

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
VIÑA DEL MAR - CHILE



**“Diseño y simulación de sistema *Pick-to-Light*
para búsqueda y entrega eficiente en
ferreterías.”**

Claudio Antonio Muñoz Valenzuela

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN INFORMÁTICA

PROFESOR GUÍA: GONZALO MENDOZA CARDENAS
PROFESOR CORREFERENTE: RODRIGO PINOCHET PONCE

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Diseño y simulación de sistema Pick-to-Light para búsqueda y entrega eficiente en ferreterías

Nombre del candidato(a): Claudio Antonio Muñoz Valenzuela

Carrera / Grado: Ingeniería en Informática

Campus: Sede Viña del Mar Departamento: Electrotecnia e informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, _Gonzalo Mendoza Cárdenas_, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

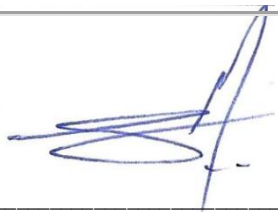
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 27/07/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27/07/2026 Firma: 

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

DEDICATORIA

Dedico este documento a mis padres y a mi abuela, quienes con sacrificio y esfuerzo siempre me apoyaron para estudiar lo que me gusta, entregándome lo necesario para poder construir mi futuro. Su formación fue esencial para ser lo que soy y alcanzar este objetivo tan anhelado.

También a mis amigos y seres queridos, quienes fueron un gran apoyo en momentos necesarios, aunque quizá no lo notasen, fueron importantes para poder lograr esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mi profesor guía y profesor correferente quienes con sus correcciones me orientaron a mejorar y perfeccionar este trabajo de título, para así llevar por buen camino este proyecto y cumplir lo necesario para esta importante etapa de mi carrera universitaria.

Agradezco especialmente a mi familia, mis padres y mi abuela, gracias por tenerme paciencia y darme un apoyo incondicional durante toda mi vida como también durante esta etapa tan importante, sin ellos no habría tenido la fuerza ni motivación para recorrer este camino y llegar hasta aquí.

Finalmente quiero agradecer a mis amigos por el apoyo en momentos complicados, las charlas, los consejos y risas, que fueron esenciales para poder seguir adelante.

RESUMEN

Este proyecto presenta el diseño y simulación de un sistema Pick-to-Light destinado a asistir la búsqueda y selección de productos en ferreterías, mediante una interfaz web se ubica de manera remota y rápida el producto solicitado por una señalización luminosa para posteriormente ser retirado por el vendedor y entregado al cliente.

La solución se evaluó en un ambiente de prueba, con una cantidad limitada de casilleros y productos con gran similitud, comparando el antes y después del proceso utilizando métricas clave, las cuales son el tiempo de atención empleado por cliente (búsqueda y selección del producto solicitado) y la tasa de errores cometidos.

Los resultados evidenciaron una reducción del 48% en el tiempo promedio de atención y la disminución de la tasa de errores del 30% a 0%, validando así la viabilidad técnica del prototipo.

PALABRAS CLAVE

Ferretería; *Picking*; *Pick-to-Light*; Errores de selección; Eficiencia

GLOSARIO

API (Application Programming Interface): Conjunto de protocolos y herramientas que permite que distintas aplicaciones de *software* se comuniquen entre sí. Define los métodos y formato de la data que un programa usa para solicitar y compartir información con otro sistema, actuando como un intermediario.

API REST: Interfaz de programación donde los recursos se identifican por URI y se accede a estos a través de métodos HTTP (GET, POST, entre otros).

Backend embebido: Arquitectura de *software* donde la lógica del servidor, el procesamiento de datos y la respuesta de solicitudes residen directamente en el microcontrolador, evitando depender de servidores externos o servicios en la nube.

E-commerce Fulfillment: Conjunto de procesos logísticos relacionados con el comercio electrónico que permiten gestionar pedidos, incluido almacenamiento de productos, preparación de pedidos (*picking*), despacho y seguimiento de las entregas al cliente final.

Edge Computing: Modelo de computación distribuida que acerca el procesamiento de los datos a donde estos se generan. Es principalmente usado en sistemas *IoT*, permitiendo reducir la latencia, mejorar el uso del ancho de banda y facilitar que los sistemas funcionen de manera autónoma y en tiempo real.

Endpoints: "Puntos finales" de una API, son URLs específicas donde se exponen recursos o acciones y que se relacionan con un método HTTP.

ESP32: Tipo de microcontrolador de 32 bits con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada.

Firmware: *Software* específico que controla físicamente el *hardware*.

GPIO (General Purpose Input/Output): Pines de entrada/salida en un microcontrolador que pueden ser configurados por medio de *software* para leer sensores o controlar actuadores.

HTTP: Protocolo fundamental usado para la web, se basa en el modelo de solicitud-respuesta entre el cliente y el servidor.

Internet of Things (IoT): Rama de la informática dedicada a proyectos que combinan dispositivos cotidianos, del hogar, con tecnología buscando mayor eficiencia y control para obtener beneficios, como reducción de gastos o mejor gestión de los recursos.

Local Area Network (LAN): Red de área local que permite interconectar, por medio del protocolo IP, dispositivos dentro de un área geográfica limitada. Permite que los dispositivos se comuniquen y compartan recursos dentro de esta red.

Microcontrolador: Dispositivo integrado programable que ejecuta instrucciones y es capaz de controlar dispositivos externos.

Pick-to-Light: Sistema de señalización por luz usado en preparación de pedidos para indicar la ubicación de productos.

Picking: Proceso de preparación de pedidos el cual consiste en localizar, seleccionar y retirar el producto solicitado.

Plug-and-Play: Tecnología que permite a un dispositivo informático ser conectado a un sistema sin necesidad de configuración física o instalación de controladores complejos para su correcto funcionamiento.

Proof of Concept (PoC): Implementación a baja escala de una idea, método o sistema, donde el principal objetivo es demostrar su viabilidad técnica y validar la funcionalidad práctica antes de llevar a cabo un desarrollo o despliegue.

Point of sale (PoS): Sistema de punto de venta utilizado para registrar transacciones, procesar pagos, y en algunos casos, actualizar inventario y emitir comprobantes.

RAD (Rapid Application Development): Metodología de desarrollo de *Software* que prioriza el prototipado rápido y las entregas iterativas e incrementales, enfocándose en la retroalimentación temprana por parte del usuario en lugar de seguir una planificación rígida.

SoC (System on Chip): Circuito integrado que tiene gran parte de los componentes de un ordenador o sistema electrónico en un solo lugar, el microcontrolador *ESP32* es un ejemplo de SoC.

Stock keeping unit (SKU) ¹: Código que se define para identificar de manera única cada variante existente de un producto, usado comúnmente para controlar stock.

WS2812B: Tipo de LED RGB direccionable que integra un circuito de control el cual, permite controlar el color y brillo de cada píxel de manera individual, por medio de solamente un pin de datos.

¹ En ferreterías pequeñas no siempre se usa SKU, eso depende el tamaño de estas, la manera en que gestionan los productos y de otros factores. Para este proyecto se utilizará para poder referenciar e identificar los productos de manera única.

INDICE DE CONTENIDOS

1.	CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
1.1.	Contexto	14
1.2.	Problemática y sus consecuencias.....	15
1.3.	Proceso actual:	16
1.4.	Objetivos del proyecto:.....	16
1.4.1.	Objetivo general	16
1.4.2.	Objetivos específicos.....	17
2.	CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL	17
2.1.	Definiciones clave:	18
2.2.	Métodos de <i>picking</i> :	18
2.3.	Estado del arte:.....	19
2.3.1.	Sistemas de alta actividad y colaboración:	19
2.3.2.	Aplicaciones nacionales de sistemas <i>Pick-to-Light</i> :	20
2.3.3.	Implementación de sistema de asistencia visual en la industria alimentaria nacional.....	20
2.3.4.	Sistemas de asistencia visual en la manufactura de herrajes y piezas pequeñas:	21
2.4.	Fundamentos del guiado visual:	22
2.5.	Métricas:.....	23
2.6.	Tecnologías habilitantes	23
2.6.1.	Microcontrolador:	23
2.6.2.	Señalización visual:	24
2.7.	Arquitectura de <i>Software</i>	24
2.7.1.	Modelo del servidor embebido:	25
2.7.2.	Interfaz por medio de <i>API REST</i> :	25
3.	CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	25
3.1.	Metodología y plan de trabajo:	26
3.1.1.	Enfoque:.....	26
3.1.2.	Diseño de evaluación piloto	26
3.1.3.	Plan de trabajo	28
3.1.4.	Cronograma	31
3.2.	Alcance del proyecto:	32
3.2.1.	Alcance técnico del prototipo	32
3.2.2.	Alcance metodológico del prototipo.....	33
3.3.	Arquitectura de la solución:	34
3.4.	Funcionalidad:	37
3.5.	Implementación tecnológica:	39
4.	CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN	40
4.1.	Protocolo de la evaluación:	40
4.2.	Resultados obtenidos:	42
4.3.	Análisis de resultados:.....	43
5.	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	45

5.1.	Limitaciones e ideas a futuro:	46
6.	Bibliografía.....	47
7.	ANEXOS	49

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Picking manual.....	14
Ilustración 2: Roadmap hitos del proyecto	31
Ilustración 3: Diagrama de la arquitectura	34
Ilustración 4: Diagrama de flujo proceso de picking	37
Ilustración 5: Interfaz de control desplegada en el navegador	38
Ilustración 6: Detalle conexiones físicas	39
Ilustración 7: Montaje experimental con 10 casilleros y productos.....	41
Ilustración 8: Comparación de tiempos de atención por tarea	44

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Hitos del proyecto	31
Tabla 2: Alcance técnico del prototipo	32
Tabla 3: Alcance metodológico del prototipo.....	33
Tabla 4: Comparativa de tiempos de atención por tarea	42
Tabla 5: Comparativa tasa de errores	43

INTRODUCCIÓN

La preparación de pedidos (*picking*) concentra parte importante del esfuerzo en las ferreterías dado su actual operación manual. Existe una amplia variedad de artículos y a su vez estos pueden tener diferencias milimétricas entre sus medidas, por ejemplo, en tornillos, lo cual aumenta la probabilidad de cometer errores de selección o de ubicación y a la vez eleva los tiempos de atención (búsqueda y entrega de productos) destinado al cliente.

