Universidad Nacional de Ingeniería

Área de Conocimiento de Tecnología de la Información y Comunicación

Implementación de un Prototipo de Sistema Electrónico automatizado de compras de supermercado para personas Ciegas

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero Electrónico

Elaborado por:

Br. Roberto Ulises Gutierrez Lacayo
Carnet: 2018-0261U

Br. Daniel Efrain Cajina Peralta
Carnet: 2018-0329U

Tutor:

MSc. Ing. Juan Miguel Mairena

30 de abril de 2026
Managua, Nicaragua

Contenido

1. Introducción 1
2. Justificación 2
3. Objetivos 3
   3.1. Objetivo General 3
   3.2. Objetivos Específicos 3
4. Marco teórico 4
   4.1. Sistemas de automatización 4
      4.1.1. Tipos de automatización 4
   4.2. Raspberry Pi 7
      4.2.1. Raspberry Pi Pico y Pico W 8
   4.3. Thonny: Entorno de Desarrollo para Python y MicroPython 10
      4.3.1. Definición y propósito 10
      4.3.2. Historia y evolución 11
   4.4. Sensores 12
      4.4.1. ¿Qué son los sensores? 12
      4.4.2. Tipos de sensores 14
4.5. Servomotores 15
      4.5.1. Principio de funcionamiento de los servomotores 16
      4.5.2. Tipos de Servomotores 16
   4.6. Módulo de Audio DFPlayer Mini 17
      4.6.1. Características técnicas del DFPlayer Mini 18
      4.6.2. Funcionamiento general y control por microcontroladores 18
5. Diseño Metodológico 20
   5.1. Tipo de investigación 20
      5.2. Método de investigación. 20
      5.3. Fase de análisis. 20
   5.4. Fase de diseño. 20
   5.5. Consideración del sistema. 21
   5.6. Descripción general del sistema. 21
      5.6.1. Subsistema de control 21
      5.6.2. Subsistema de comunicación 21

5.7. Fase de evaluación. 22
6. Análisis y presentación de resultados 23
6.1. Fase de análisis 23
6.1.1. Resultados de la encuesta 23
6.1.2. Discusión de resultados 25
6.2. Fase de diseño. 27
6.2.1. Consideración del sistema. 27
6.2.2. Descripción general del sistema. 27
6.2.3. Arquitectura del sistema 28
6.2.4. Subsistema de control 37
6.2.5. Subsistema de comunicación 42
6.2.6. Ventajas del DFPlayer Mini para accesibilidad 51
6.3. Fase de evaluación 53
6.3.1. Interfaz con Raspberry Pi Pico W 53
6.3.2. Calibración práctica 54
6.3.3. Filtrado y tratamiento de señal 54
6.3.4. Montaje y direccionamiento físico 54
6.3.5. Para mejorar fiabilidad, combinar la lectura del GP2Y0A21 con: 55
6.3.6. Procedimiento de prueba y validación 55
6.4. Presupuesto del prototipo 72
6.4.1. Análisis de costo-beneficio del sistema 74
6.4.2. Costo estimado de implementación en un supermercado real 74
6.4.3. Comparación con soluciones comerciales existentes 75
7. Conclusiones 76
8. Recomendaciones 78
8.1. Mejoras técnicas del prototipo 78
8.2. Mejora del material y diseño de los dispensadores de alimentos 78
8.3. Mejoras de la interacción con el usuario 79
8.4. Ampliación de las funcionalidades del sistema 79
8.5. Evaluación en entornos reales 79
8.6. Proyección social y escalabilidad 79
9. Anexos 80

9.1. Códigos utilizados en el sistema 80
10. Bibliografía..... 81

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Logo de Raspberry Pi 8
Ilustración 2. Familia Raspberry Pi Pico H 9
Ilustración 3. Familia Raspberry Pi Pico W y 2W 10
Ilustración 4. Logo de Thonny y MicroPython..... 11
Ilustración 5. DFPlayer Mini..... 19
Ilustración 6. PinOut Raspberry Pi pico W 28
Ilustración 7. PinOut Sensor Sharp 29
Ilustración 8. PinOut Servomotor FS90R 29
Ilustración 9. PinOut Raspberry Pi pico 2W 30
Ilustración 10. PinOut de Botones..... 30
Ilustración 11. PinOut DFPlayer Mini..... 31
Ilustración 12. Conexiones del servidor..... 33
Ilustración 13. Conexiones del cliente 36
Ilustración 14. Diagrama de bloques del sistema..... 38
Ilustración 15. Representación de comunicación del sistema 39
Ilustración 16. Diagrama de flujo del sistema completo 40
Ilustración 17. Interface Thonny 42
Ilustración 18. Diseño representativo del sistema 44
Ilustración 19. Primer dispensador Frontal..... 47
Ilustración 20. Primer dispensador Perfil..... 48
Ilustración 21. Segundo dispensador 50
Ilustración 22. Primer modelo carrito de compras 52
Ilustración 23. Segundo modelo carrito de compras 53
Ilustración 24. Prueba de medición de distancia 57

Índice de Tablas

Tabla 1. Pregunta 1 23
Tabla 2. Pregunta 2 23
Tabla 3. Pregunta 3 24
Tabla 4. Pregunta 4 24
Tabla 5. Pregunta 5 24
Tabla 6. Pregunta 6 25
Tabla 7. Pregunta 7 25
Tabla 8. Conexión de sensor Infrarrojo 32
Tabla 9. Conexión Servomotor 32
Tabla 10. Conexión Alimentación DFPlayer 34
Tabla 11. Conexión Comunicación serial DFPlayer 34
Tabla 12. Conexión Parlante 35
Tabla 13. Conexión Botón SERVO 35
Tabla 14. Conexión Botón AUDIO 35
Tabla 15. Conexión de sensor de proximidad para calibración 55
Tabla 16. Conexión de LCD para calibrar sensor de proximidad 56
Tabla 17. Valores de prueba de distancia 56
Tabla 18. Parámetros finales recomendados para sensor Infrarrojos 58
Tabla 19. Conexiones del servomotor SG90 para pruebas 59
Tabla 20. Conexiones del servomotor FS90R para pruebas 59
Tabla 21. Pruebas de servo FS90R 60
Tabla 22. Valores PWM del servo FS90R 61
Tabla 23. Comparación de servomotores 61
Tabla 24. Conexiones del DFPLayer Mini 62
Tabla 25. Pruebas del DFPlayer Mini 63
Tabla 26. Pruebas de volumen 64
Tabla 27. Pruebas de comunicación WiFi 67
Tabla 28. Pruebas de distancia WiFi 68
Tabla 29. Pruebas del sistema completo 71
Tabla 30. Simulación de detección del sistema 71
Tabla 31. Tabla de presupuesto 73

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de nuestra formación académica con este gran logro.

A nuestros padres y familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de toda mi carrera, siendo un pilar fundamental en cada uno de nuestros logros personales y profesionales.

A todos los docentes, quienes con su conocimiento, orientación y compromiso académico contribuyeron significativamente al desarrollo a lo largo de toda la carrera inculcándonos valores como personas a través de sus experiencias, brindando las herramientas necesarias para fortalecer nuestras capacidades técnicas y profesionales.

Asimismo, agradezco a todas aquellas personas que, de forma directa o indirecta, colaboraron en la elaboración de este proyecto, ya sea mediante apoyo técnico, académico o moral, y que hicieron posible la culminación de esta tesis.

Finalmente, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, así como por fomentar el desarrollo de proyectos orientados al bienestar social, la innovación tecnológica y la inclusión, pilares fundamentales que hicieron posible la realización de esta tesis.

1. Introducción

El acceso autónomo a bienes y servicios básicos constituye un derecho fundamental para todas las personas; sin embargo, en la práctica, las personas con discapacidad visual continúan enfrentando múltiples barreras que limitan su independencia en actividades cotidianas. Una de estas actividades es la compra de productos en supermercados, donde la disposición cambiante de los estantes, la falta de señalización accesible y la dependencia de terceros dificultan una experiencia de compra segura, eficiente y digna.

En los últimos años, el avance de la automatización, la electrónica y los sistemas embebidos ha permitido el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a mejorar la accesibilidad y la inclusión social. Tecnologías como los microcontroladores, sensores de proximidad, sistemas de comunicación inalámbrica e interfaces auditivas han demostrado un alto potencial para asistir a personas con discapacidad visual, facilitando su interacción con el entorno y promoviendo su autonomía.

En este contexto, la presente tesis se enfoca en el diseño y desarrollo de un sistema electrónico automatizado para asistencia en supermercados dirigido a personas ciegas, cuyo objetivo principal es mejorar la experiencia de compra mediante un prototipo funcional que permita identificar productos, brindar retroalimentación auditiva y facilitar la interacción con un carrito de compras acondicionado. El sistema integra componentes como microcontroladores Raspberry Pi Pico W, sensores infrarrojos de proximidad, módulos de reproducción de audio y actuadores, organizados en subsistemas de control y comunicación que operan de manera coordinada.

La investigación adopta un enfoque aplicado y experimental, orientado a la resolución de un problema real, combinando el análisis teórico con la implementación práctica de un prototipo. Asimismo, se considera la opinión directa de personas ciegas mediante la aplicación de encuestas, lo que permitió identificar necesidades reales, validar la pertinencia del proyecto y orientar las decisiones de diseño hacia la autonomía, la seguridad y la usabilidad.

De esta manera, la tesis no solo propone una solución tecnológica viable, sino que también busca generar un impacto social positivo, promoviendo la inclusión y la independencia de las personas con discapacidad visual en espacios comerciales. El desarrollo del prototipo y el análisis de los resultados obtenidos evidencian el potencial de los sistemas automatizados como herramientas de apoyo en entornos cotidianos, sentando las bases para futuras mejoras y aplicaciones a mayor escala.

2. Justificación

La implementación de este sistema responde a la necesidad de garantizar la accesibilidad y la independencia de las personas ciegas en sus actividades cotidianas, como hacer las compras en el supermercado. La tecnología puede desempeñar un papel crucial en la eliminación de barreras y facilitar la inclusión de este grupo de personas en la sociedad, sino que también ofrece beneficios significativos a los propios establecimientos comerciales. Al facilitar la experiencia de compra para las personas ciegas, los supermercados pueden ampliar su base de clientes y mejorar su reputación como negocios inclusivos y socialmente responsables.

Actualmente, al adoptar tecnologías accesibles, los supermercados pueden diferenciarse de la competencia y posicionarse como líderes en la promoción de la igualdad de oportunidades para todas las personas, independientemente de sus capacidades físicas. Esto no solo impulsa la inclusión social, sino que también puede traducirse en un aumento en las ventas y la fidelidad del cliente, ya que se construye una relación de confianza y respeto mutuo entre el establecimiento y su clientela diversa.

El propósito principal de este sistema es permitir que las personas ciegas realicen sus compras de manera autónoma y eficiente, sin depender de la asistencia de terceros. Al automatizar el proceso de compras, se les brinda la oportunidad de seleccionar y adquirir los productos que necesitan de manera independiente, lo que contribuye a mejorar su calidad de vida y su sensación de autoestima y autonomía.

Este sistema está diseñado específicamente para personas ciegas, aunque también puede beneficiar a otros grupos de personas con discapacidades visuales o con dificultades para desplazarse por un supermercado convencional. Además, puede resultar útil para personas mayores o con movilidad reducida que encuentran difícil navegar por grandes establecimientos comerciales y también es beneficioso para personas que se sienten abrumadas por la gran cantidad de opciones en un supermercado y necesitan orientación adicional para tomar decisiones informadas sobre sus compras.

En resumen, este sistema está destinado a toda persona que requiera asistencia adicional para realizar sus compras de manera independiente y eficaz.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Desarrollar un prototipo de sistema electrónico automatizado que facilite la experiencia de compra en supermercados para usuarios con limitaciones visuales.

3.2. Objetivos Específicos

- Analizar las principales dificultades que enfrentan las personas con discapacidad visual en las compras de productos en un supermercado.

- Diseñar un sistema electrónico automatizado de compras para personas con discapacidad visual que permita el desarrollo del prototipo.

- Evaluar el correcto funcionamiento del prototipo mediante pruebas que aseguren el cumplimiento de los requerimientos de diseño.

4. Marco teórico

El desarrollo de este prototipo de sistema electrónico automatizado representa un paso crucial hacia la igualdad de acceso en el ámbito de los supermercados, donde la tecnología se convierte en una herramienta poderosa para eliminar barreras y promover la autonomía. Al integrar características como etiquetas inteligentes, lectores de voz y guías auditivas, se busca crear un entorno inclusivo donde todos los clientes, independientemente de sus limitaciones visuales, puedan realizar sus compras con facilidad y comodidad. Este enfoque innovador no solo mejora la experiencia de compra para las personas con discapacidad visual, sino que también fomenta un ambiente más inclusivo y consciente en la sociedad

4.1. Sistemas de automatización

La automatización se entiende como el uso de tecnologías para ejecutar tareas y procesos con mínima intervención humana, con el objetivo de **incrementar la eficiencia, reducir errores y optimizar costos** (Groover M. , 2020). En la literatura moderna se reconocen diversos niveles de automatización que reflejan la complejidad y capacidad de los sistemas implementados. Entre ellos destacan la **automatización básica, la automatización de procesos, la automatización de integración y la automatización basada en inteligencia artificial (IA).**

4.1.1. Tipos de automatización

4.1.1.1. Automatización básica

La automatización básica es el nivel inicial de mecanización, donde tareas simples, repetitivas y predecibles son realizadas por dispositivos automáticos como temporizadores, interruptores, relés o actuadores básicos (Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000).

Se caracteriza por su bajo costo, simplicidad y confiabilidad, pero con escasa flexibilidad, ya que no puede adaptarse a cambios en el entorno sin intervención humana.

Ejemplos en la vida diaria:

- Puertas automáticas: Se abren al detectar movimiento, eliminando la necesidad de usar visión para localizar manijas.
- Ascensores programados: Permiten desplazarse entre pisos con solo presionar un botón.

- Iluminación con sensores de movimiento: Encendido/apagado automático.

Impacto en personas ciegas:

Para los usuarios con discapacidad visual, este nivel de automatización representa un alivio en tareas rutinarias, ya que elimina la necesidad de manipular mecanismos manuales que requieren precisión visual. Por ejemplo, una puerta automática reduce la dependencia de localizar manijas o girarlas. Aunque sus aportes son limitados, constituyen la base para mejorar la autonomía en interacciones simples con el entorno.

4.1.1.2. Automatización de procesos

La automatización de procesos se centra en coordinar y ejecutar múltiples tareas dentro de un flujo de trabajo definido (van der Aalst, 2016). A diferencia de la básica, no se limita a tareas individuales, sino que busca optimizar secuencias completas, combinando software, sensores y controladores.

En entornos industriales y de servicios, esta categoría se conoce como Business Process Automation (BPA) o automatización robótica de procesos (RPA) cuando se aplica a contextos digitales.

Ejemplos en retail y servicios:

- Cajeros automáticos (ATM): Permiten realizar operaciones bancarias de principio a fin sin asistencia humana.
- Sistemas de autoservicio en supermercados: Escaneo y pago automático de productos.
- Control de inventario con sensores: Detectan automáticamente la reposición de estantes.

Impacto en personas ciegas:

En supermercados, este nivel es vital, ya que un sistema de procesos automatizados puede guiar paso a paso al usuario en la compra: desde la identificación de un producto mediante un sensor o etiqueta RFID, hasta la confirmación auditiva y la entrega automatizada en el carrito.

Esto significa un avance importante en la independencia funcional, pues permite realizar varias tareas encadenadas sin ayuda de terceros.

4.1.1.3. Automatización de integración

La automatización de integración busca conectar y coordinar diferentes sistemas automatizados para que funcionen como un ecosistema cohesivo (Mourtzis, 2020). Se apoya en tecnologías como plataformas IoT, middleware, APIs, redes inalámbricas y sistemas de gestión centralizados.

Este nivel permite que la información fluya entre distintos subsistemas en tiempo real, generando mayor coherencia y eficiencia.

Ejemplos de integración tecnológica:

- Sistemas logísticos inteligentes: Inventario, transporte y ventas conectados en una misma plataforma.
- Casas inteligentes (Smart Home): Dispositivos de luz, seguridad y climatización coordinados desde un mismo sistema.
- Supermercados automatizados: Donde el control de inventarios, las terminales de autoservicio y las aplicaciones móviles de clientes trabajan de forma conjunta.

Impacto en personas ciegas:

En un supermercado accesible, la integración significa que todos los elementos interactúan en un solo flujo para el usuario:

- Los sensores de proximidad detectan un producto.
- El sistema lo anuncia por audio.
- El control IR o botón confirma la selección.
- El mecanismo lo deposita en el carrito.

Gracias a la integración, todo ocurre de manera coherente y sincronizada, reduciendo confusión y brindando una experiencia accesible en un solo canal (auditivo).

4.1.1.4. Automatización de inteligencia artificial (IA)

La automatización de inteligencia artificial (IA) representa el nivel más avanzado, en el que un sistema no solo ejecuta procesos, sino que aprende, se adapta y toma decisiones autónomas (Haenlein & Kaplan, 2019). Esto se logra mediante algoritmos de machine learning, deep learning y procesamiento de lenguaje natural (NLP).

Ejemplos en retail y servicios:

- Chatbots con voz: Atienden consultas personalizadas.
- Visión por computadora: Reconocimiento automático de productos en estantes.
- Sistemas predictivos: Recomendaciones basadas en hábitos de consumo.

Impacto en personas ciegas:

Para un usuario ciego, la IA puede marcar la diferencia entre una asistencia mecánica y una experiencia verdaderamente inteligente.

- Con reconocimiento de voz, el usuario podría decir: “Quiero una botella de aceite” y el sistema identificar y entregar el producto.
- Con visión artificial, la máquina podría “ver” el entorno y advertir: “Frente a usted hay tres marcas de cereal”.
- Con aprendizaje automático, el sistema podría sugerir productos habituales o detectar preferencias alimenticias.

En este nivel, la automatización trasciende la asistencia básica y se convierte en un colaborador inteligente, capaz de mejorar la inclusión y calidad de vida de las personas ciegas.

4.2. Raspberry Pi

La Raspberry Pi es una familia de microcomputadoras y microcontroladores de bajo costo y alto rendimiento desarrollada por la Raspberry Pi Foundation, ampliamente utilizada en educación, investigación y prototipado de sistemas embebidos (Gareth Halfacree, 2021). Desde su aparición en 2012, la Raspberry Pi ha evolucionado en distintas líneas: computadoras de placa única (SBC) como la Raspberry Pi 4 y 5, y microcontroladores como la serie Raspberry Pi Pico, basados en el chip RP2040 diseñado por la misma fundación.

La línea Pico se centra en proyectos de electrónica y automatización de bajo consumo, ofreciendo un microcontrolador accesible, versátil y programable en C/C++ y MicroPython (Pi, Raspberry Pi, 2025)

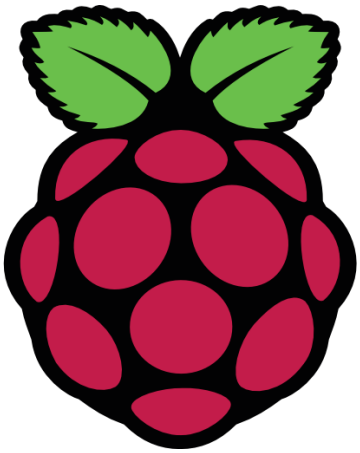


Ilustración 1. Logo de Raspberry Pi

4.2.1. Raspberry Pi Pico y Pico W

El Raspberry Pi Pico es un microcontrolador lanzado en 2021, con arquitectura ARM Cortex-M0+ de doble núcleo a 133 MHz, 264 KB de RAM y capacidad para hasta 16 MB de memoria flash externa. Es altamente eficiente en consumo energético y orientado a proyectos de control, sensórica y automatización de bajo costo (Ltd, 2025).

