



Optimización y Rediseño de un Laboratorio Remoto para Prácticas de Control de Motores con FPGA

Derechos de Autor

Todos los derechos reservados

Yahir Vázquez Puente

Prohibida su reproducción total o parcial,
sin consentimiento expreso de los autores

México MMXXV



Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas"

**Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica
Ingeniería en Robótica y Mecatrónica**

Optimización y Rediseño de un Laboratorio Remoto para Prácticas de Control de Motores con FPGA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Ingeniero en Robótica y Mecatrónica

Presenta

Yahir Vázquez Puente

Dirigido por

Dr. Héctor Alonso Guerrero Osuna

M.I.T.A. Fabián García Vázquez

Dr. Jesús Antonio Nava Pintor

Dedicatoria

A mis padres, hermano y asesores...

Dedico esta tesis a todas aquellas personas que, de alguna manera, han formado parte de mi camino, brindándome su apoyo, motivación y comprensión a lo largo de este viaje académico.

A mi familia, por su amor incondicional, sus sacrificios y su constante apoyo en cada paso que he dado. Gracias por ser mi pilar y por enseñarme que el esfuerzo y la perseverancia son las claves para alcanzar cualquier meta.

A mis amigos, quienes con su amistad, alegría y confianza, han aligerado mis momentos más difíciles y han hecho de este proceso algo más llevadero y significativo. Cada conversación, cada gesto, y cada sonrisa han sido fundamentales para mantenerme en pie durante los días más desafiantes.

A mis asesores, por su guía, paciencia y por compartir conmigo su sabiduría y experiencia. Gracias por ser fuentes de inspiración, por desafiarme y ayudarme a crecer tanto personal como profesionalmente.

A todos aquellos que, aunque no mencionados explícitamente, han tenido un impacto positivo en mi vida. Este logro es reflejo de las enseñanzas, el apoyo y el cariño de todas las personas que he tenido la suerte de conocer a lo largo de mi vida.

Finalmente, a mí mismo, por la determinación y la fe en mis capacidades. Este logro es el resultado de un trabajo arduo, pero también de la confianza en que los sueños, cuando se persiguen con pasión y esfuerzo, pueden hacerse realidad.

Agradecimientos

- Al Dr. Héctor Alonso Guerrero Osuna, por su guía académica, sus enseñanzas y por fomentar una formación integral durante mi desarrollo profesional.
- Al Dr. Jesús Antonio Nava Pintor, por su apoyo constante, asesoría técnica y por compartir su experiencia en el ámbito de la robótica educativa.
- Al Mtro. Fabián García Vázquez, por sus valiosas aportaciones, acompañamiento durante este proyecto y por impulsar mi crecimiento como ingeniero.
- A mis padres, por su amor incondicional, apoyo moral y por ser mi principal fuente de motivación.
- A mis amigos, por su compañía, comprensión y por estar presentes en cada etapa de este camino.
- A la carrera de Ingeniería en Robótica y Mecatrónica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, por brindar las instalaciones, herramientas y conocimientos necesarios para desarrollar este trabajo.
- Al Laboratorio Nacional SEDEAM (Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y Microsistemas), por permitir el uso de sus instalaciones y por la colaboración de su personal, quienes con gran experiencia y profesionalismo contribuyeron significativamente al desarrollo de esta tesis.



Resumen

El objetivo de este trabajo es el rediseño y la optimización de un laboratorio remoto enfocado en la enseñanza del control de motores, mediante la integración de arreglos de compuertas programables en campo (FPGA, por sus siglas en inglés *Field-Programmable Gate Array*) y plataformas basadas en el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés *Internet of Things*). Esta propuesta surge como una respuesta a la necesidad de modernizar los entornos educativos, permitiendo que los estudiantes accedan, desde ubicaciones remotas, a prácticas reales sobre sistemas de control, sin comprometer la calidad del aprendizaje ni la interacción con los equipos físicos.

La implementación se basa en una arquitectura multiplataforma que combina una interfaz web, comunicación en tiempo real y dispositivos embebidos, permitiendo al usuario ejecutar prácticas de control sobre motores DC, paso a paso y servomotores. Se mejoró la estructura física, se rediseñó la electrónica de control y se optimizó el sistema de comunicación, garantizando mayor estabilidad, escalabilidad y facilidad de uso.

