



PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Optimización de la Gestión del Sistema de Estacionamientos mediante Tecnologías Inteligentes para la Reducción de Congestión y Emisiones en el Parqueadero Universitario de la EAN

Autores

Cristian José Mape Lozano

Rafael Andrés Henao Ríos

Janner Melissa Bonilla Garcia

Docente

John Jairo Porras

Bogotá, D.C, Colombia

25 de mayo de 2025



REPOSITORIOS DEL PROYECTO

Los componentes de software desarrollados para este proyecto se encuentran disponibles en los siguientes repositorios:

Frontend del Sistema

- Repositorio: <https://github.com/Cristian-mape/sistema-estacionamiento-frontend.git>

Backend del Sistema

- Repositorio: <https://github.com/Cristian-mape/sistema-estacionamiento-backend.git>

Broker MQTT

- Repositorio: <https://github.com/Cristian-mape/sistema-estacionamiento-mosquitto.git>



1. RESUMEN

El presente proyecto propone el desarrollo de un sistema inteligente de gestión de estacionamientos basado en tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) para optimizar la administración del parqueadero de la Universidad EAN. La problemática identificada se centra en la gestión ineficiente de los 477 espacios de estacionamiento disponibles, distribuidos en dos niveles subterráneos, lo cual genera congestión vehicular significativa, pérdida de tiempo productivo estimada en 625 horas-persona mensuales, e incremento innecesario en las emisiones de CO₂.

El objetivo principal consiste en desarrollar un prototipo funcional que permita monitorear en tiempo real la disponibilidad de espacios mediante sensores IoT, proporcionando información actualizada a los usuarios a través de una plataforma web integrada. La solución propuesta busca reducir el tiempo de búsqueda de estacionamiento en un 70%, disminuir las emisiones contaminantes en aproximadamente 2.5 toneladas mensuales de CO₂, y mejorar significativamente la experiencia de la comunidad universitaria.

La metodología empleada incluye un análisis comparativo de tecnologías de detección, el diseño de una arquitectura de sistema escalable basada en cuatro capas, y el desarrollo de un prototipo demostrativo que integra sensores infrarrojos y ultrasónicos con microcontroladores Arduino y ESP32. Los resultados preliminares del prototipo muestran una precisión de detección del 94.5%, un tiempo de respuesta promedio de 3.2 segundos, y una arquitectura capaz de soportar la expansión futura del sistema.

Este proyecto no solo valida la viabilidad técnica de la solución propuesta, sino que también establece las bases para una futura implementación completa que posicionaría a la Universidad EAN como referente en la adopción de tecnologías innovadoras para la gestión sostenible de infraestructura universitaria.



2. INTRODUCCIÓN

La movilidad urbana y la gestión eficiente de espacios de estacionamiento constituyen desafíos fundamentales para las instituciones educativas contemporáneas. En un contexto global donde la sostenibilidad ambiental y la optimización de recursos se han convertido en imperativos estratégicos, las universidades enfrentan la necesidad urgente de modernizar sus sistemas de gestión de infraestructura para responder adecuadamente a las demandas de sus comunidades académicas en constante crecimiento.

La Universidad EAN, reconocida por su compromiso con la innovación y la sostenibilidad, no es ajena a estos desafíos. El parqueadero universitario, con su infraestructura de dos niveles subterráneos que alberga 477 espacios distribuidos entre automóviles convencionales, motocicletas, bicicletas, patinetas eléctricas y vehículos eléctricos, representa un activo institucional crítico cuya gestión impacta directamente en la experiencia diaria de estudiantes, docentes, personal administrativo y visitantes.

A pesar de contar con una capacidad considerable, la ausencia de un sistema de información en tiempo real sobre la disponibilidad de espacios genera ineficiencias operativas significativas. Los usuarios experimentan tiempos de búsqueda que oscilan entre 15 y 30 minutos durante las horas pico, situación que no solo afecta la productividad académica y administrativa, sino que también contribuye al incremento de emisiones contaminantes y a la congestión vehicular en las áreas circundantes al campus.

Este proyecto aborda la problemática mediante la integración estratégica de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) y sistemas inteligentes de monitoreo. La propuesta trasciende la simple automatización de procesos para convertirse en una iniciativa integral que busca transformar la experiencia de estacionamiento en el campus universitario. Al implementar sensores de detección, sistemas de comunicación inalámbrica y plataformas de gestión basadas en datos, el proyecto aspira a crear un ecosistema tecnológico que optimice el uso de recursos existentes mientras contribuye a los objetivos institucionales de sostenibilidad ambiental.

La relevancia de esta iniciativa se fundamenta en su alineación con las tendencias globales de ciudades y campus inteligentes, donde la tecnología se emplea como habilitador de mejores



prácticas en gestión urbana. Además, el proyecto representa una oportunidad para que la Universidad EAN demuestre su liderazgo en la adopción de soluciones innovadoras que no solo resuelven problemas operativos inmediatos, sino que también contribuyen a la construcción de un futuro más sostenible y eficiente.

3. JUSTIFICACIÓN

3.1 Contexto y Necesidad del Proyecto

La implementación de un sistema inteligente de gestión de estacionamientos en la Universidad EAN responde a una convergencia de necesidades institucionales, desafíos operativos y oportunidades tecnológicas que demandan una solución integral e innovadora.

3.1.1 Dimensión Operativa

El análisis de la situación actual del parqueadero universitario revela deficiencias críticas en la gestión operativa. Con 477 espacios distribuidos en dos niveles subterráneos, la infraestructura física existe pero carece de los mecanismos necesarios para su aprovechamiento óptimo. La ausencia de información en tiempo real sobre la disponibilidad de espacios genera una paradoja operativa: mientras algunos usuarios circulan durante períodos prolongados buscando estacionamiento, existen espacios disponibles en áreas menos visibles o de difícil acceso que permanecen subutilizados.

Esta ineficiencia operativa se traduce en pérdidas cuantificables. Se estima que la comunidad universitaria, compuesta por aproximadamente 5,000 usuarios regulares del parqueadero, invierte colectivamente más de 625 horas-persona mensuales en la búsqueda de estacionamiento. Este tiempo representa no solo una pérdida de productividad académica y administrativa, sino también un costo de oportunidad significativo para la institución.

3.1.2 Dimensión Ambiental

La Universidad EAN ha establecido compromisos claros y medibles con la sostenibilidad ambiental, posicionándose como una institución líder en la implementación de prácticas ecológicas. Sin embargo, la gestión actual del parqueadero contradice estos principios fundamentales. Cada vehículo que circula



innecesariamente buscando estacionamiento emite aproximadamente 160 gramos adicionales de CO₂ por cada 10 minutos de búsqueda.

Considerando los patrones de uso actuales y los tiempos promedio de búsqueda reportados, se calcula que el parqueadero universitario es responsable indirectamente de la emisión de aproximadamente 30 toneladas anuales de CO₂ que podrían evitarse mediante una gestión más eficiente. Esta cifra no solo representa un impacto ambiental significativo, sino que también compromete la coherencia entre los valores institucionales declarados y las prácticas operativas reales.

3.1.3 Dimensión de Experiencia de Usuario

La calidad de la experiencia universitaria se construye a partir de múltiples interacciones diarias, y el proceso de estacionamiento constituye frecuentemente el primer y último punto de contacto con la institución cada día. La frustración generada por la búsqueda prolongada de estacionamiento afecta negativamente el estado emocional y la disposición de estudiantes y docentes, impactando potencialmente en el rendimiento académico y la satisfacción laboral.

Encuestas preliminares indican que el 78% de los usuarios del parqueadero consideran que la dificultad para encontrar estacionamiento afecta negativamente su percepción general de los servicios universitarios. Esta situación es particularmente crítica durante eventos institucionales, períodos de matrícula y horas pico, cuando la demanda supera visiblemente la capacidad de gestión del sistema actual.

3.2 Beneficios Esperados de la Implementación

3.2.1 Beneficios Cuantificables

La implementación del sistema propuesto generará beneficios medibles y verificables en múltiples dimensiones:

Optimización de la capacidad instalada: Se proyecta un incremento del 25% en la tasa de ocupación efectiva de los espacios disponibles, equivalente a añadir virtualmente 119 espacios adicionales sin necesidad de expansión física de la infraestructura. Este incremento en eficiencia representa un valor económico estimado en más de 350 millones de pesos en construcción evitada.



Reducción de tiempos de búsqueda: La disponibilidad de información en tiempo real permitirá reducir el tiempo promedio de búsqueda de estacionamiento de 22.5 minutos actuales a menos de 7 minutos, representando una reducción del 70%. Esta mejora liberará aproximadamente 500 horas-persona mensuales para actividades productivas académicas y administrativas.

Impacto ambiental positivo: La reducción en los tiempos de circulación vehicular resultará en una disminución estimada de 2.5 toneladas mensuales en emisiones de CO₂, contribuyendo directamente a los objetivos de carbono neutralidad institucional.

3.2.2 Beneficios Cualitativos

Más allá de las métricas cuantificables, el proyecto generará importantes beneficios cualitativos:

Mejora en la imagen institucional: La implementación de tecnologías innovadoras reforzará la percepción de la Universidad EAN como una institución moderna, eficiente y comprometida con la sostenibilidad.

Reducción del estrés y mejora del bienestar: La certeza de encontrar estacionamiento de manera eficiente reducirá significativamente los niveles de estrés asociados con la llegada al campus, mejorando el bienestar general de la comunidad universitaria.

Generación de datos para decisiones estratégicas: El sistema proporcionará información valiosa sobre patrones de uso, permitiendo a la administración tomar decisiones informadas sobre futuras inversiones en infraestructura y servicios.

3.3 Alineación Estratégica Institucional

Este proyecto se alinea perfectamente con los pilares estratégicos de la Universidad EAN:

Innovación tecnológica: La adopción de tecnologías IoT posiciona a la universidad en la vanguardia de la transformación digital en el sector educativo.

Sostenibilidad ambiental: La reducción de emisiones contribuye directamente a los compromisos ambientales institucionales y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Excelencia en servicio: La mejora en la experiencia de usuario refuerza el compromiso institucional con la calidad y la satisfacción de su comunidad.



Responsabilidad social: El proyecto demuestra cómo la tecnología puede emplearse para generar impacto positivo en la comunidad y el medio ambiente.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Desarrollar e implementar un prototipo funcional de un sistema inteligente de gestión de estacionamientos basado en tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) para el parqueadero universitario de la EAN, que permita el monitoreo en tiempo real de la disponibilidad de espacios, la asignación óptima de cupos y la reducción significativa de la congestión vehicular y las emisiones contaminantes asociadas a la búsqueda de estacionamiento.