Dada esta situación es necesario implementar tecnología para poder solucionar las problemáticas mencionadas anteriormente, logrando así optimizar la actual manera de funcionar teniendo como beneficio directo acortar los tiempos de atención y minimizar la cantidad de errores que tienden a suceder, igualmente se considera un beneficio adicional el hecho de que modernizar este proceso permita integrar más fácilmente nuevos empleados que lleven a cabo estas actividades, donde actualmente su integración se considera prolongada y compleja dada la alta cantidad de productos y la necesidad de una rápida adaptación al negocio.

Este proyecto se enfoca en un sistema *Pick-to-Light* que asista la búsqueda y entrega de productos en ferreterías donde se maneja un gran volumen de productos y medidas diferentes, donde se evaluó su eficacia simulando la preparación de pedidos, en un entorno controlado con un número limitado de casilleros para medir el impacto comparando el proceso sin el sistema y con el sistema incorporado. Como objetivo se busca evidenciar una reducción en las métricas clave definidas las cuales son el tiempo de atención por cliente (búsqueda y entrega del producto) y la cantidad de errores al momento de la selección.

1. CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. CONTEXTO

En el área de ferretería la atención al cliente depende directamente del *picking* manual, que consiste en localizar y entregar los productos entre una extensa cantidad y tipos, presentando diferencias milimétricas, la misma medida, pero distinto material o el mismo producto para distinto uso (metal o madera, por ejemplo). En escenarios de alta demanda se requiere trabajar con precisión y en tiempos más acotados.

Este trabajo se orienta a ferreterías que manejen una gran cantidad de productos y estén organizados adecuadamente en sus estanterías, para así mantener un mapa de ubicaciones consistente. Con base en lo anterior se dejan fuera las ferreterías muy pequeñas, donde el personal gracias al tiempo conoce “de memoria” las ubicaciones de los productos, y las ferreterías ya automatizadas cuyo proceso no es manual, donde la incorporación de este proyecto no presentaría un beneficio.

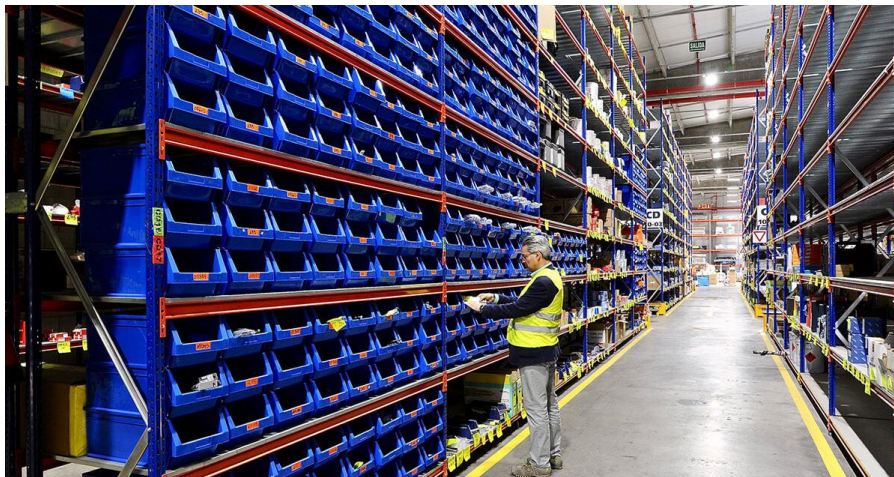


Ilustración 1: Picking manual
Fuente: Ar Racking Storage Solutions

1.2. PROBLEMÁTICA Y SUS CONSECUENCIAS

La problemática central se encuentra en el proceso de búsqueda y entrega de productos a los clientes, dado que este proceso de *picking* se realiza de manera manual en ferreterías donde existe una gran cantidad de productos similares que a la vez presentan variaciones milimétricas, generando tiempos de atención elevados, ya que el vendedor debe ir buscando entre los casilleros el producto solicitado e incluso verificar si es el correcto haciendo esto más lento el proceso, y a la vez puede llevar a una mayor cantidad de errores de selección por parte del vendedor. Este escenario empeora al tener una mayor cantidad de clientes de manera simultánea o al querer integrar nuevos trabajadores al negocio, teniendo impacto directo en dos métricas clave: tiempo de atención por cliente (solicitud, búsqueda y entrega del producto) y la tasa de errores (porcentaje de atenciones con errores cometidos sobre el total de atenciones realizadas).

Si no se toman medidas para resolver esta problemática, la productividad seguirá siendo limitada ya que cada atención exige desplazarse hacia el casillero, comparar productos en busca del correcto y verificar para tener mayor seguridad. Esto eleva los tiempos de atención por cliente, ya que se busca disminuir la probabilidad de una entrega incorrecta del producto, lo que generaría retrabajo y devoluciones que provocan una experiencia negativa en el cliente. Igualmente, se continúa dependiendo de personal “experto” para garantizar eficiencia y la integración de nuevos trabajadores sigue siendo lenta.

1.3. PROCESO ACTUAL:

Actualmente, en las ferreterías se emplea un flujo de trabajo manual para el proceso de *picking*, este inicia cuando el vendedor consulta al cliente qué producto necesita, luego recorre los estantes y casilleros hasta localizar el producto.

Ya que se tienen múltiples variantes muy similares, por ejemplo, longitudes próximas o materiales de fabricación distintos, es común realizar reverificaciones y comparar visualmente los productos prolongando así la atención, afectando directamente en:

- Tiempo de atención (búsqueda y entrega de productos), por desplazamientos y comprobaciones repetidas.
-
- Probabilidad de errores de selección (producto correcto, medida equivocada) o ubicación (casillero equivocado).

En la literatura reciente se comparan los diversos métodos de picking y se evidencia que las ayudas guiadas, como lo es *Pick-by-Light* (también llamado *Pick-to-Light*), superan el uso de las listas de papel en tiempo y exactitud. Un estudio experimental publicado en *Sensors* evidencia que el sistema *Pick-by-Light* obtuvo tiempos de preparación significativamente más cortos que al utilizar *Pick-by-Paper*, en cuanto a errores, se registraron 48 con papel, 41 con señalización visual y 21 con un método visual alternativo (*Pick-by-Point*) [1], [2].

1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO:

1.4.1. Objetivo general

El objetivo del proyecto es diseñar y simular el uso de un prototipo que asista durante la selección y entrega de productos en ferreterías, teniendo al vendedor como actor principal. Para ello se diseñará una arquitectura que integre un mecanismo visual de señalización junto con una interfaz web desarrollada como parte del proyecto, por el cual se evaluará su efecto comparando, antes y después, los tiempos de atención y la tasa de errores al momento de buscar y entregar productos al cliente.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Analizar el proceso actual e identificar los requisitos, para posterior definición de los componentes, la arquitectura y las funcionalidades que se incluirán en el proyecto.
2. Diseñar la arquitectura a usar (HW/SW), definir componentes necesarios, tecnologías de comunicación a utilizar y definir el mapa de ubicaciones (casilleros).
3. Construir e integrar el prototipo físico (maqueta con casilleros y productos) y el software mínimo necesario para realizar pruebas funcionales en un entorno controlado que permitan validar su funcionamiento.
4. Comparar los resultados obtenidos en la evaluación piloto, tiempo de atención y tasa de errores, entre los escenarios con y sin *Pick-to-Light* para determinar la eficiencia del prototipo e identificar mejoras para el sistema.

2. CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL

Este capítulo presenta las bases conceptuales que sustentan la propuesta de solución de este proyecto y su posterior evaluación. Tiene como objetivo aclarar el vocabulario técnico utilizado en la preparación de pedidos en el contexto de una ferretería, estableciendo las definiciones de *picking*, *SKU* y *Pick-to-Light*, para así también poder justificar la utilización de *Pick-to-Light* por sobre otros métodos alternativos a este (por ejemplo, *Pick-by-Paper*, *Pick-by-Voice*) [2] y justificar el por qué es el enfoque más adecuado.

Adicionalmente se presenta el guiado visual como el mecanismo técnico central de esta tecnología, que permite dirigir la atención del vendedor hacia una ubicación específica mediante señales de luz, y se detallan las métricas que se utilizarán para medir el impacto, las cuales son el tiempo de atención y la tasa de errores, en una evaluación comparativa antes y después.

2.1. DEFINICIONES CLAVE:

- *Picking* en ferreterías, proceso operativo que consiste en la búsqueda física, la verificación de la variante correcta del producto (medida o material) y la entrega del producto solicitado al cliente. En ferreterías con muchas variantes y stock esta operación concentra gran parte del tiempo y de los errores en el flujo de atención [2].
- *SKU (Stock Keeping Unit)*, identificador único por cada variante del producto (su definición consiste en la combinación de sus atributos, tamaño, material, entre otras características). Permite distinguir directamente productos por sobre sus similares, en este proyecto es usado como una clave de referencia para la búsqueda y el mapeo de las ubicaciones en los casilleros.
- *Pick-to-Light*, tecnología de guiado visual para el proceso de preparación de pedidos donde por medio de indicadores luminosos instalados en las ubicaciones físicas (casilleros) se activan para señalar donde está el producto que debe ser retirado. Este sistema reduce la necesidad de buscar entre diversos casilleros el producto, como ocurre al utilizar listas de los productos, teniendo efectos observados en la reducción de los tiempos y la cantidad de errores que se cometen [1], [2].
- *Put-to-Light*, variante orientada al abastecimiento del stock donde la luz indica el lugar donde se debe depositar el producto. Se menciona para diferenciarlo del sistema *Pick-to-Light* y expresar que este no forma parte del alcance del proyecto.

2.2. MÉTODOS DE PICKING:

- *Pick-by-Paper*: listas impresas, es un método simple y de bajo costo, pero necesita una mayor exploración visual y reverificaciones. En escenarios con muchos *SKU* similares se tiende a necesitar más tiempo para completar un pedido, considerando también una mayor cantidad de errores con este método [2].
- *Pick-to-Light*: señalización visual directa en la ubicación, reduce la búsqueda y minimiza la necesidad de reverificar. Este método requiere implementar infraestructura como módulos luminosos. En estudios este método acorta los tiempos frente al papel [1] y puede mejorar la exactitud del proceso [2].