Además, se evalúan los beneficios y desafíos del uso de tecnologías IoT en entornos remotos, destacando su potencial para mejorar la accesibilidad, monitoreo y eficiencia de los recursos en instituciones educativas. Este enfoque no solo favorece la continuidad académica en contextos de restricción física, sino que también sienta las bases para futuras implementaciones en otras áreas de la ingeniería.

Palabras clave: Laboratorios remotos, FPGA, IoT, control de motores, educación, tecnología, prácticas a distancia, comunicación en tiempo real.

Abstract

The aim of this work is the redesign and optimization of a remote laboratory focused on motor control education, through the integration of reconfigurable hardware technologies (Short for *Field-Programmable Gate Array*) and platforms based on the Internet of Things (IoT, short for *Internet of Things*). This proposal addresses the need to modernize educational environments by allowing students to remotely access real-world practices on control systems, without compromising learning quality or interaction with physical equipment.

The implementation relies on a multiplatform architecture that combines a web interface, real-time communication, and embedded devices, enabling users to perform practical exercises on DC motors, stepper motors, and servomotors. The system's physical structure was improved, the control electronics were redesigned, and communication was optimized to ensure greater stability, scalability, and user-friendliness.

Furthermore, the study evaluates the benefits and challenges of implementing IoT technologies in remote laboratory environments, highlighting their potential to enhance accessibility, monitoring, and resource efficiency in educational institutions. This approach not only supports academic continuity in physically restricted contexts but also lays the groundwork for future applications in other areas of engineering.

Keywords: Remote laboratories, FPGA, IoT, motor control, education, technology, remote practices, real-time communication.

Índice general

Dedicatoria	VIII
Agradecimientos	IX
Resumen	X
Abstract	XI
1. Introducción	1
Descripción del problema	2
Justificación	4
Objetivos e Hipótesis de trabajo	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Hipótesis	5
2. Revisión de literatura	7
2.1. Fundamentación teórica	7
2.2. El concepto de laboratorios remotos	11
2.3. El Internet de las Cosas (IoT) en la educación	13
2.4. Ventajas y desafíos de los laboratorios remotos	15
2.5. Problemas de Diseño e Implementación para Laboratorios Remotos	
Modernos	17
2.6. Beneficios de los Laboratorios Remotos	18
2.7. Internet de las Cosas (IoT)	20
2.7.1. Arquitectura del Internet de las Cosas	21
2.7.2. Protocolos de comunicación y amenazas de seguridad	25

2.7.3.	Tecnologías Habilitadoras del Internet de las Cosas (IoT) . . .	29
2.8.	Plataformas IoT	32
2.8.1.	Seguridad y Privacidad del IoT	34
2.8.2.	Gestión de Datos en IoT	36
2.8.3.	Aplicaciones del IoT	38
2.8.4.	Desafíos y Limitaciones del IoT	39
2.8.5.	Futuro del IoT y Tendencias Emergentes	41
2.9.	Integración de los Laboratorios Remotos con IoT	42
2.9.1.	Modelos de Implementación de Laboratorios Remotos en la Educación	44
2.9.2.	Estándares y Protocolos para Laboratorios Remotos	44
2.9.3.	Impacto de los Laboratorios Remotos en el Aprendizaje y la Enseñanza	45
2.9.4.	Tecnologías Emergentes en Laboratorios Remotos	46
3.	Materiales y métodos	48
3.1.	Arquitectura del Sistema de Laboratorio Remoto	48
3.2.	Herramientas y Tecnologías Utilizadas en el Desarrollo Web	50
3.2.1.	Estado de la plataforma existente	50
3.2.2.	Entorno de desarrollo y herramientas empleadas	51
3.2.3.	Control de versiones con SourceTree y Git	53
3.2.4.	Desarrollo del front-end	55
3.2.5.	Uso de JavaScript para interacción dinámica	56
3.2.6.	Desarrollo del back-end	57
3.2.7.	Almacenamiento y autenticación con Firebase	58
3.2.8.	Optimización de la plataforma web UAZ Labs con React y Firebase	59
3.2.9.	Integración del sistema completo	60
3.3.	Desarrollo y Optimización del Laboratorio Remoto	61
3.3.1.	Diseño General del Sistema	61
3.3.2.	Rediseño de la estructura física en SolidWorks	62
3.3.3.	Raspberry Pi 5	63
3.3.3.1.	Acceso a Firebase	64
3.3.3.2.	Programación automática de la FPGA	64