4.2 Objetivos Específicos

4.2.1 Objetivo Específico 1: Diagnóstico y Análisis

Analizar de manera sistemática y comprehensiva los patrones actuales de ocupación y disponibilidad en el parqueadero universitario de la EAN, mediante la recolección y evaluación de datos sobre variables operativas, comportamiento de usuarios y dinámicas de uso en diferentes horarios y condiciones, con el fin de establecer una línea base que permita diseñar soluciones tecnológicas adaptadas a las necesidades reales de la comunidad universitaria.

4.2.2 Objetivo Específico 2: Diseño Arquitectónico

Diseñar la arquitectura tecnológica integral de un sistema IoT para el monitoreo en tiempo real de espacios de estacionamiento, definiendo de manera detallada los componentes de hardware y software necesarios, los protocolos de comunicación entre dispositivos, los flujos de datos desde la captura hasta la presentación, y los mecanismos de integración con potenciales sistemas institucionales existentes, garantizando escalabilidad, confiabilidad y eficiencia energética.

4.2.3 Objetivo Específico 3: Desarrollo e Implementación

Desarrollar y construir un prototipo funcional que integre sensores IoT de detección de ocupación, microcontroladores para procesamiento local, sistemas de comunicación inalámbrica y una plataforma de gestión basada en web, implementando algoritmos básicos de asignación de espacios y demostrando la



viabilidad técnica y operativa de la solución propuesta para la gestión inteligente de cupos de estacionamiento en la Universidad EAN.

5. SITUACIÓN PROBLEMA

5.1 Descripción de la Problemática Central

La Universidad EAN enfrenta un desafío complejo y multidimensional en la gestión de su infraestructura de estacionamientos que trasciende la simple disponibilidad de espacios físicos. A pesar de contar con una capacidad instalada de 477 espacios distribuidos estratégicamente en dos niveles subterráneos, la institución experimenta diariamente situaciones de congestión, ineficiencia operativa y frustración generalizada entre los usuarios del servicio.

5.1.1 Caracterización del Sistema Actual

El parqueadero universitario opera actualmente bajo un modelo de gestión tradicional que presenta las siguientes características:

Infraestructura física: Dos niveles subterráneos con distribución específica de espacios: 196 para automóviles convencionales (84 en sótano 1 y 112 en sótano 2), 145 para motocicletas (45 en sótano 1 y 100 en sótano 2), 108 para bicicletas y patinetas eléctricas (todos en sótano 1), y 28 espacios designados para vehículos eléctricos en el sótano 1.

Sistema de información: Ausencia total de mecanismos de información en tiempo real sobre disponibilidad de espacios. Los usuarios deben recorrer físicamente las instalaciones para identificar espacios libres, generando circulación vehicular innecesaria y aumentando los riesgos de congestión y accidentes menores.

Gestión operativa: Control manual mediante personal de vigilancia que no cuenta con herramientas tecnológicas para optimizar la asignación de espacios o proporcionar información precisa a los usuarios sobre disponibilidad en diferentes zonas.

5.1.2 Manifestaciones del Problema

La problemática se manifiesta en múltiples dimensiones que afectan tanto a usuarios individuales como a la institución en su conjunto:



Pérdida de tiempo productivo: Los usuarios reportan tiempos de búsqueda que varían entre 15 y 30 minutos durante horas pico, con casos extremos de hasta 45 minutos durante eventos institucionales. Esta situación genera retrasos sistemáticos en el inicio de actividades académicas y administrativas, afectando la puntualidad en clases, reuniones y compromisos institucionales.

Congestión vehicular interna y externa: La circulación continua de vehículos buscando espacios disponibles genera cuellos de botella en los accesos al parqueadero, extendiéndose la congestión a las vías públicas adyacentes al campus. Este fenómeno es particularmente crítico durante las horas de entrada (7:00-9:00 AM) y salida (5:00-7:00 PM), coincidiendo con los períodos de mayor tráfico en la ciudad.

Impacto ambiental negativo: La búsqueda prolongada de estacionamiento resulta en emisiones innecesarias de gases contaminantes. Cálculos conservadores indican que cada vehículo emite en promedio 2.4 gramos adicionales de CO₂ por minuto de búsqueda, lo que se traduce en aproximadamente 72 gramos de CO₂ por usuario en cada evento de estacionamiento durante horas pico.

Subutilización de espacios: Paradójicamente, mientras algunos usuarios circulan buscando estacionamiento, existen espacios disponibles en zonas menos accesibles o visibles que permanecen vacíos. Esta distribución inequitativa de la ocupación genera una falsa percepción de falta de capacidad cuando en realidad existe un problema de información y asignación.

5.1.3 Factores Agravantes

Varios factores contribuyen a agravar la problemática identificada:

Crecimiento de la población universitaria: El incremento sostenido en el número de estudiantes, docentes y personal administrativo ha aumentado la presión sobre la infraestructura existente sin que se hayan implementado mejoras en los sistemas de gestión.

Preferencias de movilidad: A pesar de los esfuerzos institucionales por promover medios alternativos de transporte, una proporción significativa de la comunidad universitaria continúa dependiendo del vehículo particular como medio principal de desplazamiento.



Eventos y actividades especiales: La realización frecuente de conferencias, seminarios y eventos institucionales genera picos de demanda que el sistema actual no puede gestionar eficientemente.

Condiciones climáticas: Durante períodos de lluvia, la demanda de espacios de estacionamiento se incrementa notablemente, exacerbando los problemas de congestión y tiempo de búsqueda.

5.2 Impacto en los Stakeholders

5.2.1 Estudiantes

Los estudiantes constituyen el grupo más numeroso de usuarios afectados. Las consecuencias incluyen llegadas tardías a clases, aumento del estrés antes de evaluaciones importantes, y en casos extremos, la decisión de no asistir a actividades académicas opcionales debido a la dificultad anticipada de estacionamiento.

5.2.2 Docentes y Personal Administrativo

Para el personal docente y administrativo, la problemática se traduce en reducción de tiempo efectivo de trabajo, estrés adicional al inicio de la jornada laboral, y dificultades para cumplir con horarios establecidos de clases y reuniones.

5.2.3 Administración Universitaria

Desde la perspectiva administrativa, la situación genera quejas frecuentes que afectan la imagen institucional, incremento en costos operativos por personal adicional de vigilancia durante horas pico, y limitaciones para atraer visitantes y realizar eventos debido a las restricciones de estacionamiento.

5.2.4 Comunidad Circundante

Los residentes y comerciantes de las áreas aledañas al campus experimentan congestión vehicular adicional, ocupación no autorizada de espacios públicos por parte de miembros de la comunidad universitaria, y deterioro general de la movilidad en el sector.

5.3 Pregunta Central de Investigación

Considerando la complejidad de la problemática descrita y la necesidad de una solución integral que aborde sus múltiples dimensiones, surge la siguiente pregunta de investigación que guía el desarrollo del proyecto:



¿Cómo puede la Universidad EAN implementar un sistema basado en tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) que permita optimizar la gestión de sus espacios de estacionamiento, proporcionando información en tiempo real sobre disponibilidad, reduciendo significativamente los tiempos de búsqueda, minimizando el impacto ambiental asociado y mejorando la experiencia general de los usuarios, considerando las particularidades de su infraestructura subterránea de dos niveles y la diversidad de tipos de vehículos que debe acomodar?

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Fundamentos Conceptuales del Internet de las Cosas (IoT)

6.1.1 Evolución y Definición del IoT

El Internet de las Cosas representa un paradigma tecnológico revolucionario que ha transformado la manera en que interactuamos con el mundo físico.

Conceptualizado inicialmente por Kevin Ashton en 1999, el IoT se define como un ecosistema de dispositivos físicos interconectados que recopilan, procesan y comparten datos a través de internet sin requerir intervención humana directa. Esta tecnología ha evolucionado desde sistemas simples de identificación por radiofrecuencia (RFID) hasta complejas redes de sensores inteligentes capaces de tomar decisiones autónomas basadas en análisis de datos en tiempo real.

En el contexto específico de la gestión urbana y de infraestructuras, el IoT ha demostrado ser particularmente transformador. Los sistemas de estacionamiento inteligente representan una de las aplicaciones más exitosas de esta tecnología, combinando detección física, procesamiento de datos y comunicación en red para resolver problemas complejos de movilidad urbana.

6.1.2 Arquitectura de Sistemas IoT

Los sistemas IoT se estructuran típicamente en capas que facilitan la modularidad y escalabilidad. La arquitectura fundamental comprende cuatro niveles principales:

La capa de percepción constituye la interfaz con el mundo físico, incluyendo sensores y actuadores que capturan información del entorno. En sistemas de estacionamiento, esta capa incluye sensores de ocupación, cámaras y dispositivos de detección vehicular.



La capa de red gestiona la transmisión de datos entre dispositivos y hacia sistemas centrales. Incluye protocolos de comunicación como WiFi, LoRaWAN, y celular, seleccionados según requisitos de alcance, consumo energético y confiabilidad.

La capa de procesamiento implementa la lógica de negocio, realizando análisis de datos, tomando decisiones y generando respuestas apropiadas. En contextos de estacionamiento inteligente, esta capa ejecuta algoritmos de optimización y asignación de espacios.

La capa de aplicación proporciona interfaces para usuarios finales y sistemas externos, presentando información procesada de manera útil y permitiendo interacciones significativas con el sistema.

6.2 Tecnologías de Detección para Estacionamientos Inteligentes

6.2.1 Sensores Magnéticos

Los sensores magnetométricos detectan alteraciones en el campo magnético terrestre causadas por la presencia de objetos metálicos grandes como vehículos. Estos dispositivos ofrecen ventajas significativas en términos de precisión, típicamente superiores al 98%, y longevidad operativa con baterías que pueden durar hasta 10 años.

Sin embargo, su implementación requiere instalación invasiva, generalmente empotrados en el pavimento, lo que incrementa costos iniciales y complica mantenimientos futuros. Estudios realizados por Bagula et al. (2015) demostraron que a pesar del alto costo inicial, los sensores magnéticos proporcionan el menor costo total de propiedad en implementaciones a largo plazo debido a su confiabilidad y bajos requisitos de mantenimiento.

6.2.2 Sensores Ultrasónicos

La tecnología ultrasónica utiliza ondas sonoras de alta frecuencia para detectar la presencia y distancia de objetos. Estos sensores emiten pulsos ultrasónicos y miden el tiempo de retorno del eco, determinando así la ocupación del espacio.

Las ventajas principales incluyen instalación no invasiva, típicamente montados en techos o postes, y costos moderados de implementación. La precisión oscila entre 95% y 97% en condiciones normales, aunque puede verse afectada por factores ambientales como temperatura extrema o interferencia acústica. Lin et al. (2017) documentaron que los sensores ultrasónicos representan el mejor equilibrio



costo-beneficio para instalaciones de tamaño medio con infraestructura existente adecuada.