El Raspberry Pi Pico W, lanzado en 2022, añade conectividad inalámbrica integrada: Wi-Fi 802.11n (2,4 GHz) y, en versiones recientes, Bluetooth 5.2, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) y sistemas que requieren comunicación remota o en red (Pi, Raspberry Pi, 2025).

4.2.1.1. Raspberry Pi Pico y Pico H

La diferencia principal entre la versión Pico y la Pico H radica en la inclusión de pines preinstalados (headers soldados) en la segunda. Esto facilita la conexión con protoboards, módulos y periféricos sin necesidad de soldadura, haciendo que la Pico H sea más conveniente para prototipado rápido y entornos educativos (Gareth Halfacree, 2021).

En términos de rendimiento, ambas versiones son idénticas, ya que comparten el mismo microcontrolador RP2040 y especificaciones técnicas. La elección entre una u otra depende de la comodidad de conexión que se busque.

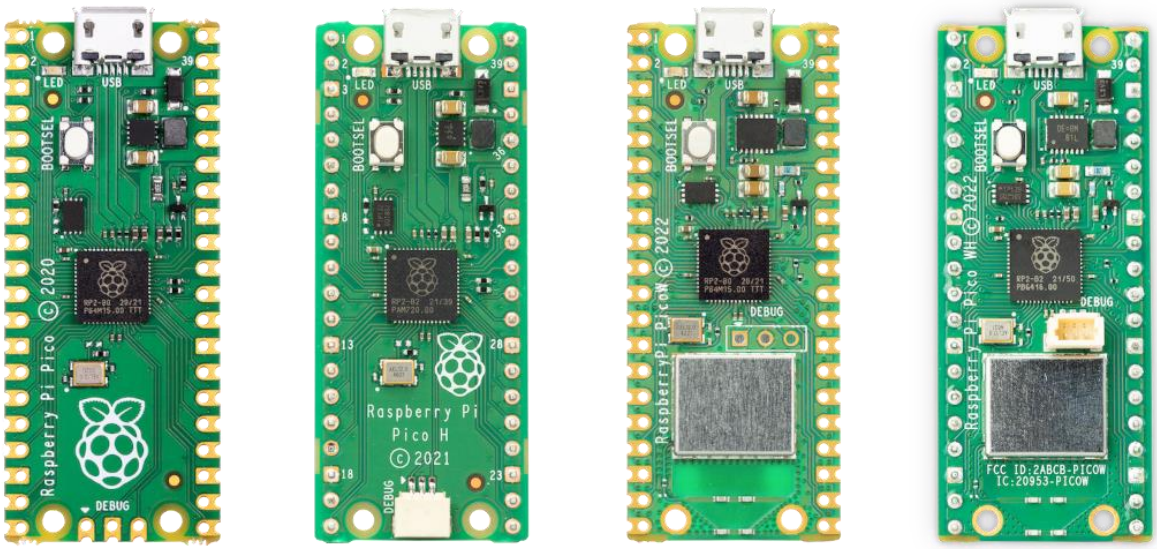


Ilustración 2. Familia Raspberry Pi Pico H

4.2.1.2. Raspberry Pi Pico W y Pico 2W

El Raspberry Pi Pico W incorpora conectividad inalámbrica (Wi-Fi y Bluetooth), mientras que la Pico WH añade a esas características los headers soldados, lo que simplifica aún más la integración con sensores, actuadores y protoboards.

Estas variantes están especialmente orientadas a proyectos que requieren comunicación entre dispositivos, acceso a internet o integración con plataformas de IoT. Su bajo costo (aprox. 6–8 USD por unidad) y su soporte oficial para MicroPython y C/C++ las convierten en una alternativa competitiva frente a otros microcontroladores como el ESP32 o el Arduino UNO, que, aunque ofrecen capacidades similares, suelen implicar mayor consumo energético o menor documentación oficial.

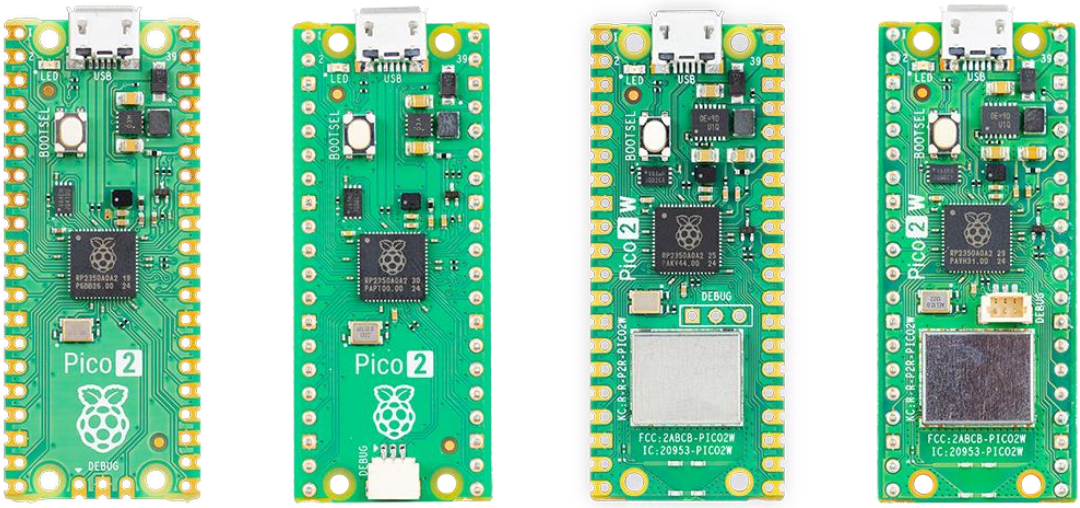


Ilustración 3. Familia Raspberry Pi Pico W y 2W

4.3. Thonny: Entorno de Desarrollo para Python y MicroPython

4.3.1. Definición y propósito

Thonny es un entorno de desarrollo integrado (IDE) diseñado específicamente para la enseñanza y aprendizaje de Python. Fue creado por Aivar Annamaa en la Universidad de Tartu, Estonia, como parte de una investigación sobre herramientas educativas para programación (Annamaa, 2025). En el *International Journal of Innovation and Research in Educational Sciences*, Thonny es descrito como un IDE de código abierto para Python, "principalmente desarrollado en el Institute of Computer Science de la Universidad de Tartu, Estonia". Se destaca que su propósito es hacer la visualización del programa una parte natural del flujo de trabajo para principiantes. Entre sus funciones más importantes mencionan: distintos modos de "stepping" (ejecución paso a paso), visualización intuitiva de la pila de llamadas (call stack), evaluación de expresiones paso por paso y un modo para explicar conceptos como referencias y heap (Xiangrong Shi, 2025).

Thonny permite ejecutar código paso a paso, observar el flujo de ejecución y visualizar cómo cambian las variables y las llamadas a funciones en tiempo real (Hardson-Hurley, 2025). Esta característica lo hace especialmente útil para depurar errores y entender el comportamiento del programa. Además, incluye una interfaz intuitiva con una consola integrada, resaltado de sintaxis, autocompletado y soporte

para administración de paquetes a través de una interfaz gráfica de pip (Raspberry Pi Foundation, 2025).

4.3.2. Historia y evolución

El desarrollo de Thonny comenzó en 2013 como un proyecto académico para investigar métodos de enseñanza de programación estructurada. En 2015 se lanzó su primera versión pública, destacando por su sencillez y sus funciones de depuración visual (Annamaa, 2025). Con el paso del tiempo, la comunidad educativa y tecnológica adoptó el entorno por su facilidad de uso y sus mejoras progresivas.

Las versiones posteriores añadieron características como:

- Integración con MicroPython, el intérprete optimizado de Python para microcontroladores.
- Soporte para conexión con dispositivos Raspberry Pi Pico y Pico W.
- Instalación de bibliotecas mediante interfaz gráfica.
- Compatibilidad con diversos intérpretes de Python y MicroPython.

En 2017, la Raspberry Pi Foundation decidió incluirlo en su distribución oficial, reforzando su enfoque educativo y práctico. Actualmente, Thonny es utilizado en universidades, escuelas y proyectos de automatización por su capacidad para trabajar directamente con hardware de bajo nivel sin perder accesibilidad (Hardson-Hurley, 2025).

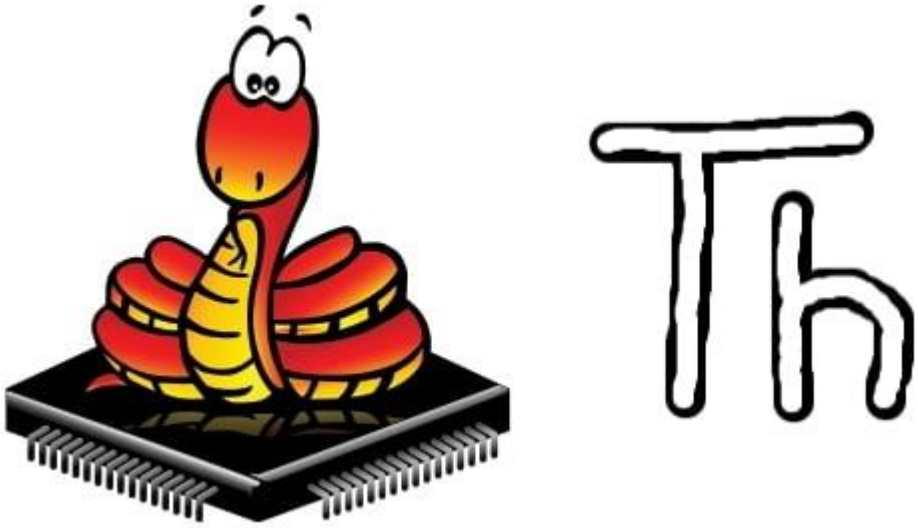


Ilustración 4. Logo de Thonny y MicroPython

4.4. Sensores

4.4.1. ¿Qué son los sensores?

Los sensores son dispositivos capaces de detectar y transformar una magnitud física, química o biológica en una señal eléctrica que pueda ser interpretada por un sistema electrónico o informático (Richard C. Dorf, 2010). En otras palabras, son los "sentidos" de los sistemas automatizados, ya que permiten a una máquina percibir su entorno y responder a los cambios que ocurren en él.

Desde una perspectiva técnica, un sensor actúa como el primer eslabón en una cadena de medición: capta un fenómeno físico (como temperatura, luz o movimiento), lo convierte en una señal analógica o digital, y posteriormente esta señal es procesada por un controlador —en este caso, la Raspberry Pi Pico W— para generar una acción o decisión (Khandpur, 2015).

Los sensores se dividen en dos grandes categorías según la naturaleza de su salida y del fenómeno que detectan:

- Según el tipo de señal de salida:

Sensores analógicos: generan una señal continua, generalmente un voltaje o corriente proporcional a la magnitud medida. Ejemplo: sensor de temperatura LM35 o sensor de luz LDR.

Sensores digitales: entregan una señal discreta, generalmente de tipo todo o nada (1 o 0). Ejemplo: sensor infrarrojo digital o sensor ultrasónico con salida lógica.

- Según la magnitud que detectan:

Sensores físicos: miden variables del entorno como temperatura, presión, velocidad, humedad, distancia o luminosidad.

Sensores químicos o biológicos: detectan concentraciones de gases, pH o sustancias específicas, y son comunes en el ámbito médico e industrial.

De acuerdo con (Nise, 2015), el papel del sensor es esencial dentro de un sistema de control retroalimentado (feedback), ya que permite comparar el valor real medido con el valor deseado o de referencia. Sin una medición confiable, la automatización carecería de precisión y adaptabilidad.

4.4.1.1. Funcionamiento general de un sensor

Todo sensor consta de tres etapas principales (Doebelin, 1990):

- **Elemento sensible:** Es la parte del sensor que responde directamente a la magnitud física. Por ejemplo, un termistor varía su resistencia con la temperatura.
- **Transductor o convertidor:** Transforma la variación física en una señal eléctrica proporcional.
- **Etapa de acondicionamiento:** Amplifica, filtra o digitaliza la señal antes de enviarla al microcontrolador.

Esta estructura permite que la señal resultante sea interpretada, procesada y utilizada por un sistema automatizado. En el contexto de tu tesis, los sensores serán los encargados de detectar la presencia de productos, la posición del carrito y las interacciones del usuario, garantizando que el sistema responda con precisión a las necesidades de las personas ciegas.

4.4.1.2. Importancia de los sensores en la automatización

En los sistemas automatizados modernos, los sensores son el puente entre el mundo físico y el digital. Según (Groover M. P., 2016), la automatización depende directamente de la precisión con la que los sensores capturan los datos del entorno. Por ejemplo:

En un sistema de supermercado automatizado, los sensores permiten identificar la ubicación de productos y confirmar la entrega correcta al usuario.

En sistemas de asistencia, como los destinados a personas con discapacidad visual, los sensores permiten generar retroalimentación táctil o auditiva para guiar la interacción.

La fiabilidad del sistema depende de la exactitud de los datos recolectados. Por ello, se busca seleccionar sensores con alta sensibilidad, bajo error y rápida respuesta, adecuados al entorno de aplicación (Doebelin, 1990).

4.4.1.3. Sensores y accesibilidad

El uso de sensores tiene una implicación social importante cuando se aplican en contextos de accesibilidad. Según la Organización Mundial de la Salud (vision, 2025), más de 43 millones de personas en el mundo viven con discapacidad visual severa, y las tecnologías asistivas representan una herramienta fundamental para su autonomía. En ese sentido, los sensores permiten crear entornos inteligentes capaces de percibir, guiar y responder al usuario sin depender de la visión.

En el prototipo de esta tesis, los sensores cumplen un papel inclusivo: detectarán la presencia del usuario y los productos solicitados, activando respuestas sonoras o

de movimiento. Esto convierte la automatización no solo en un proceso técnico, sino en una herramienta de accesibilidad y equidad tecnológica (vision, 2025).

4.4.2. Tipos de sensores

Los sensores pueden clasificarse de muchas formas (por magnitud medida, principio físico, salida, contacto/no contacto), pero para aplicaciones de navegación y detección en un carrito de supermercado para personas ciegas resulta práctico agruparlos así:

4.4.2.1. Sensores de proximidad / distancia (sin contacto)

Detectan la presencia o la distancia a un objeto sin requerir contacto físico. Existen varias tecnologías:

- Infrarrojos (IR) activos (reflectivos): Emplean un LED emisior IR y un fotodetector. Miden la energía reflejada por el objeto; su salida suele relacionarse de forma no lineal con la distancia. Ventajas: baratos, compactos, consumo bajo. Limitaciones: sensibles a la reflectancia y color del objeto y a la luz ambiental. Ejemplos: sensores Sharp GP2Y* (Fraden, 2025) (Khandpur, 2015).

- Ultrasonido (sonar): Emiten pulsos acústicos (ultrasonidos) y miden el tiempo de vuelo hasta el eco. Ventajas: menos afectados por color/reflectancia; buenos para rangos medios. Limitaciones: ángulo de apertura amplio (menor resolución lateral), problemas con superficies absorbentes o en ambientes ruidosos (Fraden, 2025).

- LIDAR / Time-of-Flight (ToF) óptico: Miden tiempo de vuelo óptico o fase para obtener distancia con alta precisión y rango. Ventajas: alta resolución y alcance; Limitación: costo y complejidad mayor (Doebelin, 1990).

- Sensores capacitivos / inductivos (proximidad de superficie): Inductivos detectan metales; capacitivos detectan cambios en capacitancia (útiles para superficies). Son de corto alcance y muy fiables cuando se usan según su propósito.

Aplicación al carrito: Para detectar en qué producto está el carrito (posición frente a un estante o frente a un riel de producto), los sensores IR reflectivos o ToF suelen ser apropiados por su tamaño, respuesta rápida y facilidad de montaje; sin embargo, los IR requieren calibración por color/reflectancia, y los ToF son más robustos, pero más caros (Fraden, 2025) (Doebelin, 1990).

4.4.2.2. Sensores de contacto / interruptores

Detectan cuando existe contacto físico (e.g., microinterruptores, sensores de presión). En el contexto de un carro, se usan para confirmar, por ejemplo, que un mecanismo mecánico ha soltado el producto al carro (sensores mecánicos de fin de carrera, contactos reed). Son fiables para eventos discretos, pero requieren interacción física (Nise, 2015).

4.4.2.3. Sensores de identificación

No miden distancia, sino identidad: **RFID**, **NFC** o **códigos QR**. Se usan para identificar un producto concreto o una etiqueta en un estante. **RFID** permite lectura sin línea de visión y rápida identificación; **QR** es muy barato, pero requiere cámara/visión o lector óptico. En entornos de supermercado, RFID es muy útil para inventario y confirmación de producto, a pesar de su coste (Wafa Elmannaiy, 2025).

4.4.2.4. Sensores inerciales y de posición

Acelerómetros, giroscopios y magnetómetros (IMU) miden movimiento y orientación. Para un carrito pueden ayudar a detectar cambios de dirección o golpes, pero no son aptos para determinar la distancia a un estante con la precisión necesaria (Fraden, 2025).

4.4.2.5. Sensores de fuerza / peso

Celdas de carga o sensores de presión permiten verificar que un producto fue colocado en el carrito (confirmación de entrega). Su uso combinado con sensores de proximidad mejora la fiabilidad (Khandpur, 2015).

4.5. Servomotores

Los servomotores son actuadores ampliamente utilizados en sistemas mecatrónicos, robótica y automatización debido a su capacidad para controlar posición, velocidad y, en algunos casos, torque, mediante señales eléctricas de retroalimentación (Nise, 2015). A diferencia de los motores de corriente continua tradicionales, los servomotores incorporan un sistema de control cerrado (feedback), normalmente utilizando un potenciómetro o sensor interno, lo que permite posicionamientos precisos y repetibles (Bolton, 2015).

En aplicaciones donde se requiere controlar mecanismos de apertura, cierre, orientación o movimiento angular limitado, los servomotores son una solución compacta, eficiente y económica (AdvancedMotionControls, 2025).

4.5.1. Principio de funcionamiento de los servomotores

Un servomotor típico está conformado por tres elementos principales:

1. Motor DC o motor sin escobillas interno, responsable del movimiento.
2. Caja de engranajes, que reduce la velocidad y aumenta el torque.
3. Circuito de control y potenciómetro, que retroalimenta la posición angular.

El servomotor recibe una señal de modulación por ancho de pulso (PWM), generalmente con un ciclo de trabajo entre 1 ms y 2 ms, donde:

- ~1 ms corresponde a un extremo del ángulo (0°).
- ~1.5 ms corresponde al punto medio (≈ 90°).
- ~2 ms corresponde al extremo opuesto (≈ 180°).

Este mecanismo de control hace que el eje se posicione en el ángulo pedido, manteniéndose mediante correcciones constantes realizadas internamente por el circuito del servo (Nise, 2015) (Bolton, 2015).

La capacidad de actuar en forma precisa y mantener su posición incluso ante pequeñas perturbaciones los convierte en candidatos ideales para sistemas de dispensación, compuertas, brazos articulados y mecanismos de selección, como los requeridos en este proyecto.

4.5.2. Tipos de Servomotores

Los servomotores se clasifican principalmente en tres categorías dependiendo de su rango de operación:

4.5.2.1. Servomotores de rotación limitada

Son los más comunes y operan típicamente entre 0 y 180 grados. Incluyen potenciómetro interno para retroalimentación.