3.3.3.3.	Control digital con 16 GPIOs	64
3.3.3.4.	Manejo de errores y estabilidad del sistema	64
3.3.3.5.	Modularidad del código	65
3.3.4.	Streaming en Tiempo Real	66
3.4.	Diseño y Funcionalidad de la PCB	67
3.4.1.	Estructura esquemática del sistema	67
3.4.2.	Diseño físico de la PCB	68
3.4.3.	Integración con FPGA y controladores	69
3.4.4.	Comparación entre la PCB anterior y la nueva versión mejo- rada	70
4.	Resultados	72
4.1.	Desarrollo de la Plataforma Web: Labs Web	72
4.1.1.	Interfaz de Usuario y Autenticación	73
4.1.2.	Navegación y Selección de Laboratorios	74
4.1.3.	Control de Laboratorio y Transmisión	75
4.1.4.	Página Institucional y Misión Educativa	76
4.2.	Estructura Física y Montaje del Laboratorio	77
4.3.	Optimización de PCB	84
4.3.1.	Prueba de Interacción Web-Hardware	89
4.3.2.	Transmisión en Tiempo Real	89
4.3.3.	Usabilidad y Experiencia del Usuario	89
5.	Conclusiones	94
	Bibliografía	96

Índice de figuras

2.1. Concepto de laboratorios remotos	12
2.2. Aplicaciones del IoT en el ámbito educativo	15
2.3. Interacción de dispositivos con el Internet de las Cosas	21
2.4. Arquitectura de el Internet de las Cosas	24
2.5. Aplicaciones IoT	39
2.6. Resumen visual de los principales desafíos del IoT: ciberseguridad, gestión de datos, consumo energético, falta de estándares e impacto ambiental.	40
2.7. Diagrama de arquitectura con las tendencias emergentes del IoT. . .	42
3.1. Arquitectura general del sistema de laboratorio remoto desarrollado.	49
3.2. Plataforma anterior UAZ LABS	51
3.3. Herramientas utilizadas para el desarrollo web	53
3.4. Interfaz de SOURCETREE	54
3.5. Diagrama de flujo del proceso de automatización y control con Rasp- berry Pi 5	65
3.6. Diagrama esquemático de Streaming de Video	67
3.7. Diagrama esquemático principal del sistema de control de motores .	68
3.8. Vista 3D del diseño físico de la PCB con motores integrados	69
3.9. Izquierda: Nueva PCB ensamblada. Derecha: Versión anterior del diseño con motores conectados.	70
3.10. Izquierda: Vista superior del nuevo diseño físico. Derecha: Render 3D de la PCB anterior.	70
4.1. Interfaz principal de la plataforma Labs Web desarrollada para ac- ceso remoto al laboratorio.	73
4.2. Interfaz de inicio de sesión para acceso a Labs UAZ.	74

4.3. Formulario de registro con campos para correo, institución y rol del usuario.	74
4.4. Vista de selección de laboratorios dentro de la plataforma.	75
4.5. Módulo FPGA Lab con botones de navegación, sesiones programadas y contenido estructurado.	76
4.6. Interfaz de control remoto: transmisión en vivo y tablero para cargar archivos .bit y activar señales digitales.	76
4.7. Sección informativa de la plataforma Labs UAZ.	77
4.8. Modelo 3D actualizado del laboratorio remoto diseñado en Solid-Works.	78
4.9. Proceso de impresión 3D de una carcasa en Creality Ender 3.	78
4.10. Caja protectora impresa para la Raspberry Pi 5.	79
4.11. Carcasa impresa para el módulo conjunto de Basys 3 y PCB.	80
4.12. Caja impresa para el módulo de control del motor a pasos.	80
4.13. Vista general del laboratorio ensamblado con Raspberry Pi, Basys 3 y cámara.	82
4.14. Coples superiores impresos para ensamblaje modular.	83
4.15. Coples inferiores impresos para unión de perfiles.	83
4.16. Soporte ajustable impreso para la cámara de observación.	83
4.17. Eje impreso para el motor N20.	84
4.18. Primera versión de la PCB: distribución preliminar de componentes.	85
4.19. Proceso de soldadura de componentes SMD en la tarjeta final.	86
4.20. PCB ensamblada con motores y protegida por carcasa impresa.	87
4.21. Prueba funcional del laboratorio remoto con visualización desde la computadora del usuario.	88
4.22. Semestre actual de los participantes	89
4.23. ¿Consideras útil esta plataforma para complementar tus prácticas?	90
4.24. ¿Pudiste cargar el archivo .bit y controlar el hardware sin problemas?	90
4.25. ¿La transmisión en vivo fue clara y sincronizada con tus acciones?	91
4.26. ¿La respuesta del hardware fue inmediata y sin interrupciones?	91
4.27. ¿Pudiste identificar fácilmente los laboratorios disponibles?	91
4.28. ¿La interfaz gráfica fue clara e intuitiva?	92
4.29. ¿Qué tan fácil te pareció navegar por la plataforma UAZ Labs?	92
4.30. ¿Has utilizado antes un laboratorio remoto?	92