- *Picking* por voz: uso de manos libres y buena movilidad, depende directamente del reconocimiento y el entrenamiento, resultando beneficioso en recorridos largos o al necesitar manejar una gran cantidad de productos [2].
- *Pick-to-Point*: guiado visual con punteros o proyecciones, brindan una alta precisión, pero necesitan aún más infraestructura lo cual eleva los costos para su implementación.

2.3. ESTADO DEL ARTE:

En el mercado actual de la logística industrial la tecnología *Pick-to-Light* se encuentra presente en distintas áreas, aportando soluciones más sofisticadas con las cuales los grandes centros de distribución se ven beneficiados gracias a estas implementaciones.

2.3.1. Sistemas de alta actividad y colaboración:

Un ejemplo de esta implementación lo demuestra la empresa **Kardex Remstar**, y su sistema "*Kardex Color Pick System*", quienes con esta tecnología *pick-to-light*, eliminaron una limitación existente en el *picking* manual que es la congestión de operarios causado por varios en un mismo pasillo, atendiendo distintas solicitudes.

Mientras que los sistemas tradicionales utilizan solamente un color para toda la operación, esta tecnología usa módulos de luces con colores dinámicos. Asignando un color específico a cada vendedor, lo que permite que múltiples de estos trabajen simultáneamente en la misma zona de estanterías sin generar confusiones visuales o errores de asignación. Como describe la documentación de Kardex Remstar, este enfoque colaborativo permite alcanzar una tasa de rendimiento de hasta 300 líneas de pedido por hora por cada vendedor/operador [3].

Esto permite gestionar equipos de trabajo mediante la señalización visual diferenciada, demostrando que la implementación de estas tecnologías brinda eficiencia en entornos de alta demanda.

2.3.2. Aplicaciones nacionales de sistemas *Pick-to-Light*:

A nivel comercial en el mercado nacional chileno destacan las implementaciones corporativas como las ofrecidas por SD Works, especializadas en *e-commerce fulfillment* y automatización de bodegas [4]. Su solución tecnológica *Pick-to-Light* y *Put-to-Light* utiliza displays numéricos luminosos instalados en las estanterías, los cuales se activan a medida que se van escaneando los productos, guiando de manera visual hacia la ubicación exacta e indicando la cantidad que debe ser extraída, respaldado por una arquitectura de *software* basada en la nube y computación en el borde (*Edge Computing*) [4].

La información que presenta esta compañía indica que este tipo de soluciones permite optimizar los procesos de preparación de pedidos (*picking*), aumentando así la productividad y reduciendo los errores vinculados directamente con la selección manual de productos. De igual manera se menciona que es posible integrar el sistema con plataformas de gestión logística o de almacenamiento, brindando mayor facilidad en la coordinación de operaciones en centros de distribución con un alto volumen de pedidos [4].

La utilización de estos sistemas y las mejoras que representan en procesos que son realizados comúnmente de manera manual evidencian que las tecnologías de asistencia visual para el *picking* corresponden a estrategias de automatización usadas actualmente en el mercado nacional, buscando mejorar con ellas la eficiencia y la precisión de los procesos logísticos.

2.3.3. Implementación de sistema de asistencia visual en la industria alimentaria nacional

Otro caso relevante en el contexto nacional corresponde a la reconocida empresa panificadora Castaño, la cual implementó sistemas de asistencia visual para optimizar sus procesos de distribución y preparación de pedidos [5]. Se menciona que, dada su forma de operar, la compañía necesitaba gestionar diariamente grandes volúmenes de productos frescos destinados a supermercados y a más de 150 sucursales

distribuidas a nivel nacional, debiendo operar con altas exigencias de tiempo y precisión logística.

Para lidiar con estas problemáticas la empresa incorporó tecnologías *Pick-to-Light* y *Put-to-Light* proporcionadas por PcData Logistics [5], con las cuales lograron guiar visualmente a los operadores al clasificar y preparar pedidos por medio del uso de indicadores luminosos instalados en las estaciones de trabajo, disminuyendo la dependencia a los procesos manuales y mejorando la coordinación de la operación.

En base al caso de estudio presentado por PcData Logistics, la implementación mejoró la productividad de las operaciones logísticas y aumentó la precisión en la preparación de los pedidos, disminuyendo así los errores de *picking* que derivaban en reclamos por productos faltantes en las tiendas [5]. Lo cual demuestra que las tecnologías de asistencia visual pueden ser aplicadas exitosamente en organizaciones nacionales con altos requerimientos de distribución, presentándose como una alternativa efectiva para optimizar la productividad, la precisión y la eficiencia de los procesos logísticos.

2.3.4. Sistemas de asistencia visual en la manufactura de herrajes y piezas pequeñas:

En el ámbito internacional, un referente destacado en la gestión logística de piezas pequeñas corresponde a ASSA ABLOY, una empresa mundial con soluciones en acceso y seguridad. De acuerdo con el caso de estudio presentado por PcData Logistics [6], una de las plantas de producción de la compañía enfrentaba problemas operativos debido a la precisión en la preparación de pedidos. Según los antecedentes registrados, cerca del 80% de los reclamos hechos por parte de los clientes se debían a envíos incorrectos o la falta de piezas durante el proceso de extracción [6].

Esta problemática estaba relacionada con la utilización de listas de *picking* en papel y con la complejidad de administrar un catálogo con una gran cantidad de referencias (*SKU*), muchas de ellas de tamaño reducido y difíciles de identificar

por medio de métodos tradicionales, como los códigos de barras. Con el objetivo de afrontar esta problemática la empresa implementó tecnología *Pick-to-Light* en sus procesos de preparación de pedidos [6], guiando de manera visual a los operarios hacia la ubicación correcta de cada producto por medio de indicadores luminosos instalados en las zonas de almacenamiento, reduciendo la dependencia de procedimientos manuales y facilitando la identificación de las piezas requeridas.

Los resultados indicados por PcData Logistics señalan que la implementación de esta tecnología permitió reducir los reclamos asociados a errores de extracción en más de un 55%, optimizar la carga de trabajo del personal y alcanzar el retorno de inversión (ROI) en un periodo aproximado de 7 meses [6].

Este caso internacional deja en evidencia que las tecnologías de asistencia visual pueden representar una alternativa efectiva para optimizar procesos de *picking* en entornos donde se manipulan grandes cantidades de referencias y piezas de tamaño reducido. A su vez señala que la incorporación de sistemas *Pick-to-Light* puede aportar a disminuir errores operativos, mejorar la productividad y aumentar la precisión en la preparación de pedidos.

2.4. FUNDAMENTOS DEL GUIADO VISUAL:

El guiado visual reduce la carga de búsqueda al hacer más reconocible la ubicación objetivo (LED del casillero), lo cual acorta el “escaneo” del estante en busca del casillero adecuado y disminuye la necesidad de comparaciones innecesarias al querer verificar si tiene lo correcto. Para que esta ayuda sea efectiva se necesita que el tiempo que se demore en activarse sea mínimo, es decir, una activación menor o igual a un segundo evitando así retrasar la búsqueda y manteniendo el flujo constante.

2.5. MÉTRICAS:

Se definen dos métricas clave, que se relacionan directamente con los objetivos del proyecto:

1. Tiempo de atención por cliente (s), se componen de la solicitud, búsqueda y entrega del producto al cliente.
2. Tasa de errores (%), es el resultado del total de atenciones con error sobre la cantidad de atenciones realizadas.

2.6. TECNOLOGÍAS HABILITANTES

Para la implementación del prototipo definido se usa hardware de bajo costo que pueda cumplir con los requisitos de conectividad necesarios y el control en tiempo real de la solución.

2.6.1. Microcontrolador:

Actualmente el mercado ofrece diversas soluciones para la implementación de sistemas *IoT* de este tipo, las cuales varían en potencia y conectividad. A continuación, se presentan las opciones que fueron analizadas para incorporar en este proyecto:

Plataformas basadas en Arduino: La utilización de Arduino se considera un estándar para las automatizaciones básicas, sin embargo, gran parte de sus placas necesitan manejar de forma externa su conectividad Wi-Fi o bluetooth necesitando integrar módulos adicionales.

Por lo que para lograr la funcionalidad de servidor web requeridas para este proyecto es necesario la incorporación de estos, incrementando la complejidad del circuito al igual que su implementación, los costos y las posibles fallas que puede causar el *hardware* [7].

Por otro lado, los dispositivos Raspberry Pi ofrecen una gran potencia de cómputo al funcionar sobre un sistema operativo (*Linux*). Para aplicaciones de este tipo donde solamente debe controlar el encendido de luces LED, esta opción resulta desproporcionada en términos de recursos para lo que realmente necesita el proyecto, teniendo a la vez un mayor consumo energético, un costo más elevado y una configuración compleja innecesaria donde solo se necesita mantener el sistema recibiendo comandos y activando las señales visuales, sin mantener varios procesos en segundo plano [7].

Finalmente, en la categoría de System on Chip (SoC), el modelo ESP32 integra conectividad Wi-Fi y bluetooth, junto con un procesador de doble núcleo de 32 bits en un solo componente. Permitiendo por esta arquitectura tener funcionalidades de servidor web y control de dispositivos externos sin depender de módulos externos, brindando un equilibrio entre rendimiento y conectividad para soluciones de *backend* embebido [7].

2.6.2. Señalización visual:

Para indicar de manera visual la ubicación de los productos en los casilleros la tecnología de LEDs direccionables, específicamente la tira de LEDs WS2812B, es una alternativa eficiente por sobre la iluminación comúnmente utilizada.

Eficiencia en el cableado, a diferencia de usar LEDs RGB que necesitan de 3 o 4 cables para funcionar correctamente y que requerirían una gestión más compleja de las conexiones para múltiples casilleros, el usar WS2812B contienen el controlador en el propio encapsulado del LED, reduciendo considerablemente el cableado necesario [8].

Control serial, permite controlar individualmente el color y brillo de cada LED en cadena usando un solo pin de datos (*GPIO*) del microcontrolador, facilitando en gran parte el diseño del circuito y el cableado físico del sistema [8].