Son ideales para compuertas, actuadores pequeños y mecanismos de control angular (Bolton, 2015).

4.5.2.2. Servomotores de rotación continua

No regulan ángulo sino velocidad y dirección, por lo que se asemejan más a un motor DC con control PWM.

Se utilizan en plataformas robóticas, ruedas y bandas transportadoras (AdvancedMotionControls, 2025).

4.5.2.3. Servomotores industriales (AC servos)

Son de mayor precisión y torque elevado, empleados en maquinaria CNC, automatización industrial y robótica avanzada.

Trabajan con controladores dedicados y algoritmos PID (Farid Golnaraghi, 2025).

Para sistemas económicos de automatización ligera —como un dispensador de productos en un prototipo de supermercado— los servos de rotación limitada son la opción ideal debido a su bajo costo y facilidad de integración.

4.5.2.4. Ventajas de los servomotores en proyectos de automatización

- Alta precisión angular (±1° según modelo).
- Bajo consumo energético.
- Peso reducido y tamaño compacto.
- Fácil control mediante microcontroladores como Raspberry Pi Pico W.
- Capacidad de mantener posición sin necesidad de control externo complejo.
- Torque suficiente para mover pequeñas compuertas, tapas o mecanismos de liberación.

Estas características los convierten en un componente clave para el proyecto de dispersión automatizada de productos en un carro asistido para personas ciegas.

4.6. Módulo de Audio DFPlayer Mini

El DFPlayer Mini es un módulo de reproducción de audio autónomo ampliamente utilizado en sistemas embebidos, proyectos electrónicos y dispositivos interactivos debido a su capacidad para reproducir archivos MP3 y WAV sin necesidad de un procesador externo complejo (DFRobot, 2016). Puede funcionar tanto de manera independiente como controlado por microcontroladores mediante interfaces seriales, lo que lo convierte en una solución compacta y eficiente para dispositivos que requieran retroalimentación auditiva.

En sistemas orientados a accesibilidad para personas ciegas, el DFPlayer Mini se utiliza frecuentemente para generar mensajes de voz, alertas, instrucciones auditivas o identificación sonora de objetos, lo cual resulta fundamental para mejorar la interacción humano–máquina (Elmannai & Elleithy, 2017).

4.6.1. Características técnicas del DFPlayer Mini

El DFPlayer Mini integra un decodificador de audio, un amplificador y un lector de tarjetas microSD, todo dentro de un módulo de pocos centímetros. Según la documentación técnica oficial (DFRobot, 2016), sus principales características son:

- Reproduce archivos MP3 y WAV directamente desde una tarjeta microSD.
- Control mediante comandos seriales (UART) desde microcontroladores como Arduino, ESP32 o Raspberry Pi Pico W.
- Amplificador integrado de 3W para conectar parlantes directamente.
- Voltaje de operación: 3.2 V – 5 V.
- Sistema de archivos soportado: FAT16 y FAT32.
- Funciones internas: reproducir, pausar, subir/bajar volumen, reproducir carpeta específica, reproducir archivos numerados.
- Consumo energético bajo ideal para sistemas móviles.

Gracias a esta arquitectura, el DFPlayer Mini puede operar sin depender de un sistema operativo ni de recursos elevados de procesamiento, lo cual reduce complejidad y aumenta la confiabilidad, especialmente en ambientes donde se requiere robustez y respuesta inmediata.

4.6.2. Funcionamiento general y control por microcontroladores

El DFPlayer Mini puede recibir comandos por UART, lo cual permite enviar instrucciones como:

- Reproducir archivo por número
- Reproducir carpeta específica
- Pausar / detener
- Ajustar volumen
- Repetir bucle

Este tipo de control es ideal para sistemas de interacción auditiva en tiempo real, ya que permite que el microcontrolador (en este caso, la Raspberry Pi Pico W) envíe directamente la orden de reproducir el archivo correspondiente al producto detectado.

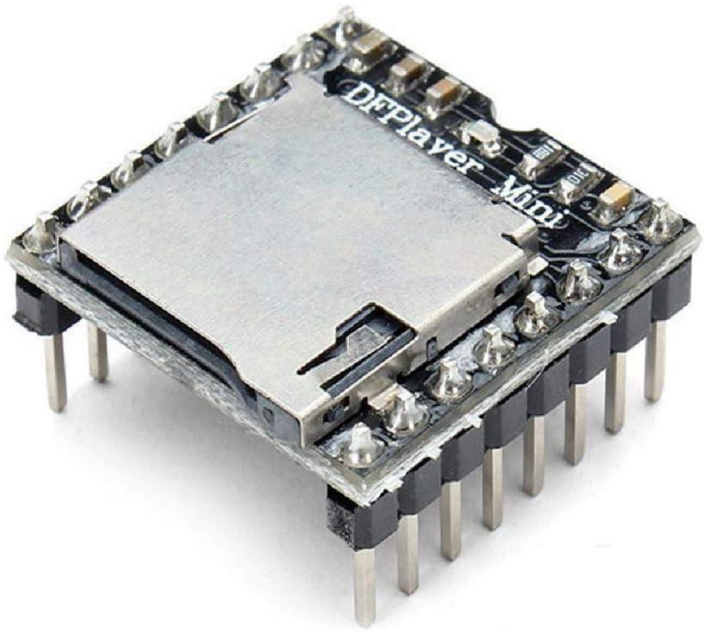


Ilustración 5. DFPlayer Mini

5. Diseño Metodológico

5.1. Tipo de investigación.

La investigación desarrollada en este proyecto fue de tipo aplicada, debido a que su propósito principal consistió en encontrar una solución práctica a un problema real relacionado con la accesibilidad en supermercados para personas ciegas. Para ello, se utilizaron los conocimientos adquiridos durante la formación académica.

El proyecto se centró en el diseño y la implementación de un prototipo de sistema electrónico automatizado de compras para personas con discapacidad visual, el cual buscó mejorar su experiencia mediante un proceso de adquisición de productos más autónomo, seguro y eficiente.

5.2. Método de investigación.

Se empleó un enfoque experimental, ya que las variables involucradas fueron manipuladas en un entorno controlado. Esto permitió seleccionar, evaluar y probar los componentes electrónicos y computacionales que conformaron el sistema automatizado, a fin de determinar cuáles ofrecían el mejor rendimiento y cumplían adecuadamente con los requisitos planteados.

La experimentación facilitó obtener resultados confiables sobre el funcionamiento del prototipo y permitió realizar ajustes durante el proceso.

5.3. Fase de análisis.

En esta fase se realizó una búsqueda exhaustiva de información proveniente de fuentes primarias y secundarias. Asimismo, se estudiaron trabajos previos relacionados con sistemas electrónicos orientados a personas ciegas, tecnologías de asistencia y automatización aplicada.

Como parte del análisis, se definieron los requisitos técnicos y funcionales que el sistema debía cumplir, así como las tecnologías, sensores, microcontroladores y módulos de comunicación que mejor se adecuaban a las necesidades del proyecto.

Esta etapa fue fundamental para estructurar los objetivos y para garantizar que las decisiones de diseño estuvieran correctamente fundamentadas.

5.4. Fase de diseño.

Durante la fase de diseño se analizaron las consideraciones técnicas y operativas del sistema, y se elaboraron los modelos y esquemas de los subsistemas que conformaron el prototipo final.

5.5. Consideración del sistema.

Tomando en cuenta los requerimientos del entorno donde se implementó el prototipo y siguiendo las recomendaciones de diversos autores especializados en usabilidad y accesibilidad, se estableció que el sistema debía cumplir con las siguientes características para asegurar su correcto funcionamiento:

- El sistema debía resultar confortable y comprensible para los usuarios.
- El sistema debía notificar auditivamente al usuario sobre los productos presentes en los estantes durante su trayecto.
- Se utilizarían un pasillo simulado y un carro de compras acondicionado específicamente para el sistema.

Estas consideraciones guiaron el diseño físico y lógico del prototipo.

5.6. Descripción general del sistema.

El sistema electrónico automatizado desarrollado para mejorar la experiencia de compra de usuarios con discapacidad visual estuvo conformado por dos subsistemas principales: el subsistema de control y el subsistema de comunicación. Ambos operaron de manera integrada para permitir el correcto funcionamiento del prototipo.

5.6.1. Subsistema de control

Este subsistema estuvo compuesto por el microcontrolador, los sensores de proximidad, los actuadores y los receptores necesarios para operar el sistema. Su función principal fue identificar la posición del carrito, procesar la información del entorno y activar el mecanismo que permitía liberar el producto seleccionado hacia el carrito de compras.

5.6.2. Subsistema de comunicación

Este subsistema se encargó de informar al usuario sobre los artículos disponibles mediante una bocina controlada por el módulo de audio. Además, incorporó un control IR que permitía enviar instrucciones específicas al sistema.

El objetivo principal de este subsistema fue ofrecer retroalimentación auditiva clara y contextual, facilitando la navegación autónoma del usuario por el pasillo designado.

5.7. Fase de evaluación.

Durante la fase de evaluación se llevaron a cabo pruebas exhaustivas del prototipo para verificar su funcionamiento integral. Estas pruebas permitieron identificar fallas o inconsistencias en el sistema, las cuales fueron corregidas progresivamente mediante ajustes técnicos y de programación.

A partir de los resultados obtenidos en esta etapa, fue posible evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente y determinar la efectividad del prototipo como solución accesible para personas con discapacidad visual.

6. Análisis y presentación de resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de una encuesta aplicada a 10 personas ciegas con el propósito de identificar sus necesidades, hábitos y expectativas respecto al uso de un sistema automatizado para asistencia en supermercados. Los datos recabados sirvieron para validar la pertinencia del proyecto y orientar decisiones de diseño enfocadas en accesibilidad y usabilidad.

La encuesta consistió en siete preguntas abiertas y cerradas. A continuación, se muestran los resultados.

6.1. Fase de análisis

6.1.1. Resultados de la encuesta

Pregunta 1. ¿Qué tan común va usted a un supermercado?

Frecuencia	Respuestas	Porcentaje
1 vez por semana	4	40%
2–3 veces por semana	2	20%
1 vez cada 15 días	3	30%
1 vez al mes	1	10%

Tabla 1. Pregunta 1

Interpretación: La mayoría asiste al supermercado al menos semanalmente, evidenciando que el acto de compra es una actividad recurrente y relevante para este grupo.

Pregunta 2. ¿Cuál es el mayor reto que usted enfrenta en un supermercado?

Reto identificado	Frecuencia
Dificultad para ubicar productos	7
Dependencia de otra persona	6
Falta de señalización accesible	4
Dificultad para desplazarse en pasillos	3

Tabla 2. Pregunta 2

Comentarios breves de personas encuestadas:

- “Dependo de alguien para que me guíe”
- “No hay referencias táctiles o sonoras”
- “Las estanterías cambian y me pierdo”

Interpretación: El desafío principal está relacionado con la autonomía en la localización de productos, lo que confirma la necesidad del sistema propuesto.

Pregunta 3. ¿Usted va acompañado o solo para ir hacer compras al supermercado?

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Acompañado	9	90%
Solo	1	10%

Tabla 3. Pregunta 3

Interpretación: Existe una fuerte dependencia externa al realizar compras, lo cual justifica el desarrollo de herramientas de apoyo para autonomía.

Pregunta 4. ¿Le gusta la idea del proyecto?

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Sí	10	100%
No	0	0%

Tabla 4. Pregunta 4

Interpretación: Los participantes muestran aceptación absoluta y entusiasmo hacia el proyecto.

Pregunta 5. ¿Cree usted que es una necesidad nuestro proyecto en los supermercados?

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Sí	9	90%
Tal vez	1	10%
No	0	0%

Tabla 5. Pregunta 5

Interpretación: Existe una percepción clara de utilidad y necesidad del sistema propuesto.

Pregunta 6. ¿Qué características le gustaría que tuviera el proyecto?

Respuestas más comunes:

Característica sugerida	Frecuencia
Guía auditiva por voz	8
Avisos de obstáculos	6
Compatibilidad con bastón/sensores	3
Notificación de promociones básicos	2
Botón de emergencia / asistencia	2

Tabla 6. Pregunta 6

Interpretación: La prioridad del usuario es asistencia auditiva e independencia en navegación, validando el uso de audios y sensores de proximidad.

Pregunta 7. ¿Le gustaría que fuera guiado o usted mover el carrito de compras?

Preferencia	Frecuencia	Porcentaje
Yo mover el carrito	7	70%
Carrito guiado automáticamente	3	30%

Tabla 7. Pregunta 7

Interpretación: La mayoría desea control propio del carrito, alineándose al diseño actual basado en autonomía asistida.

6.1.2. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada a personas ciegas permiten analizar de manera clara la problemática cotidiana que enfrentan al realizar compras en supermercados y el impacto positivo potencial que puede tener el sistema automatizado propuesto.

En primer lugar, la frecuencia con la que los participantes asisten a supermercados demuestra que la actividad de compra forma parte de su vida cotidiana y no es un evento ocasional. Sin embargo, esta recurrencia contrasta con las dificultades constantes que manifestaron enfrentar, especialmente en la localización de productos y el desplazamiento dentro de los pasillos. Esto evidencia que el entorno

del supermercado, tal como está diseñado actualmente, no resulta inclusivo ni accesible para personas con discapacidad visual.

Uno de los hallazgos más relevantes es la alta dependencia de terceros, ya que el 90 % de los encuestados indicó que debe acudir acompañado para realizar sus compras. Esta dependencia no solo limita la autonomía del usuario, sino que también afecta su privacidad, su capacidad de tomar decisiones de manera independiente y su autoestima. En este contexto, el sistema propuesto adquiere un valor significativo al plantearse como una herramienta que reduce la necesidad de asistencia humana constante, promoviendo la independencia funcional del usuario.

El alto nivel de aceptación del proyecto (100 %) y la percepción de necesidad (90 %) reflejan que las personas ciegas reconocen el valor de la tecnología como medio de apoyo, siempre que esta esté diseñada de acuerdo con sus necesidades reales. Esto indica que el sistema automatizado no es percibido como una solución innecesaria o invasiva, sino como una oportunidad para mejorar su experiencia de compra y su calidad de vida.

Asimismo, las características más solicitadas como la guía auditiva por voz y los avisos de obstáculos confirman que la información sonora contextual es fundamental para la orientación espacial y la toma de decisiones dentro del supermercado. El uso de sensores de proximidad junto con retroalimentación auditiva permite al usuario identificar productos, comprender su entorno inmediato y desplazarse con mayor seguridad, lo que disminuye el riesgo de accidentes y la sensación de desorientación.

Otro aspecto relevante es la preferencia mayoritaria por mantener el control del carrito de compras. Este resultado sugiere que las personas ciegas no desean que el sistema sustituya completamente su movilidad, sino que actúe como un asistente inteligente, brindando información y apoyo sin anular su participación activa. Esto refuerza la idea de que el objetivo del sistema no es automatizar la experiencia en exceso, sino empoderar al usuario, respetando su capacidad de decisión y movimiento.

Desde una perspectiva social, el sistema propuesto tiene el potencial de fomentar la inclusión, al permitir que las personas ciegas realicen compras de forma más autónoma, reduciendo barreras físicas y sociales. Además, puede contribuir a sensibilizar a los comercios sobre la importancia de implementar tecnologías accesibles, promoviendo entornos más equitativos.

En conjunto, los resultados indican que el sistema automatizado basado en sensores de proximidad, control mediante microcontroladores y retroalimentación auditiva responde directamente a las necesidades expresadas por los usuarios. Más allá de su viabilidad técnica, el proyecto destaca por su impacto humano y social, al ofrecer una solución que puede transformar la experiencia de compra en una

actividad más digna, independiente y segura para las personas con discapacidad visual.

6.2. Fase de diseño.

6.2.1. Consideración del sistema.

En esta etapa se definieron las características fundamentales del prototipo, tomando en cuenta los requerimientos funcionales y no funcionales previamente identificados, así como las necesidades específicas de los usuarios objetivo, en este caso, personas con discapacidad visual. La consideración del sistema se centró en diseñar una solución accesible, intuitiva y segura, capaz de facilitar el proceso de compra de productos en un supermercado mediante el uso de tecnología electrónica automatizada.

Para ello, se establecieron los componentes principales del sistema, la arquitectura de funcionamiento y la interacción entre hardware y software. Se contempló el uso de dispositivos de entrada que permitieran al usuario seleccionar o identificar productos sin depender de la visión, así como mecanismos de salida auditiva que proporcionaran información clara y oportuna sobre cada acción realizada. Asimismo, se consideró la conectividad necesaria para la consulta y procesamiento de datos relacionados con los productos.

6.2.2. Descripción general del sistema.

El prototipo permite reconocer los productos, consultar sus características principales y comunicar al usuario datos relevantes como nombre, precio y confirmación de selección mediante mensajes de voz. Asimismo, incorpora controles físicos accesibles que facilitan la interacción sin necesidad de interfaces visuales, garantizando un uso sencillo e intuitivo.

- Microcontrolador (Raspberry Pi Pico W)

Se utilizó como unidad principal de procesamiento del sistema debido a su bajo costo, tamaño compacto y capacidad de conectividad inalámbrica (Wi-Fi), lo que permite la comunicación con otros dispositivos y servicios necesarios para automatizar el proceso de compras.

- Módulo de conexión inalámbrica (Wi-Fi integrado)

Permite la comunicación con bases de datos o aplicaciones externas para consultar información de productos, precios y disponibilidad en tiempo real, facilitando la automatización del sistema.

- Sistema de salida de audio (bocina o auriculares)

Fundamental para brindar retroalimentación auditiva a personas ciegas, informando el nombre del producto, precio y confirmaciones de compra mediante mensajes de voz.

- Botones físicos de control

Permiten la interacción sencilla del usuario con el sistema (por ejemplo: confirmar selección, repetir información, cancelar operación), priorizando la accesibilidad sin depender de interfaces visuales.

- Módulo de alimentación (batería recargable o fuente de poder)

Proporciona energía al prototipo, permitiendo su funcionamiento portátil dentro del entorno de supermercado.

- Estructura física del prototipo (carcasa o soporte)

Diseñada para alojar los componentes electrónicos de manera segura y ergonómica, facilitando su uso práctico por parte de personas con discapacidad visual.