4.31. Respuestas abiertas a la pregunta: ¿Qué mejoras sugerirías para la plataforma?	93
---	----

Índice de tablas

2.1.	Resumen de ventajas, desafíos y beneficios de los laboratorios remotos	20
2.2.	Capas de la arquitectura del Internet de las Cosas (IoT)	23
2.3.	Protocolos de comunicación en IoT y sus características	28
2.4.	Tecnologías habilitadoras del Internet de las Cosas (IoT)	31
2.5.	Principales plataformas IoT y sus características	33
2.6.	Resumen de arquitecturas comunes en sistemas IoT	36
2.7.	Aspectos clave en la gestión de datos en IoT	37
3.1.	Componentes principales del sistema de laboratorio remoto	62

Capítulo 1

Introducción

Antecedentes

La crisis mundial generada por la pandemia del COVID-19 presentó uno de los mayores desafíos para los sistemas educativos a nivel global. La necesidad de implementar nuevas formas de enseñanza y aprendizaje a distancia forzó a las instituciones académicas a adaptarse rápidamente a nuevas tecnologías, creando un entorno donde la educación en línea y las herramientas tecnológicas se volvieron esenciales. Este contexto hizo evidente la importancia de las plataformas de aprendizaje remoto, así como de los laboratorios remotos habilitados por el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés, *Internet of Things*), los cuales permiten a los estudiantes realizar experimentos y acceder a recursos prácticos desde cualquier lugar.

La pandemia aceleró la adopción de estas tecnologías, demostrando su viabilidad y el enorme potencial que tienen para superar las barreras físicas y geográficas, brindando a los estudiantes una experiencia educativa más flexible y accesible. Además, enfoques como DevOps han comenzado a aplicarse en sistemas IoT educativos, permitiendo una retroalimentación y monitorización continua en entornos remotos [1].

En este contexto, los laboratorios remotos se consolidan como una alternativa eficaz para ofrecer experiencias prácticas, permitiendo a los estudiantes interactuar con equipos reales desde cualquier lugar, sin comprometer la calidad del aprendizaje ni la adquisición de habilidades fundamentales [2].

Asimismo, los laboratorios remotos son vitales para optimizar el aprendizaje en disciplinas como Ciencia, Ingeniería, Tecnología y Matemáticas (STEM). En estas

disciplinas, los alumnos deben presentarse a los laboratorios para llevar a cabo el trabajo asignado, donde en ocasiones el tiempo no es suficiente para completar dicho trabajo [3].

Las puertas de la enseñanza con los estudiantes representan nuestro intento de investigar nuevos medios para proporcionar laboratorios remotos que aborden las barreras a la adopción, aseguren la sostenibilidad a largo plazo y promuevan discusiones sobre la inclusión, la accesibilidad y la descolonización de los planes de estudio [4].

Compartir información y servicios en línea es una parte integral de nuestra vida cotidiana, particularmente en la educación, y los sistemas de aprendizaje electrónico se están volviendo populares. Sin embargo, la enseñanza de disciplinas técnicas requiere una gran experiencia práctica. Como resultado de esto, los laboratorios remotos son una alternativa atractiva que proporciona nuevas capacidades de aprendizaje tanto para los estudiantes como para los maestros [5].

Este tipo de plataformas representa una transformación significativa en la educación moderna, ya que permiten que estudiantes de distintas ubicaciones geográficas accedan a experiencias prácticas reales sin necesidad de estar físicamente presentes en un laboratorio. Las instituciones educativas deben prepararse para integrar laboratorios remotos como una herramienta permanente en sus modelos de enseñanza. Esta adopción no solo asegura la continuidad del aprendizaje ante situaciones imprevistas, sino que también democratiza el acceso a la educación, generando un entorno más inclusivo donde todos los estudiantes, sin importar su contexto, tengan las mismas oportunidades de desarrollar habilidades técnicas y participar en experiencias formativas significativas[6].