2.7. ARQUITECTURA DE SOFTWARE

En el desarrollo de soluciones para IoT, la arquitectura a utilizar es fundamental para determinar así la eficiencia que tendrá el sistema. Normalmente existen 2 modelos para estas soluciones:

Arquitectura centralizada (Cliente - Servidor/Cloud): Es la opción tradicional donde los dispositivos funcionan como nodos que envían la información a un servidor central para su posterior procesamiento. Esta arquitectura permite manejar una lógica compleja, es muy dependiente de la alta conexión a internet e infraestructura externa, lo que puede generar latencia en la respuesta [9].

Arquitectura de *Backend* Embebido (*Edge Computing*): Este método aloja directamente la lógica del negocio y el servidor web en el microcontrolador. Permitiendo que el dispositivo funcione de manera autónoma sin depender de servidores externos, este modelo se usa principalmente cuando se necesitan tiempos de respuesta inmediatos, ya que las solicitudes se procesan localmente [9].

2.7.1. Modelo del servidor embebido:

A diferencia de las arquitecturas tradicionales usadas que cuentan con un servidor central, en la nube o de manera física en las instalaciones por el cual envía comandos a controladores, este proyecto implementa la lógica del negocio y el servidor web directamente en el microcontrolador ESP32. Eliminando la necesidad de depender de infraestructura externa, disminuyendo costos de mantenimiento y permitiendo que el sistema funcione como un dispositivo *Plug-and-Play* dentro de la red local.

2.7.2. Interfaz por medio de *API REST*:

La comunicación entre la interfaz de usuario (*Frontend*) y el *hardware* se realiza mediante API REST sobre el protocolo HTTP.

Integración de interfaz embebida, la arquitectura implementa el *frontend* de la aplicación y el *backend* directo en la memoria del chip ESP32. Esto permite disminuir el tiempo de respuesta ya que se elimina la necesidad de leer archivos externos simplificando el despliegue del sistema, garantizando así el correcto funcionamiento como un Servidor Web local autónomo [9].

Universalidad, al usar el protocolo HTTP el sistema es accesible desde cualquier dispositivo que tenga un navegador web y esté conectado a la red local permitiendo interactuar con la interfaz sin necesidad de realizar instalaciones [10].

3. CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Se propone un sistema *Pick-to-Light* para optimizar el proceso de búsqueda y entrega de productos en ferreterías, esta solución que se compone de la combinación de *hardware* y *software*, busca facilitar la preparación de pedidos por medio de una señalización visual a través de una interfaz web. Al momento de que el vendedor selecciona el producto solicitado por el cliente, el sistema enciende el LED correspondiente al casillero, dirigiendo así de manera clara al vendedor evitando desplazamientos innecesarios y minimizando la posibilidad de que este cometa un error de selección. La efectividad del proyecto se evaluará comparando la reducción del tiempo de atención y la disminución de la tasa de errores al seleccionar un producto, considerando para ello los escenarios donde no está implementado el sistema *Pick-to-Light* y donde sí.

3.1. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO:

3.1.1. Enfoque:

El presente proyecto sigue la metodología de desarrollo rápido de aplicaciones (RAD), la cual se basa en un proceso iterativo e incremental centrado en la construcción y validación de prototipos. A través de distintos ciclos de construcción, evaluación y refinamiento, se desarrollará y mejorará continuamente la solución, que combina *hardware* y *software*. Este proceso finaliza al validar el prototipo mediante una evaluación piloto en un entorno simulado, la cual tiene como finalidad comparar el tiempo de atención y la tasa de errores durante la búsqueda y entrega de productos, al realizar el proceso de forma manual y guiado por una señalización visual.

Para aplicar correctamente la metodología RAD se llevan a cabo ciclos iterativos e incrementales de construcción y validación. Evitando así una secuencia lineal donde cada componente se evalúa continuamente, primero con el hardware de manera apartada, luego la interfaz web y subsecuentemente la integración entre estos.

Si durante las pruebas o la evaluación piloto se detectan problemas o posibilidades de mejora, la metodología permite aplicar retroalimentación rápidamente volviendo a la fase de diseño o implementación que corresponda para así realizar los ajustes necesarios antes de continuar.

3.1.2. Diseño de evaluación piloto

La evaluación del prototipo busca medir la eficiencia en un entorno controlado. El diseño de esta se menciona a continuación:

- Ámbito de estudio, la evaluación se realizará en una maqueta simulando una ferretería a pequeña escala con 10 casilleros y productos con medidas muy similares, como tornillos, clavos o tuercas, para así demostrar directamente la problemática abordada.

- Métricas por evaluar:
 - Tiempo de atención: Se medirá en segundos y se define como el tiempo desde que se busca el producto hasta que se confirma y entrega al cliente.
 - Tasa de errores: Se registrará la cantidad de errores cometidos por los participantes y se calculará dividiendo la cantidad de errores por la cantidad de atenciones realizadas.
- Tareas a realizar:
 - Se asignarán 10 tareas de búsqueda y selección de productos por cada escenario del experimento, las cuales serán realizadas por dos participantes no expertos (sin experiencia previa en ferreterías ni conocimiento de los productos relacionados a esta área).
- Escenarios:
 - Se definen 2 escenarios bajo los que se evaluarán las métricas antes mencionadas, para su posterior comparación.
 - ✓ Sin *Pick-to-Light* (línea base), proceso de búsqueda y entrega de productos de manera manual.
 - ✓ Con *Pick-to-Light*, proceso asistido mediante la activación del LED correspondiente al producto buscado.

Para evitar un efecto de aprendizaje y familiarización con las ubicaciones, se alternará el orden de los escenarios en que los participantes realizan la prueba.

3.1.3. Plan de trabajo

Dado el enfoque de trabajo metodológico RAD, las fases no mantienen un flujo lineal a llevar a cabo, sino uno iterativo incremental. Cada etapa cuenta con una revisión donde si se detectan fallos, se debe generar una retroalimentación para así poder corregir y dar por finalizada la fase actual o concluir finalmente la anterior.

Fase 1 – Alcance y requisitos

- Se delimita lo que incluye y excluye el sistema a desarrollar, a la vez se define el mapa de ubicaciones de los productos. Al finalizar esta fase se tiene la lista de requisitos y la tabla de ubicaciones para el prototipo.
- Validación y ajuste: Definición del mapa de ubicaciones y requisitos. Si se identifican nuevas restricciones, se modifica el alcance antes de comenzar el diseño.

Fase 2 – Diseño

- Elaboración del diseño de alto nivel de la arquitectura, selección de componentes necesarios, definición del protocolo de comunicación y de la estructura de datos. Teniendo finalmente un diagrama de la arquitectura y una lista de los componentes necesarios.
- Validación y ajuste: Revisión de diagrama de arquitectura y la lista de componentes definidos, verificando su factibilidad técnica antes de la elaboración del prototipo. En caso de no tener algún componente disponible se ajusta el diseño antes de pasar a la siguiente fase.

Fase 3 – Implementación de *hardware*

- Se construye la maqueta y se monta el circuito electrónico para tener una maqueta con el *hardware* operativo.
- Validación y ajuste: Verificación del encendido individual de cada LED, si el circuito presenta fallas se corrige su ensamblaje antes de avanzar a la siguiente fase.

Fase 4 – Implementación de *software*

- Desarrollo del firmware necesario para el microcontrolador *ESP32* y de la interfaz web para poder interactuar con el sistema.
- Validación y ajuste: Confirmación de respuesta y envío de peticiones *HTTP* correctamente por parte de la interfaz. Si existen errores de formato, se corrige el código.

Fase 5 – Integración y pruebas funcionales

- Se unen los módulos de *hardware* y *software*, posteriormente se realizan pruebas de funcionalidad para verificar el correcto funcionamiento y el tiempo de respuesta del sistema.
- Validación y ajuste: Pruebas de comunicación exitosas entre interfaz web y microcontrolador, sin una latencia significativa para el usuario. Si se presentan retrasos en la respuesta de la luz, se revisa el código del servidor y las conexiones del prototipo buscando corregir el problema.

Fase 6 – Evaluación piloto

- Realización de tareas por parte de los participantes para recopilar los datos sobre el tiempo y los errores, los cuales se registrarán en una planilla para su análisis.
- Validación y ajuste: Revisión de que los datos de tiempo y errores registrados en la planilla sean coherentes con el protocolo definido. Si se identifica algún registro incompleto, se verifica directamente con el participante antes de continuar con el siguiente escenario.

Fase 7 – Análisis y cierre

- Se analizarán los datos recolectados durante la evaluación piloto, para esto se calculan los promedios de los tiempos de atención en ambos escenarios, se realiza el conteo de errores y se determina la tasa de errores. Finalmente se hace un resumen de los resultados para determinar limitaciones o posibles mejoras en el proyecto.
- Validación y ajuste: Revisión de la coherencia entre los resultados obtenidos y las métricas definidas previamente. Si se determinan inconsistencias en los datos, se regresa a la fase 6 para verificar el registro de la información antes de cerrar el análisis.

3.1.4. Cronograma

Se definen hitos que permiten reconocer el progreso del proyecto y asegurar los entregables de cada fase.

Hito	Actividad	Duración	Responsable	Entregable y Validación (iteración)
H1	Construcción de maqueta física y montaje del circuito electrónico.	2 semanas	Desarrollador de proyecto	Prototipo de <i>hardware</i> ensamblado. Prueba de encendido individual de LEDs (iteración 1).
H2	Desarrollo de interfaz web y programación de <i>firmware</i> inicial.	3 semanas	Desarrollador de proyecto	Código fuente e interfaz <i>web</i> . Interfaz responde y envía peticiones <i>HTTP</i> sin errores (iteración 2).
H3	Integración de componentes (HW/SW) y ejecución de pruebas de funcionamiento	1 semana	Desarrollador de proyecto	Sistema HW y SW integrado. Pruebas de comunicación exitosas entre la <i>web</i> y el microcontrolador sin una latencia perceptible. (iteración 3).
H4	Realización de prueba piloto (medición de tiempos y errores)	1 semana	Desarrollador de proyecto	Planilla de datos registrados. Ejecución completa de las 10 tareas iterativas por escenario (iteración 4).
H5	Análisis de datos obtenidos, comparación y formulación de conclusiones.	1 semana	Desarrollador de proyecto	Capítulo de resultados y conclusiones de informe. Aprobación del análisis comparativo de las métricas (iteración 5).