6.2.3. Arquitectura del sistema

El prototipo está compuesto por dos microcontroladores:

- Servidor — Raspberry Pi Pico W

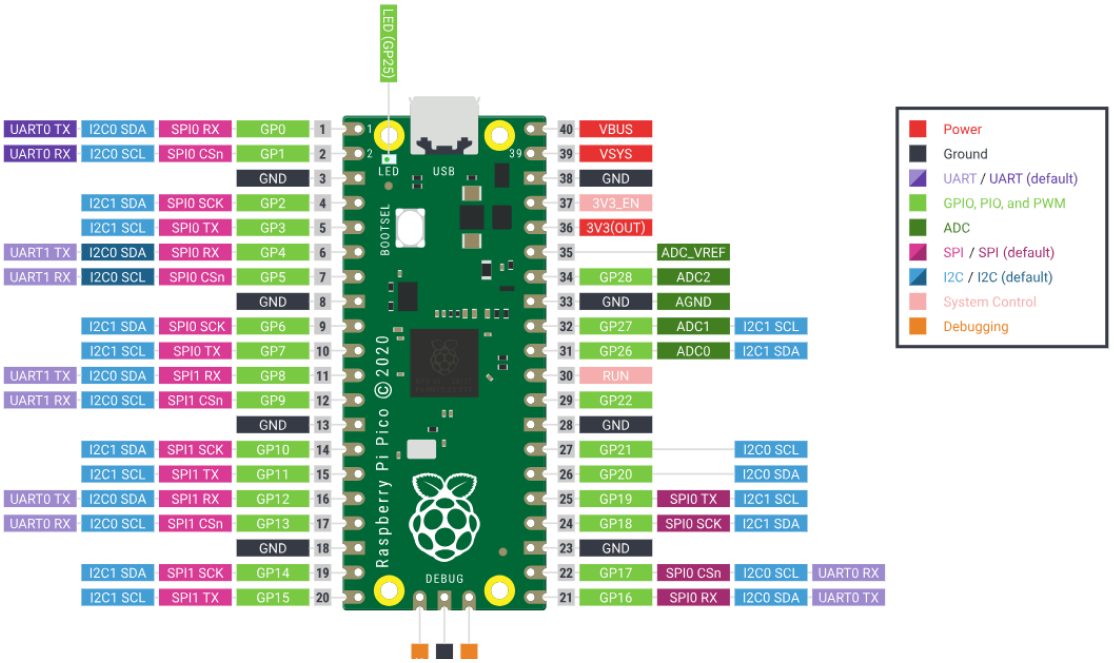


Ilustración 6. PinOut Raspberry Pi pico W

Controla:

a. Sensores de distancia Sharp

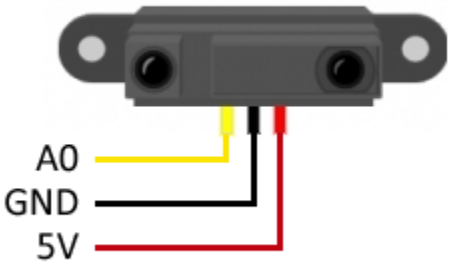


Ilustración 7. PinOut Sensor Sharp

b. Servomotores (dispensador)



Ilustración 8. PinOut Servomotor FS90R

c. Comunicación WiFi

- Cliente — Raspberry Pi Pico 2 W

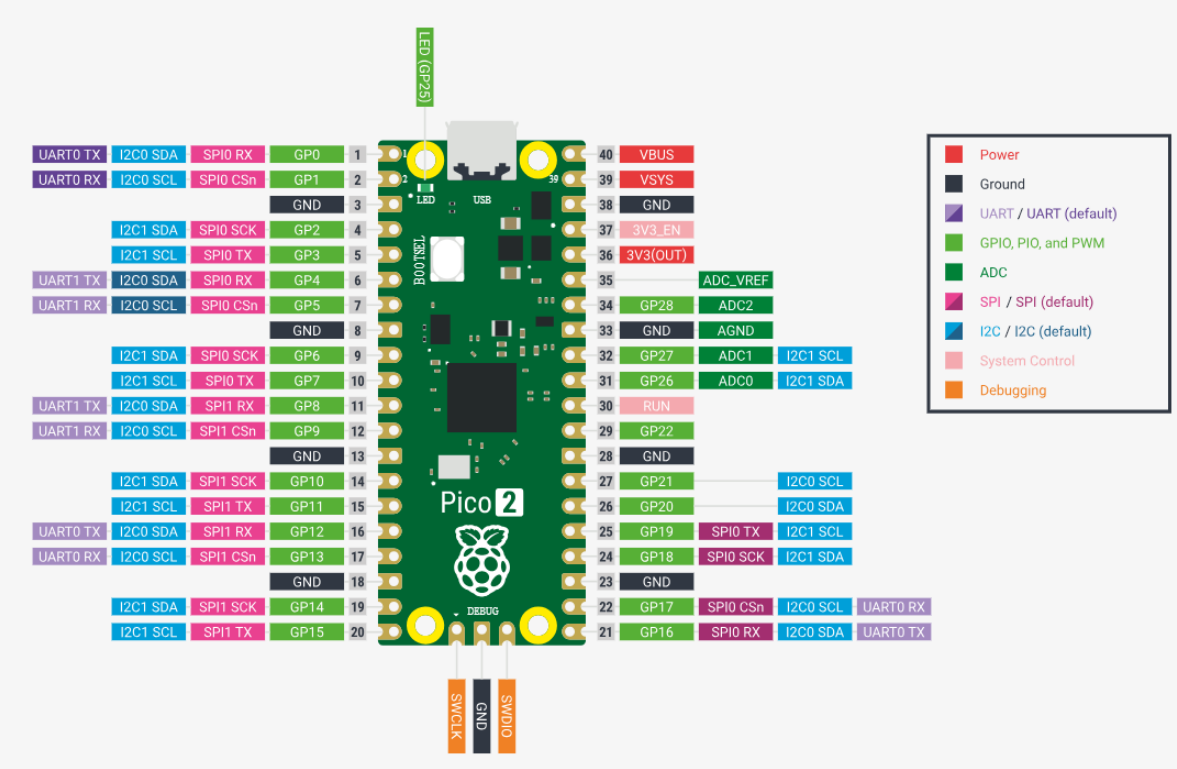


Ilustración 9. PinOut Raspberry Pi pico 2W

Controla:

a. Botones físicos del usuario (Botones SERVO y AUDIO)

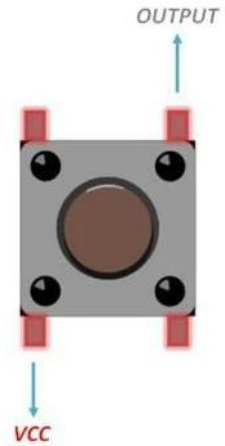


Ilustración 10. PinOut de Botones

b. DFPlayer Mini + parlante (audio)

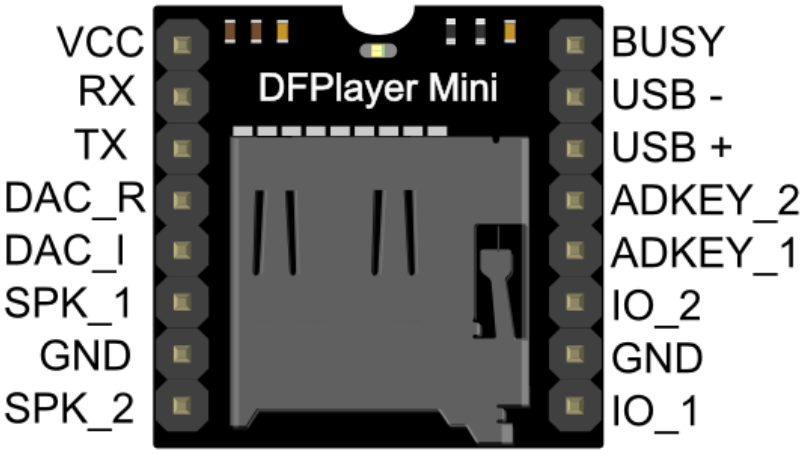


Ilustración 11. PinOut DFPlayer Mini

c. Recepción de eventos del servidor
d. Activación de audio remoto
e. Comunicación WiFi

Ambos se comunican por TCP vía WiFi.

6.2.3.1. Circuito Servidor (Pico W)

El microcontrolador servidor gestiona el mecanismo de dispensación mediante un servomotor controlado por señal PWM y detecta la presencia del carrito mediante un sensor de proximidad Sharp conectado a una entrada analógica (ADC). Cuando el carrito es detectado, el sistema envía una señal al cliente para reproducir el mensaje de bienvenida.

6.2.3.1.1. Sensor de distancia

- Función:

Detecta el carrito a ~10 cm para activar el sistema automáticamente.

- Conexiones:

Sensor	Pico W	Motivo
VCC	3V3 (OUT)	Alimentación segura (no 5V)
GND	GND	Tierra común
OUT	GP26 (ADC0)	Lectura analógica de distancia

Tabla 8. Conexión de sensor Infrarrojo

- Por qué GP26:

a. Es un pin ADC (conversión analógico-digital).
b. El sensor entrega voltaje variable según distancia.
c. Solo los pines ADC pueden leerlo.

- En el código:

```
sensor = ADC(26)
```

6.2.3.1.2. Servomotor (ADC)

- Función:

Abre el dispensador de producto cuando se recibe SERVE.

- Conexiones:

Servo	Pico W	Motivo
Rojo	VBUS (5V)	El servo requiere 5V
Marrón	GND	Tierra
Naranja	GP15	Señal PWM

Tabla 9. Conexión Servomotor

- Por qué GP15:

a. Es pin digital con soporte PWM
b. El servo necesita señal PWM de 50 Hz

- Código:

servo = PWM(Pin(15))

servo.freq(50)

6.2.3.1.3. LED interno

- Función:

Indica conexión con el cliente.

- No requiere cableado:

led_interno = Pin("LED", Pin.OUT)

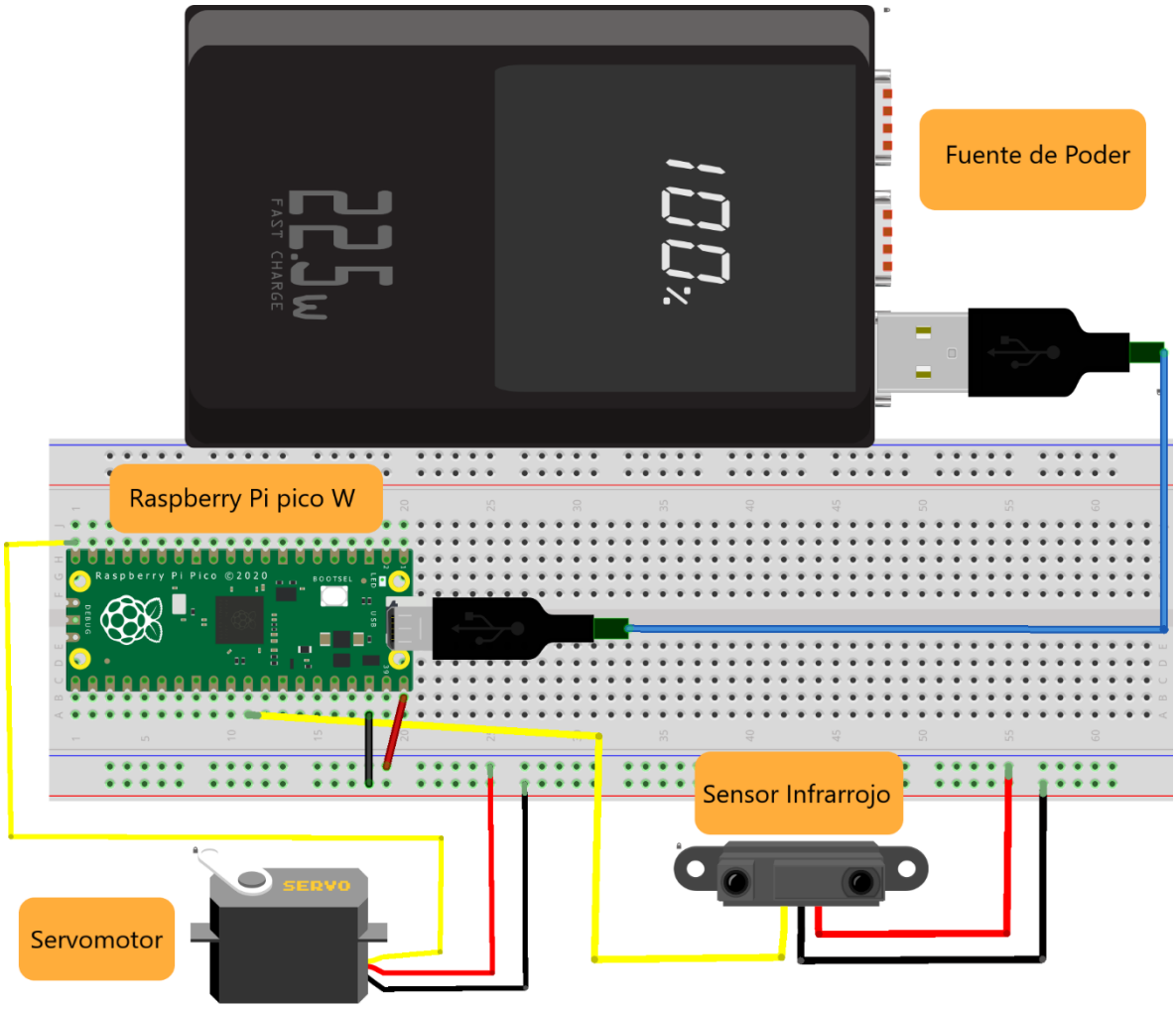


Ilustración 12. Conexiones del servidor

6.2.3.2. Circuito Cliente (Pico 2W)

El microcontrolador cliente controla la interacción del usuario mediante dos botones físicos y reproduce mensajes de voz a través de un módulo DFPlayer Mini conectado mediante comunicación serial UART.

El botón SERVE permite solicitar el despacho de producto, mientras que el botón AUDIO activa la reproducción de instrucciones auditivas. El parlante conectado al DFPlayer Mini proporciona retroalimentación sonora al usuario.

6.2.3.2.1. DFPlayer Mini + Parlante

- Función:

Reproduce mensajes de voz

a. Se detecta carrito (evento del servidor)
b. Usuario presiona botón AUDIO

- Conexiones (Alimentación):

DFPlayer	Pico 2 W	Motivo
VCC	VBUS (5V)	El módulo requiere 5V
GND	GND	Tierra común

Tabla 10. Conexión Alimentación DFPlayer

Se utiliza el pin VBUS porque el DFPlayer Mini opera a 5 V, mientras que el pin 3V3 del microcontrolador no proporciona suficiente voltaje para su funcionamiento estable.

- Conexiones (Comunicación serial (UART)):

DFPlayer	Pico 2 W	Función
TX	GP1	Datos hacia el Pico
RX	GP0	Comandos desde el Pico

Tabla 11. Conexión Comunicación serial DFPlayer

- Por qué GP0 y GP1:

a. UART0 hardware
b. Comunicación estable sin usar CPU extra
c. Recomendado para módulos seriales

- Conexiones del parlante:

Parlante	DFPlayer
Cable +	SPK1
Cable −	SPK2

Tabla 12. Conexión Parlante

El audio se amplifica internamente en el DFPlayer.

6.2.3.2.2. Botones del cliente

- Botón del SERVO:

Botón	Pico 2 W
Un lado	GP14
Otro lado	GND

Tabla 13. Conexión Botón SERVO

Configurado como Pull-Up interno.

- Botón AUDIO:

Botón	Pico 2 W
Un lado	GP16
Otro lado	GND

Tabla 14. Conexión Botón AUDIO

Solicita reproducción en el DFPlayer del cliente.

- Funcionamiento final del cliente:

a. Evento automático (sensor del servidor):

Servidor → envía AUDIO_SENSOR

Cliente → reproduce audio en DFPlayer

b. Evento manual:

Botón AUDIO → envía AUDIO

Servidor responde → Cliente reproduce audio

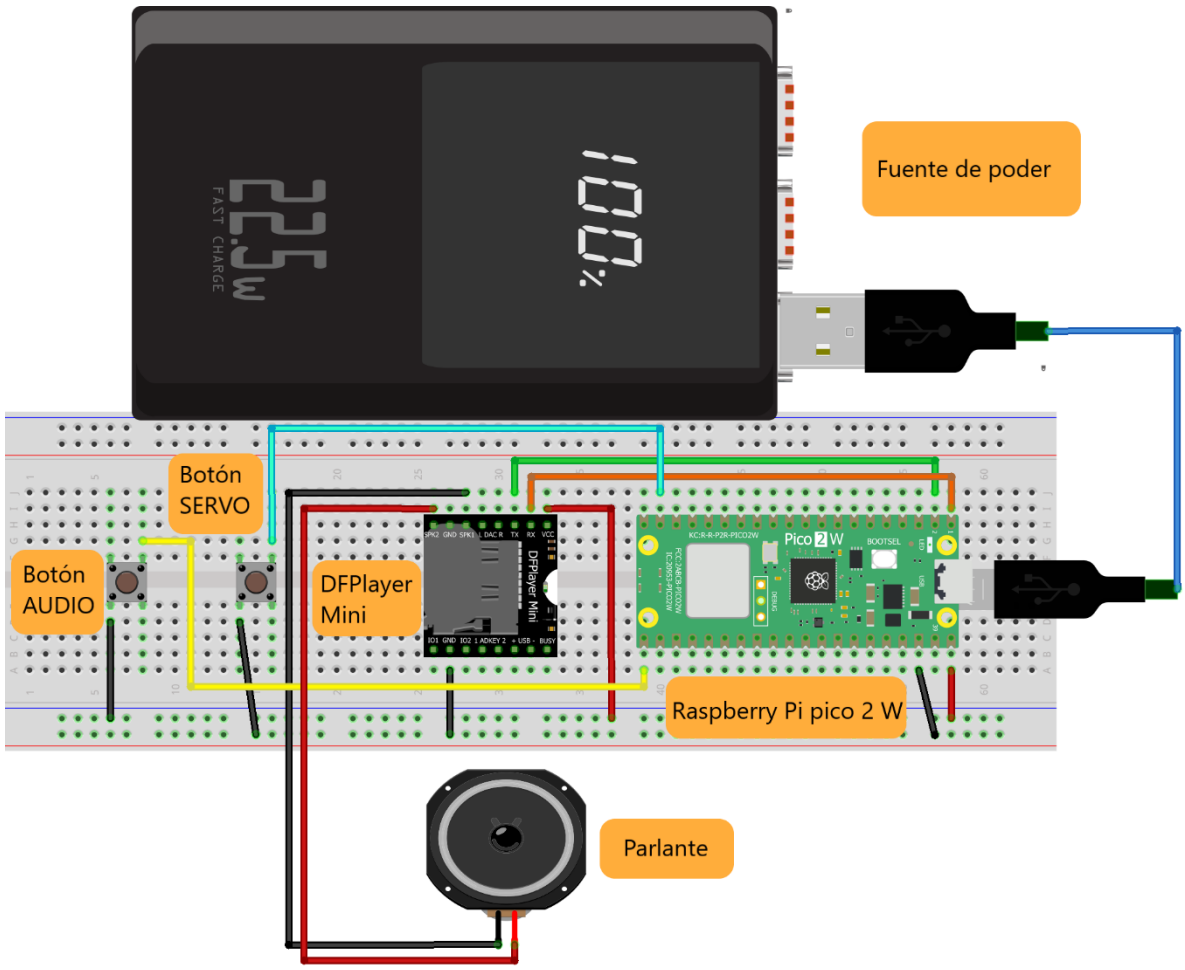


Ilustración 13. Conexiones del cliente

6.2.4. Subsistema de control

6.2.4.1. Justificación del uso de Raspberry Pi Pico W en el proyecto

En el presente sistema, se selecciona la Raspberry Pi Pico W por tres razones fundamentales:

- Conectividad inalámbrica integrada:

Al contar con Wi-Fi nativo, permite establecer comunicación entre microcontroladores sin necesidad de módulos adicionales (ej. ESP8266). Esto reduce costos, simplifica el diseño y minimiza el consumo de energía.

- Relación costo-beneficio:

Con un precio significativamente menor al de una Raspberry Pi 4 o ESP32, la Pico W ofrece suficiente potencia para manejar sensores, control de actuadores y comunicación en red, sin incurrir en gastos excesivos.

- Facilidad de programación y documentación:

El soporte oficial para MicroPython facilita el desarrollo rápido de prototipos y el trabajo con librerías de comunicación y control, además de contar con amplia documentación oficial y soporte comunitario.

