utilizaron dos instrumentos:

Pauta de Observación No Participante:

Para registrar tiempos de interacción, errores de navegación y expresiones emocionales.

Cuestionario de Salida (Escala Likert):

Para medir la percepción subjetiva del usuario (Ej. Del 1 al 5, ¿qué tan fácil fue encontrar el botón?).

Entrevista de salida con escala de valoración verbal: Para medir la percepción subjetiva del usuario respecto a la facilidad de uso, comprensión del contenido, interés por las abejas y satisfacción con la experiencia. Las preguntas fueron formuladas oralmente y las respuestas registradas por el investigador utilizando

una escala de valoración previamente definida.

Tareas de Interacción (El "Guion" de la prueba): Se solicitará a los usuarios realizar una serie de tareas específicas para evaluar la funcionalidad:

Tarea 1 (Exploración Libre): "Recorre el objeto con tus manos y dime qué crees que es". (*Mide reconocimiento formal*).

Tarea 2 (Navegación Guiada): "Encuentra el Tórax y presiona el botón para escuchar la explicación". (*Mide usabilidad y tacto*).

Tarea 3 (Evaluación Cognitiva): "Activa la trivía del Aguijón y responde la pregunta". (*Mide aprendizaje*).

Para finalizar la experiencia realizaremos 2 preguntas abiertas:

¿Qué fue lo que más te gustó de aprender sobre las abejas con XPA?

Después de usar XPA, ¿te gustaría aprender más sobre las abejas? ¿Por qué?

6.3 Resultados obtenidos

6.3.1 Análisis de Usabilidad (Eficacia y Eficiencia)

- **Tasa de Éxito en Tareas:** [Aquí pondrás: "El 90% de los usuarios logró encontrar el botón del tórax en menos de 10 segundos"].
- **Errores Frecuentes:** [Aquí describirás si hubo problemas: "Se observó dificultad para encajar el abdomen en usuarios con manos pequeñas"].

6.3.2 Evaluación del Aprendizaje (Impacto Cognitivo)

- **Retención de Información:** (Aquí pondrás: "Al finalizar la prueba, 4 de 5 usuarios respondieron correctamente que el tórax es el motor de la abeja").
- **Comprensión de Escala:** (Aquí pondrás citas textuales: "Un usuario comentó: 'No sabía que tenían pelos en los ojos'").

6.3.3 Valoración de la Experiencia (Cualitativa)

- **Autonomía:** Se analizó el grado de independencia. (Conclusión sobre si necesitaron ayuda o lo hicieron solos).
- **Feedback Emocional:** (Reacciones observadas: sorpresa, curiosidad, etc.).

6.3.4 Interés y experiencia educativa

El análisis no solo considera la facilidad de uso del prototipo, sino también su capacidad para generar una experiencia educativa significativa. En este sentido, se evaluó si la interacción con XPA despertó interés por las abejas, favorece la curiosidad científica y promueve una percepción positiva del aprendizaje mediante recursos táctiles y auditivos.

Los indicadores considerados fueron:

- Interés por conocer más sobre las abejas.
- Percepción de haber aprendido nuevos contenidos.
- Nivel de satisfacción con la experiencia.
- Sensación de autonomía durante la interacción.

- Comprensión de la importancia de las abejas en el ecosistema.
- Disposición a participar nuevamente en una actividad similar.
- Motivación por explorar otros contenidos educativos mediante herramientas accesibles.

Para complementar los resultados cuantitativos, el proceso de validación finalizará con dos preguntas abiertas. Las preguntas abiertas buscan profundizar aspectos que difícilmente pueden ser capturados mediante escalas numéricas, permitiendo identificar si la experiencia logró generar conexiones significativas con el contenido presentado y si los participantes perciben que el aprendizaje mediante recursos táctiles y auditivos resulta atractivo y efectivo.

¿Qué fue lo que más te gustó de aprender sobre las abejas con XPA?

Después de usar XPA, ¿te gustaría aprender más sobre las abejas? ¿Por qué?

Las respuestas obtenidas permitieron complementar los datos de usabilidad y aprendizaje, aportando información sobre

la motivación, la curiosidad y la percepción de los usuarios respecto a la experiencia educativa propuesta.