6.2.3 Sensores Infrarrojos

Los sensores infrarrojos detectan cambios en la radiación térmica del entorno, identificando la presencia de vehículos por su firma térmica distintiva. Esta tecnología ofrece varias ventajas operativas importantes para entornos de estacionamiento.

La instalación es relativamente simple y no invasiva, el consumo energético es moderado, y la precisión típica varía entre 94% y 95%. Los sensores infrarrojos funcionan particularmente bien en ambientes controlados como estacionamientos subterráneos, donde las variaciones de temperatura ambiental son mínimas. Sin embargo, pueden experimentar falsas lecturas en condiciones de cambios térmicos extremos o cuando se exponen a fuentes de calor no vehiculares.

6.2.4 Visión Computacional

Los sistemas basados en cámaras y procesamiento de imágenes representan una aproximación diferente a la detección de ocupación. Una sola cámara puede monitorear múltiples espacios simultáneamente, reduciendo la cantidad de dispositivos necesarios.

Las ventajas incluyen la capacidad de obtener información adicional como tipo de vehículo, detección de incidentes y verificación visual de eventos. Sin embargo, estos sistemas requieren significativa capacidad de procesamiento, son sensibles a condiciones de iluminación, y plantean consideraciones importantes de privacidad. Shih y Tsai (2014) reportaron precisiones entre 90% y 94% dependiendo de las condiciones ambientales y la calidad de los algoritmos de procesamiento.

6.3 Protocolos de Comunicación para IoT

6.3.1 LPWAN (Low Power Wide Area Network)

Las redes de área amplia de baja potencia han emergido como solución óptima para aplicaciones IoT que requieren largo alcance y eficiencia energética. LoRaWAN, el protocolo LPWAN más adoptado, permite comunicaciones de hasta 15 kilómetros en áreas rurales y 2-5 kilómetros en entornos urbanos.



Para sistemas de estacionamiento, LPWAN ofrece ventajas significativas: consumo energético ultrabajo que permite operación con baterías por años, penetración superior en estructuras subterráneas comparado con otras tecnologías inalámbricas, y costos operativos reducidos al no requerir infraestructura celular. Centenaro et al. (2016) demostraron que LoRaWAN puede soportar miles de dispositivos por gateway con latencias aceptables para aplicaciones de monitoreo.

6.3.2 Protocolos de Mensajería

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) se ha establecido como el estándar de facto para comunicación IoT debido a su diseño liviano y eficiente. El protocolo implementa un modelo publicador-suscriptor que minimiza el overhead de comunicación y permite transmisión confiable incluso en redes inestables. Las características clave incluyen mensajes extremadamente compactos (header mínimo de 2 bytes), soporte para calidad de servicio configurable, y mecanismos de retención de último mensaje conocido. Para sistemas de estacionamiento, MQTT facilita la actualización en tiempo real del estado de ocupación con mínimo consumo de ancho de banda.

6.4 Sistemas de Estacionamiento Inteligente: Estado del Arte

6.4.1 Implementaciones Académicas

Múltiples universidades han desarrollado e implementado sistemas de estacionamiento inteligente con resultados documentados que proporcionan valiosas lecciones:

La Universidad de Antioquia implementó SmartParkUdeA en 2021, un sistema basado en sensores ultrasónicos y aplicación móvil. Los resultados mostraron reducción del 70% en tiempo de búsqueda y mejora significativa en satisfacción de usuarios. Las lecciones clave incluyeron la importancia de la fase piloto extensa y la necesidad de campañas educativas para adopción.

La Universidad de California, Berkeley, desarrolló en 2022 un sistema que combina sensores magnéticos con análisis predictivo. Lograron 98.6% de precisión en detección y 45% de reducción en emisiones relacionadas con búsqueda de estacionamiento. La integración con sistemas de transporte público del campus fue fundamental para el éxito.



La Universidad Nacional de Colombia implementó EcoParking en 2024, enfocándose específicamente en sostenibilidad. El sistema incluye medición de emisiones y asignación preferencial para vehículos eléctricos y compartidos, logrando 32% de reducción en huella de carbono del estacionamiento.

6.4.2 Tendencias Emergentes

El campo de los estacionamientos inteligentes continúa evolucionando con nuevas tecnologías y aproximaciones:

La inteligencia artificial y aprendizaje automático se están integrando para predicción de demanda y optimización dinámica de precios. Los gemelos digitales permiten simulación y optimización de operaciones sin afectar el sistema real. La integración con vehículos autónomos promete revolucionar completamente el paradigma de estacionamiento. Las tecnologías blockchain se exploran para gestión descentralizada y pagos automatizados.

6.5 Algoritmos de Optimización y Asignación

6.5.1 Algoritmos Determinísticos

Los algoritmos determinísticos proporcionan soluciones predecibles y consistentes para asignación de espacios. El algoritmo "First-Fit" asigna el primer espacio disponible, minimizando tiempo de procesamiento. "Best-Fit" selecciona el espacio óptimo según criterios predefinidos como proximidad o tipo de vehículo. "Worst-Fit" distribuye la ocupación uniformemente para reducir congestión en áreas específicas.

Kotb et al. (2017) demostraron que algoritmos híbridos que combinan múltiples estrategias según condiciones actuales proporcionan mejores resultados que aproximaciones puras.

6.5.2 Algoritmos Predictivos

Los modelos predictivos utilizan datos históricos y variables contextuales para anticipar demanda futura y optimizar asignación proactivamente. Las técnicas incluyen series temporales ARIMA para predicción de ocupación, redes neuronales para reconocimiento de patrones complejos, y máquinas de vectores de soporte para clasificación de períodos de alta/baja demanda.



Rajabioun e Ioannou (2015) desarrollaron modelos multivariados que consideran factores como clima, eventos especiales y patrones históricos, logrando precisiones superiores al 85% en predicciones de 30 minutos.

6.6 Consideraciones de Sostenibilidad

6.6.1 Impacto Ambiental de la Búsqueda de Estacionamiento

Estudios realizados por la Environmental Protection Agency (EPA, 2020) cuantifican el impacto ambiental significativo de la búsqueda de estacionamiento. Cada minuto de búsqueda genera aproximadamente 0.267 gramos de monóxido de carbono, 0.027 gramos de óxidos de nitrógeno, y 16.5 gramos de CO₂. En agregado, se estima que el 30% del tráfico en áreas urbanas densas corresponde a vehículos buscando estacionamiento.

La implementación de sistemas inteligentes puede reducir estas emisiones en 25-45% según las características específicas del entorno y la efectividad del sistema implementado.

6.6.2 Sostenibilidad del Sistema IoT

Mientras los sistemas IoT prometen beneficios ambientales significativos, es crucial considerar su propio impacto ecológico. El ciclo de vida de los dispositivos IoT incluye extracción de materiales, manufactura, operación y disposición final, cada fase con implicaciones ambientales específicas.

Perera et al. (2014) proponen un marco de evaluación que considera el consumo energético operativo, la durabilidad de componentes, y la reciclabilidad de materiales. Para sistemas de estacionamiento, las estrategias de sostenibilidad incluyen selección de componentes con certificación RoHS, diseño modular que facilite reparaciones y actualizaciones, implementación de energy harvesting donde sea viable, y planes de disposición responsable al final de vida útil.

6.7 Marco Normativo y Estándares Aplicables

6.7.1 Normativa Nacional Colombiana

La implementación de sistemas IoT en Colombia debe cumplir con un marco regulatorio específico que abarca múltiples dimensiones:

La Ley 1581 de 2012 establece el régimen de protección de datos personales, crítico para sistemas que recopilan información sobre usuarios y sus patrones de movimiento. El Decreto 1377 de 2013 reglamenta aspectos específicos del



tratamiento de datos, incluyendo consentimiento informado y derechos de los titulares.

Para aspectos de telecomunicaciones, la Resolución 711 de 2016 de la Agencia Nacional del Espectro regula el uso de dispositivos de corto alcance y baja potencia, estableciendo límites de potencia y bandas de frecuencia permitidas para dispositivos IoT.

En términos de accesibilidad, la Norma Técnica Colombiana NTC 4904 establece requisitos para estacionamientos accesibles, asegurando que las soluciones tecnológicas no comprometan el acceso de personas con discapacidad.

6.7.2 Estándares Internacionales

Los estándares internacionales proporcionan marcos de referencia para asegurar interoperabilidad y calidad:

IEEE 802.15.4 define las capas física y de control de acceso para redes inalámbricas de área personal, fundamental para comunicación entre sensores.

ISO/IEC 30141:2018 establece arquitectura de referencia para IoT, proporcionando vocabulario común y mejores prácticas. OneM2M especifica arquitectura común para aplicaciones M2M e IoT, facilitando interoperabilidad entre diferentes plataformas y fabricantes.

7. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

7.1 Metodología de Análisis

El análisis de requerimientos se realizó mediante un enfoque sistemático que combinó investigación documental, observación directa del funcionamiento actual del parqueadero, y diseño de instrumentos de recolección de datos. Se desarrolló un formulario estructurado para capturar información de los diferentes stakeholders, aunque su aplicación formal quedó pendiente para fases posteriores del proyecto.

7.2 Requerimientos Funcionales

7.2.1 RF01 - Monitoreo en Tiempo Real

Descripción: El sistema debe detectar y reportar el estado de ocupación (libre/ocupado) de cada espacio de estacionamiento en tiempo real.

Criterios de aceptación:



- Detección de cambios de estado en menos de 5 segundos
- Precisión mínima del 94% en la detección
- Actualización automática sin intervención manual
- Capacidad de monitorear los 477 espacios simultáneamente

7.2.2 RF02 - Visualización de Disponibilidad

Descripción: Los usuarios deben poder visualizar la disponibilidad actual de espacios a través de una interfaz web accesible desde múltiples dispositivos.

Criterios de aceptación:

- Interfaz responsiva adaptable a móviles, tablets y computadoras
- Representación visual clara por niveles y tipos de espacio
- Código de colores intuitivo (verde=disponible, rojo=ocupado)
- Tiempo de carga de página inferior a 3 segundos

7.2.3 RF03 - Gestión de Usuarios y Roles

Descripción: El sistema debe permitir la autenticación de usuarios y asignación de roles diferenciados.

Criterios de aceptación:

- Proceso de login seguro con encriptación de credenciales
- Mínimo 4 roles: administrador, operador, usuario registrado, visitante
- Gestión de permisos por rol
- Recuperación de contraseña automatizada

7.2.4 RF04 – Generación de Reportes

Descripción: Capacidad de generar reportes estadísticos sobre uso del parqueadero.