6.2.4.2. Uso de dos Raspberry Pi Pico W en arquitectura cliente-servidor

El prototipo plantea utilizar dos unidades de Raspberry Pi Pico W bajo un modelo cliente-servidor:

- Servidor: Una Pico W actuará como control central, gestionando la base de datos de productos disponibles, controlando los sensores y activando el mecanismo de entrega al carrito.
- Cliente: La segunda Pico W funcionará como interfaz de usuario, recibiendo los comandos del usuario (a través de botones o control remoto IR) y proporcionando retroalimentación auditiva mediante altavoces.

Ambos dispositivos se comunicarán vía Wi-Fi, intercambiando mensajes en tiempo real. Este enfoque permite distribuir la carga de trabajo, evitando que un único microcontrolador se sobrecargue, y al mismo tiempo genera un sistema más modular y escalable, donde cada módulo puede mejorarse o reemplazarse de manera independiente.

Para usuarios ciegos, esta arquitectura asegura que el sistema pueda responder con rapidez a las interacciones del usuario y al control de productos, manteniendo la fiabilidad y autonomía en la experiencia de compra.

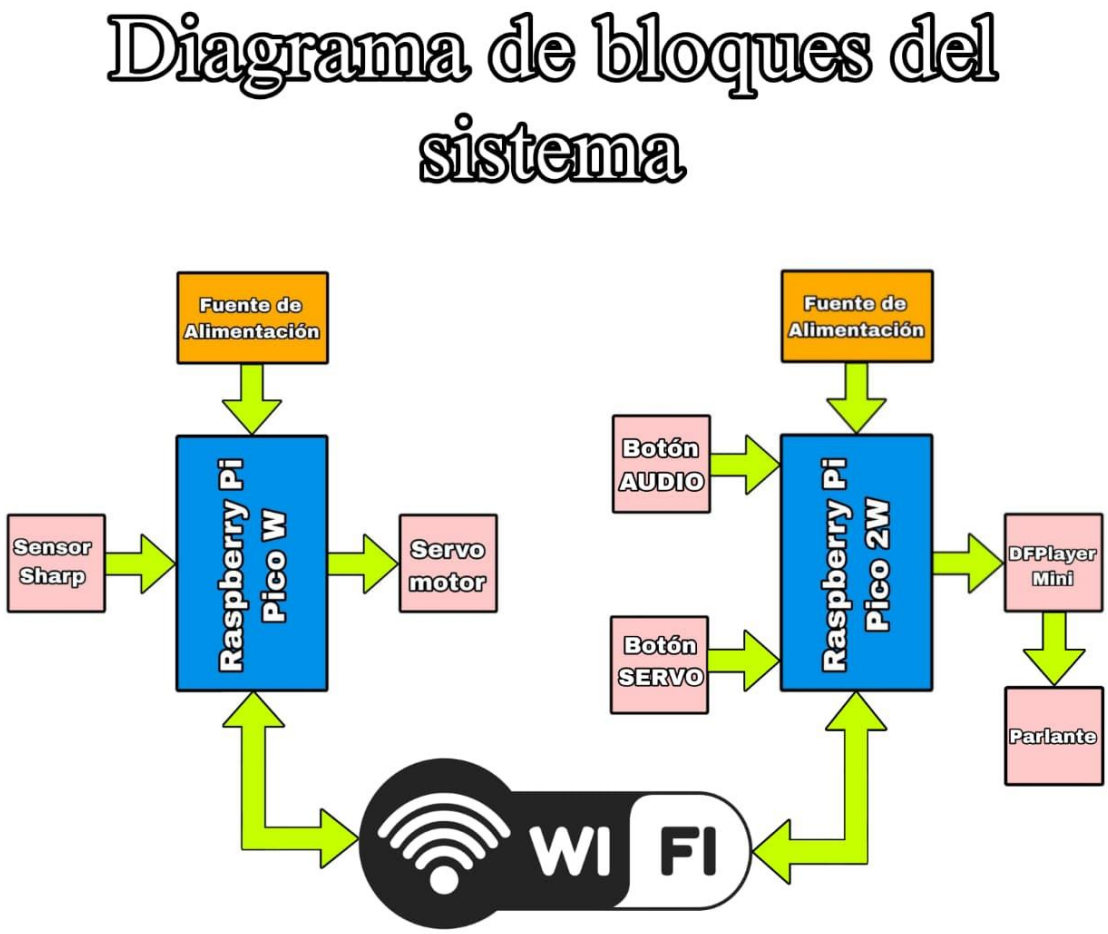


Ilustración 14. Diagrama de bloques del sistema

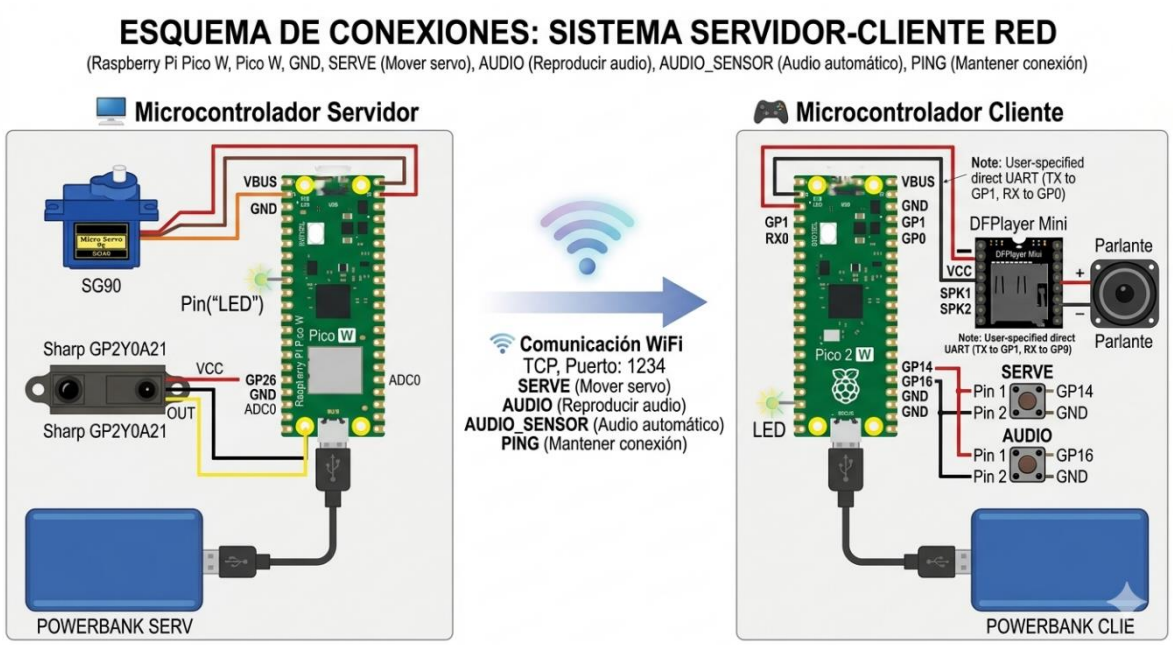


Ilustración 15. Representación de comunicación del sistema

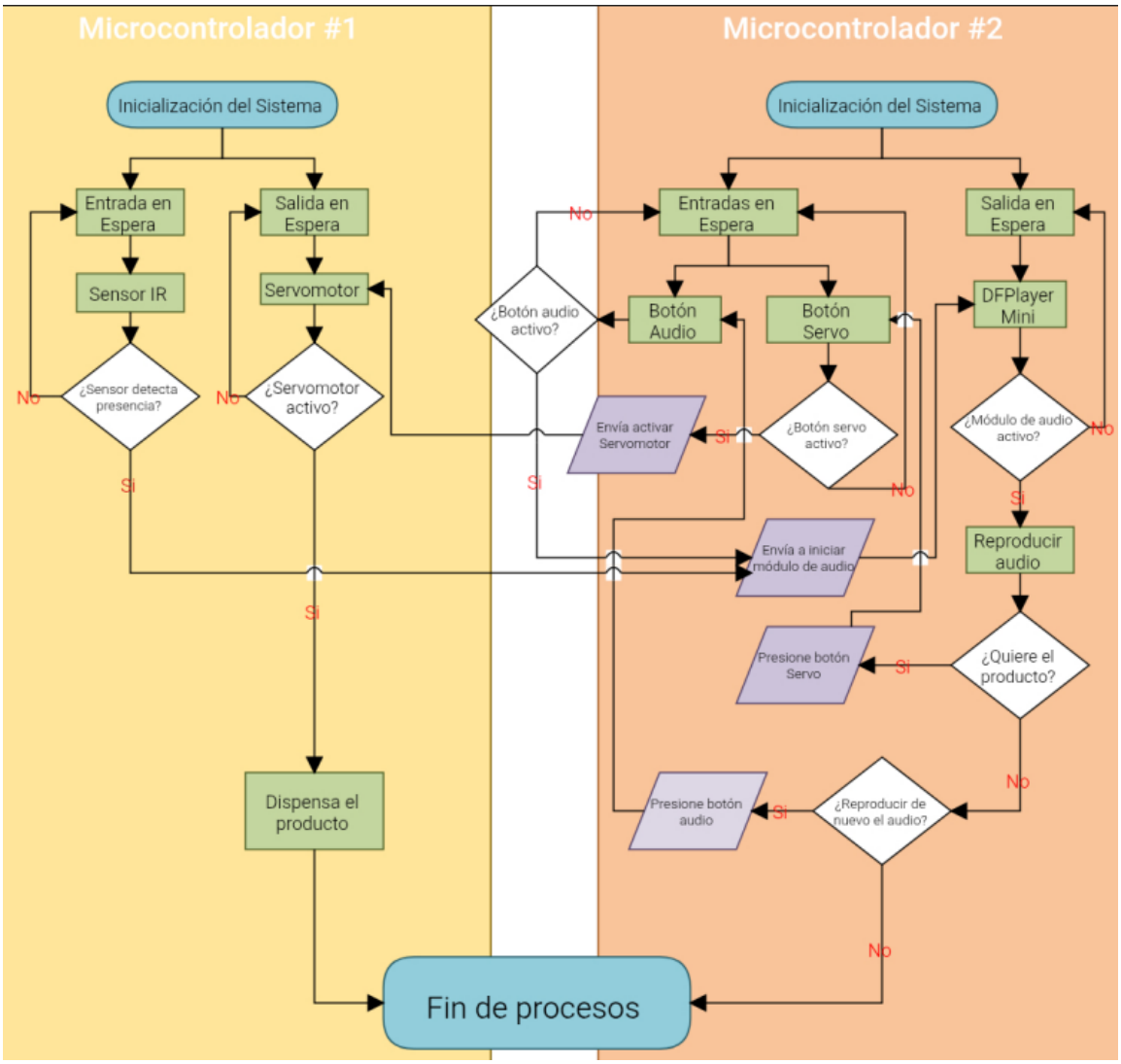


Ilustración 16. Diagrama de flujo del sistema completo

6.2.4.3. Uso de Thonny en Raspberry Pi y Raspberry Pi Pico

Thonny está diseñado para integrarse de forma nativa con Raspberry Pi OS y con los microcontroladores Raspberry Pi Pico y Pico W. Su entorno permite escribir, cargar y ejecutar código Python o MicroPython directamente en el dispositivo a través de un puerto USB (Raspberry Pi Foundation, 2025).

El proceso típico consiste en:

- Conectar el Raspberry Pi Pico / Pico W al ordenador mediante cable USB.
- Seleccionar en Thonny el intérprete MicroPython (Raspberry Pi Pico).
- Escribir y guardar el programa directamente en la memoria del microcontrolador.

- Ejecutar el script y visualizar el resultado en la consola REPL.

Thonny también facilita la instalación del firmware MicroPython en el microcontrolador, lo cual permite programarlo sin depender de plataformas externas. Gracias a su interfaz visual, los usuarios pueden depurar el comportamiento del hardware —por ejemplo, lectura de sensores, control de servomotores o comunicación inalámbrica— sin necesidad de herramientas de línea de comandos (Core Electronics, 2025).

6.2.4.4. Aplicación en el proyecto de tesis

En el desarrollo del prototipo automatizado de supermercado accesible para personas ciegas, Thonny representa una herramienta esencial por las siguientes razones:

- Desarrollo rápido y depuración visual:

Su interfaz intuitiva y su depurador paso a paso permiten probar, modificar y verificar el código de manera eficiente, reduciendo el tiempo de desarrollo de los módulos de comunicación y control.

- Compatibilidad con MicroPython:

Dado que las Raspberry Pi Pico W empleadas en el proyecto funcionan con MicroPython, Thonny facilita la transferencia directa del código y la interacción en tiempo real con los dispositivos.

- Gestión simplificada de múltiples microcontroladores:

El proyecto utiliza dos Raspberry Pi Pico W en un esquema cliente-servidor. Thonny permite trabajar con cada microcontrolador de forma independiente, facilitando la prueba de su comunicación Wi-Fi y su sincronización funcional.

- Entorno accesible y reproducible:

Su naturaleza multiplataforma y de código abierto permite que cualquier miembro del equipo o futuro investigador pueda reproducir el entorno y continuar con la investigación o mantenimiento del sistema.

- Apoyo al aprendizaje y documentación:

La facilidad para visualizar el comportamiento interno del código ayuda a documentar el funcionamiento del sistema automatizado, un aspecto fundamental en un trabajo académico.

En resumen, Thonny ofrece una combinación ideal de accesibilidad, funcionalidad y compatibilidad que lo convierte en una herramienta clave para el desarrollo del sistema propuesto en esta tesis.

6.2.4.5. Consideraciones y limitaciones

Aunque Thonny es muy útil, también conviene tener presente algunas limitaciones:

- No es tan robusto como IDEs profesionales (p. ej. PyCharm) para proyectos enormes con muchas dependencias.
- La performance puede ser limitada si el código es muy complejo, pero en microcontroladores típicos esa limitación no suele aparecer.
- Algunas extensiones o paquetes muy especializados pueden requerir instalación adicional o ajustes manuales fuera del entorno GUI.



Ilustración 17. Interface Thonny

6.2.5. Subsistema de comunicación

6.2.5.1. Aplicaciones en el proyecto de tesis

En el desarrollo del sistema automatizado propuesto, los sensores se integrarán a la Raspberry Pi Pico W, permitiendo realizar funciones clave, tales como:

Detección de presencia: mediante sensores infrarrojos o ultrasónicos para identificar la aproximación del usuario.

Verificación de productos: utilizando sensores de peso o de proximidad para confirmar la entrega del artículo correcto.

Retroalimentación para el usuario: los datos sensados activarán respuestas auditivas que informen el estado de la compra o la interacción.

El correcto funcionamiento de estos sensores será fundamental para que el sistema mantenga su propósito inclusivo y operativo, garantizando precisión, respuesta rápida y confiabilidad en el proceso de automatización.

6.2.5.2. Criterios para elegir el tipo de sensor en este proyecto

Para el objetivo de saber en qué producto está el carrito (detección de posición frente a un estante/producto) priorizamos:

- Resolución espacial y distancia operativa (rango típico del estante a ~2–40 cm).
- Respuesta rápida (tiempos de muestreo cortos < 100 ms).
- Robustez a condiciones del supermercado (iluminación variable, colores/etiquetas diferentes, ruido ambiental).
- Facilidad de integración con Raspberry Pi Pico W (salida analógica o digital, nivel de voltaje compatible).
- Costo y escalabilidad (múltiples sensores por pasillo o por carrito).

Con estas prioridades, los sensores IR reflectivos analógicos (ej. Sharp GP2Y0A21) y los sensors ToF surgen como opciones adecuadas; los ultrasonidos son viables pero su patrón de haz amplio puede confundir en estanterías densas. Además, el GP2Y0A21 ofrece salida analógica proporcional (fácil lectura por ADC del Pico), tamaño compacto y precio accesible, lo que lo convierte en una elección coherente para un prototipo de bajo costo (Global, 2025) (Fraden, 2025).



Ilustración 18. Diseño representativo del sistema

6.2.5.3. Sensor Sharp GP2Y0A21YK0F (GP2Y0A21)

6.2.5.3.1. Descripción general

El Sharp GP2Y0A21YK0F (abreviado GP2Y0A21) es un sensor de distancia infrarrojo reflectivo basado en triangulación óptica. Proporciona una salida analógica de voltaje que varía de forma no lineal respecto a la distancia del objeto. Su rango típico es aproximadamente 10 cm a 80 cm (según datasheet y condiciones de objeto/reflectancia) y su tiempo de respuesta es rápido, lo que permite muestreos frecuentes (Global, 2025).

- Características típicas (resumen práctico):
- Principio: triangulación óptica / IR reflectivo.
- Rango operativo: ~10–80 cm (dependiente de reflectancia).
- Salida: señal analógica (voltaje proporcional a la distancia, no lineal).
- Alimentación: típicamente 4.5–5.5 V (revisar datasheet).
- Consumo: bajo a moderado durante la medición.
- Tamaño: compacto, fácil montaje en chasis de carro. (Global, 2025)

6.2.5.3.2. Ventajas

- Fácil lectura analógica: compatible con ADC de microcontroladores como el RP2040 (Pico W).

- Respuesta rápida: apto para muestreo continuo y detección de posición en movimiento.
- Compacidad y costo: económico y pequeño, ideal para múltiples unidades en un carro.

6.2.5.3.3. Limitaciones

No linealidad de la curva voltaje-distancia: requiere calibración y/o linearización por software (tabla de conversión o modelo empírico).

Sensibilidad a reflectancia y color: objetos oscuros absorben IR y reducen la señal; superficies brillantes pueden saturar la lectura.

Influencia de luz ambiental: luz solar intensa o iluminación IR puede afectar lecturas (Fraden, 2025) (Khandpur, 2015).

Ángulo de detección: el sensor tiene un campo de visión que puede detectar objetos fuera del objetivo si no se orienta/cubre adecuadamente.

6.2.5.4. Servomotor GS90 y evolución del sistema de dispensado

El GS90 es un servomotor de rotación limitada ampliamente utilizado en proyectos educativos, de robótica y prototipos debido a su bajo costo, peso ligero y torque adecuado para mecanismos pequeños. Por sus características, resulta ideal para accionar la compuerta del dispensador del primer modelo del sistema propuesto en esta tesis.

Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto se diseñó un segundo modelo de dispensador con un mecanismo distinto, basado en un sistema tipo resorte similar al utilizado en máquinas expendedoras. Este nuevo enfoque requirió el uso de un servomotor de rotación continua (FS90R), capaz de generar movimiento constante en lugar de posiciones angulares fijas, permitiendo así el desplazamiento del producto a través de la espiral.

6.2.5.4.1. Características técnicas principales

Según la hoja técnica del fabricante (goteck, 2025), las especificaciones del GS90 son:

- Ángulo de operación: 0° a 180° (rotación limitada)
- Voltaje de operación: 4.8 V – 6.0 V
- Torque nominal: ≈ 1.6 kg·cm a 4.8 V
- Velocidad: 0.12 s/60° (4.8 V)
- Peso: 9 g
- Control: PWM estándar (1 ms – 2 ms)

Estas características lo ubican dentro de la categoría de servos micro, diseñados para aplicaciones donde el espacio es reducido, pero se requiere movimiento preciso.

6.2.5.4.2. Integración del GS90 con Raspberry Pi Pico W

El servomotor GS90 se controla fácilmente utilizando la señal PWM generada por la Raspberry Pi Pico W, gracias a los módulos PWM del chip RP2040.

La conexión típica es:

- Cable café/negro → GND
- Cable rojo → 5V (alimentación independiente recomendada)
- Cable naranja → Señal PWM (GPIO Pico W)

Ensayar la compuerta permitirá que el GS90 abra y cierre el dispensador mediante un movimiento angular de 30°–60°, dependiendo del diseño mecánico del mecanismo.