Los resultados obtenidos durante la sesión de validación con los cinco participantes fueron registrados mediante una escala de 1 a 5, donde 1 indica que no cumple y 5 que cumple correctamente con el criterio evaluado. La

Tabla 4 resume el desempeño individual de cada usuario en las tres tareas de interacción, junto con las observaciones cualitativas recogidas durante la sesión.

Usuario	Tarea 1 (reconoce abeja)	Tarea 2 (encuentra botón)	Tarea 3 (responde trivía)	Observaciones/comentarios
1	3	4	5	Recomendó camino hacia la trivía para partes más alejadas
2	4	3	5	Recomendación de incorporar una abeja de la misma escala con todas sus partes para la guía de cómo van las partes
3	4	3	4	Recomendación de incorporar abeja a escala
4	4	4	4	Le encanto la maqueta, pero no supo en que parte de la abeja van las alas.
5	3	3	3	Persona con retos múltiples, más que la información dada, se enfocó en lo táctil

Tabla 6: Resultados de la validación por usuario

Análisis de Usabilidad (Eficacia y Eficiencia)

Como se observa en la tabla 6 el análisis de la **Tarea 1** arrojó un promedio de **3.6/5.0** en el reconocimiento formal abstracto de la abeja mediante exploración libre. Los usuarios lograron identificar la morfología general, aunque la naturaleza descompuesta o modular del prototipo requirió una exploración más pausada para asociar la totalidad de la figura insectil.

Para la **Tarea 2**, enfocada en la localización de componentes y activación de la interfaz, el promedio se situó en **3.4/5.0**. Los participantes demostraron la capacidad de interactuar de manera autónoma con los botones tras localizar el relieve de las piezas principales. Sin embargo, se detectaron oportunidades de mejora ergonómicas y de navegación:

Accesibilidad en zonas periféricas: El Usuario 1 manifestó que, para las trivias que se encuentran más alejados del núcleo central, el dispositivo se beneficiaría de un relieve o "camino guía" táctil que conduzca la mano directamente hacia la trivia o el botón correspondiente.

Evaluación del Aprendizaje (Impacto Cognitivo)

La dimensión cognitiva y de apropiación tecnológica (**Tarea 3**) obtuvo el desempeño cuantitativo más alto de la validación, alcanzando un promedio de **4.2/5.0**. Esto demuestra la alta efectividad del sistema de audio-retroalimentación integrado para la consolidación de contenidos biológicos.

Los Usuarios 1 y 2 alcanzaron la puntuación máxima (5/5) en la resolución de las trivias formativas, validando que el lenguaje seleccionado (claro, breve y adaptado al rango de 10 a 15 años) mitiga las barreras de comprensión técnica.

Es relevante destacar el caso del Usuario 5 (**3.0/5.0** en los tres ítems), quien presenta retos múltiples de aprendizaje. Durante su evaluación, se observó que la experiencia de apropiación no estuvo guiada prioritariamente por el procesamiento de la información sonora de las trivias, sino por una fuerte inmersión en la dimensión háptica y sensorial. Su interacción se volcó al reconocimiento volumétrico y la estimulación táctil de las texturas diferenciadas del prototipo XPA, confirmando que el material posee un valor de

estimulación sensorial independiente del canal auditivo.

6.3.3 Valoración de la Experiencia (Cualitativa)

- **Autonomía:** El comportamiento espacial de las piezas modulares generó reflexiones metodológicas importantes sobre la autonomía de la exploración. Los Usuarios 2 y 3 plantearon de manera independiente una recomendación de diseño crucial: incorporar en el set una figura complementaria de una abeja íntegra a escala reducida que posea todas sus partes unidas de forma permanente. Esta sub-maqueta de referencia actuaría como un "mapa táctil" previo, permitiendo al estudiante comprender la totalidad del insecto antes de desarmar o explorar los detalles macro en el prototipo principal.
- **Feedback Emocional:** Las expresiones observadas durante las sesiones denotaron curiosidad y sorpresa, en especial al activar las respuestas de las trivias de manera autónoma. La estimulación multisensorial disminuyó la frustración comúnmente asociada a la comprensión de morfologías complejas que no pueden verse, transformando el aprendizaje biológico en un proceso lúdico y participativo.

6.3.4 Interés y experiencia educativa

El análisis no solo considera la facilidad de uso del prototipo, sino también su capacidad para generar una experiencia educativa significativa. En este sentido, se evaluará si la interacción con XPA despierta interés por las abejas, favorece la curiosidad científica y promueve una percepción positiva del aprendizaje mediante recursos táctiles y auditivos.