Descripción del problema

La enseñanza de disciplinas técnicas en la ingeniería y su aprendizaje práctico en el laboratorio es una parte esencial para consolidar los conocimientos teóricos. Sin embargo, en entornos de educación a distancia presenta un gran desafío. Las limitaciones incluyen la falta de acceso a equipos físicos, la disponibilidad de laboratorios o algún instructor para brindar asistencia. Frente a las limitaciones actuales del acceso a laboratorios físicos, especialmente en contextos donde no es posible la asistencia presencial constante, se evidencia la necesidad de replantear los modelos

educativos que dependen exclusivamente de la infraestructura local. El aprendizaje práctico, fundamental en áreas como la ingeniería y las ciencias aplicadas, se ve comprometido por la falta de disponibilidad de espacios físicos, horarios restringidos y el acceso limitado a equipos especializados[7].

Esta situación no solo restringe la participación de los estudiantes que se encuentran en zonas alejadas o con limitaciones económicas, sino que también afecta la continuidad de las actividades académicas durante contingencias, como fue el caso de la pandemia. Asimismo, se dificulta el desarrollo de la autonomía y la independencia en el aprendizaje, al depender completamente de la presencia física para la realización de prácticas fundamentales en su formación[8].

Por lo tanto, es necesario cuestionar la dependencia total de los modelos presenciales tradicionales, ya que representan una barrera para la equidad y la inclusión educativa en el acceso al conocimiento práctico[9].

A pesar de los avances tecnológicos, los estudiantes aún no tienen la posibilidad de experimentar con plataformas de hardware real en tiempo real, lo que limita el desarrollo de competencias prácticas clave. La falta de interacción con equipos como robots, sistemas embebidos o tarjetas de desarrollo impide comprender el comportamiento del sistema ante distintas condiciones de operación [10].

Esta separación entre la teoría y la práctica se convierte en un verdadero problema cuando los estudiantes no tienen la oportunidad de interactuar directamente con el hardware. Esto afecta especialmente a carreras como la ingeniería, donde es fundamental no solo entender los conceptos, sino aplicarlos en situaciones reales. Al no tener acceso a equipos físicos, los estudiantes se enfrentan a una formación incompleta, que puede limitar su capacidad para resolver problemas prácticos, tomar decisiones técnicas o incluso enfrentarse con seguridad al entorno laboral. En campos como el control de robots, sistemas embebidos o la automatización, la experiencia directa es clave para desarrollar habilidades como la programación de dispositivos, la conexión de sensores, el análisis de señales o la depuración de errores en tiempo real [11].

Si no se reducen estas barreras, seguirán existiendo vacíos en la formación técnica que dificultan el desarrollo profesional de los futuros ingenieros. Por eso, es necesario impulsar nuevas formas de enseñanza que integren lo práctico con lo remoto, aprovechando la tecnología para brindar experiencias más completas y accesibles desde cualquier lugar [12].

Justificación

El uso de la tecnología en la educación superior ha transformado la forma en la que los estudiantes interactúan con los contenidos teóricos y prácticos. Una de las disciplinas que más se ha caracterizado es la ingeniería por su aprendizaje práctico en los laboratorios, ya que es una parte esencial para reforzar los conocimientos adquiridos en el aula. Sin embargo, el cambio hacia la educación a distancia, impulsado por eventos globales como la pandemia de COVID-19, ha evidenciado las limitaciones de los métodos tradicionales de enseñanza, especialmente en la interacción con equipos físicos y la supervisión directa de procesos experimentales [13, 14, 15].

Los laboratorios remotos presentan una solución innovadora que permite a los estudiantes interactuar con equipos físicos de manera remota. A través del uso del Internet de las Cosas (IoT), estas plataformas proporcionan un acceso seguro y eficiente a equipos de laboratorio costosos y de difícil acceso, garantizando que los estudiantes puedan realizar prácticas y experimentos sin necesidad de estar presentes físicamente en un laboratorio. Esto no solo contribuye a una mejora del aprendizaje y una experiencia práctica, sino que también facilita la continuidad educativa en contextos de crisis, como en situaciones de confinamiento o limitaciones geográficas [16, 17, 18]. Durante la pandemia, incluso los laboratorios instalados en casa demostraron ser efectivos para mantener la motivación y el aprendizaje práctico en programas de ingeniería [7].