6.2.5.4.3. Razones para elegir el GS90 en el primer modelo

El GS90 es especialmente adecuado para el sistema por las siguientes razones:

- Tamaño reducido

Permite integrarlo dentro de estructuras pequeñas sin añadir peso significativo al carrito.

- Torque suficiente

Con ~1.6 kg·cm puede mover una compuerta ligera o mecanismo de liberación sin dificultades.

- Alta repetibilidad

La precisión angular interna asegura que la compuerta se abra y cierre siempre en las mismas posiciones, evitando errores de dosificación.

- Eficiencia energética

Consume poca corriente, lo cual es importante en sistemas embebidos móviles.

- Facilidad de control

El GS90 trabaja con la señal PWM estándar, lo que lo vuelve totalmente compatible con la Raspberry Pi Pico W sin necesidad de controladores externos.

- Bajo costo

A diferencia de servos industriales o de mayor torque, este modelo es económico, accesible y reemplazable.

6.2.5.4.4. Aplicación del GS90 en el primer modelo de dispensador

En el primer diseño del sistema, el servomotor GS90 se utilizó para accionar una compuerta de liberación. Su funcionamiento es el siguiente:

- Mantener la compuerta cerrada hasta que el sistema valide la posición correcta del carrito.
- Recibir una señal desde la Raspberry Pi Pico W (cliente/servidor).
- Rotar un ángulo específico (aprox. 45°) para abrir la compuerta.
- Permitir la caída del producto al carrito.
- Volver automáticamente a la posición original para cerrar el dispensador.

Este enfoque permitió un control preciso y confiable del proceso de dispensado.

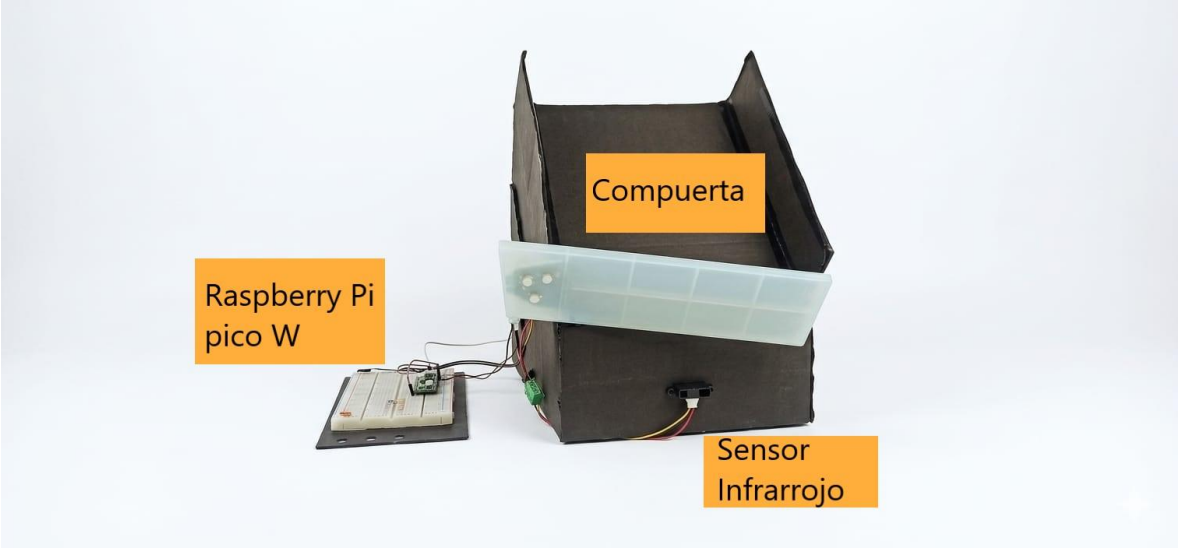


Ilustración 19. Primer dispensador Frontal

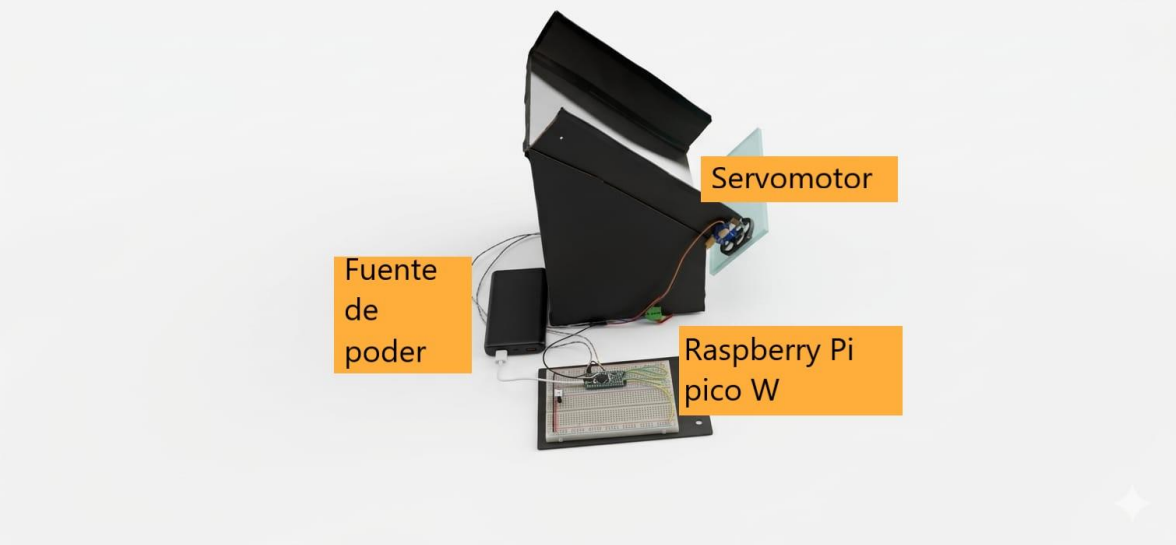


Ilustración 20. Primer dispensador Perfil

6.2.5.4.5. Implementación del servo FS90R en el segundo modelo

Para el segundo modelo del dispensador, se adoptó un mecanismo tipo resorte (espiral), similar al de las máquinas expendedoras comerciales. Este diseño requiere movimiento continuo para desplazar el producto hacia el punto de salida, por lo que se seleccionó el servomotor FS90R.

El FS90R es un servomotor de rotación continua, lo que significa que no se posiciona en ángulos específicos, sino que gira en sentido horario o antihorario dependiendo de la señal PWM aplicada.

Sus características principales incluyen:

• Rotación continua (360° sin límite)

• Voltaje de operación: 4.8 V – 6.0 V

• Control por PWM (velocidad y dirección)

• Tamaño y peso similares al GS90

6.2.5.4.6. Ventajas del FS90R en el nuevo diseño

La elección del FS90R se justifica por las siguientes razones:

• Movimiento continuo: Permite girar el mecanismo tipo resorte para empujar el producto progresivamente.

• Simulación de máquina expendedora: Reproduce el comportamiento real de sistemas comerciales, mejorando el diseño del prototipo.

• Control de velocidad: La señal PWM permite ajustar la velocidad de giro según la necesidad del sistema.

• Integración sencilla: Al igual que el GS90, es compatible directamente con la Raspberry Pi Pico W.

6.2.5.4.7. Aplicación del FS90R en el dispensador tipo resorte

En el segundo modelo, el FS90R cumple la función de accionar el espiral dispensador:

• El sistema valida la solicitud de dispensado.

• La Raspberry Pi Pico W envía una señal PWM al servo.

• El servo gira durante un tiempo determinado.

• El espiral desplaza el producto hacia adelante.

• El producto cae al carrito al completar el ciclo.

• El servo se detiene al finalizar el movimiento.

Este nuevo enfoque mejora la versatilidad del sistema, permitiendo manejar distintos tipos de productos y simulando un entorno más cercano a aplicaciones reales.

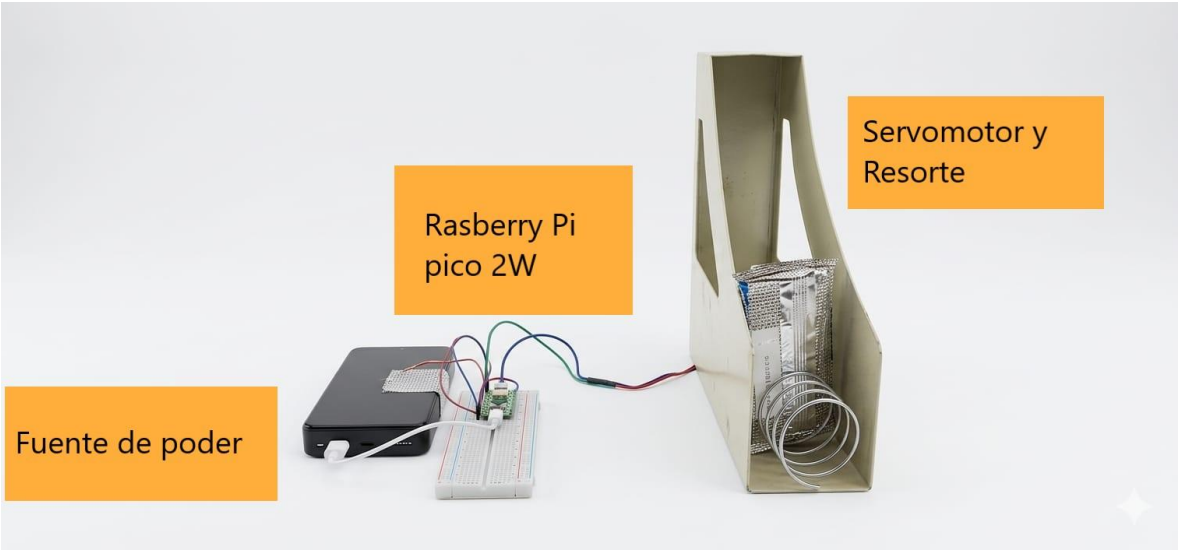


Ilustración 21. Segundo dispensador

6.2.5.5. Aplicación del DFPlayer Mini en el sistema automatizado para personas ciegas

En el contexto de esta tesis, el DFPlayer Mini cumple una función esencial:

proporcionar retroalimentación auditiva clara y accesible para que el usuario ciego sepa qué producto tiene frente al dispensador.

Esto se convierte en una pieza clave del proyecto porque sustituye completamente el canal visual, permitiendo que el usuario interactúe naturalmente con el sistema mediante una interfaz sonora diseñada específicamente para sus necesidades de accesibilidad.

El proceso de reproducción de audio en el sistema es el siguiente:

- El sensor GP2Y0A21 detecta la posición del carrito frente a un producto específico.
- La Pico W determina qué producto está en esa posición mediante el sistema cliente–servidor.
- Se envía un mensaje por serial al DFPlayer Mini indicando cuál archivo reproducir.
- El DFPlayer reproduce un archivo MP3 con el nombre del producto, por ejemplo:
    - “Arroz blanco”

- “Aceite vegetal”
- “Cereal avena”

6.2.5.5.1. El usuario escucha la identificación y puede solicitar el producto o confirmar su selección.

Este flujo está alineado con recomendaciones internacionales sobre accesibilidad auditiva, donde la retroalimentación sonora clara y contextual es fundamental para facilitar la navegación autónoma de personas ciegas (ISO, 2018; WHO, 2023).

6.2.6. Ventajas del DFPlayer Mini para accesibilidad

El uso del DFPlayer Mini aporta múltiples beneficios para un sistema asistivo:

- Voz natural y clara

Permite usar archivos MP3 grabados con voces humanas o generadas por TTS, facilitando comprensión inmediata (Elmannai & Elleithy, 2017).

- Respuesta instantánea

Al no depender de un sistema operativo, la reproducción comienza casi sin latencia, fundamental para mantener fluidez en la interacción.

- Independencia de procesamiento

Reduce la carga en la Pico W porque no requiere decodificar audio localmente.

- Bajo consumo

Ideal para sistemas móviles energéticamente sensibles.

- Escalabilidad

Agregar nuevos productos solo requiere añadir más archivos MP3 numerados.

- Control simple mediante UART

Permite integración directa con la lógica del sistema.

Todas estas ventajas convierten al DFPlayer Mini en la mejor alternativa para implementar una interfaz auditiva accesible, robusta y de bajo costo dentro del proyecto.

6.2.6.1.1. Justificación del uso del DFPlayer Mini en este proyecto

El DFPlayer Mini fue seleccionado debido a que:

- Permite reproducir mensajes de voz sin depender de software complejo o librerías grandes.
- Su control serial es compatible de forma nativa con la Raspberry Pi Pico W.
- Su bajo costo y facilidad de configuración lo hacen ideal para proyectos escalables.
- La calidad del audio es suficiente para mensajes hablados claros y entendibles.
- Es ampliamente utilizado en dispositivos asistivos, como bastones inteligentes, lectores sonoros y sistemas de navegación para personas ciegas (Ahmed et al., 2020).
- Mantiene un diseño compacto que facilita incorporarlo dentro del chasis del carrito automatizado.

Todo esto contribuye a que el sistema proporcione una experiencia auditiva inclusiva y funcional, permitiendo al usuario identificar productos sin necesidad de asistencia visual.



Ilustración 22. Primer modelo carrito de compras



Ilustración 23. Segundo modelo carrito de compras

6.3. Fase de evaluación

6.3.1. Interfaz con Raspberry Pi Pico W

El RP2040 del Pico W tiene ADC de 12 bits (entrada analógica) que puede leer la salida del GP2Y0A21 tras acondicionamiento si es necesario (Pi, Raspberry Pi Pico W Datasheet an RP2040-based microcontroller board with wireless, 2025). El flujo típico es:

- Alimentar el GP2Y0A21 con 5 V (según datasheet); si el Pico W opera a 3.3 V en su lógica, hay que cuidar que la señal analógica al ADC esté dentro de 0–3.3 V (usar divisor resistivo o acondicionamiento) o alimentar sensor a 3.3 V si especificado por variante.
- Leer la salida analógica con el ADC del Pico W (muestreo a frecuencia adecuada, p. ej. 50–200 Hz).
- Filtrar la señal (promediado, filtro pasa-bajo, mediana) para reducir ruido y rebotes.
- Convertir voltaje a distancia mediante curva de calibración (tabla o función inversa).

- Aplicación lógica: establecer umbrales/zonas para decidir “el carrito está frente al producto X” (por ejemplo, distancias entre 12–18 cm = producto A, 18–25 cm = producto B, etc.).

Nota sobre niveles de voltaje: algunos modelos Sharp están diseñados para 5 V; si se usan con microcontroladores de 3.3 V, es obligatorio acondicionar la señal o usar un LDO / divisor para proteger el ADC (Doebelin, 1990).

6.3.2. Calibración práctica

- Curva experimental: en bancada, colocar objetos de referencia (blanco, negro, texturizado) a distancias conocidas (p. ej. cada 2 cm) y registrar voltajes.
- Ajuste por color/reflectancia: realizar curvas con las variedades de envases que existan en el supermercado (papel, plástico brillante, metalizado).
- Algoritmo de compensación: generar tablas de corrección o modelos (polinómico, logarítmico) y guardar coeficientes en el firmware.
- Umbrales por zona: en lugar de depender de un número exacto, definir rangos (zonas) que correspondan a productos/posiciones, aumentando robustez frente a variaciones.

6.3.3. Filtrado y tratamiento de señal

- Promediado móvil (moving average) para suavizar ruido.
- Filtro mediano para eliminar spikes (picos transitorios).
- Filtro de Kalman si se desea fusión avanzada con otras lecturas (IMU o ultrasonido) y optimizar estimación en movimiento (Doebelin, 1990) (Nise, 2015)

6.3.4. Montaje y direccionamiento físico

- Montar el sensor con soporte mecánico que mantenga ángulo y distancia constantes respecto al estante.
- Añadir tubos o shrouds para reducir detección lateral (restringir ángulo de visión) y evitar lecturas de estanterías adyacentes.

- Probar posiciones y alturas según la variedad del surtido del supermercado.
- Uso conjunto con otros sensores (fusión)

6.3.5. Para mejorar fiabilidad, combinar la lectura del GP2Y0A21 con:

- Ultrasonido para validar distancia cuando la reflectancia sea dudosa.
- Sensor de peso (celdas) para confirmar que el producto fue depositado.
- RFID para identificar ítems específicos si es necesario confirmar exactamente qué producto (Wafa Elmannaiy, 2025).

Esta fusión mejora la precisión y reduce falsos positivos / negativos en el entorno real del supermercado.

6.3.6. Procedimiento de prueba y validación

6.3.6.1. Pruebas del sensor de proximidad infrarrojo

6.3.6.1.1. Objetivo de la prueba

El objetivo de esta prueba fue calibrar el sensor de proximidad infrarrojo Sharp GP2Y0A21 para determinar el rango de detección más adecuado para el funcionamiento del prototipo. Se buscó identificar una distancia óptima de activación que permitiera detectar la presencia del carrito de forma precisa y evitar activaciones erróneas causadas por objetos lejanos o ruido del sensor.

6.3.6.1.2. Configuración del sensor

Para realizar las pruebas de calibración se utilizó el sensor Sharp GP2Y0A21 conectado a la Raspberry Pi Pico W mediante una entrada analógica. Adicionalmente, se empleó una pantalla LCD I2C con el fin de visualizar en tiempo real los valores de distancia detectados por el sensor.

Sensor	Raspberry Pi Pico W
VCC	3V3
GND	GND
OUT	GP26 (ADC0)

Tabla 15. Conexión de sensor de proximidad para calibración

LCD I2C	Raspberry Pi Pico
VCC	VBUS
GND	GND
SDA	GP0
SCL	GP1

Tabla 16. Conexión de LCD para calibrar sensor de proximidad

6.3.6.1.3. Procedimiento de Prueba

Para realizar la calibración del sensor se utilizó un código, el cual permitió visualizar la distancia detectada en tiempo real mediante la pantalla LCD. **(El código se puede encontrar en el capítulo 9)**

Durante las pruebas se colocó el carrito a diferentes distancias frente al sensor y se registraron los valores obtenidos.