Los indicadores considerados serán:

- Interés por conocer más sobre las abejas.
- Percepción de haber aprendido nuevos contenidos.
- Nivel de satisfacción con la experiencia.
- Sensación de autonomía durante la interacción.
- Comprensión de la importancia de las abejas en el ecosistema.
- Disposición a participar nuevamente en una actividad similar.
- Motivación por explorar otros contenidos educativos mediante herramientas accesibles.

Para complementar los resultados cuantitativos, el proceso de validación finalizó

con dos preguntas abiertas, cuyo objetivo fue profundizar en la percepción subjetiva de los participantes, identificando aquellos aspectos de la experiencia que resultaron más significativos y explorando el interés que el prototipo es capaz de generar respecto al aprendizaje sobre las abejas y su importancia ecológica.

Las preguntas abiertas buscan profundizar aspectos que difícilmente pueden ser capturados mediante escalas numéricas, permitiendo identificar si la experiencia logró generar conexiones significativas con el contenido presentado y si los participantes perciben que el aprendizaje mediante recursos táctiles y auditivos resulta atractivo y efectivo.

¿Qué fue lo que más te gustó de aprender sobre las abejas con XPA? Al analizar las respuestas de los participantes, se constató un fenómeno de interés unánime: el **aguijón** fue el componente anatómico y la sección interactiva que más llamó la atención de la totalidad de la muestra. La oportunidad de explorar táctilmente una estructura comúnmente asociada al peligro, pero presentada aquí de forma segura, volumétrica y texturizada, junto con la activación de su trivía correspondiente, se posicionó como el hito más significativo de la experiencia

interactiva. Los usuarios destacaron el valor de poder descubrir y reconocer mediante sus manos detalles morfológicos precisos que antes solo conocían de forma conceptual o abstracta.

Después de usar XPA, ¿te gustaría aprender más sobre las abejas? ¿Por qué?

La respuesta ante esta interrogante fue categóricamente positiva en el 100% de los casos. Todos los participantes manifestaron haber quedado con altas expectativas y deseos de profundizar en el conocimiento sobre las abejas, además de expresar un marcado interés por continuar interactuando con el dispositivo XPA en el futuro. Este resultado demuestra que el artefacto tecnológico no solo funciona como un canal de transmisión de información biológica, sino como un elemento detonador de curiosidad científica. La combinación de estímulos hápticos y sonoros logró derribar la apatía o el distanciamiento pedagógico, transformando la percepción del aprendizaje en una actividad lúdica, accesible y altamente motivadora para alumnos con ceguera o baja visión.

7 CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto XPA: Experiencia de Aprendizaje Accesible permite concluir que la innovación en el diseño inclusivo no reside en la sofisticación tecnológica, sino en la capacidad de articular una respuesta empática y pedagógicamente pertinente a las necesidades del usuario. A través de un proceso metodológico riguroso —que transitó desde el descubrimiento de barreras sensoriales hasta la validación de un dispositivo funcional— se logró materializar una solución que amplía el acceso al conocimiento científico para estudiantes con discapacidad visual.

A modo de cierre, y en correspondencia con los objetivos trazados, se destacan los siguientes hallazgos:

Validación cognitiva multisensorial. Se comprobó que la integración sincrónica de estímulos táctiles y auditivos supera las limitaciones de los modelos unimodales tradicionales. La contigüidad temporal entre tacto (textura) y audio reduce la carga cognitiva del estudiante y facilita la construcción de imágenes mentales complejas sobre la morfología de la abeja, validando la hipótesis de que la tecnología

asistida debe actuar como puente cognitivo y no solo como soporte informativo.

Solidez ingenieril. El proyecto demuestra la capacidad de desarrollar equipamiento museográfico interactivo de alta fidelidad, seguro y duradero. El valor del rediseño no radica en la economía de materiales, sino en la robustez de la arquitectura física: la integración de manufactura aditiva (impresión 3D) con electrónica embebida y protegida permite un dispositivo apto para uso intensivo y continuo en un entorno educativo real.

Diseño centrado en la autonomía del usuario. La validación empírica con estudiantes del Colegio Santa Lucía confirmó decisiones ergonómicas críticas (escala aumentada, diferenciación textural) y redefinió el propósito del objeto: de herramienta de enseñanza pasiva a dispositivo de exploración autónoma. XPA demuestra que otorgar independencia al usuario es el factor más determinante para una experiencia educativa significativa y digna.