Tabla 1: Hitos del proyecto
Fuente: Elaboración propia

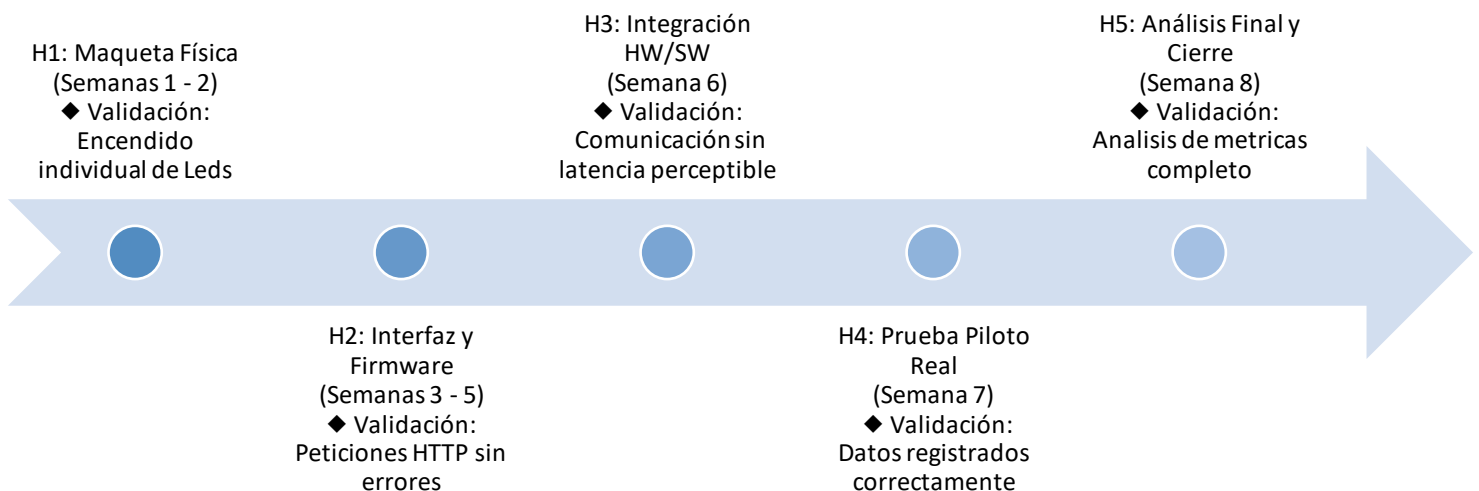


Ilustración 2: Roadmap hitos del proyecto
Fuente: Elaboración propia

3.2. ALCANCE DEL PROYECTO:

El alcance de este proyecto define los límites técnicos y metodológicos que demarcan el diseño y la simulación del prototipo. En las siguientes tablas se detalla lo que se incluye, excluye, supuestos y las limitaciones del proyecto.

3.2.1. Alcance técnico del prototipo

Para describir de manera precisa las características funcionales y los componentes necesarios para este sistema, la Tabla 2 detalla los elementos que componen la solución, permitiendo así definir los límites técnicos a considerar, como también presentar lo necesario para el armado y uso de la maqueta.

Incluye	- Maqueta en entorno controlado con 10 casilleros y productos, con alta similitud entre ellos. - Mapa de ubicaciones, relaciona el <i>SKU</i> con el LED correspondiente. - Interfaz web mínima que presenta los productos disponibles para su selección. - Control de la activación y apagado de LEDs por medio de la interfaz web. - Microcontrolador <i>ESP32</i> que expone <i>endpoints</i> mínimos para poder controlar el sistema.
Excluye	- Gestión de inventario (stock actual) - Integración con sistema <i>Point of Sale (POS)</i>, utilizado para procesar ventas y transacciones - Pruebas en un entorno de ferretería real
Supuestos	- La operación de <i>picking</i> en las ferreterías se realiza de forma manual. - Stock organizado y disposición estable de los productos, no cambian de posición constantemente.

Tabla 2: Alcance técnico del prototipo
Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Alcance metodológico del prototipo

Para establecer la forma de evaluar y las condiciones bajo las cuales se realizará el estudio, se define la Tabla 3, exhibiendo el alcance metodológico del proyecto. Su finalidad es mostrar los procedimientos de prueba a ejecutar, especificar qué tipo de análisis se aplicará a los datos y presentar las limitaciones prácticas del entorno simulado en el que se llevarán a cabo las pruebas de validación.

Incluye	- Diseño de evaluación para comparar el antes y después, sobre entornos controlados con y sin sistema <i>Pick-to-Light</i>. - Participantes no expertos, los cuales deben realizar 10 tareas en cada uno de los 2 escenarios definidos.
Excluye	- Análisis avanzado y muestras grandes para las evaluaciones. - Evaluación de la gestión del inventario en ferreterías. - Operación en ferreterías en entornos reales.
Limitaciones	- Muestra de productos y maqueta acotada, enfocada en determinar la factibilidad y tendencia de las evaluaciones, no pensando en la operación real.

Tabla 3: Alcance metodológico del prototipo
Fuente: Elaboración propia

3.3. ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN:

El diseño de la presente arquitectura se estructura bajo un modelo de *backend* embebido funcionando sobre una red local. Este método de *Edge Computing* permite que el sistema completo funcione de manera autónoma, brindando así una baja latencia en la respuesta y evitando la necesidad de depender de un servidor externo o una conexión a internet estable. Los elementos centrales se detallan a continuación:

- *Backend* embebido (ESP32): El microcontrolador funciona como un servidor web mínimo, ya que expone una *API REST* para poder manejar solicitudes *HTTP* desde la interfaz web y poder controlar los LED.
- *Frontend* (interfaz web): Aplicación web mínima accesible desde un navegador en la red local, permite al vendedor realizar las acciones de buscar y confirmar necesarias para el proceso.
- Protocolo de comunicación: se usará el protocolo *HTTP* sobre una red local (*LAN*) para comunicar la interfaz web y el microcontrolador.

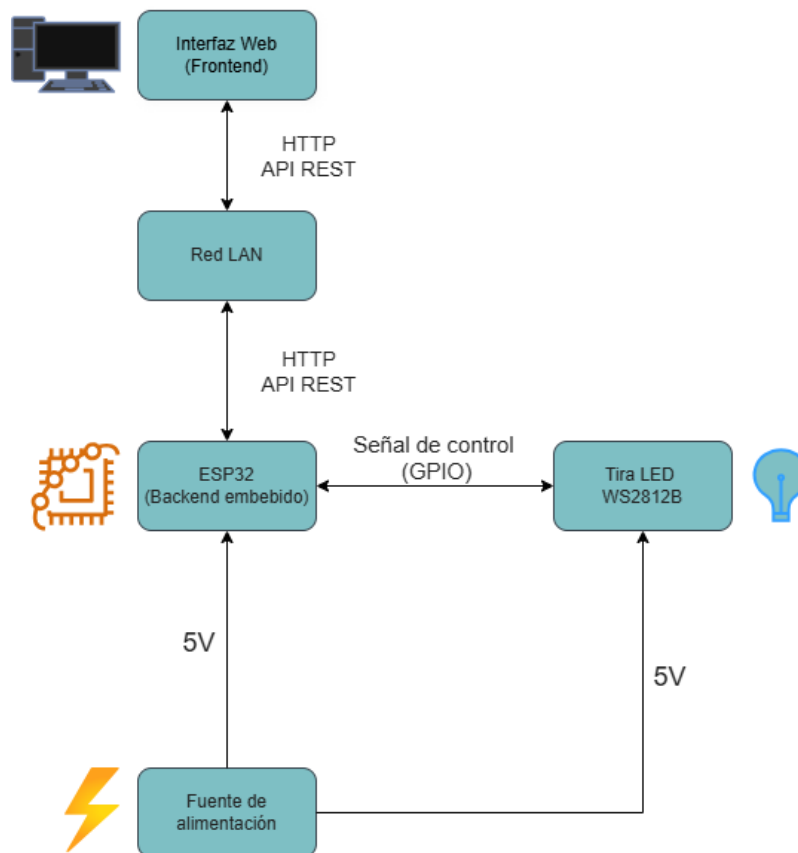


Ilustración 3: Diagrama de la arquitectura
Fuente: Ilustración propia

- Esquema de datos para productos: Para el prototipo se usará un esquema de datos estructurado que relaciona la información del producto con su ubicación física (el casillero donde se encuentra). Esto se almacena directamente en la memoria Flash del ESP32 para optimizar su acceso, definiéndose de la siguiente manera:
 - sku (*string*), identificador único del producto, permite la búsqueda precisa de estos.
 - nombre (*string*), nombre descriptivo del producto para búsqueda intuitiva.
 - medida (*string*), descripción técnica del tamaño.
 - casillero_id (número), numero del casillero físico en la maqueta.
 - led_index (número), numero del LED en la tira, usado por el microcontrolador para activar estos.

Se utiliza una estructura de datos (*struct*) dentro del firmware, lo que permite validar la unicidad de los campos sku y led_index al compilar, garantizando integridad y respuesta inmediata dado que no se necesita procesar y/o analizar texto durante la ejecución.

- Escalabilidad:
 - La arquitectura presenta un diseño modular que permite un escalamiento horizontal para así poder implementarse en un entorno de ferretería real, donde la cantidad de productos que se mantienen es alta. La cantidad de dispositivos a utilizar depende directamente del tamaño y la distribución física del local, precisando un microcontrolador *ESP32* por cada pasillo específico.
 - Todos los nodos se conectan entre sí a la misma red local vía *Wi-Fi*, con su direccionamiento de red correspondiente, donde cada *ESP32* aloja su propia interfaz web correspondiente al pasillo y los productos que en este se tienen, procesando de manera independiente las solicitudes HTTP de esa zona.

- Componentes principales:
 - Módulo de *hardware*: Consiste en una maqueta de prueba con 10 casilleros simulando un entorno de ferretería mínimo, tiras de LED direccionables, una fuente de alimentación de 5V y protecciones básicas para los componentes electrónicos.
 - Módulo de *software*: Incluye la interfaz web mínima, diseñada para la selección del producto a buscar, y el firmware necesario para el microcontrolador ESP32, con el que se podrán procesar las solicitudes y manejar los LED.