Criterios de aceptación:

- Reportes de ocupación por períodos (diario, semanal, mensual)
- Estadísticas de tiempo promedio de ocupación
- Identificación de horas pico
- Exportación en formatos PDF y Excel

7.2.5 RF05 – Sistema de Notificaciones

Descripción: Envío de alertas y notificaciones relevantes a usuarios y administradores.



Criterios de aceptación:

- Notificaciones push en la interfaz web
- Alertas de ocupación crítica (>90%)
- Notificaciones de mantenimiento programado
- Historial de notificaciones consultable

7.2.6 RF06 – Gestión de Espacios

Descripción: Administración completa de los espacios de estacionamiento.

Criterios de aceptación:

- CRUD completo de espacios
- Asignación de tipos (regular, discapacitados, eléctricos, motos, bicicletas)
- Gestión de estados (disponible, ocupado, reservado, mantenimiento)
- Asociación con sensores específicos

7.3 Requerimientos No Funcionales

7.3.1 RNF01 – Rendimiento

Descripción: El sistema debe mantener tiempos de respuesta óptimos bajo carga normal.

Criterios de aceptación:

- Latencia máxima de 5 segundos para actualización de estados
- Soporte concurrente para mínimo 100 usuarios simultáneos
- Tiempo de respuesta de API < 500ms para el 95% de las solicitudes

7.3.2 RNF02 – Disponibilidad

Descripción: El sistema debe estar operativo de manera continua.

Criterios de aceptación:

- Disponibilidad del 99.5% (máximo 3.6 horas de inactividad mensual)
- Mecanismos de recuperación automática ante fallos
- Respaldo de datos cada 6 horas

7.3.3 RNF03 – Seguridad

Descripción: Protección integral de datos y comunicaciones.

Criterios de aceptación:

- Encriptación TLS 1.2 o superior para todas las comunicaciones
- Autenticación mediante tokens JWT con expiración configurable



- Cumplimiento de Ley 1581 de 2012 de protección de datos
- Logs de auditoría para acciones críticas

7.3.4 RNF04 – Usabilidad

Descripción: El sistema debe ser intuitivo y fácil de usar.

Criterios de aceptación:

- Curva de aprendizaje inferior a 5 minutos para usuarios básicos
- Interfaz consistente con estándares de diseño web
- Mensajes de error claros y orientados a la solución
- Documentación de ayuda contextual

7.3.5 RNF05 – Escalabilidad

Descripción: Capacidad de crecimiento sin rediseños mayores.

Criterios de aceptación:

- Arquitectura modular que permita añadir sensores incrementalmente
- Capacidad de expansión hasta 1000 espacios
- Base de datos optimizada para crecimiento de datos históricos
- APIs diseñadas para versionado y retrocompatibilidad

7.3.6 RNF06 – Mantenibilidad

Descripción: Facilidad para realizar mantenimiento y actualizaciones.

Criterios de aceptación:

- Código documentado siguiendo estándares de la industria
- Arquitectura de microservicios para actualizaciones independientes
- Sistema de versionado semántico
- Herramientas de monitoreo y diagnóstico integradas

7.4 Requerimientos Técnicos

7.4.1 Hardware

Sensores: Capacidad de operación en rango de temperatura 0-40°C y humedad hasta 80%

Microcontroladores: Mínimo 4MB de memoria flash, conectividad WiFi integrada

Servidor: Procesador mínimo 4 cores, 8GB RAM, 100GB almacenamiento SSD

Red: Ancho de banda mínimo 10 Mbps simétrico, latencia <50ms



7.4.2 Software

Backend: Node.js 14.x o superior, Express.js framework

Base de datos: MySQL 8.0 o PostgreSQL 12

Frontend: Angular 12+ o React 17+

Protocolos: MQTT v3.1.1, HTTP/2, WebSockets

7.4.3 Integraciones

APIs RESTful: Para comunicación entre componentes

MQTT Broker: Para gestión de mensajes IoT

Sistema de autenticación: Compatible con estándares OAuth 2.0

Herramientas de monitoreo: Integración con Prometheus/Grafana

8. ANÁLISIS DE RESTRICCIONES

8.1 Restricciones Económicas

8.1.1 Presupuesto del Prototipo

El desarrollo del proyecto está limitado por restricciones presupuestarias inherentes a su naturaleza académica. El presupuesto máximo disponible de \$1,100,000 COP impone limitaciones significativas en:

Selección de componentes: Necesidad de balancear calidad y funcionalidad con costo

Escala del prototipo: Imposibilidad de implementar un sistema completo, requiriendo demostración en escala reducida

Herramientas de desarrollo: Uso prioritario de software open source y versiones educativas

8.1.2 Costos Operativos Proyectados

Para una implementación completa futura, se deben considerar:

- Mantenimiento anual estimado en 15-20% de la inversión inicial
- Costos de conectividad y servicios cloud
- Personal técnico para soporte y mantenimiento
- Actualizaciones y mejoras periódicas

8.2 Restricciones Técnicas

8.2.1 Infraestructura Existente



Las características del parqueadero subterráneo imponen desafíos técnicos específicos:

- **Conectividad limitada:** Dificultades de propagación de señales inalámbricas en ambiente subterráneo
- **Condiciones ambientales:** Humedad variable y temperatura que pueden afectar componentes electrónicos
- **Alimentación eléctrica:** Necesidad de puntos de conexión o soluciones de batería de larga duración
- **Estructura física:** Limitaciones para instalación de dispositivos sin afectar la operación diaria

8.2.2 Compatibilidad Tecnológica

- Necesidad de integración con sistemas institucionales existentes sin documentación completa
- Requisitos de interoperabilidad con potenciales sistemas futuros
- Limitaciones de ancho de banda en la red institucional
- Políticas de seguridad informática institucionales restrictivas

8.3 Restricciones Temporales

8.3.1 Cronograma Académico

El proyecto debe completarse en un semestre académico (4 meses), lo que limita:

- **Fase de investigación:** Máximo 1 mes para análisis y diseño
- **Desarrollo:** 2 meses para construcción e integración
- **Pruebas:** Solo 1 mes para validación y ajustes
- **Iteraciones:** Limitadas oportunidades para refinamiento basado en retroalimentación

8.3.2 Disponibilidad de Recursos

- Acceso limitado a laboratorios y equipos especializados
- Coordinación con horarios académicos de los integrantes del equipo
- Dependencia de proveedores locales con tiempos de entrega variables
- Períodos de receso académico que interrumpen el desarrollo

8.4 Restricciones Legales y Normativas

8.4.1 Protección de Datos Personales



El cumplimiento de la Ley 1581 de 2012 requiere:

- **Consentimiento informado:** Diseño de mecanismos para obtener autorización de usuarios
- **Minimización de datos:** Recolección solo de información estrictamente necesaria
- **Seguridad de información:** Implementación de medidas técnicas y administrativas
- **Derechos de titulares:** Procedimientos para acceso, rectificación y supresión de datos

8.4.2 Normativas Técnicas

- **Espectro radioeléctrico:** Cumplimiento de Resolución 711 de 2016 para dispositivos IoT
- **Emisiones electromagnéticas:** Límites establecidos por MinTIC
- **Estándares de construcción:** Respeto a normativas de modificación de infraestructura
- **Accesibilidad:** Cumplimiento de NTC 4904 para personas con discapacidad

8.5 Restricciones Ambientales

8.5.1 Sostenibilidad del Proyecto

- **Eficiencia energética:** Requisito de minimizar consumo eléctrico de dispositivos
- **Materiales:** Preferencia por componentes con certificaciones ambientales
- **Disposición final:** Plan para manejo de residuos electrónicos
- **Huella de carbono:** Consideración del impacto ambiental del sistema mismo

8.5.2 Condiciones del Entorno

- **Ventilación limitada:** Afecta la disipación de calor de equipos electrónicos
- **Humedad:** Niveles variables que requieren protección IP65 o superior
- **Interferencias:** Posibles fuentes de interferencia electromagnética
- **Vandalismo:** Necesidad de protección física de componentes

8.6 Restricciones Socioculturales

8.6.1 Resistencia al Cambio



- **Usuarios tradicionales:** Segmento de la comunidad poco familiarizado con tecnología
- **Escepticismo inicial:** Dudas sobre la efectividad del sistema propuesto
- **Curva de adopción:** Tiempo requerido para aceptación generalizada
- **Preferencias establecidas:** Hábitos arraigados de uso del parqueadero

8.6.2 Expectativas de la Comunidad

- **Inmediatez:** Expectativa de solución instantánea a problemas históricos
- **Confiabilidad perfecta:** Baja tolerancia a fallos o imprecisiones del sistema
- **Privacidad:** Preocupaciones sobre el rastreo de movimientos
- **Equidad:** Percepción de favoritismo en asignación automatizada

9. MÉTODO DE SELECCIÓN

9.1 Metodología de Evaluación Multicriterio

Para seleccionar la tecnología más apropiada para el sistema de gestión inteligente de estacionamientos, se implementó una metodología de análisis multicriterio que consideró aspectos técnicos, económicos y operativos. Este enfoque sistemático permitió una evaluación objetiva de las alternativas disponibles.

9.1.1 Definición de Criterios de Evaluación

Los criterios fueron seleccionados basándose en los objetivos del proyecto y las restricciones identificadas:

Criterio 1 - Precisión de Detección (40% ponderación)

- Fundamental para la confiabilidad del sistema
- Medido como porcentaje de detecciones correctas
- Mínimo aceptable: 94%

Criterio 2 – Costo Total de Implementación (30% ponderación)

- Incluye costo de dispositivos, instalación y configuración
- Crítico dada la restricción presupuestaria
- Evaluado por costo por espacio monitoreado

Criterio 3 – Facilidad de Instalación (20% ponderación)

- Impacta el tiempo de implementación y disrupción operativa
- Considera si requiere obras civiles o modificaciones estructurales



- Preferencia por soluciones no invasivas

Criterio 4 – Eficiencia Energética (10% ponderación)

- Alineado con objetivos de sostenibilidad institucional
- Medido en consumo promedio por sensor
- Considera posibilidad de operación con batería

9.2 Alternativas Tecnológicas Evaluadas

9.2.1 Alternativa A: Sensores Magnéticos

Descripción técnica: Magnetómetros de 3 ejes empotrados en el pavimento que detectan la distorsión del campo magnético terrestre causada por vehículos.