Escalabilidad y proyección institucional. La escalabilidad del proyecto se entiende no como producción masiva, sino como sistematización técnica: la arquitectura de hardware y software desarrollada establece un estándar replicable (por ejemplo, para

incorporar al Zángano o la Reina), garantizando la sostenibilidad del proyecto en el tiempo. Con ello, XPA contribuye a la misión del BeeLab al transformar el apiario en un espacio verdaderamente universal, derribando la barrera de seguridad que históricamente excluyó a las personas ciegas de la educación ambiental in situ.

En definitiva, este trabajo de título no solo entrega un prototipo funcional, seguro y accesible; entrega una metodología de diseño inclusivo validada desde la ingeniería de productos.

REFERENCIAS

- Fundación Luz. (2023). Desigualdad educativa y laboral en personas con discapacidad visual en Chile.
- Hatira, A., et al. (2024). Multisensory learning and tactile feedback in children's education. *Advanced Intelligent Systems*.
- IDSA. (2006). Talking Tactile Tablet (TTT). Industrial Designers Society of America.
- Khalaila, A., Everette, G., Kim, S., & Roy, I. (2025). StreetScape: Gamified tactile interactions for collaborative learning and play. *arXiv preprint*.
- Landau, S., Russell, M., Gourgey, K., Erin, J. N., & Cowan, J. (2003). Use of the Talking Tactile Tablet in mathematics testing. *Journal of Visual Impairment & Blindness*.
- Melian, C. (2023). Estudio: 13,7% de los menores de edad en Chile tiene algún grado de discapacidad visual. EMOL.
- OEI. (2023). Inclusión educativa en Iberoamérica. Organización de Estados Iberoamericanos.
- Phutane, M., Wright, J., Castro, B. V., Shi, L., Stern, S. R., Lawson, H. M., & Azenkot, S. (2022). Tactile materials in practice: Understanding the experiences of teachers of the visually impaired. *arXiv preprint*.
- UNESCO-UNICEF. (2021). Reconstruir la educación, no las barreras. Informe sobre educación inclusiva en América Latina y el Caribe.

Cho, J. D., et al. (2021). Multi-sensory interaction for blind and visually impaired people. *Electronics*

Ibarra-Cabrera, M. J., et al. (2025). Design and Evaluation of a Multisensory Tangible Game for Children with Visual Impairments. *Education Sciences*

Jean-Prost, P. (2007). *Apicultura: Conocimiento de la abeja. Manejo de la colmena* (4.^a ed.). Mundi-Prensa Libros. Servicio Nacional de la Discapacidad. (2017). Catálogo de tecnologías para la educación inclusiva. SENADIS. <https://www.senadis.gob.cl>

Mendizábal, F. (2004). *Abejas*. Albatros. Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic

object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3), 342-368.

Panero, J., & Zelnik, M. (1996). Las dimensiones humanas en los espacios

interiores. Editorial Gustavo Gili.

Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3), 342-368.

Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285.

Mayer, R. E. (2001). *Multimedia learning*. Cambridge University Press.

CAST. (2018). *Universal Design for Learning Guidelines version 2.2*. Center for Applied Special Technology

Ungar, S. (2000). Cognitive mapping without visual experience. En R. Kitchin & S. Freundschuh (Eds.), *Cognitive mapping: Past, present and future* (pp. 221–248). Routled.

Design Council. (2005). *A study of the design process: The Double Diamond*.

ANEXO A – Antecedente prototipo



Prototipo taller V, conceptualización de la idea.



Prototipo taller VI, idea más conceptualizado, pero sin fundamentos

ANEXO B – normas

NORMAS PARA XPA

XPA es un producto considerado como un material de apoyo al **aprendizaje** para personas con **discapacidad visual**, las cuales tengan un rango etario de **10 a 15 años**.



Material

Las maderas deberán ser naturalmente **resistentes a la putrefacción y a la infestación por insectos** o tratadas para evitar dicho deterioro.

Norma ISO/DIS 8124-4:2024 4.1.1

La creosota, el pentaclorofenol, el óxido de tributilestaño y los revestimientos superficiales que contengan pesticidas no se utilizarán para los juguetes de actividades.

Los plásticos y otros materiales que **experimentan degradación ultravioleta (UV)** se deberán estabilizar contra la luz ultravioleta.