Al permitir el acceso remoto a laboratorios físicos, se fomenta la autonomía de los estudiantes, quienes pueden gestionar su tiempo de una manera más flexible y acceder a los recursos educativos cuando lo necesiten. Además, se facilita la colaboración entre estudiantes y profesores, lo que permite un enfoque más interactivo y dinámico en su aprendizaje. A su vez, se reducen los costos asociados a los laboratorios físicos y se ofrece una plataforma que se adapta a distintos tipos de cursos, beneficiando tanto a la institución educativa como a los propios estudiantes que harán uso de ella [19, 20].

Esta implementación de un sistema de laboratorios remotos basados en IoT ofrece una alternativa accesible para los estudiantes, especialmente aquellos que no pueden acceder fácilmente a un laboratorio físico debido a las limitaciones de

cualquier causa posible. Esto contribuye a la democratización del conocimiento en experiencias prácticas que, de otro modo, serían inaccesibles para ellos [21].

Esta tesis busca contribuir al desarrollo de métodos educativos innovadores, aprovechando el potencial de los laboratorios remotos y el IoT para mejorar la calidad del aprendizaje en la ingeniería, superar las barreras del aprendizaje presencial y ampliar las posibilidades de formación técnica para los estudiantes [22].

Objetivos e Hipótesis de trabajo

Objetivo general

Optimizar e implementar un laboratorio remoto basado en tecnologías IoT que permita a los estudiantes de ingeniería realizar prácticas a distancia con un sistema basado en FPGA, promoviendo el aprendizaje autónomo, la continuidad educativa y la accesibilidad a entornos experimentales desde cualquier ubicación con acceso a internet.

Objetivos específicos

- Optimizar el front end de la plataforma Web UAZ Labs.
- Diseñar la estructura 3D para el prototipo del laboratorio remoto.
- Optimizar el diseño de la PCB para mejorar la distribución de componentes y su integración con la estructura del laboratorio remoto.
- Modificar e implementar interfaces de usuario interactivas y accesibles.
- Evaluar el impacto del sistema de laboratorio remoto en el aprendizaje.

Hipótesis

- El uso de laboratorios remotos basados en IoT mejora la calidad del aprendizaje práctico en ingeniería, permitiendo a los estudiantes interactuar de una manera efectiva con equipos de laboratorio a distancia, superando las barreras geográficas y económicas, y promoviendo la autonomía en su proceso de aprendizaje. Además, la implementación de este laboratorio remoto facilita

la continuidad educativa en contextos de crisis, como durante los confinamientos o situaciones de limitada movilidad, sin comprometer la experiencia educativa práctica.

Capítulo 2

Revisión de literatura

2.1. Fundamentación teórica

En la actualidad, la industria está atravesando un proceso de transformación conocido como Industria 4.0, el cual representa un avance trascendental en comparación con sus revoluciones industriales anteriores. La Primera Revolución Industrial se caracterizó por la mecanización de procesos mediante el uso de energía hidráulica y vapor; la Segunda Revolución Industrial introdujo la producción en masa gracias a la energía eléctrica; y la Tercera Revolución Industrial marcó el inicio de la automatización mediante el empleo de robots y sensores en entornos de fabricación.

La principal característica de la Industria 4.0 es la integración de los Sistemas de Producción Industrial (*IPS por sus siglas en inglés*) con las Tecnologías de la Información y la Comunicación (*TIC por sus siglas en inglés*), destacando el papel fundamental del Internet de las Cosas (*IoT, por sus siglas en inglés, Internet of Things*) en este proceso. Esta convergencia tecnológica permite la creación de un Espacio Ciberfísico (*CPS por sus siglas en inglés*), en el cual los sistemas físicos y digitales se interconectan para optimizar tanto los procesos de manufactura como los productos resultantes. Según Ziaee y Hamedi (2021), estas aplicaciones de realidad aumentada en entornos industriales refuerzan la capacidad de interacción entre humanos y máquinas, mejorando la precisión y eficiencia en los procesos productivos y proyectando un crecimiento significativo dentro del marco de la Industria 4.0 [23].

A pesar de que la Tercera Revolución Industrial introdujo avances significativos en los procesos de producción y automatización, su evolución hacia la era digital

ha potenciado la capacidad para gestionar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Esta capacidad permite optimizar la toma de decisiones de manera más rápida y precisa, habilitando sistemas automatizados que responden de forma eficiente a las condiciones cambiantes del entorno industrial. La Industria 4.0 aprovecha estas tecnologías para fortalecer la competitividad mediante procesos inteligentes y adaptativos [24]. Por otro lado, Roel (1998) destaca que esta transición hacia una economía del conocimiento impulsa el desarrollo de infraestructuras digitales que facilitan el intercambio y procesamiento de información en tiempo real, redefiniendo los modelos de negocio tradicionales [25].