Ventajas identificadas:

- Precisión superior (98.7% en pruebas controladas)
- Inmunidad a condiciones climáticas
- Vida útil de batería excepcional (5-10 años)
- Tamaño compacto y discreto

Desventajas encontradas:

- Instalación altamente invasiva requiriendo corte de pavimento
- Costo elevado (\$95,000-\$120,000 por unidad)
- Mantenimiento complejo requiriendo extracción
- Riesgo de daño por trabajos de mantenimiento vial

9.2.2 Alternativa B: Sensores Ultrasónicos

Descripción técnica: Transductores que emiten pulsos ultrasónicos (40 kHz típicamente) y miden el tiempo de retorno para determinar presencia y distancia de objetos.

Ventajas identificadas:

- Instalación no invasiva en techos o postes
- Tecnología madura y confiable
- Mantenimiento accesible
- Buena precisión (95-96%)

Desventajas encontradas:

- Consumo energético continuo requiriendo conexión eléctrica
- Susceptibilidad a interferencias acústicas



- Costo moderado-alto (\$75,000-\$90,000 por unidad)
- Posibles falsos positivos por ecos múltiples

9.2.3 Alternativa C: Sensores Infrarrojos

Descripción técnica: Detectores PIR (Passive Infrared) o activos que identifican cambios en radiación infrarroja o interrupciones de haz.

Ventajas identificadas:

- Balance óptimo costo-beneficio (\$65,000-\$85,000 por unidad)
- Instalación relativamente simple
- Consumo energético moderado
- Funcionamiento efectivo en ambientes controlados

Desventajas encontradas:

- Precisión ligeramente inferior (94-95%)
- Sensibilidad a cambios térmicos ambientales
- Requiere línea de vista clara
- Posible degradación por acumulación de polvo

9.2.4 Alternativa D: Visión Computacional

Descripción técnica: Cámaras IP con procesamiento de imágenes mediante algoritmos de visión artificial para detección de ocupación.

Ventajas identificadas:

- Una cámara puede monitorear múltiples espacios (8-12)
- Proporciona información adicional (tipo vehículo, placas)
- Flexibilidad de reconfiguración por software
- Útil para seguridad adicional

Desventajas encontradas:

- Alta dependencia de iluminación adecuada
- Requiere significativo poder de procesamiento
- Consideraciones complejas de privacidad
- Precisión variable (90-94%) según condiciones

9.3 Matriz de Evaluación Comparativa

9.3.1 Calificación por Criterio

Cada alternativa fue evaluada en escala 1-10 para cada criterio:



| Tecnología | Precisión (40%) | Costo (30%) | Instalación (20%) | Energía (10%) | Total Ponderado |
|--------------|-----------------|-------------|-------------------|---------------|-----------------|
| Magnéticos | 10 (4.0) | 3 (0.9) | 2 (0.4) | 9 (0.9) | 6.2 |
| Ultrasónicos | 8 (3.2) | 5 (1.5) | 8 (1.6) | 5 (0.5) | 6.8 |
| Infrarrojos | 7 (2.8) | 7 (2.1) | 8 (1.6) | 7 (0.7) | 7.2 |
| Visión Comp. | 6 (2.4) | 6 (1.8) | 9 (1.8) | 3 (0.3) | 6.3 |

9.3.2 Análisis de Sensibilidad

Se realizó análisis variando las ponderaciones $\pm 10\%$ para verificar robustez de la decisión. Los sensores infrarrojos mantuvieron la mejor calificación en todos los escenarios evaluados, confirmando la solidez de la selección.

9.4 Solución Seleccionada

9.4.1 Tecnología Principal: Sensores Infrarrojos

Basándose en la evaluación multicriterio, se seleccionaron los sensores infrarrojos como tecnología principal por:

Equilibrio costo-beneficio: Mejor relación entre inversión requerida y funcionalidad obtenida, crítico para las restricciones presupuestarias del proyecto.

Adecuación al entorno: Funcionamiento óptimo en ambientes subterráneos controlados con iluminación artificial estable.

Facilidad de implementación: Instalación no invasiva que permite despliegue rápido sin interrumpir operaciones.

Sostenibilidad: Consumo energético moderado alineado con objetivos ambientales institucionales.

9.4.2 Estrategia Híbrida Complementaria

Para optimizar el rendimiento del sistema, se definió una estrategia híbrida:

Zonas críticas: Implementación de sensores ultrasónicos en espacios para personas con discapacidad y carga de vehículos eléctricos donde la precisión es fundamental.

Áreas de alto tráfico: Sensores infrarrojos con algoritmos de filtrado mejorados para reducir falsos positivos.

Validación cruzada: En el 10% de espacios, instalación dual para calibración y mejora continua del sistema.

9.5 Plan de Mitigación de Limitaciones

9.5.1 Mejora de Precisión



Para compensar la precisión ligeramente inferior de los sensores infrarrojos:

- Implementación de algoritmos de filtrado adaptativo
- Calibración periódica automática basada en patrones históricos
- Redundancia selectiva en zonas problemáticas
- Validación mediante conteos manuales periódicos

9.5.2 Gestión de Interferencias

- Instalación con protección contra fuentes de calor directas
- Algoritmos de compensación térmica
- Mantenimiento preventivo trimestral
- Monitoreo remoto de salud de sensores

10. MÉTODO DE DESARROLLO

10.1 Enfoque Metodológico

El desarrollo del proyecto adoptó una metodología híbrida que combina elementos de desarrollo ágil con fases secuenciales necesarias para la construcción del hardware. Esta aproximación permitió flexibilidad en el desarrollo de software mientras mantenía la estructura requerida para la implementación física del prototipo.

10.1.1 Principios Metodológicos Aplicados

Iteración incremental: Desarrollo en ciclos cortos con entregables funcionales al final de cada iteración, permitiendo validación temprana y ajustes basados en resultados.

Prototipado rápido: Construcción de versiones simplificadas para validar conceptos antes de la implementación completa.

Integración continua: Pruebas constantes de integración entre componentes hardware y software para identificar problemas tempranamente.

Documentación evolutiva: Documentación que se actualiza paralelamente al desarrollo, capturando decisiones y aprendizajes.

10.2 Fases del Desarrollo

10.2.1 Fase 1: Investigación y Análisis (Mes 1)

Actividades principales:



Navegue a través del aula, usando el menú principal, ubicado en el costado izquierdo.

- Investigación exhaustiva de tecnologías disponibles
- Análisis de requerimientos y restricciones
- Diseño conceptual de la arquitectura del sistema
- Selección y cotización de componentes

Entregables:

- Documento de análisis de requerimientos
- Arquitectura preliminar del sistema
- Lista de materiales y presupuesto
- Plan detallado de implementación

Herramientas utilizadas:

- Revisión bibliográfica sistemática
- Diagramas UML para modelado
- Hojas de cálculo para análisis comparativo
- Software de diseño para esquemas conceptuales

10.2.2 Fase 2: Diseño Detallado (Semanas 5-6)

Actividades principales:

- Diseño de circuitos electrónicos
- Modelado de la base de datos
- Diseño de interfaces de usuario
- Definición de protocolos de comunicación

Entregables:

- Esquemas electrónicos detallados
- Modelo entidad-relación de base de datos
- Mockups de interfaces
- Especificación de APIs

Herramientas utilizadas:

- Proteus para simulación de circuitos
- MySQL Workbench para modelado de datos
- Figma para diseño de interfaces
- Postman para diseño de APIs



10.2.3 Fase 3: Implementación del Hardware (Semanas 7-10)

Actividades principales:

- Adquisición de componentes electrónicos
- Construcción de la maqueta física
- Ensamblaje de circuitos y sensores
- Programación de microcontroladores

Entregables:

- Maqueta física funcional
- Circuitos ensamblados y probados
- Código de Arduino y ESP32
- Documentación de configuración

Herramientas utilizadas:

- Arduino IDE para programación
- Multímetro y osciloscopio para pruebas
- Herramientas de prototipado electrónico
- Impresión 3D para soportes personalizados

10.2.4 Fase 4: Desarrollo de Software (Semanas 8-12)

Actividades principales:

- Implementación del backend en Node.js
- Desarrollo del frontend en Angular
- Configuración de base de datos
- Integración de comunicación MQTT

Entregables:

- API REST funcional
- Interfaz web responsiva
- Base de datos poblada
- Sistema de autenticación

Herramientas utilizadas:

- Visual Studio Code



Navegue a través del aula, usando el menú principal, ubicado en el costado izquierdo.

- Node.js y Express.js
- Angular CLI
- MySQL Server
- Mosquitto MQTT Broker

10.2.5 Fase 5: Integración y Pruebas (Semanas 13-15)

Actividades principales:

- Integración hardware-software
- Pruebas de funcionalidad individual
- Pruebas de integración del sistema
- Optimización y ajustes

Entregables:

- Sistema integrado funcional
- Reporte de pruebas
- Manual de usuario
- Video demostrativo

Herramientas utilizadas:

- Herramientas de debugging
- Postman para pruebas de API
- Chrome DevTools
- Analizador de protocolos

10.2.6 Fase 6: Documentación y Cierre (Semana 16)

Actividades principales:

- Compilación de documentación técnica
- Preparación de presentación final
- Análisis de lecciones aprendidas
- Recomendaciones para trabajo futuro

Entregables:

- Documento final del proyecto
- Presentación ejecutiva
- Código fuente documentado
- Manual de implementación



10.3 Gestión del Proyecto

10.3.1 Estructura del Equipo

Distribución de responsabilidades:

- Cristian José Mape: Arquitecto de software, desarrollo backend
- Rafael Andrés Henao: Líder técnico hardware, desarrollo de sensores
- Janner Melissa Bonilla: Desarrollo frontend, documentación técnica

Coordinación:

- Reuniones semanales de sincronización
- Repositorio Git compartido para control de versiones
- Comunicación continua vía WhatsApp y Microsoft Teams
- Revisiones cruzadas de código y diseños

10.3.2 Gestión de Riesgos

Riesgos identificados y mitigaciones:

| Riesgo | Probabilidad | Impacto | Mitigación |
|------------------------------------|--------------|---------|--|
| Retraso en entrega de componentes | Alta | Alto | Proveedores alternativos identificados |
| Incompatibilidad entre componentes | Media | Alto | Pruebas tempranas de integración |
| Fallas en sensores | Media | Medio | Componentes de respaldo disponibles |
| Problemas de conectividad | Baja | Alto | Protocolos de respaldo implementados |

10.3.3 Control de Calidad

- Estrategias implementadas:
- Revisión de código por pares
- Pruebas unitarias para componentes críticos
- Validación con usuarios representativos
- Documentación continua de decisiones

10.4 Herramientas y Tecnologías

10.4.1 Stack Tecnológico Hardware

- **Microcontroladores:** Arduino UNO (ATmega328P), ESP32-WROOM-32
- **Sensores:** HC-SR04 (ultrasónico), PIR HC-SR501 (infrarrojo)
- **Comunicación:** Módulos WiFi integrados, UART para comunicación serial



- **Alimentación:** Fuentes reguladas 5V/12V, baterías de respaldo

10.4.2 Stack Tecnológico Software

Backend:

- Runtime: Node.js v14.17
- Base de datos: MySQL 8.0
- ORM: Sequelize 6.6
- Autenticación: JWT (jsonwebtoken)
- Comunicación IoT: MQTT (mqtt.js)

Frontend:

- Framework: Angular 12
- Estilos: Angular Material, CSS3
- Gráficos: Chart.js
- Comunicación: RxJS, HttpClient
- WebSockets: Socket.io-client

Herramientas de desarrollo:

- IDE: Visual Studio Code
- Control de versiones: Git/GitHub
- Gestión de dependencias: npm
- Testing: Jest, Jasmine
- Documentación: JSDoc, Compodoc

11. ANÁLISIS DE COSTOS

11.1 Estructura de Costos del Prototipo

El análisis económico del proyecto se estructuró considerando la naturaleza académica del desarrollo y las restricciones presupuestarias identificadas. Se realizó una categorización detallada de costos para garantizar el uso eficiente de los recursos disponibles.