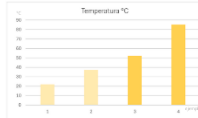
Circuito

Temperatura

Los juguetes eléctricos deberán diseñarse y construirse de forma que se garantice que las temperaturas máximas que alcancen todas las superficies directamente accesibles, no provocarán quemaduras al tocarlas.

Artículo 21

1. Celular: 22 °C
2. Temperatura corporal: 37 °C
3. Computador: 52 °C
4. Taza de té: 85 °C



La temperatura **no debería superar los 40°C** para considerarse segura, especialmente si los juguetes van a estar en contacto directo y prolongado con la piel.

https://www.ispch.cl/ley/20285p_activa/marco_normativo/7c/daec_114_2005.pdf



Esquinas y bordes

Las superficies y bordes accesibles de los juguetes de madera deben estar **libres de astillas**.

Norma ISO 8124-1:2022 4.7.3

Los bordes de metal, incluidas las fijaciones y material polimérico rígidos, deberán estar **libres de rebabas** que puedan provocar heridas o abrasión.

Norma EN 71-1:2014+A1:2018 4.7

Las esquinas y bordes **expuestos** deberán ser **redondeados**.

Norma ISO/DIS 8124-4:2024 4.1.5
Norma ISO 8124-1:2022 4.3.1

Todos los materiales deberán estar **visualmente limpios y libres de infestaciones**. Los materiales se evaluarán visualmente mediante visión normal corregida en lugar de bajo aumento.

Norma ISO/DIS 8124-4:2024 4.1.1

Propiedades eléctricas

La tensión eléctrica de los juguetes que funcionen con electricidad no podrá exceder de **24 voltios**.

Las partes de juguetes en contacto, o que puedan entrar en contacto, con una fuente de electricidad capaz de provocar una descarga eléctrica, así como los cables y otros conductores por los que se lleve la electricidad a tales partes, deberán estar suficientemente aislados y protegidos mecánicamente para evitar el riesgo de descarga.

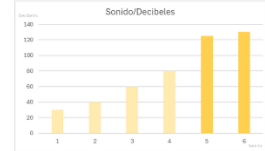
Artículo 20

Los juguetes no deberán contener elementos o sustancias radiactivas, de acuerdo a la definición de radiación en la ley 18.302 sobre Seguridad Nuclear.



Sonido

1. Susurro
2. ruido de lluvia
3. Conversación
4. Teléfono sonando
5. Concierto de rock
6. Despegue de avión



El nivel de presión acústica de emisión promediado en el tiempo y ponderado producido cuando se prueba a 50 cm con juguetes de sobremesa **no debe superar los 80 dB**.

4.20.2.3 Juguetes de mesa o de suelo
Norma europea EN 71-1:2014+A1

Las personas hablamos a 6 sílabas por segundo. Si lo hacemos muy rápido, podemos llegar a 10, pero las personas no videntes pueden escuchar hasta **25 sílabas por segundo**, ya que tienen el sentido de la audición más desarrollado.

<https://www.univision.com/explorafilos-ciegos-oyen-mejor-mito-o-realidad>



Instrucciones y advertencias

Las instrucciones y demás textos requeridos por esta norma deberán redactarse en el idioma oficial del país en el que se vaya a vender el aparato.

Las advertencias deberán ir precedidas de las palabras "Advertencia(s)". La palabra "Advertencia(s)" pueden escribirse con mayúscula o ir seguidas de puntuación.

Norma europea EN 71-1:2014+A1
Norma europea EN 71-1:2014+A1

- Indicar el país de origen del producto.
- El tamaño y tipo de letra debe permitir la lectura al consumidor a simple vista.
- Tener instrucciones sobre el uso adecuado y seguro.
- Informar en forma clara y visible el nombre o razón social y domicilio del fabricante, importador o responsable de la venta.
- Señalar si requiere supervisión de un adulto cuando sea necesaria esta indicación.
- Deben tener indicaciones sobre la edad recomendada.

https://www.semtec.com/portal/6150/w3_article-2780.html

Pilas y botones

Aquellos juguetes que utilizan pilas botón para energizarse, tienen un grado implícito de riesgo al manipularse en condiciones inseguras, de abuso razonablemente previsible (acciones análogas de soltar, lanzar, dejar caer, aplastar y/o pisar un juguete). Por ello en Chile deben pasar por una serie de pruebas.

https://www.semtec.com/portal/619/articles-4055_archivo_01.pdf

Mecanismos de accionamiento

Los mecanismos de accionamiento deberán estar **encerrados** de tal manera que no expongan bordes afilados peligrosos accesibles o puntas afiladas peligrosas o que de otro modo presentan un peligro que pueda causar aplastamiento de los dedos u otras partes del cuerpo.