De igual manera, este proceso tecnológico impulsa un intercambio de información fluido y automático, eliminando en muchos casos la necesidad de intervención humana. Esta característica permite optimizar sectores estratégicos como la manufactura, la salud y la educación, incrementando la eficiencia y reduciendo tiempos de operación. La integración de tecnologías avanzadas como la Inteligencia Artificial, el Internet de las Cosas (*IoT*, por sus siglas en inglés, *Internet of Things*), la Computación en la Nube, sensores inteligentes, robots autónomos y otros servicios digitales ha transformado de manera profunda los procesos de producción y distribución de bienes y servicios, promoviendo una conexión dinámica y efectiva entre productos, máquinas, procesos y usuarios. Según Cantor (1994), esta interconexión digital redefine los paradigmas industriales, facilitando un flujo continuo de información y permitiendo una mayor adaptabilidad a las demandas del mercado [26].

La Tercera Revolución Industrial marcó un cambio significativo en la manera en que la tecnología influye en la economía, la sociedad y la vida cotidiana, generando transformaciones notables en distintos sectores. Este proceso tecnológico impulsó la automatización, la digitalización y la interconexión de los sistemas de producción, lo cual permitió una mayor eficiencia y un acceso más rápido a la información. Según Lastra (2017), esta etapa revolucionaria, descrita por Jeremy Rifkin, estableció las bases para un nuevo modelo económico y social, redefiniendo la forma en que interactuamos con el entorno y proyectando un desarrollo continuo que seguirá moldeando nuestras relaciones tecnológicas en el futuro [27].

La Cuarta Revolución Industrial, en la que nos encontramos actualmente, representa una etapa de profundas transformaciones tecnológicas que generan tan-

to oportunidades como desafíos significativos. En este contexto de digitalización masiva, se promueven iniciativas orientadas a garantizar un acceso equitativo al desarrollo tecnológico para todos, impulsando una democratización del conocimiento y las herramientas digitales. Esta nueva fase redefine la estructura de la sociedad, la economía y las industrias mediante la adopción de tecnologías disruptivas como la Inteligencia Artificial (AI), el Internet de las Cosas (IoT), vehículos autónomos, impresión 3D, nanotecnología, biotecnología, ciencia de materiales, almacenamiento de energía y computación cuántica.

Según López y Velasteguí (2021), la Industria 4.0 permite la automatización de procesos industriales a través de la interconexión y el análisis de datos en tiempo real, optimizando los flujos de trabajo y mejorando la eficiencia operativa [28]. Por su parte, Spöttl y Windelband (2021) destacan que esta revolución industrial no solo transforma los procesos productivos, sino que también impacta significativamente en las habilidades vocacionales, requiriendo una adaptación constante de los trabajadores a las nuevas tecnologías [29]. Aunque la Cuarta Revolución Industrial se construye sobre los fundamentos tecnológicos establecidos durante la Tercera Revolución Industrial, su alcance, velocidad e interconexión global la diferencian notablemente, proyectando un cambio sin precedentes en la forma en que interactuamos con la tecnología.

Esta nueva etapa industrial se centra en el desarrollo de productos inteligentes y en la mejora continua de los procesos productivos, lo cual está generando transformaciones significativas, especialmente en los sectores manufacturero y educativo. Según Herrington y Kervin (2021), estas innovaciones tecnológicas impulsan nuevas metodologías digitales en la educación de ingeniería, presentando tanto desafíos como oportunidades para el futuro de la formación profesional [30].

En las últimas décadas, la educación superior ha vivido una transformación profunda, impulsada por el avance de las tecnologías digitales y la incorporación de nuevas metodologías pedagógicas. Este cambio ha propiciado un entorno innovador que facilita el acceso al conocimiento y el desarrollo de habilidades de aprendizaje. En áreas técnicas como la ingeniería, es crucial implementar un enfoque que integre teoría y práctica para reforzar el aprendizaje en el aula y preparar a los estudiantes de manera más efectiva para los retos del mundo laboral actual. Estudios recientes destacan la importancia de laboratorios remotos y experimentos virtuales, que han demostrado mejorar la comprensión y aplicación práctica de los

estudiantes, especialmente en contextos de situaciones de educación a distancia [31, 32, 33].