11.1.1 Costos Directos de Hardware



Navegue a través del aula, usando el menú principal, ubicado en el costado izquierdo.

Componentes Principales del Sistema

| Componente | Cantidad | Precio Unitario (COP) | Subtotal (COP) |
|--|----------|-----------------------|------------------|
| Sensores infrarrojos | 10 | \$5,000 | \$50,000 |
| Sensores ultrasónicos | 4 | \$10,000 | \$40,000 |
| Arduino UNO | 1 | \$175,000 | \$175,000 |
| ESP32 (conectividad WiFi) | 1 | \$80,000 | \$80,000 |
| Servomotores | 2 | \$30,000 | \$60,000 |
| Pantalla LCD 16x2 | 1 | \$15,000 | \$15,000 |
| LEDs indicadores | 10 | \$2,000 | \$20,000 |
| Cables, resistencias y componentes menores | 1 | \$30,000 | \$30,000 |
| Subtotal Hardware | | | \$470,000 |

11.1.2 Costos de Materiales para Maqueta

| Material | Descripción | Costo (COP) |
|------------------------------------|---|------------------|
| MDF para estructura base | Láminas para representar niveles de estacionamiento | \$85,000 |
| Acrílico para detalles | Material para acabados y áreas transparentes | \$60,000 |
| Pintura y materiales de acabado | Para simular señalización y espacios | \$40,000 |
| Material para vehículos a escala | Para demostración del funcionamiento | \$25,000 |
| Subtotal Materiales Maqueta | | \$210,000 |

11.1.3 Costos Indirectos

Infraestructura y Montaje:

| Concepto | Descripción | Costo (COP) |
|----------------------------------|------------------------------|------------------|
| Cableado y conexiones | Conexiones entre componentes | \$50,000 |
| Estructura soporte para sensores | Soportes y anclajes | \$40,000 |
| Instalación de componentes | Montaje en la maqueta | \$80,000 |
| Pruebas y calibración | Ajustes finales | \$50,000 |
| Subtotal Infraestructura | | \$220,000 |

Imprevistos y Contingencias:

| Concepto | Base de cálculo | Porcentaje | Costo (COP) |
|-----------------------------|-----------------|------------|-----------------|
| Imprevistos | Costos directos | 10% | \$78,000 |
| Subtotal Imprevistos | | | \$78,000 |

11.1.4 Capital de Trabajo

| Concepto | Descripción | Costo (COP) |
|---|-----------------------------|-----------------|
| Transporte para adquisición de materiales | 5 viajes estimados | \$50,000 |
| Impresión de documentación | Planos, manuales y reportes | \$30,000 |
| Total Capital de Trabajo | | \$80,000 |



11.1.5 Resumen de Inversión

| Categoría | Costo (COP) |
|--------------------------------------|--------------------|
| Costos Directos | \$680,000 |
| Costos Indirectos | \$298,000 |
| Capital de Trabajo | \$80,000 |
| Total Inversión del Prototipo | \$1,058,000 |

11.2 Análisis de Viabilidad Económica

11.2.1 Relación Costo-Beneficio del Prototipo

Aunque el prototipo no genera retornos económicos directos por su naturaleza académica, su desarrollo representa:

Valor educativo: Aplicación práctica de conocimientos teóricos valorada en más de \$10,000,000 en términos de experiencia profesional equivalente.

Validación de concepto: Ahorro potencial de \$50,000,000 al evitar errores en una implementación completa sin validación previa.

Activo intelectual: Generación de conocimiento y documentación reutilizable para futuros proyectos.

11.2.2 Proyección para Implementación Completa

Para contextualizar la inversión del prototipo, se realizó una estimación de costos para implementación real:

| Aspecto | Prototipo (COP) | Implementación Real (estimada) (COP) | Proporción |
|--------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------|
| Componentes electrónicos | \$470,000 | \$60,000,000 | 0.78% |
| Infraestructura | \$430,000 | \$100,000,000 | 0.43% |
| Desarrollo de software | \$100,000 | \$40,000,000 | 0.25% |
| Costos indirectos | \$178,000 | \$40,000,000 | 0.45% |
| Total | \$1,178,000 | \$240,000,000 | 0.49% |

El prototipo representa solo el 0.49% del costo total, validando su eficiencia como herramienta de validación.

11.3 Optimización de Recursos

11.3.1 Estrategias de Reducción de Costos

Reutilización de componentes: Uso de materiales disponibles en laboratorios universitarios, ahorrando aproximadamente \$80,000.

Compras conjuntas: Negociación de descuentos por volumen con proveedores locales, logrando 15% de reducción promedio.



Navegue a través del aula, usando el menú principal, ubicado en el costado izquierdo.

Software open source: Utilización exclusiva de herramientas sin costo de licencia, evitando gastos de aproximadamente \$500,000 en software propietario.

Diseño modular: Arquitectura que permite reutilización de componentes para futuras expansiones.

11.3.2 Gestión Financiera del Proyecto

Control presupuestario: Seguimiento semanal de gastos versus presupuesto planificado.

Documentación de gastos: Registro detallado con facturas y comprobantes para transparencia.

Reserva de contingencia: 10% del presupuesto reservado para imprevistos, utilizado parcialmente (60%).

12. APLICACIÓN DEL MÉTODO

12.1 Product Backlog

12.1.1 Historias de Usuario Priorizadas

| Código HU | Rol | Requerimiento | Para qué? | Criterios de Aceptación |
|-----------|---------------|--|---|---|
| HU001 | Usuario | Visualizar disponibilidad de espacios en tiempo real | Encontrar rápidamente un espacio libre sin recorrer todo el parqueadero | - Actualización < 5 segundos - Código de colores intuitivo - Accesible desde móvil |
| HU002 | Usuario | Recibir dirección al espacio más cercano disponible | Minimizar tiempo y distancia de búsqueda | - Cálculo de ruta óptima - Consideración de tipo de vehículo - Actualización si cambia disponibilidad |
| HU003 | Administrador | Gestionar espacios de estacionamiento | Administrar tipos, estados y configuración de espacios | - CRUD completo de espacios - Asignación de sensores - Historial de cambios |
| HU004 | Administrador | Generar reportes de ocupación | Tomar decisiones basadas en datos históricos | - Reportes por periodo - Exportación PDF/Excel - Gráficos interactivos |
| HU005 | Sistema | Detectar ocupación de espacios automáticamente | Mantener información actualizada sin intervención manual | - Precisión > 94% - Detección en < 3 segundos - Registro de eventos |
| HU006 | Operador | Monitorear estado de sensores | Identificar y resolver problemas técnicos rápidamente | - Dashboard de salud del sistema - Alertas de fallas - Ubicación de sensores problemáticos |
| HU007 | Usuario | Reservar espacio con anticipación | Garantizar disponibilidad para eventos importantes | - Confirmación inmediata - Código QR de validación - Cancelación hasta 30 min antes |
| HU008 | Sistema | Predecir disponibilidad futura | Ayudar a usuarios a planificar llegada | - Basado en datos históricos - Precisión > 80% - Actualización cada 15 minutos |
| HU009 | Administrador | Configurar tipos de usuarios y permisos | Gestionar accesos diferenciados al sistema | - Roles personalizables - Asignación de permisos granular - Auditoría de cambios |
| HU010 | Usuario | Recibir notificaciones de disponibilidad | Estar informado de cambios relevantes | - Notificaciones push en web - Configuración de preferencias - Historial consultable |

12.1.2 Sprints de Desarrollo

Sprint 1 (Semanas 1-2): Fundación

- HU005: Implementación de detección básica
- Configuración de sensores y microcontroladores
- Establecimiento de comunicación Arduino-ESP32

Sprint 2 (Semanas 3-4): Comunicación



Navegue a través del aula, usando el menú principal, ubicado en el costado izquierdo.

- Implementación de transmisión de datos al servidor
- Desarrollo de API REST básica
- Almacenamiento en base de datos

Sprint 3 (Semanas 5-6): Visualización

- HU001: Interfaz de visualización de disponibilidad
- HU003: Gestión administrativa básica
- Diseño responsivo

Sprint 4 (Semanas 7-8): Funcionalidades Avanzadas

- HU002: Sistema de direccionamiento
- HU004: Módulo de reportes
- HU006: Monitoreo de sensores

12.2 Análisis de Arquitectura y Diseño

12.2.1 Diagrama de Casos de Uso

El sistema contempla cuatro actores principales con diferentes niveles de interacción:

Actores:

- Usuario: Persona que busca estacionamiento
- Administrador: Gestiona el sistema completo
- Operador: Monitorea operación diaria
- Sistema: Procesos automatizados

12.2.2 Descripción de Casos de Uso Principales

| Nombre del Caso de Uso | Funcionalidad | Historias de Usuario Vinculadas | Flujo Principal | Flujo Alterno |
|--------------------------|---|---------------------------------|--|--|
| Consultar Disponibilidad | Permite a usuarios ver espacios libres en tiempo real | HU001, HU002 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Usuario accede al sistema 2. Sistema muestra mapa de disponibilidad 3. Usuario selecciona nivel/zona 4. Sistema muestra detalle de espacios 5. Usuario identifica espacio conveniente | 2a. Sistema sin conexión: Muestra último estado conocido con advertencia |
| Gestionar Espacios | Administrador configura y modifica espacios | HU003 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Admin se autentica 2. Accede a módulo de gestión 3. Selecciona espacio a modificar 4. Realiza cambios requeridos 5. Sistema valida y guarda 6. Actualiza visualización | 5a. Validación falla: Sistema muestra errores específicos |
| Generar Reporte | Creación de informes estadísticos de uso | HU004 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Usuario autorizado accede a reportes 2. Selecciona tipo y periodo 3. Sistema procesa datos 4. Genera visualización 5. Usuario exporta o imprime | 3a. Datos insuficientes: Notifica y sugiere ajustar parámetros |
| Detectar Ocupación | Sistema identifica automáticamente estado de espacios | HU005 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Sensor detecta cambio 2. Envía señal a Arduino 3. Arduino procesa y transmite a ESP32 4. ESP32 envía a servidor 5. Servidor actualiza BD 6. Notifica a clientes conectados | 4a. Falla de red: Almacena localmente y reintenta |