La integración de estos componentes establece la arquitectura del prototipo, con la cual se mantiene un entorno autónomo que no depende de servidores externos, garantizando tiempos de comunicación mínimos y evitando caídas del sistema por problemas de conectividad con elementos externos a este.

3.4. FUNCIONALIDAD:

La principal funcionalidad del sistema consiste en:

- Activación: El vendedor busca y selecciona el producto solicitado en la interfaz web, para que esta envíe la solicitud al ESP32.
- Señalización: El microcontrolador recibe la solicitud y enciende el LED correspondiente al casillero donde se encuentra el producto.
- Confirmación: Cuando el vendedor ya tomó el producto solicitado del casillero vuelve a su puesto de trabajo, confirmando en la interfaz web la solicitud completada, lo que apaga el LED dejando el sistema disponible para recibir más solicitudes.

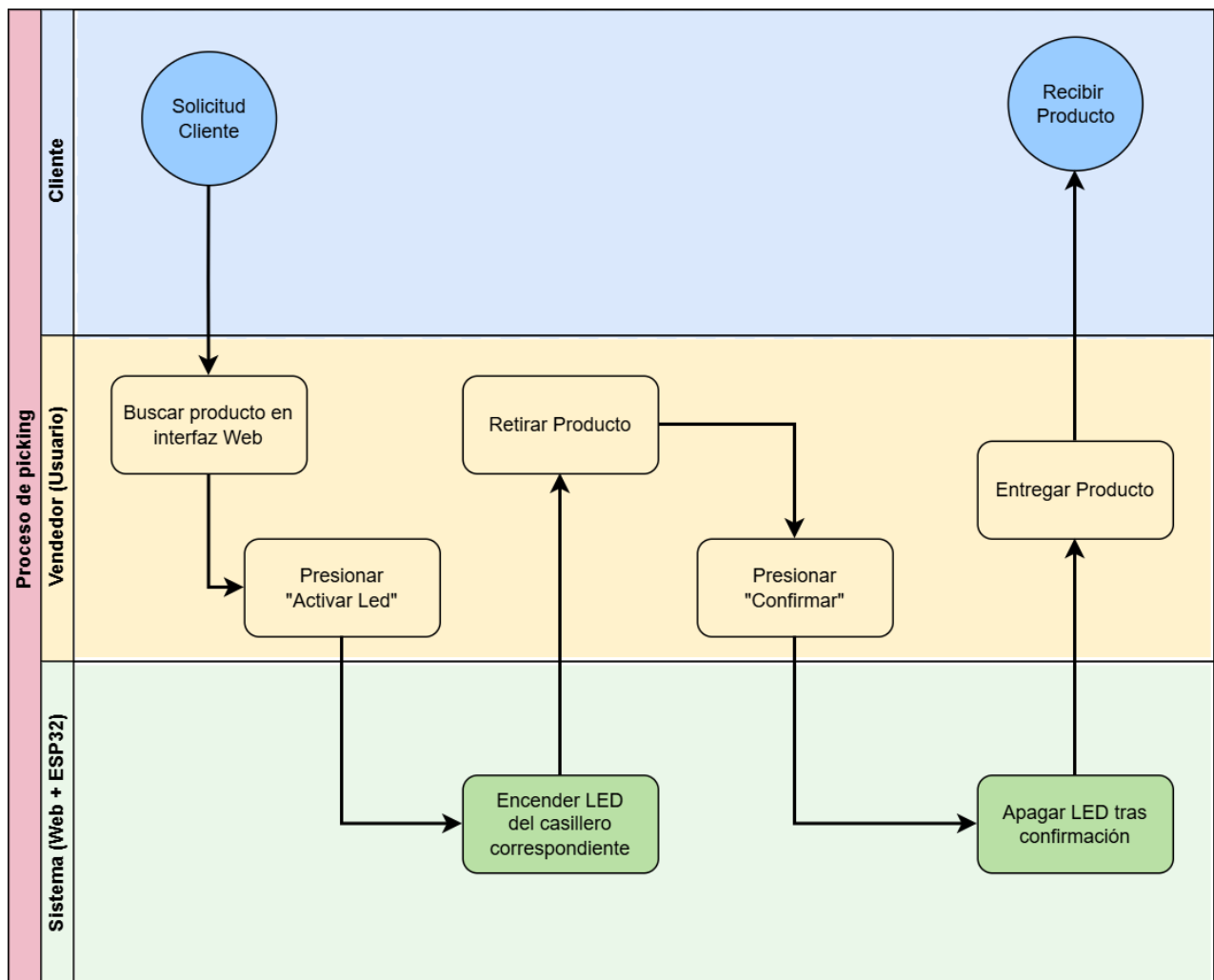


Ilustración 4: Diagrama de flujo proceso de picking
Fuente: Ilustración propia

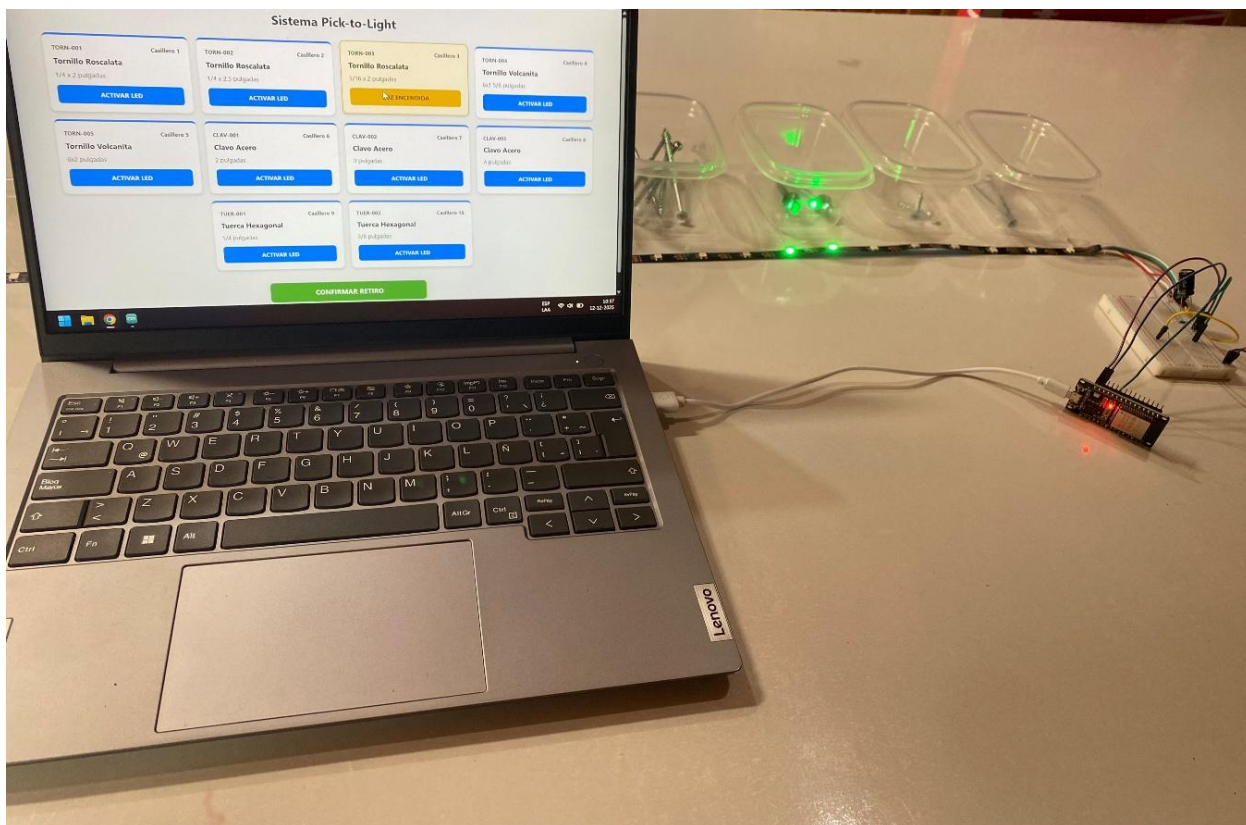


Ilustración 5: Interfaz de control desplegada en el navegador
Fuente: Ilustración propia

3.5. IMPLEMENTACIÓN TECNOLÓGICA:

- a) Aspectos técnicos del *hardware*: Ya que la alimentación del sistema será de 5V se utilizarán resistencias de 220-470 Ω para la tira de LEDs, igualmente se usará un capacitor de desacoplo el que permitirá mantener la alimentación estable lo cual presenta beneficios para la comunicación y la activación de LEDs.
- b) Aspectos técnicos del *software*: La interfaz web enviará solicitudes *HTTP* (Por ejemplo, mediante solicitudes tipo GET con parámetros en la URL) al *ESP32* para activar o apagar el LED correspondiente de manera directa.