6.3.6.1.4. Simulación y mediciones realizadas

A partir de las pruebas experimentales se obtuvieron los siguientes valores aproximados:

Distancia (cm)	Valor ADC aproximado	Activación
3 cm	42000	Sí
5 cm	36000	Sí
7 cm	32000	Sí
10 cm	26000	Sí
12 cm	23000	Sí
15 cm	20000	Sí
18 cm	18000	No
20 cm	16000	No
25 cm	14000	No
30 cm	12000	No

Tabla 17. Valores de prueba de distancia

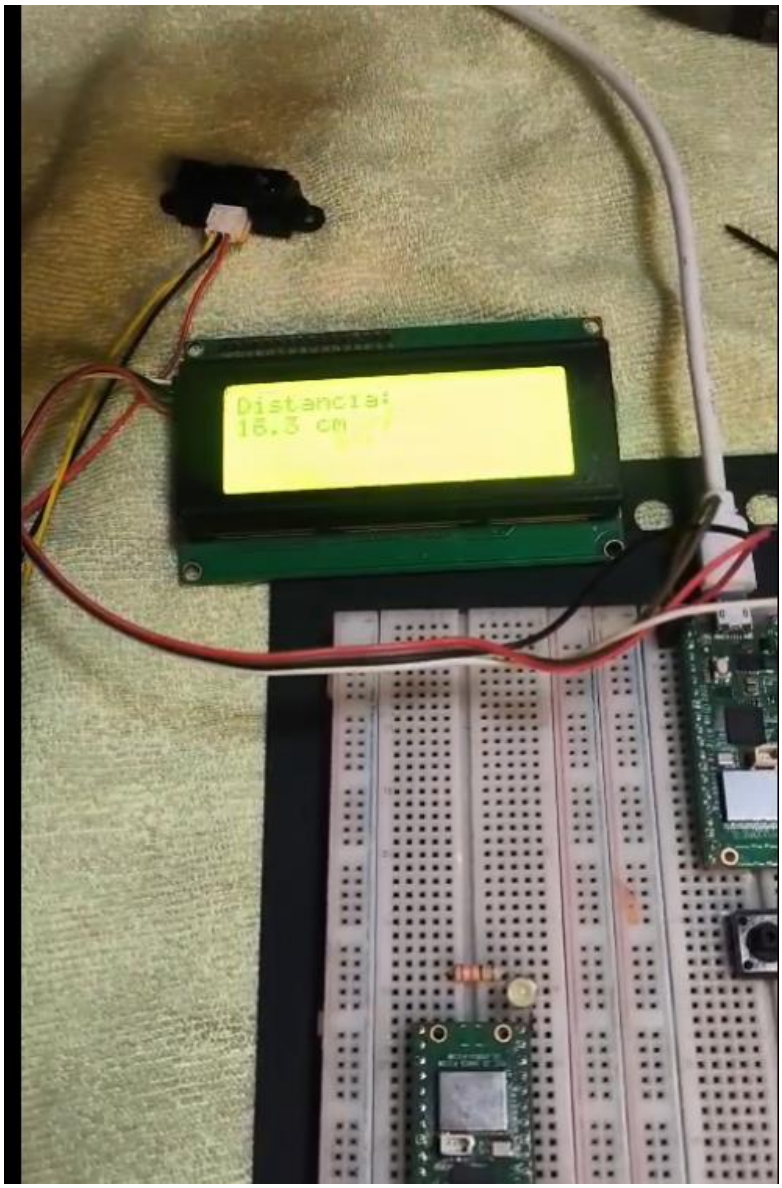


Ilustración 24. Prueba de medición de distancia

6.3.6.1.5. Problemas encontrados

Durante las pruebas se identificaron las siguientes dificultades

- Variaciones en la lectura del sensor
- Ruido en mediciones analógicas
- Activación a distancias no deseadas
- Sensibilidad a la iluminación ambiental

Estas variaciones provocaban activaciones incorrectas del sistema, lo que afectaba la precisión del prototipo.

6.3.6.1.6. Solución aplicada

Para mejorar la precisión del sensor se implementaron las siguientes soluciones:

- Promedio de múltiples lecturas
- Confirmación de detección
- Rango de activación limitado

En el código final del servidor se implementó:

DIST_MIN = 10000

DIST_MAX = 30000

LECTURAS = 6

CONFIRMACIONES = 1

Posteriormente, estos valores fueron ajustados para limitar la detección únicamente entre 5 cm y 15 cm.

Parámetro	Valor
DIST_MIN	20000
DIST_MAX	36000
LECTURAS	6
CONFIRMACIONES	1

Tabla 18. Parámetros finales recomendados para sensor Infrarrojos

Estos valores permiten detectar únicamente la presencia del carrito dentro del rango deseado.

6.3.6.1.7. Resultados obtenidos

Después de la calibración, el sensor logró detectar correctamente el carrito dentro del rango establecido de 5 cm a 15 cm. Esto permitió reducir activaciones erróneas y mejorar la estabilidad del sistema.

Las pruebas confirmaron que el sensor Sharp GP2Y0A21 es adecuado para el funcionamiento del prototipo, proporcionando una detección precisa y confiable para activar el sistema de asistencia automatizada.

6.3.6.2. Pruebas del servomotor

6.3.6.2.1. Objetivo de la prueba

El objetivo de esta fase fue evaluar el funcionamiento de los servomotores utilizados en el prototipo, verificando su precisión, estabilidad y capacidad de movimiento para el mecanismo de dispensación. Durante el desarrollo del sistema se realizaron pruebas con dos tipos de servomotores: el servo SG90 de posición angular y el

servo FS90R de rotación continua, los cuales fueron utilizados en dos diseños diferentes del dispensador.

Estas pruebas permitieron analizar el comportamiento de cada servomotor y determinar cuál era el más adecuado para el funcionamiento del prototipo.

6.3.6.2.2. Configuración del servomotor SG90

El primer diseño del dispensador utilizó un servomotor SG90 de rotación angular, el cual permite controlar la posición del eje mediante señales PWM.

Servo	Raspberry Pi Pico W
Rojo	VBUS (5V)
Marrón	GND
Naranja	GP15

Tabla 19. Conexiones del servomotor SG90 para pruebas

Este servomotor fue utilizado para abrir y cerrar el dispensador mediante posiciones angulares controladas. Estas pruebas permitieron verificar el movimiento del servomotor entre distintas posiciones angulares.

6.3.6.2.3. Configuración del servomotor FS90R

Posteriormente, se desarrolló un segundo diseño de dispensador tipo máquina expendedora utilizando un servomotor FS90R de rotación continua. Este diseño incluía un sistema de resorte que permitía dispensar productos mediante giro continuo. **(El código se puede encontrar en el capítulo 9)**

Servo	Raspberry Pi Pico
VCC	VBUS
GND	GND
Señal	GP16

Tabla 20. Conexiones del servomotor FS90R para pruebas

6.3.6.2.4. Procedimiento de prueba

Las pruebas realizadas consistieron en:

- Evaluar la respuesta del servomotor
- Medir la velocidad de giro
- Verificar estabilidad del movimiento
- Analizar comportamiento en reposo
- Probar distintos valores PWM

Estas pruebas se realizaron utilizando botones físicos para simular el funcionamiento del sistema.

6.3.6.2.5. Problemas encontrados

Durante el proceso de pruebas se detectaron diversos problemas, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

#	Código / Enfoque	Descripción	Resultado	Problema detectado	Ajuste realizado
1	PWM activo permanente	Señal constante al servo	✕ Movimiento involuntario	Punto neutro inestable	Calibración manual
2	Ajuste duty_u16	Búsqueda de punto neutro	⚠ Mejora parcial	Variación entre servos	Cambio de enfoque
3	Botones PULL_DOWN	Control manual	✕ No respondían	Error de conexión	Revisión cableado
4	Prueba con print()	Validación botones	⚠ Dependiente hardware	Confirmación física	Uso de PULL_UP
5	PWM temporal	Activación por evento	☑ Funcional	—	Solución adoptada
6	Ajuste velocidad	Cambio de duty	☑ Correcto	Limitación servo	Rango definido
7	Activación 2 segundos	Giro controlado	☑ Funcional	Tiempo corto	Ajuste duración
8	Activación 3 segundos	Giro optimizado	☑ Óptimo	Ninguno	Solución final

Tabla 21. Pruebas de servo FS90R

6.3.6.2.6. Simulación de valores PWM del servo FS90R

Durante las pruebas se identificaron los siguientes valores de funcionamiento:

Duty PWM	Comportamiento
3500	Giro izquierdo lento
4000	Giro izquierdo medio
4500	Detenido aproximado
5000	Detenido aproximado
5500	Giro derecho lento
6500	Giro derecho rápido

Tabla 22. Valores PWM del servo FS90R

6.3.6.2.7. Solución aplicada

Después de múltiples pruebas se determinó que el servo FS90R debía activarse únicamente cuando fuera necesario, desactivando la señal PWM inmediatamente después del movimiento.

La solución final implementada fue:

- Activación temporal del servo
- Control de giro por tiempo
- Desactivación PWM con deinit()
- Duración de giro de 3 segundos

6.3.6.2.8. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos demostraron que ambos servomotores fueron funcionales para el prototipo. Sin embargo, cada uno presentó ventajas específicas:

Servo	Tipo	Ventaja
SG90	Angular	Mayor precisión
FS90R	Continua	Mayor fuerza y dispensación

Tabla 23. Comparación de servomotores

Finalmente, el sistema permitió validar ambos diseños de dispensación, proporcionando alternativas para el desarrollo final del prototipo.

6.3.6.2.9. Observación técnica

El servomotor FS90R presenta características distintas al servo SG90:

- No permite control de ángulo
- Solo permite control de dirección
- Control de velocidad
- Control por tiempo

Estas características fueron consideradas durante el diseño del dispensador final.

6.3.6.3. Pruebas del módulo DFPlayer Mini

6.3.6.3.1. Objetivo de la prueba

El objetivo de esta fase fue evaluar el funcionamiento del módulo DFPlayer Mini para la reproducción de audio dentro del prototipo. Se realizaron pruebas para verificar la correcta comunicación con la Raspberry Pi Pico, la reproducción de archivos de audio, la calidad del sonido y la estabilidad del sistema.

El módulo DFPlayer Mini fue seleccionado debido a su facilidad de uso, bajo consumo energético y capacidad para reproducir archivos de audio desde una memoria microSD sin necesidad de componentes adicionales complejos.

6.3.6.3.2. Configuración del módulo DFplayer Mini

Durante las pruebas se utilizó un parlante de 4 ohmios y 5 watts para obtener mayor volumen en la reproducción del audio.

DFPlayer Mini	Raspberry Pi Pico 2 W
VCC	VBUS (5V)
GND	GND
RX	GP0
TX	GP1
SPK1	Parlante (+)
SPK2	Parlante (-)

Tabla 24. Conexiones del DFPLayer Mini

6.3.6.3.3. Procedimiento de prueba

Las pruebas realizadas fueron:

- Verificación de encendido del módulo
- Comunicación UART con Raspberry Pi Pico
- Reproducción de archivo de audio
- Prueba de volumen
- Prueba de estabilidad
- Prueba con distintos formatos de audio

(El código se puede encontrar en el capítulo 9)

6.3.6.3.4. Problemas encontrados

Durante las pruebas se detectaron varios inconvenientes que fueron corregidos durante el proceso.

#	Prueba	Descripción	Resultado	Problema detectado	Ajuste realizado
1	Conexión inicial	Conexión básica	✕ Sin audio	Error en cableado	Corrección conexiones
2	Reproducción inicial	Archivo audio	⚠ Audio bajo	Parlante pequeño	Cambio de parlante
3	Prueba UART	Comunicación serial	✕ No responde	Baudrate incorrecto	Ajuste a 9600
4	Formato audio	Archivo WAV	⚠ No reproducía	Formato incompatible	Conversión archivo
5	Memoria microSD	Lectura archivos	✕ No detecta	Formato incorrecto	Formato FAT32
6	Parlante 4 ohm 5W	Audio alto	☑ Correcto	—	Solución adoptada
7	Estabilidad	Reproducción continua	☑ Estable	—	Configuración final

Tabla 25. Pruebas del DFPlayer Mini

6.3.6.3.5. Simulación de pruebas de volumen

Durante las pruebas se evaluó la intensidad del sonido utilizando distintos tipos de parlantes.

Tipo de parlante	Impedancia	Potencia	Resultado
Parlante pequeño	8 ohm	0.5W	Bajo volumen
Parlante mediano	8 ohm	1W	Volumen medio
Parlante grande	4 ohm	5W	Volumen alto

Tabla 26. Pruebas de volumen

6.3.6.3.6. Configuración final adoptada

Después de las pruebas realizadas, se determinó la siguiente configuración final:

- Parlante de 4 ohmios
- Potencia de 5 watts
- Comunicación UART a 9600 baudios
- Archivos en formato WAV
- Memoria microSD formateada en FAT32

6.3.6.3.7. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos demostraron que el módulo DFPlayer Mini funciona correctamente con la Raspberry Pi Pico, permitiendo reproducir audio de manera estable y con buen volumen.

El módulo cumplió con los requerimientos del prototipo, proporcionando:

- Reproducción automática de audio
- Buena calidad de sonido
- Bajo consumo energético
- Fácil integración con el sistema

6.3.6.3.8. Observación técnica

Durante las pruebas se determinó que el módulo DFPlayer Mini presenta las siguientes ventajas:

- No requiere amplificador externo
- Fácil integración
- Bajo costo
- Tamaño compacto

Estas características lo convierten en una opción adecuada para el prototipo desarrollado.

6.3.6.4. Pruebas de comunicación WiFi (Raspberry Pi Pico W)

6.3.6.4.1. Objetivo de la prueba

El objetivo de esta fase fue evaluar la comunicación inalámbrica entre la Raspberry Pi Pico W configurada como servidor y la Raspberry Pi Pico 2 W configurada como cliente. Estas pruebas permitieron verificar la estabilidad de la conexión, el tiempo de respuesta y la confiabilidad de la transmisión de datos dentro del sistema del prototipo.

La comunicación WiFi es fundamental para el funcionamiento del sistema, ya que permite que el sensor detecte la proximidad del carrito y envíe la señal para activar el dispensador de audio.

6.3.6.4.2. Configuración del sistema

Durante las pruebas se utilizaron dos dispositivos:

- Raspberry Pi Pico W (Servidor)
- Raspberry Pi Pico 2 W (Cliente)

Función del servidor

El servidor se encargó de:

- Leer el sensor de proximidad
- Detectar presencia del carrito

- Enviar señal al cliente
- Controlar el servomotor

Función del cliente

El cliente se encargó de:

- Recibir señal del servidor
- Activar reproducción de audio
- Indicar estado mediante LED

6.3.6.4.3. Código de pruebas del servidor

Durante las pruebas se utilizó comunicación TCP mediante sockets WiFi.

Funciones evaluadas:

- Conexión a red WiFi
- Creación del servidor TCP
- Envío de señal al cliente
- Reconexión automática

Estas pruebas permitieron validar el comportamiento del servidor.

6.3.6.4.4. Código de prueba del cliente

El cliente se configuró para:

- Conectarse a la red WiFi
- Conectarse al servidor
- Esperar señal
- Ejecutar acción al recibir comando

Estas pruebas permitieron validar la recepción de datos.

6.3.6.4.5. Procedimiento de prueba

Las pruebas realizadas fueron:

- Conexión inicial a la red WiFi
- Comunicación entre servidor y cliente
- Envío de datos
- Recepción de datos
- Reconexión automática
- Pruebas de estabilidad

6.3.6.4.6. Problemas encontrados

Durante las pruebas se detectaron algunos inconvenientes que fueron corregidos durante el desarrollo.

#	Prueba	Descripción	Resultado	Problema detectado	Ajuste realizado
1	Conexión inicial	Conexión a red WiFi	✕ No conecta	Error credenciales	Corrección SSID
2	Comunicación TCP	Envío datos	⚠ Inestable	Desconexión frecuente	Reconexión automática
3	Recepción señal	Cliente recibe datos	✕ No recibe	Error IP	Ajuste IP servidor
4	Prueba distancia	Separación dispositivos	⚠ Interferencia	Señal débil	Reubicación
5	Reconexión	Pérdida WiFi	✕ No reconecta	Código incompleto	Loop reconexión
6	Prueba continua	Comunicación constante	☑ Estable	—	Configuración final

Tabla 27. Pruebas de comunicación WiFi

6.3.6.4.7. Simulación de distancia de conexión WiFi

Durante las pruebas se evaluó la estabilidad de conexión a diferentes distancias.

Distancia	Señal WiFi	Resultado
1 metro	Excelente	Comunicación estable
3 metros	Buena	Comunicación estable
5 metros	Buena	Comunicación estable
8 metros	Media	Leve retraso
10 metros	Baja	Comunicación inestable
12 metros	Muy baja	Desconexión

Tabla 28. Pruebas de distancia WiFi

6.3.6.4.8. Configuración final adoptada

Después de las pruebas realizadas, se determinó la siguiente configuración:

- Comunicación TCP
- Reconexión automática
- Verificación de conexión activa
- Señales simples de activación

Esta configuración permitió una comunicación estable entre ambos dispositivos.

6.3.6.4.9. Resultados obtenidos

Los resultados demostraron que la comunicación WiFi entre las Raspberry Pi Pico fue estable y confiable para el funcionamiento del prototipo.

El sistema permitió:

- Comunicación en tiempo real
- Activación remota del dispensador
- Reproducción automática de audio
- Funcionamiento continuo

6.3.6.4.10. Observación técnica

Durante las pruebas se observó que:

- La señal WiFi depende del entorno
- Interferencias pueden afectar la comunicación
- Es recomendable mantener distancia menor a 8 metros

Estas consideraciones fueron tomadas en cuenta en el diseño final del prototipo.

6.3.6.5. Pruebas del sistema completo del prototipo

6.3.6.5.1. Objetivo de la prueba

El objetivo de esta fase fue evaluar el funcionamiento del prototipo completo, integrando todos los componentes previamente probados de manera individual. Estas pruebas permitieron verificar la interacción entre el sensor de proximidad, servomotor, módulo DFPlayer Mini y la comunicación WiFi entre las dos Raspberry Pi Pico.

El propósito principal fue comprobar que el sistema funcionara de manera automática y estable en condiciones reales de uso.

6.3.6.5.2. Componentes integrados en la prueba

Para la validación del sistema completo se integraron los siguientes componentes:

- Sensor de proximidad Sharp GP2Y0A21
- Raspberry Pi Pico W (Servidor)
- Raspberry Pi Pico 2 W (Cliente)
- Servomotor (SG90 / FS90R)
- Módulo DFPlayer Mini
- Parlante 4 ohmios 5 watts
- Comunicación WiFi TCP

6.3.6.5.3. Funcionamiento del sistema completo

El sistema completo funciona mediante el siguiente proceso:

- El sensor detecta la proximidad del carrito (5 cm a 15 cm)
- La Raspberry Pi Pico W procesa la señal del sensor
- El servidor envía señal al cliente mediante WiFi
- La Raspberry Pi Pico 2 W recibe la señal
- El DFPlayer Mini reproduce el audio
- El servomotor activa el dispensador
- El sistema vuelve al estado de espera

Este flujo permitió validar el funcionamiento automático del prototipo.

6.3.6.5.4. Procedimiento de prueba

Las pruebas realizadas fueron:

- Prueba de detección del sensor
- Prueba de activación del servomotor
- Prueba de reproducción de audio
- Prueba de comunicación WiFi
- Prueba de funcionamiento continuo
- Prueba de estabilidad del sistema

Estas pruebas se realizaron en diferentes condiciones para evaluar el rendimiento del prototipo.

6.3.6.5.5. Problemas encontrados

Durante la integración del sistema completo se detectaron algunos inconvenientes.

#	Prueba	Descripción	Resultado	Problema detectado	Ajuste realizado
1	Integración inicial	Conexión total	✕ Fallo comunicación	Error sincronización	Ajuste código
2	Sensor + servo	Activación automática	⚠ Respuesta lenta	Delay general	Delay solo sensor
3	WiFi + audio	Reproducción remota	⚠ Retraso audio	Latencia red	Optimización código
4	Funcionamiento continuo	Prueba prolongada	⚠ Reinicio sistema	Saturación memoria	Optimización lógica
5	Prueba final	Sistema completo	☑ Funcional	—	Configuración final

Tabla 29. Pruebas del sistema completo

6.3.6.5.6. Simulación de funcionamiento del sistema

Se realizaron simulaciones de funcionamiento para validar la respuesta del sistema.

Distancia detectada	Sensor	Servo	Audio	Resultado
2 cm	No activa	No	No	Correcto
5 cm	Activa	Sí	Sí	Correcto
8 cm	Activa	Sí	Sí	Correcto
12 cm	Activa	Sí	Sí	Correcto
15 cm	Activa	Sí	Sí	Correcto
18 cm	No activa	No	No	Correcto
20 cm	No activa	No	No	Correcto

Tabla 30. Simulación de detección del sistema

6.3.6.5.7. Configuración final del sistema

Después de las pruebas realizadas, se estableció la siguiente configuración:

- Sensor activo entre 5 cm y 15 cm
- Servo activado por 3 segundos
- Reproducción de audio automática
- Comunicación WiFi estable

- Delay solo en detección del sensor

Esta configuración permitió optimizar el rendimiento del prototipo

6.3.6.5.8. Resultados obtenidos

Los resultados demostraron que el sistema completo funciona correctamente y cumple con los objetivos del prototipo.