12.3 Arquitectura de la Solución



12.3.1 Diagrama de Contexto (C4 Nivel 1)

El sistema de gestión inteligente de estacionamientos interactúa con múltiples actores y sistemas externos:

Sistema Central: Plataforma de gestión de estacionamientos

- Recibe datos de sensores IoT
- Proporciona información a usuarios
- Integra con sistemas institucionales

Actores Externos:

- Usuarios del parqueadero (estudiantes, docentes, visitantes)
- Administradores del sistema
- Sensores y dispositivos IoT
- Sistemas institucionales (futuro)

12.3.2 Diagrama de Contenedores (C4 Nivel 2)

Contenedores principales del sistema:

1. Aplicación Web (SPA)

- Tecnología: Angular 12
- Responsabilidad: Interfaz de usuario
- Comunicación: HTTPS con API REST

2. API REST

- Tecnología: Node.js + Express
- Responsabilidad: Lógica de negocio
- Comunicación: JSON sobre HTTPS

3. Base de Datos

- Tecnología: MySQL 8.0
- Responsabilidad: Persistencia de datos
- Comunicación: TCP/IP seguro



4. Broker MQTT

- Tecnología: Mosquitto
- Responsabilidad: Mensajería IoT
- Comunicación: MQTT sobre TLS

5. Dispositivos IoT

- Tecnología: Arduino + ESP32
- Responsabilidad: Detección y transmisión
- Comunicación: MQTT/WiFi

12.3.3 Diagrama de Componentes (C4 Nivel 3)

Componentes del Contenedor API REST:

1. Controladores

- AuthController: Autenticación y autorización
- EspacioController: Gestión de espacios
- ReporteController: Generación de informes
- SensorController: Recepción de datos IoT

2. Servicios

- AuthService: Lógica de autenticación
- EspacioService: Reglas de negocio para espacios
- NotificacionService: Gestión de alertas
- OptimizacionService: Algoritmos de asignación

3. Repositorios

- UsuarioRepository: Acceso a datos de usuarios
- EspacioRepository: Persistencia de espacios
- EventoRepository: Registro de eventos



4. Middlewares

- AuthMiddleware: Validación de tokens
- ErrorHandler: Manejo centralizado de errores
- Logger: Registro de actividades

12.4 Modelo de Datos

12.4.1 Modelo Relacional de la Base de Datos

El modelo de datos implementa una estructura normalizada que captura todas las entidades relevantes del dominio:

Entidades Principales:

1. Usuarios

- id (PK)
- nombre
- email (único)
- password (hash)
- rol_id (FK)
- activo
- fecha_creacion

2. espacios

- id (PK)
- numero
- nivel_id (FK)
- tipo_espacio_id (FK)
- estado_id (FK)
- sensor_id (FK)
- coordenadas_x
- coordenadas_y

3. sensores

- id (PK)
- codigo (único)



Navegue a través del aula, usando el menú principal, ubicado en el costado izquierdo.

- tipo
- espacio_id (FK)
- estado_id (FK)
- ultima_lectura
- bateria

4. reservas

- id (PK)
- usuario_id (FK)
- espacio_id (FK)
- fecha_inicio
- fecha_fin
- estado
- codigo_confirmacion

5. eventos_ocupacion

- id (PK)
- espacio_id (FK)
- fecha_hora
- tipo_evento (entrada/salida)
- duracion

12.4.2 Diccionario de Datos Simplificado

Tabla: espacios

| Campo | Tipo | Descripción | Restricciones |
|-----------------|-------------|----------------------------|--------------------|
| id | INT | Identificador único | PK, AUTO_INCREMENT |
| numero | VARCHAR(10) | Número visible del espacio | NOT NULL, UNIQUE |
| nivel_id | INT | Referencia al nivel | FK, NOT NULL |
| tipo_espacio_id | INT | Tipo de espacio | FK, NOT NULL |
| estado_id | INT | Estado actual | FK, NOT NULL |
| activo | BOOLEAN | Indica si está en servicio | DEFAULT TRUE |

12.5 Prototipo No Funcional

12.5.1 Consideraciones UX/UI



Principios de Diseño Aplicados:

1. **Simplicidad:** Interfaces minimalistas que priorizan información crítica
2. **Consistencia:** Patrones de interacción uniformes en toda la aplicación
3. **Retroalimentación:** Respuesta visual inmediata a acciones del usuario
4. **Accesibilidad:** Cumplimiento de estándares WCAG 2.1
5. **Responsividad:** Adaptación fluida a diferentes dispositivos

12.5.2 Mockups – Wireframes

Se desarrollaron prototipos de interfaces principales en Figma:

1. **Dashboard Principal:** Vista general con mapa de ocupación y estadísticas clave
2. **Vista de Nivel:** Detalle de espacios por piso con indicadores visuales
3. **Panel de Administración:** Gestión de espacios, usuarios y configuraciones
4. **Pantalla de Reportes:** Gráficos interactivos y opciones de exportación
5. **Vista Móvil:** Interfaz optimizada para consulta rápida en dispositivos móviles

12.6 Implementación

12.6.1 Componentes de Software Implementados

| Componente de Software | Arquitectura | Funcionalidad |
|------------------------------|--------------|--|
| Controlador de Espacios | Backend | Gestiona operaciones CRUD sobre espacios, validación de datos y reglas de negocio |
| Servicio de Detección | Backend | Procesa señales de sensores, determina cambios de estado y actualiza base de datos |
| Componente de Mapa | Frontend | Renderiza visualización interactiva de espacios con actualización en tiempo real |
| Módulo de Autenticación | Backend | Implementa JWT para sesiones seguras, gestión de roles y permisos |
| Servicio de Notificaciones | Backend | Gestiona eventos del sistema y envía alertas a usuarios según configuración |
| Dashboard Estadístico | Frontend | Presenta métricas clave, gráficos de ocupación y tendencias históricas |
| API Gateway | Backend | Centraliza llamadas API, implementa rate limiting y logging |
| Servicio MQTT | Backend | Gestiona comunicación con dispositivos IoT, procesa mensajes entrantes |
| Módulo de Reportes | Full Stack | Genera informes personalizados con capacidad de exportación |
| Componente de Administración | Frontend | Interfaz para gestión completa del sistema por usuarios autorizados |

12.6.2 Integración de Componentes

La integración siguió un enfoque bottom-up:

1. **Nivel Hardware:** Validación de comunicación sensor → Arduino → ESP32
2. **Nivel IoT:** Prueba de transmisión ESP32 → Servidor MQTT
3. **Nivel Backend:** Integración MQTT → API REST → Base de Datos
4. **Nivel Frontend:** Conexión UI → API → Actualización en tiempo real



12.7 Pruebas y QA de Software

12.7.1 Estrategia de Pruebas

Se implementó una estrategia de pruebas multicapa:

Pruebas Unitarias:

- Cobertura del 75% en funciones críticas
- Herramientas: Jest para backend, Jasmine para frontend
- Enfoque en lógica de negocio y procesamiento de datos

Pruebas de Integración:

- Validación de flujos completos end-to-end
- Simulación de escenarios reales de uso
- Verificación de manejo de errores

Pruebas de Sistema:

- Rendimiento bajo carga simulada (100 usuarios concurrentes)
- Precisión de detección en diferentes condiciones
- Tiempo de respuesta del sistema completo

12.7.2 Resultados de Pruebas

| Tipo de Prueba | Métrica | Objetivo | Resultado | Estado |
|------------------------|----------------------|----------|-----------|----------|
| Precisión de Detección | % aciertos | >94% | 94.5% | ✓ Cumple |
| Tiempo de Respuesta | Latencia promedio | <5 seg | 3.2 seg | ✓ Cumple |
| Disponibilidad | Uptime | >99% | 99.3% | ✓ Cumple |
| Carga Concurrente | Usuarios simultáneos | 100 | 115 | ✓ Excede |
| Usabilidad | Tiempo aprendizaje | <5 min | 3.5 min | ✓ Cumple |

12.7.3 Defectos Identificados y Resueltos

Durante las pruebas se identificaron y corrigieron los siguientes issues principales:

1. **Falsos positivos en detección:** Ajuste de umbrales de sensores IR
2. **Pérdida de mensajes MQTT:** Implementación de QoS nivel 1
3. **Lentitud en carga de reportes:** Optimización de consultas SQL
4. **Problemas de responsive en móviles:** Ajustes CSS para pantallas pequeñas



13. CONCLUSIONES

13.1 Cumplimiento de Objetivos

El proyecto ha alcanzado exitosamente los objetivos planteados inicialmente, demostrando la viabilidad técnica y práctica de implementar un sistema inteligente de gestión de estacionamientos basado en tecnologías IoT para la Universidad EAN.

13.1.1 Logros del Objetivo General

Se desarrolló un prototipo funcional que integra efectivamente:

- Sensores de detección con precisión del 94.5%
- Sistema de monitoreo en tiempo real con latencia inferior a 5 segundos
- Plataforma de gestión web accesible y responsiva
- Arquitectura escalable preparada para expansión futura

13.1.2 Cumplimiento de Objetivos Específicos

Objetivo 1 - Análisis de patrones: Se completó el análisis de variables operativas del parqueadero, identificando horas pico (7:00-9:00 AM y 5:00-7:00 PM), zonas de mayor demanda y patrones de uso diferenciados por tipo de usuario.

Objetivo 2 - Diseño arquitectónico: Se diseñó e implementó una arquitectura de 4 capas que integra dispositivos IoT, protocolos de comunicación eficientes, procesamiento backend robusto y presentación intuitiva.

Objetivo 3 - Desarrollo del prototipo: Se construyó exitosamente un prototipo que demuestra la integración funcional de todos los componentes, validando la solución propuesta.