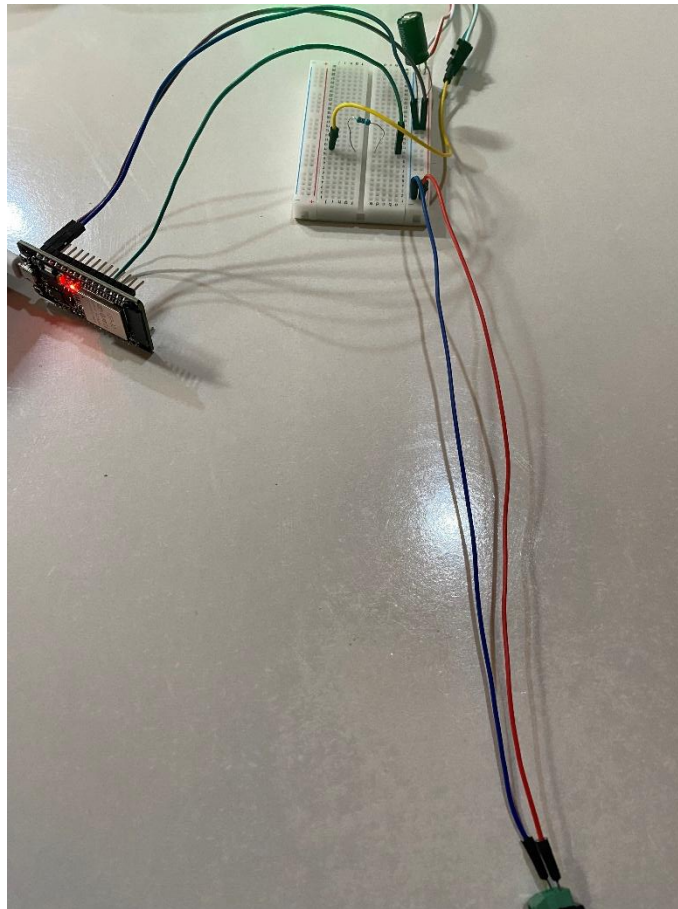


Ilustración 6: Detalle conexiones físicas
Fuente: Ilustración propia

4. CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

4.1. PROTOCOLO DE LA EVALUACIÓN:

- Para realizar la evaluación piloto se preparó una maqueta física con 10 casilleros, buscando simular la disposición de los productos en una ferretería, a esto se agrega que los productos a utilizar son parecidos entre si lo cual en un entorno real puede generar confusiones al momento de la búsqueda de los mismos. Estos productos son tornillos, clavos y tuercas, de distintas medidas y uso para así evaluar si por medio del sistema se logra disminuir la cantidad de errores por confusión visual.
- La evaluación del sistema se llevó a cabo bajo la metodología de una Prueba de Concepto (PoC), en la cual dado el alcance del proyecto la validación física del sistema se realizó bajo una muestra reducida de 2 participantes. Para garantizar que el sistema sea el principal guía en el proceso de *picking*, los usuarios seleccionados no contaban con experiencia laboral en el rubro de ferretería y no tenían conocimiento de la disposición del inventario en el prototipo. Para compensar el tamaño reducido de la muestra de participantes se aplicó un enfoque iterativo probando con distintos productos por ejecución, alternando turnos entre participantes hasta que se completara un total de 10 tareas de búsqueda por escenario, logrando generar los datos necesarios para su posterior análisis e interpretación.
- Se plantearon 2 escenarios para esta prueba:
 - El primer escenario considera la búsqueda manual por parte del usuario donde en base a una lista escrita en papel debe ubicar y seleccionar el producto solicitado sin ninguna ayuda externa.
 - El segundo escenario cuenta con la implementación del sistema *Pick-to-Light* donde el usuario debe seleccionar el producto requerido en la interfaz *Web*, para luego dirigirse siendo guiado por la luz hasta el casillero correspondiente.

La elección de estos 2 escenarios opuestos (búsqueda manual versus búsqueda asistida) permite diferenciar directamente el impacto del sistema. Al hacer que los usuarios realicen 10 tareas diferentes por escenario, se puede obtener la diferencia representada en los tiempos de atención y la tasa de errores. Lo cual permite confirmar la hipótesis inicial con datos reales y cumpliendo así con los objetivos de una prueba de concepto (PoC).

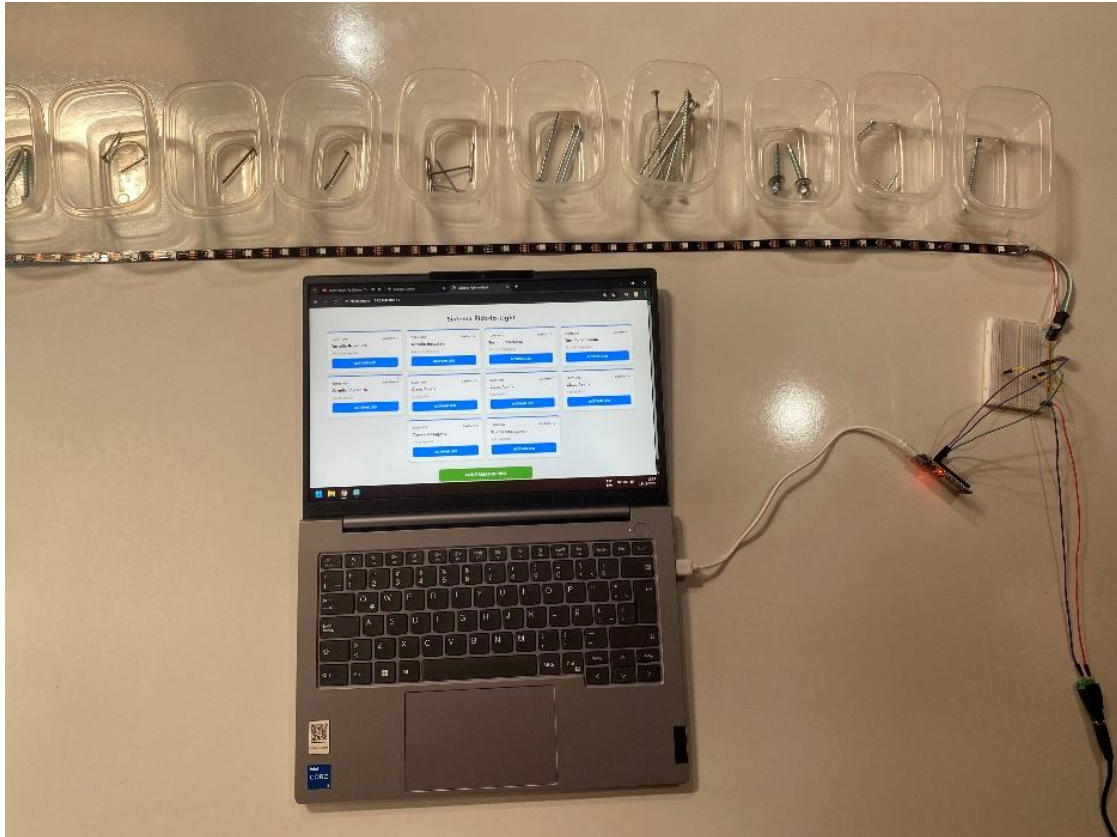


Ilustración 7: Montaje experimental con 10 casilleros y productos
Fuente: Elaboración propia

- El objetivo de estas pruebas es medir directamente el tiempo de atención que se utiliza para el proceso de *picking* (en segundos) y la tasa de errores cometidos en el proceso.

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS:

A continuación, se presentan los datos que se recopilaron durante la ejecución de la evaluación, donde se registraron los tiempos de ejecución por tarea y la cantidad de errores en ambos escenarios.

Tarea	Producto solicitado	Escenario 1	Escenario 2	Mejora (%)
1	Tornillo roscalata ¼ x 2"	13 s	4,7 s	63,8%
2	Clavo acero 2"	8,2 s	4,5 s	45,1%
3	Tuerca hexagonal ¼"	5,7 s	3,9 s	31,6%
4	Tornillo volcánita 6x1 5/8"	7,6 s	3,8 s	50%
5	Clavo acero 4"	8 s	3,5 s	56,3%
6	Tornillo roscalata 5/16 x 2"	9,5 s	5,1 s	46,3%
7	Tuerca hexagonal 3/8"	4,7 s	3,4 s	27,7%
8	Tornillo volcánita 6x2"	5 s	3 s	40%
9	Clavo acero 3"	6,1 s	4,3 s	29,5%
10	Tornillo roscalata ¼ x 2.5"	12 s	5,5 s	54,2%

Tabla 4: Comparativa de tiempos de atención por tarea
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 4, la implementación del sistema generó una reducción significativa y constante en los tiempos por tarea. Esto representa una reducción del 48% del tiempo medio global, donde el promedio de mejoras individuales por tarea fue de 44,5%, confirmando que la mejora fue consistente en todas las tareas evaluadas.

Bajo estos resultados es posible determinar la efectividad del sistema, justificando que la asistencia visual facilita directamente la localización de los productos.

Escenario	Total intentos	Errores cometidos	Tasa errores (%)
1. Manual	10	3	30%
2. Pick to Light	10	0	0%

Tabla 5: Comparativa tasa de errores
Fuente: Elaboración propia

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS:

- Al momento de analizar los resultados obtenidos en ambos escenarios podemos evidenciar que disminuyó en gran parte el tiempo empleado para buscar y seleccionar algún producto, donde se redujo aproximadamente en un 48% (de 7,98s a 4,17s) el tiempo promedio de atención. El uso del sistema evita que el vendedor deba leer la etiqueta de cada casillero, se desplace innecesariamente en búsqueda del casillero correcto y reduce considerablemente la probabilidad de errores de selección.
- Cuando se realiza de manera manual la similitud visual entre productos, por ejemplo, en tornillos puede ocasionar confusiones o dudas las cuales a su vez generan retrasos y extienden el tiempo total de atención por cliente. Usando el sistema *Pick-to-Light* esta búsqueda es más directa al encenderse solamente el LED correspondiente al producto que se busca, lo cual quita la posibilidad de equivocarse de casillero.

- En conclusión, los datos recolectados validan la viabilidad técnica de la solución, donde el uso de la señalización visual genera un beneficio claro disminuyendo los tiempos de atención por cliente, el cual puede aumentar drásticamente al necesitar más de 1 producto, y la carga cognitiva asociada a manejar el proceso de *picking* de manera manual.

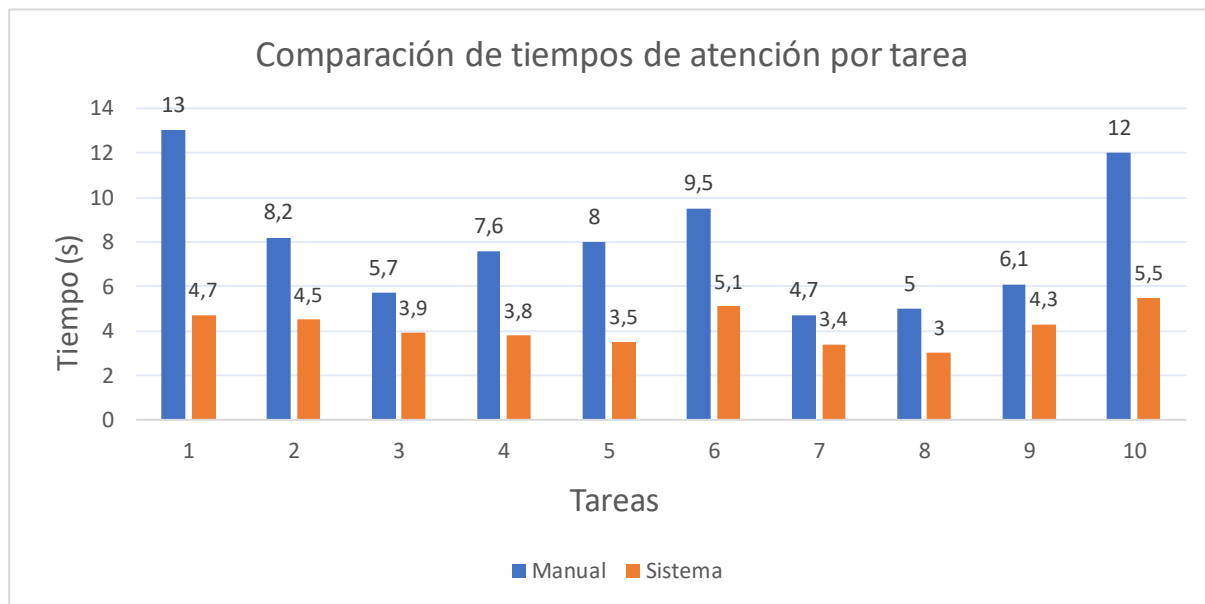


Ilustración 8: Comparación de tiempos de atención por tarea
Fuente: Elaboración propia

5. CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El presente trabajo de titulación aborda una problemática persistente en ferreterías donde el proceso de *picking* se realiza de manera manual, teniendo una ineficiencia logística y una tasa de errores causados por el factor humano. En base a lo anterior se propone una solución que mitigue las problemáticas y facilite este proceso.