El sistema permitió:

- Detección automática del carrito
- Activación automática del dispensador
- Reproducción automática de audio
- Funcionamiento inalámbrico
- Operación estable

6.3.6.5.9. Validación del prototipo

Las pruebas finales confirmaron que el prototipo cumple con los requisitos establecidos:

- Funcionamiento automático
- Estabilidad del sistema
- Buena respuesta del sensor
- Audio claro y audible
- Dispensación funcional

Esto permitió validar el diseño final del prototipo.

6.4. Presupuesto del prototipo

El desarrollo del prototipo del sistema electrónico automatizado requirió la adquisición de diversos componentes electrónicos, mecánicos y estructurales necesarios para su construcción, integración y funcionamiento. Debido a la limitada disponibilidad de algunos dispositivos en el mercado local, la mayoría de los componentes electrónicos fueron adquiridos mediante pedidos en línea a proveedores internacionales, lo cual permitió obtener dispositivos específicos para el proyecto.

Uno de los elementos principales fue el carrito de supermercado adaptado para la implementación del sistema, el cual se obtuvo en una chatarrería a un costo de 400

córdobas, equivalentes aproximadamente a 10.90 dólares estadounidenses, lo que permitió reducir significativamente el costo total del prototipo. Este carrito fue reacondicionado para integrar los dispositivos electrónicos, el sistema de dispensación y los módulos de comunicación.

El resto de los componentes incluyó microcontroladores, sensores de proximidad infrarrojos, actuadores, módulos de audio y accesorios electrónicos necesarios para el funcionamiento integral del sistema. La selección de estos dispositivos se realizó considerando criterios de compatibilidad, bajo consumo energético y costo accesible.

A continuación, se presenta el presupuesto estimado del prototipo expresado en dólares estadounidenses:

Componente	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Carrito de supermercado reciclado	1	10.90	10.90
Raspberry Pi Pico W	2	8.00	16.00
Sensor de proximidad infrarrojo GP2Y0A21	3	12.00	36.00
Servomotor GS90	3	4.00	12.00
Módulo DFPlayer Mini	1	6.00	6.00
Bocina (parlante)	1	5.00	5.00
Materiales para dispensadores	—	8.00	8.00
Cables, conectores y accesorios	—	7.00	7.00
Costo total estimado del prototipo: 100.90 USD			

Tabla 31. Tabla de presupuesto

El presupuesto demuestra que el sistema automatizado propuesto puede construirse con un costo relativamente bajo en comparación con otras soluciones tecnológicas asistivas, lo que favorece su viabilidad y posible implementación en entornos reales. Asimismo, el uso de componentes de bajo costo y fácil adquisición facilita la replicabilidad del prototipo y su escalabilidad a proyectos futuros.

Este análisis económico evidencia que es posible desarrollar tecnologías inclusivas accesibles orientadas a mejorar la autonomía de las personas con discapacidad

visual sin requerir inversiones elevadas, lo cual representa una ventaja significativa para su adopción en supermercados y otros entornos comerciales.

6.4.1. Análisis de costo-beneficio del sistema

El sistema automatizado de dispensación de alimentos desarrollado en la presente investigación constituye una alternativa tecnológica orientada a optimizar los procesos de autoservicio dentro de supermercados. Desde la perspectiva económica, el prototipo se diseñó utilizando componentes electrónicos de bajo costo y fácil adquisición, lo cual permite reducir significativamente la inversión inicial en comparación con sistemas automatizados comerciales.

Entre los beneficios más relevantes se destaca la mejora en las condiciones de higiene, al minimizar el contacto directo de los usuarios con los alimentos, así como la reducción del desperdicio mediante el control de porciones dispensadas. Asimismo, el sistema contribuye a optimizar la atención al cliente, al proporcionar un mecanismo de uso intuitivo y automatizado. De igual forma, su implementación podría disminuir la necesidad de supervisión constante por parte del personal, generando un ahorro en costos operativos a mediano y largo plazo.

En este sentido, aunque la inversión inicial supera ligeramente a la de dispensadores manuales tradicionales, los beneficios obtenidos en términos de eficiencia, seguridad alimentaria y reducción de costos operativos permiten concluir que el sistema presenta una relación costo-beneficio favorable para su aplicación en entornos comerciales.

6.4.2. Costo estimado de implementación en un supermercado real

Para implementar el sistema en un supermercado real sería necesario desarrollar una versión industrial del prototipo, utilizando materiales resistentes, componentes electrónicos de grado comercial y estructuras duraderas aptas para uso continuo.

El costo aproximado por unidad automatizada podría incluir:

- Microcontrolador programable: $10 — $25
- Sensores infrarrojos de proximidad (3 unidades): $9 — $15
- Servomotores de alta resistencia (3 unidades): $30 — $60
- Módulo de audio DFPlayer Mini y bocina: $10 — $20
- Fuente de alimentación y cableado: $15 — $30
- Estructura y dispensadores de material industrial (acrílico o metal): $80 — $150
- Ensamblaje, programación e instalación: $50 — $100
- Costo estimado por estación automatizada: entre $204 y $400 USD

En un supermercado mediano que requiera entre 10 y 20 estaciones automatizadas, la inversión total podría oscilar entre $2,040 y $8,000 USD, dependiendo de la calidad de los materiales, personalización del sistema y costos de instalación.

6.4.3. Comparación con soluciones comerciales existentes

Los sistemas comerciales automatizados de dispensación de alimentos disponibles en el mercado suelen ser equipos industriales importados con precios elevados, que pueden superar los $1,000 USD por unidad, sin incluir costos de envío, mantenimiento ni adaptación al espacio físico del establecimiento.

En comparación, el sistema propuesto en esta investigación ofrece las siguientes ventajas:

- Menor costo de fabricación e implementación
- Facilidad de mantenimiento, al utilizar componentes estándar y accesibles
- Posibilidad de personalización, adaptándose a las necesidades específicas del supermercado
- Escalabilidad, permitiendo ampliar el sistema gradualmente

No obstante, las soluciones comerciales poseen ventajas en términos de durabilidad industrial certificada, soporte técnico especializado y cumplimiento de normativas internacionales. Por ello, el prototipo desarrollado representa una alternativa viable y económica para contextos locales o supermercados pequeños y medianos que buscan modernizar sus servicios sin realizar inversiones excesivas.

7. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo monográfico permitió diseñar e implementar un prototipo de sistema electrónico automatizado orientado a mejorar la experiencia de compra en supermercados para personas ciegas. A partir del análisis teórico, el diseño metodológico, la implementación del prototipo y la evaluación mediante encuestas a usuarios potenciales, se obtuvieron resultados relevantes tanto desde el punto de vista técnico como social.

El sistema propuesto integra sensores de proximidad, microcontroladores Raspberry Pi Pico W, un módulo de audio DFPlayer Mini y un mecanismo de dispensación controlado por servomotor, permitiendo al usuario identificar productos de forma auditiva y recibir asistencia durante el proceso de compra. La arquitectura implementada demuestra la viabilidad técnica de desarrollar soluciones accesibles, de bajo costo y escalables que contribuyan a la autonomía de las personas ciegas en entornos comerciales.

Los resultados obtenidos mediante la encuesta aplicada evidenciaron que las principales dificultades que enfrentan las personas ciegas durante las compras están relacionadas con la localización de productos, la falta de señalización accesible y la dependencia de terceros. Estos hallazgos reflejan que el entorno tradicional de los supermercados aún presenta limitaciones en términos de accesibilidad, lo cual afecta la independencia, privacidad y capacidad de decisión de las personas con discapacidad visual. Este análisis permitió fundamentar la necesidad de implementar soluciones tecnológicas inclusivas que reduzcan dichas barreras.

El diseño del sistema se desarrolló considerando las necesidades identificadas en la fase de análisis, incorporando sensores infrarrojos para la detección de productos, retroalimentación auditiva mediante el DFPlayer Mini y un mecanismo de dispensación controlado por servomotores. La implementación de una arquitectura cliente–servidor basada en dos microcontroladores Raspberry Pi Pico W permitió estructurar un sistema modular, facilitando su escalabilidad y la posibilidad de incorporar mejoras futuras, como la integración de nuevos sensores o funciones inteligentes.

Las pruebas realizadas en el entorno simulado evidenciaron un funcionamiento adecuado del prototipo, permitiendo la detección de productos, la reproducción de mensajes auditivos y la activación del mecanismo de dispensación de forma eficiente. Asimismo, durante la fase experimental se identificaron aspectos susceptibles de mejora, relacionados con la estabilidad y precisión del sistema, lo que permitió fortalecer el desarrollo del prototipo y validar su funcionamiento.

Desde una perspectiva social, el sistema presenta un alto potencial de impacto positivo en la vida cotidiana de las personas ciegas, al facilitar una actividad diaria

como la compra en supermercados y fomentar la autonomía, la inclusión social y la confianza del usuario. Los resultados de la encuesta reflejaron una alta aceptación del proyecto, evidenciando la necesidad de implementar soluciones tecnológicas enfocadas en mejorar la accesibilidad en entornos comerciales.

Además, se identificó la preferencia por soluciones tecnológicas que apoyen al usuario sin sustituir completamente su movilidad, destacando la importancia de diseñar sistemas centrados en la experiencia del usuario. El prototipo desarrollado responde a esta necesidad al proporcionar asistencia auditiva en tiempo real, manteniendo el control del proceso en manos del usuario.

Finalmente, el presente trabajo evidencia que la tecnología con enfoque inclusivo puede convertirse en una herramienta fundamental para reducir barreras y promover la igualdad de oportunidades. El sistema automatizado desarrollado constituye una base sólida para futuras investigaciones en tecnologías asistivas, con posibilidades de implementación en entornos reales, integración con sistemas comerciales y la incorporación de tecnologías más avanzadas en automatización e inteligencia artificial.

8. Recomendaciones

A partir del desarrollo, implementación y evaluación del prototipo de sistema electrónico automatizado de compras en supermercados para personas ciegas, se presentan las siguientes recomendaciones orientadas a optimizar su desempeño, durabilidad y aplicabilidad en entornos reales.

8.1. Mejoras técnicas del prototipo

Se recomienda mejorar la precisión y confiabilidad del sistema de detección, incorporando sensores complementarios o combinando diferentes tecnologías de sensado, como sensores ultrasónicos o sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID). Esta integración permitiría reducir errores de identificación de productos y mejorar el desempeño del sistema en entornos reales donde existen variaciones de ruido, iluminación y disposición física de los estantes.

Asimismo, se sugiere implementar un sistema de alimentación eléctrica más robusto, mediante baterías recargables de mayor capacidad y circuitos de gestión energética. Esto permitiría ampliar el tiempo de uso del carrito de compras y facilitar su operación continua dentro del supermercado.

8.2. Mejora del material y diseño de los dispensadores de alimentos

Durante el desarrollo del prototipo, los dispensadores de productos fueron construidos con material de cartón, lo cual resultó adecuado para fines experimentales y de validación conceptual. Sin embargo, para una implementación funcional y duradera, se recomienda sustituir este material por otros más resistentes, higiénicos y aptos para entornos comerciales.

Entre los materiales recomendados se encuentran:

- Plásticos de grado alimenticio (como ABS o PET), por su resistencia, facilidad de limpieza y bajo peso.
- Acrílico o policarbonato, que ofrecen buena resistencia mecánica y permiten visualizar el contenido del dispensador.
- Aluminio liviano, para aplicaciones que requieran mayor robustez estructural.

Además, se sugiere rediseñar la estructura mecánica del dispensador, optimizando la forma de la compuerta y los mecanismos de liberación del producto. Un diseño más ergonómico permitiría:

- Evitar atascos o caídas múltiples de productos.
- Adaptarse a productos de distintos tamaños y pesos.
- Reducir el esfuerzo mecánico requerido por el servomotor.
- Incrementar la vida útil del sistema.

Estas mejoras contribuirían a una operación más segura, confiable y acorde a los estándares de higiene requeridos en supermercados.

8.3. Mejoras de la interacción con el usuario

Se recomienda incorporar comandos de voz, permitiendo al usuario interactuar con el sistema de forma más natural y accesible. Esto reduciría la necesidad de controles físicos y facilitaría el uso para personas con movilidad limitada.

Asimismo, la implementación de retroalimentación háptica, como vibraciones, podría complementar la información auditiva y proporcionar alertas adicionales ante eventos importantes, como la detección de obstáculos o la confirmación de una selección.

8.4. Ampliación de las funcionalidades del sistema

Para futuras versiones del sistema, se recomienda integrar una base de datos de productos, que permita informar al usuario sobre precios, promociones y características básicas. Esta información podría actualizarse automáticamente desde los sistemas internos del supermercado.

También se sugiere implementar un sistema de navegación asistida, capaz de guiar al usuario hacia productos específicos mediante instrucciones auditivas secuenciales, mejorando aún más la experiencia de compra.

8.5. Evaluación en entornos reales

Se recomienda realizar pruebas del sistema en supermercados reales, con la participación de un mayor número de personas ciegas. Estas pruebas permitirían evaluar el comportamiento del sistema en condiciones reales, identificar nuevas áreas de mejora y validar su impacto en la autonomía del usuario.

Además, estudios a largo plazo permitirían analizar el efecto del sistema en la reducción de la dependencia de terceros y en la satisfacción general del usuario.

8.6. Proyección social y escalabilidad

Desde una perspectiva social, se recomienda establecer alianzas con supermercados, asociaciones de personas con discapacidad visual y entidades gubernamentales para fomentar la adopción del sistema como una solución inclusiva.

Finalmente, se sugiere explorar la escalabilidad del sistema, adaptándolo a otros entornos como farmacias, bibliotecas o centros comerciales, donde las personas ciegas enfrentan desafíos similares.

9. Anexos

El presente apartado de anexos tiene como finalidad complementar la información desarrollada a lo largo de la tesis, proporcionando material adicional que respalda el diseño, implementación y funcionamiento del sistema electrónico automatizado propuesto.

9.1. Códigos utilizados en el sistema

En este apartado se presentan los códigos desarrollados e implementados durante la construcción del prototipo, los cuales permitieron el funcionamiento e integración de los distintos componentes del sistema, como el sensor de proximidad, servomotor, comunicación WiFi y módulo de audio.

Con el fin de facilitar el acceso, revisión y futura replicación del proyecto, los códigos completos han sido publicados en el siguiente repositorio en línea, donde se encuentran organizados según la función de cada dispositivo y etapa del desarrollo:

Enlace del repositorio:

https://github.com/t1t02000/C-digos-recopilatorio-para-Tesis.git

Estos códigos corresponden a las versiones finales utilizadas durante la validación del prototipo.

10. Bibliografía

AdvancedMotionControls. (2025, noviembre 10). Retrieved from What is a DC Servo Motor: Definition, Working Principle and Applications: https://www.a-m-c.com/dc-servo-motor/

Annamaa, A. (2025, 10 16). *Thonny: A Python IDE for Learning Programming. University of Tartu*. Retrieved from https://dl.acm.org/doi/10.1145/2828959.2828969

Bolton, W. (2015). *Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering [6 ed.] .* Pearson.

Core Electronics. (2025, 10 16). Retrieved from Cómo configurar una Raspberry Pi Pico y programar con Thonny: https://core-electronics.com.au/guides/how-to-setup-a-raspberry-pi-pico-and-code-with-thonny/

Doebelin, E. O. (1990). *MEASUREMENT SYSTEMS.* Ohio: McGraw-Hill Publishing Company.

Farid Golnaraghi, B. C. (2025, noviembre 10). *automatic control systems.* Retrieved from automatic control systems: https://controltheorymaster.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/11/farid-golnaraghi-benjamin-c-kuo-automatic-control-systems.pdf

Fraden, J. (2025, noviembre 08). *Handbook of modern sensors physics designs and applications Fifth edition.* Retrieved from Handbook of modern sensors physics designs and applications Fifth edition: https://rizkia.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2017/11/Handbook-of-modern-sensors-physics-designs-and-applications-Fraden-Jacob-Springer-2016.pdf

Gareth Halfacree, B. E. (2021). *Get Started with MicroPython on Raspberry Pi Pico. Raspberry Pi Press.* Raspberry Pi PRESS.

Global, S. (2025, noviembre 08). *Sharp Global.* Retrieved from Distance Measuring Sensors_GP2Y0A21YK0F_Datasheet: https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf

goteck. (2025, noviembre 10). Retrieved from Servo Analogic and digital brushless: https://www.goteckrc.com/ProductShow.asp?ID=13

Groover, M. (2020). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (5th ed.). Pearson.

Groover, M. P. (2016). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing fourth Edition.* Saranathan: Pearson.

Haenlein, M., & Kaplan, A. (2019). A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence. *California Management Review, 61*(4), 5-14. doi:10.1177/0008125619864925

Hardson-Hurley, K. (2025, 10 16). *Real Python*. Retrieved from Thonny: El editor de Python para principiantes: https://realpython.com/python-thonny/

ISO. (2025, noviembre 8). Retrieved from Ergonomics of human-system interaction: https://www.iso.org/standard/63500.html ; https://cdn.standards.iteh.ai/samples/63500/33c267a5a7564f298f02bbd65721a181/ISO-9241-11-2018.pdf

Khandpur, R. S. (2015). *Handbook of Analytical Instruments.* New Delhi: McGraw Hill Education (India) Private Limited.

Ltd, R. P. (2025, 10 16). *Raspberry Pi Pico Datasheet: An RP2040-based microcontroller board.* Retrieved from https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf

Mourtzis, D. (2020). Simulation in the design and operation of manufacturing systems: State of the art and new trends. *International Journal of Production Research, 58*(7), 1927-1949. doi:10.1080/00207543.2019.1636321

Nise, N. S. (2015). *CONTROL SYSTEMS ENGINEERING Seventh Edition.* California: WILEY.

Parasuraman, R., Sheridan, T., & Wickens, C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 30*(3), 286-297. doi:10.1109/3468.844354

Pi, R. (2025, 10 16). *Raspberry Pi*. Retrieved from Raspberry Pi: https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/pico-series.html

Pi, R. (2025, noviembre 08). *Raspberry Pi Pico W Datasheet an RP2040-based microcontroller board with wireless.* Retrieved from Raspberry Pi Pico W Datasheet an RP2040-based microcontroller board with wireless: https://docs.sparkfun.com/SparkFun_XRP_Controller/assets/component_documentation/pico-w-datasheet.pdf

Raspberry Pi Foundation. (2025, 10 16). Retrieved from Introducción a Raspberry Pi Pico: https://projects.raspberrypi.org/en/projects/getting-started-with-the-pico

Richard C. Dorf, J. A. (2010). *Introduction to Electric Circuits.* california: John Wiley & Sons, Inc.

van der Aalst, W. (2016). *Process Mining: Data Science in Action* (2nd ed.). Springer.

vision, W. r. (2025, noviembre 8). *World Heatlh Organization* . Retrieved from https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-vision.

Wafa Elmannaiy, K. E. (2025, noviembre 08). *MPDI*. Retrieved from Sensor-Based Assistive Devices for Visually-Impaired People: Current Status, Challenges, and Future Directions: https://www.mdpi.com/1424-8220/17/3/565

Xiangrong Shi, Y. C. (2025, noviembre 8). *New Teaching Method of Python Programming for.* Retrieved from International Journal of Innovation and Research in Educational Sciences: https://www.ijires.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJIRES_1742_FINAL.pdf