Norma europea EN 71-1:2014+A1 4.10.2



Xpa Procesos

Usuarios

Personas con discapacidad visual.
Rango etario: 10-15 años.
Persona que le guste el aprendizaje autónomo

Objetivos del proyecto

Desarrollar una herramienta de aprendizaje diseñada específicamente para fomentar el aprendizaje autónomo en personas con discapacidad visual.

- La herramienta deberá estar enfocada en enseñar cómo son diversos objetos y animales que destacan por sus tamaños, extremos, ya sean muy pequeños o muy grandes, permitiendo a los usuarios explorar y comprender sus características de tamaño accesible y táctiles.
- Proyecto interactivo el cual muestre diversas estimulaciones.



Objetivos de los prototipos

Prototipo 1

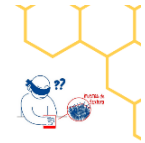
Realizar la mayor cantidad de información posible de los componentes del sistema que se está diseñando, para que sea más fácil entender a los usuarios de una idea.

Prototipo 2

Determinar la distancia mínima necesaria entre los componentes del sistema para garantizar que cada cosa de que se pudiese ver fácilmente de los lados, además, se revisa la claridad y calidad de la voz en el audio, así como la adecuación del volumen audido para un uso en entornos cerrados.

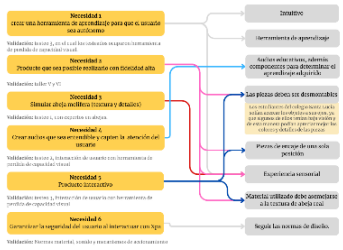
Prototipo 3

Revisar la claridad de la interacción y la facilidad de uso de los botones, así como determinar los materiales adecuados para los usuarios.



ANEXO C- Procesos

Necesidades y requerimientos de diseño



Hallazgos de testeo



Testeo 1

- Resultados de materialidad de los ejes de diseño.
- Materialidad de los ejes de diseño en función de los ejes de diseño.
- Materialidad de los ejes de diseño en función de los ejes de diseño.

Testeo 2

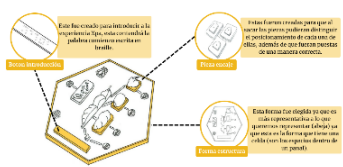
- Distancia de 4 cm entre placas de diseño.
- Preferencia por voz artificial.
- Experiencia por touch volume (70 dB).
- Voz podría ser más lenta.

Testeo 3

- Distancia de 4 cm, los audios sonde, voz artificial a un volumen de 70 dB y se ajustaron la velocidad a un volumen de 70 dB.
- Distancia de 4 cm, los audios sonde, voz artificial a un volumen de 70 dB.
- Distancia de 4 cm, los audios sonde, voz artificial a un volumen de 70 dB.

Señales de puntos, cambio de colores en los botones, cambio en la interacción para que sea de una mejor interacción de interacción.

Variantes de diseño del proceso



Fidelidad



Dimensiones

Refinamiento de apariencia: Vista visual de la interfaz de usuario, con respecto a la interfaz de usuario.

Interactividad: Interacción entre el producto y el usuario.

Amplitud: Abstracción y ligeros a las funciones principales.

Profundidad: Reconstrucción de funciones de Xpa.

Modelos de interacción: Información que comunica el producto.

Restricciones de diseño

- Andrés:**
 - No se puede usar los ojos.
 - No se puede usar los ojos.
 - No se puede usar los ojos.
- Materiales:**
 - Materialidad de los ejes de diseño.
 - Materialidad de los ejes de diseño.
 - Materialidad de los ejes de diseño.
- Equipos y bordes:**
 - Equipos y bordes.
 - Equipos y bordes.
 - Equipos y bordes.

Interacción: Interacción entre el producto y el usuario.
Interacción: Interacción entre el producto y el usuario.
Interacción: Interacción entre el producto y el usuario.

Referentes de diseño



Mecánicas de juego