Luego de la validación se concluye que el objetivo general planteado se cumplió satisfactoriamente, la solución tecnológica planteada que se basa en el uso de un microcontrolador ESP32 junto con la señalización visual, demostró ser beneficiosa para el vendedor evitando que este dependa de su conocimiento o memoria y disminuyendo la carga cognitiva relacionada a la búsqueda de productos.

Respecto a los objetivos específicos y los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los resultados de la evaluación piloto en un entorno simulado permiten confirmar que quitar la búsqueda visual y lectura de etiquetas en los estantes disminuye un 48% los tiempos promedio de atención por tarea, agilizando el proceso de *picking* lo cual demuestra que el sistema mantiene una eficiencia operativa superior al método manual.
- El uso del sistema dejó en evidencia que el método manual presenta errores (con una tasa de errores igual al 30%) principalmente por la similitud visual entre los productos de la misma categoría, lo cual al ser sustituido por una señalización visual se redujo a 0% en el entorno evaluado, lo que sugiere que la señalización visual elimina la ambigüedad visual entre los productos similares.
- El usar el microcontrolador ESP32 con un *backend* embebido, actuando de servidor web autónomo y controlador a la vez fue un éxito, ya que este soportó la carga de la interfaz web y el manejo de la tira LED sin una latencia perceptible. Lo cual confirma que para ferreterías medianas no se necesitaría invertir en una infraestructura con servidores dedicados para su manejo.

- Ya que se usó API REST sobre HTTP cualquier dispositivo con un navegador web y dentro de la misma red puede actuar como terminal de control para el sistema, sin necesidad de una compleja configuración previa, facilitando su integración y reduciendo significativamente las barreras de entrada para adoptar esta tecnología por parte de personal no experto o con poca familiarización con la tecnología.

5.1. LIMITACIONES E IDEAS A FUTURO:

1. Integración con sistema de venta (POS):

Actualmente el inventario del sistema se almacena de manera independiente, considerando que, si una ferretería trabajase con una base de datos de ventas, se podría desarrollar una API que sincronice el stock con el sistema *Pick-to-Light* automatizando la actualización de productos.

2. Escalabilidad física:

El prototipo actual está limitado a manejar solamente 10 casilleros. Para este proyecto el microcontrolador ESP32 tiene la capacidad de direccionar lógicamente una gran cantidad de LEDs, sin embargo, implementar esto donde un solo microcontrolador mantenga estas conexiones de manera física en una ferretería generaría problemas de cableado y caídas de voltaje a lo largo de la tira.

En base a lo anterior, se plantea una arquitectura que permita un escalamiento horizontal, aumentando la cantidad de microcontroladores en vez de necesitar dispositivos con una mayor capacidad de procesamiento, manteniendo así un sistema con distintos nodos distribuidos para cumplir con los requerimientos.

3. Entorno industrial:

Para llevar este sistema a un entorno real de ferretería, con polvo, vibraciones y un uso constante, se debería diseñar o adquirir una carcasa de protección para el ESP32 y las conexiones de las tiras LED asegurando su correcto funcionamiento y resguardando la integridad física de los componentes. Así se garantiza que el reemplazo de algún componente sea únicamente dado por el cumplimiento de su vida útil operativa, y no por fallas tempranas causadas por el entorno donde se mantiene.

4. Gestión de multiusuarios:

El diseño actual del prototipo está planteado bajo una lógica de atención para un vendedor, donde este realiza la búsqueda de un producto por atención. Dado que una ferretería real comúnmente mantiene múltiples vendedores que atienden, en ocasiones, de manera simultánea es necesario que el sistema pueda ser usado concurrentemente, integrando a futuro un sistema de identificación por colores (un color de LED específico por vendedor) para así permitir que varios vendedores realicen el proceso de *picking* sin generar conflictos visuales ni de operación.

5. Tamaño de muestra:

La evaluación se realizó con una muestra de 2 participantes bajo un enfoque de prueba de concepto, cuyo objetivo fue validar principalmente la viabilidad técnica del sistema, pero no es estadísticamente representativo para generalizar los resultados a cualquier tipo de ferretería.

Para una validación más robusta, donde los datos puedan ser tomados de manera estadísticamente representativa, lo ideal sería escalar la evaluación piloto con una muestra más amplia de participantes y productos.

Como se ha evidenciado a lo largo de este documento, este proyecto demuestra de manera empírica que la eficiencia logística no es exclusiva de los grandes centros de distribución. La solución propuesta demuestra que, mediante la integración de tecnologías accesibles, como lo es *IoT* y microcontroladores, se puede optimizar el proceso de *picking* en ferreterías que realicen este proceso de manera manual, brindando una solución real para modernizar el área, convirtiendo este proceso propenso a errores y demoras en una operación más rápida y exacta.

Además, dada su escalabilidad y bajo costo de implementación de la arquitectura, es posible concluir que el sistema podría integrarse en otros contextos de negocio donde se necesite agilizar su gestión manual en el proceso de *picking*, tales como en farmacias o en la venta de repuestos automotrices, por ejemplo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Łopuszyński, K. Janusz y D. Karwat, «Comparative Study of Selected Order-Picking Methods: Efficiency, Ergonomics, and Adaptation Rate of New Employees,» *Sensors*, vol. 25, nº 3, 2025.
- [2] G. Casella, A. Volpi, R. Montanari, L. Tebaldi y E. Bottani, «Trends in order picking: a 2007–2022 review of the literature,» *Production & Manufacturing Research*, vol. 11, nº 1, 2023.
- [3] Kardex Remstar, «Kardex,» 2024. [En línea]. Available: <https://info.kardex-remstar.com/knowledge/kardex-color-pick-system>.
- [4] SD Works, «Sistemas Put to Light y Pick to Light,» 2026. [En línea]. Available: <https://sdworks.cl/sistemas-pick-put-to-light/>. [Último acceso: 04 06 2026].
- [5] Pcddata Logistics Automation, «Case Studies: Castaño,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.pcddata-logistics.com/case-studies/castano/>. [Último acceso: 04 06 2026].
- [6] Pcddata Logistics Automation, «Case Studies: ASSA ABLOY,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.pcddata-logistics.com/case-studies/assa-abloy/>. [Último acceso: 04 06 2026].
- [7] Kenso Circuits, «Comparativa: ESP32 vs STM32 vs Raspberry Pi Pico (¿Cuál Elegir?),» 2024. [En línea]. Available: <https://kensocircuits.com/archivos/comparativa-esp32-vs-stm32-vs-raspberry-pi-pico-cual-elegir/>.
- [8] Shenzhen Ledodm Lighting Co., Ltd., «Guía para la tira de luz LED WS2812B,» 10 01 2021. [En línea]. Available: <https://www.ledodm.com/es/Guide-for-WS2812B-LED-Strip-Light-id66933897.html>.
- [9] A. J. Agama Chico, J. F. Saa Ayala, E. G. Baldeón Navarrete y O. A. Bajaña Ortiz, «Servidor Web local con Autenticación y Administración de Usuarios basado en ESP32 para Viviendas Inteligentes,» *JOURNAL OF SCIENCE AND RESEARCH*, 2023.
- [10] R. T. Fielding, «Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures,» Univ. of California, Irvine, Irvine, CA, 2000.

7. ANEXOS

Anexo A: Fuentes de ilustraciones

Ilustración 1 Picking manual.

Recuperado de <https://www.ar-racking.com/pe/blog/tipos-de-picking-en-un-almacen-fases-y-claves-para-optimizarlo/>

Anexo B: Repositorio digital

El código fuente usado para el proyecto, que se sube dentro del microcontrolador ESP32, se dispone a continuación.

<https://github.com/MVClaudio/pick-to-light-ferreteria>

A continuación, se detalla la estructura de datos usada en el ESP32.

```
struct Producto {  
    String sku;  
    String nombre;  
    String medida;  
    int casillero;  
    int led_inicio;  
};
```

```
Producto inventario [10] = {  
    {"TORN-001", "Tornillo Roscalata", "1/4 x 2 pulgadas", 1, 0},  
    {"TORN-002", "Tornillo Roscalata", "1/4 x 2.5 pulgadas", 2, 3},  
    {"TORN-003", "Tornillo Roscalata", "5/16 x 2 pulgadas", 3, 6},  
    {"TORN-004", "Tornillo Volcanita", "6x1 5/8 pulgadas", 4, 9},  
    {"TORN-005", "Tornillo Volcanita", "6x2 pulgadas", 5, 12},  
    {"CLAV-001", "Clavo Acero", "2 pulgadas", 6, 15},  
    {"CLAV-002", "Clavo Acero", "3 pulgadas", 7, 18},  
    {"CLAV-003", "Clavo Acero", "4 pulgadas", 8, 21},  
    {"TUER-001", "Tuerca Hexagonal", "1/4 pulgadas", 9, 24},  
    {"TUER-002", "Tuerca Hexagonal", "3/8 pulgadas", 10, 27}  
};
```