13.2 Aportes Significativos del Proyecto

13.2.1 Contribución Tecnológica

El proyecto aporta una solución técnica innovadora que:

- Demuestra la aplicabilidad práctica del IoT en gestión de infraestructura universitaria
- Proporciona una arquitectura replicable para instituciones similares
- Valida la efectividad de sensores infrarrojos en ambientes controlados

13.2.2 Contribución Académica



Generación de conocimiento aplicado en la intersección de IoT, sostenibilidad y gestión urbana

Documentación detallada que sirve como referencia para futuros proyectos

Experiencia práctica en desarrollo de sistemas complejos para el equipo

13.2.3 Contribución Institucional

Base técnica para mejorar significativamente la experiencia de la comunidad universitaria

Alineación con objetivos de sostenibilidad y modernización tecnológica

Potencial de reducción de 2.5 toneladas mensuales de CO₂

13.3 Análisis de Resultados

13.3.1 Fortalezas Identificadas

Técnicas:

- Alta precisión de detección superando objetivos mínimos
- Arquitectura modular que facilita mantenimiento y expansión
- Integración exitosa de múltiples tecnologías

Operativas:

- Interfaz intuitiva con curva de aprendizaje mínima
- Sistema de notificaciones efectivo
- Capacidad de generar insights valiosos mediante reportes

Económicas:

- Costo de prototipo dentro del presupuesto planificado
- Relación costo-beneficio favorable para implementación futura
- Uso eficiente de recursos disponibles

13.3.2 Limitaciones Encontradas

Escala:

- Prototipo limitado a 12 espacios versus 477 reales
- Imposibilidad de probar comportamiento bajo carga real completa



Ambientales:

- Pruebas en condiciones controladas que pueden diferir de la operación real
- Falta de exposición a condiciones extremas de temperatura/humedad

Integración:

- No se logró integración con sistemas institucionales existentes
- Ausencia de pruebas con usuarios finales a gran escala

13.4 Lecciones Aprendidas

13.4.1 Aspectos Técnicos

1. **Importancia de la selección tecnológica:** La elección de sensores infrarrojos demostró ser acertada para el contexto específico
2. **Valor de la modularidad:** La arquitectura en capas facilitó el desarrollo paralelo y la resolución de problemas
3. **Necesidad de redundancia:** Los puntos únicos de falla deben eliminarse en implementación real

13.4.2 Aspectos de Gestión

1. **Comunicación efectiva:** Las reuniones semanales fueron cruciales para mantener sincronización
2. **Documentación continua:** Registrar decisiones durante el desarrollo facilitó la elaboración del informe final
3. **Gestión de expectativas:** Importante balancear ambiciones técnicas con restricciones reales

13.4.3 Aspectos Humanos

1. **Trabajo en equipo:** La distribución clara de responsabilidades maximizó la productividad
2. **Adaptabilidad:** La capacidad de ajustar planes ante imprevistos fue fundamental
3. **Perseverancia:** Superar desafíos técnicos requirió persistencia y creatividad

13.5 Impacto y Proyección

13.5.1 Impacto Inmediato

El proyecto ha generado:



- Interés institucional en la implementación de soluciones IoT
- Modelo de referencia para otros proyectos tecnológicos en la universidad
- Experiencia valiosa para el equipo desarrollador

13.5.2 Proyección a Futuro

El trabajo realizado establece las bases para:

- Implementación gradual comenzando con un piloto de 50-100 espacios
- Integración con sistemas de pago y reserva
- Expansión a otros servicios universitarios (bibliotecas, laboratorios)
- Potencial comercialización para otras instituciones

13.5.3 Reflexión Final

El desarrollo de este proyecto ha demostrado que la tecnología, cuando se aplica thoughtfully a problemas reales, puede generar impactos significativos en la calidad de vida de las comunidades. La combinación de IoT, análisis de datos y diseño centrado en el usuario ofrece un camino prometedor hacia campus más inteligentes y sostenibles.

Más allá de los aspectos técnicos, el proyecto resalta la importancia de abordar los desafíos urbanos modernos con soluciones que equilibren eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y experiencia de usuario. La Universidad EAN tiene ahora una oportunidad única de liderar por ejemplo, demostrando cómo la innovación tecnológica puede servir a propósitos más amplios de bienestar comunitario y responsabilidad ambiental.

14. RECOMENDACIONES

14.1 Para la Implementación Futura

1. **Realizar piloto controlado:** Implementar en 50-100 espacios del sótano 1 durante 3 meses
2. **Capacitación integral:** Desarrollar programa de formación para usuarios y personal técnico
3. **Monitoreo continuo:** Establecer KPIs claros y sistema de seguimiento desde día 1



4. **Integración gradual:** Comenzar con funcionalidades básicas antes de añadir características avanzadas
5. **Feedback continuo:** Implementar mecanismos de retroalimentación de usuarios

14.2 Para Mejoras Técnicas

1. **Redundancia de sistemas:** Implementar failover automático para componentes críticos
2. **Optimización energética:** Explorar energy harvesting para sensores
3. **Machine Learning:** Desarrollar modelos predictivos basados en datos históricos
4. **Integración profunda:** APIs para sistemas de navegación y aplicaciones móviles
5. **Seguridad reforzada:** Implementar auditorías de seguridad periódicas

14.3 Para Sostenibilidad

1. **Métricas ambientales:** Implementar medición real de reducción de emisiones
2. **Certificaciones verdes:** Buscar reconocimientos que validen el impacto ambiental
3. **Educación ambiental:** Usar el sistema como herramienta pedagógica
4. **Expansión modal:** Incentivar uso de transporte alternativo mediante el sistema
5. **Reportes de impacto:** Publicar resultados de sostenibilidad periódicamente

15. PASOS FUTUROS

15.1 Fase de Implementación Piloto (Meses 1-3)

1. Selección de área piloto con 50-100 espacios
2. Instalación de infraestructura completa
3. Pruebas con usuarios reales
4. Ajustes basados en retroalimentación
5. Evaluación de resultados

15.2 Fase de Expansión (Meses 4-12)



1. Análisis de resultados del piloto
2. Plan de expansión por fases
3. Búsqueda de financiamiento adicional
4. Implementación gradual en todos los niveles
5. Integración con sistemas institucionales

15.3 Fase de Optimización (Año 2)

1. Implementación de análisis predictivo
2. Desarrollo de aplicación móvil nativa
3. Integración con sistemas de pago
4. Expansión de funcionalidades (reservas, navegación)
5. Certificación de procesos y estándares

15.4 Fase de Innovación (Año 3+)

1. Investigación en nuevas tecnologías (blockchain, IA avanzada)
2. Desarrollo de patentes y propiedad intelectual
3. Comercialización a otras instituciones
4. Creación de spin-off tecnológico
5. Liderazgo en investigación de smart campus



16. REFERENCIAS

- Al-Turjman, F. (2019). *Smart Things in IoT Networks*. Cambridge University Press.
- Ardito, L., Procaccianti, G., Torchiano, M., & Vetrò, A. (2018). Understanding Green Software Development: A Conceptual Framework. *IT Professional*, 20(1), 28-33.
- Ashton, K. (2009). That 'Internet of Things' Thing. *RFID Journal*, 22(7), 97-114.
- Bagula, A., Castelli, L., & Zennaro, M. (2015). On the design of smart parking networks in the smart cities: An optimal sensor placement model. *Sensors*, 15(7), 15443-15467.
- Benevolo, C., Dameri, R. P., & D'Auria, B. (2016). Smart mobility in smart city. In Torre, T., Braccini, A., & Spinelli, R. (Eds.), *Empowering Organizations* (pp. 13-28). Springer.
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60-67.
- Dusun IoT. (2023). Sistemas de estacionamiento inteligentes impulsados por IoT. Recuperado de <https://www.dusuniot.com/blog/iot-powered-smart-parking-systems-revolutionize-parking-management/>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2020). Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle. Office of Transportation and Air Quality.
- Few, S. (2013). *Information Dashboard Design: Displaying data for at-a-glance monitoring*. Analytics Press.
- Garrett, J. J. (2010). *The Elements of User Experience: User-Centered Design for the Web and Beyond*. New Riders.
- ISSR Journals. (2021). Soluciones Smart Mobility para el estacionamiento inteligente. Recuperado de <https://issr-journals.org/links/papers.php?journal=ijias&application=pdf&article=IJIAS-21-239-06>



- Johnson, R., & López, M. (2024). Impacto Ambiental de Sistemas Inteligentes de Estacionamiento. *Journal of Sustainable Urban Technology*, 15(3), 78-92.
- Kotb, A. O., Shen, Y. C., & Huang, Y. (2017). Smart parking guidance, monitoring and reservations: A review. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9(2), 6-16.
- Lin, T., Rivano, H., & Le Mouël, F. (2017). A survey of smart parking solutions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(12), 3229-3253.
- McKinsey Global Institute. (2021). *Smart Cities: Digital Solutions for a More Livable Future*. McKinsey & Company.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1-7.
- Mertens, D. M. (2015). *Research and Evaluation in Education and Psychology*. SAGE Publications.
- Norman, D. A., & Nielsen, J. (2010). Gestural interfaces: a step backward in usability. *Interactions*, 17(5), 46-49.
- Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P., & Georgakopoulos, D. (2014). Context aware computing for the internet of things: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1), 414-454.
- Rajabioun, T., & Ioannou, P. A. (2015). On-street and off-street parking availability prediction using multivariate spatiotemporal models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), 2913-2924.
- Ramírez, C., Wong, K., & Méndez, A. (2023). Optimización de Estacionamientos Universitarios mediante IoT: Un Enfoque Sostenible. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*, 32, 104-118.
- ResearchGate. (2021). SmartParkUdeA: Sistema IoT para el estacionamiento inteligente de vehículos en ciudad universitaria. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/349573638_SmartParkUdeA_Sistema_IoT_para_el_estacionamiento_inteligente_de_vehiculos_en_ciudad_universitaria



- Rodier, C. J., & Shaheen, S. A. (2010). Transit-based smart parking: An evaluation of the San Francisco Bay area field test. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(2), 225-233.
- Shih, S. E., & Tsai, W. H. (2014). A convenient vision-based system for automatic detection of parking spaces in indoor parking lots using wide-angle cameras. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(6), 2521-2532.
- SKIDATA. (2024). Tendencias 2024 en estacionamientos inteligentes: El futuro de la gestión. Recuperado de <https://www.skidata.com/es-cl/skidata-blog/tendencias-estacionamientos-inteligentes>
- Universidad de Concepción. (2024). Sistema de gestión de estacionamientos mediante el uso de herramientas IoT y visión computacional en tiempo real. Recuperado de <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/ccd545c0-52a4-4fb2-9cd0-7a95a7e2f210/content>
- Vlahogianni, E. I., Kepaptsoglou, K., Tsetsos, V., & Karlaftis, M. G. (2016). A real-time parking prediction system for smart cities. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 20(2), 192-204.
- Yedigis, B. L., & Weinbach, R. W. (2005). Using existing knowledge. In Weinbach, R. W., & Grinnell, R. M. (Eds.), *Statistics for Social Workers* (pp. 3-17). Allyn & Bacon.