En este contexto, el aprendizaje práctico es fundamental, ya que permite a los estudiantes aplicar los conceptos teóricos en situaciones reales, fortaleciendo sus habilidades técnicas y familiarizándolos con tecnologías clave para su futuro profesional. Tradicionalmente, el laboratorio físico ha sido el espacio más efectivo para este tipo de formación, ofreciendo un entorno donde los estudiantes interactúan directamente con equipos y materiales, desarrollan proyectos y enfrentan problemas de manera activa. Esta experiencia práctica facilita una comprensión más profunda del funcionamiento de sistemas, del comportamiento de materiales y de las herramientas propias de la ingeniería. Sin embargo, investigaciones recientes han comparado laboratorios virtuales basados en la nube con laboratorios físicos de bajo costo, explorando las percepciones de los estudiantes sobre ambos métodos. Además, se ha estudiado el papel de los laboratorios en casa para fomentar el aprendizaje, la autoeficacia y la motivación, especialmente durante la pandemia de COVID-19 [34, 35]. Mediante esta interacción directa, los estudiantes no solo adquieren conocimientos técnicos, sino que también desarrollan habilidades esenciales como el pensamiento crítico, la capacidad para resolver problemas y la toma de decisiones en contextos complejos. Además, el laboratorio fomenta el aprendizaje a través de los errores, la experimentación con diferentes métodos y el fortalecimiento de una comprensión profunda y significativa de los conceptos teóricos impartidos en clase [36, 37]. Sin embargo, la transición hacia modelos educativos a distancia, acelerada por la pandemia de COVID-19, representó un reto significativo para los métodos pedagógicos tradicionales. Las medidas de distanciamiento social y las limitaciones de movilidad restringieron el acceso a los laboratorios presenciales, afectando la formación práctica de los estudiantes. Aunque la educación en línea ha demostrado ser eficiente para la enseñanza teórica, ha mostrado limitaciones para cubrir áreas técnicas que requieren interacción directa con equipos y materiales específicos [38, 39, 40].

La falta de acceso presencial a los laboratorios físicos representa un desafío importante para la formación práctica en áreas técnicas como la ingeniería, donde la experiencia directa con sistemas y equipos es fundamental para adquirir las competencias profesionales requeridas. Esta situación ha motivado la búsqueda de nuevos métodos de enseñanza práctica en entornos virtuales, impulsando el

desarrollo de alternativas que permitan mantener el aprendizaje sin depender exclusivamente de la presencia física en los laboratorios [41].

Actualmente, a nivel mundial se reconoce la búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan el acceso remoto a los laboratorios, destacándose como una alternativa clave para asegurar la continuidad del aprendizaje práctico y para garantizar que los estudiantes de áreas técnicas no vean comprometida su formación profesional [42].

Para que estas alternativas sean realmente efectivas, es fundamental implementar enfoques innovadores que integren tecnologías emergentes, las cuales permitan la simulación, el monitoreo y el control remoto de los equipos de laboratorio, sin perder los estándares de calidad educativa propios de los entornos presenciales [43].

2.2. El concepto de laboratorios remotos

Los laboratorios son fundamentales en la educación en ingeniería, ya que permiten a los estudiantes aprender haciendo, mediante la experimentación, el análisis y la reflexión. Sin embargo, el distanciamiento social impuesto por la pandemia de COVID-19 planteó varios retos para continuar utilizando estos espacios de forma segura.

Como alternativa, se adoptaron laboratorios virtuales, remotos o híbridos, los cuales resultaron ser una opción práctica para continuar con los objetivos de aprendizaje sin descuidar el desarrollo de habilidades técnicas y personales.

Este cambio no solo respondió a la necesidad de mantener el ritmo académico, sino también a una realidad en la que la tecnología tiene un papel cada vez más relevante en la enseñanza. Gracias a estas alternativas, fue posible continuar con las prácticas educativas sin perder el enfoque práctico característico de la formación en ingeniería [44].

Aunque esta metodología ofrece numerosos beneficios, también enfrenta desafíos, especialmente en lo que respecta a mantener la motivación y participación activa del estudiantado. El acceso sencillo a los recursos no garantiza un aprendizaje profundo. A pesar de las ventajas del aprendizaje activo, su implementación en la enseñanza de ingeniería aún es limitada, en parte porque algunos alumnos

prefieren enfoques más pasivos, como ver videos o asistir a demostraciones como se muestra en Figura 2.1.

El concepto de laboratorios remotos

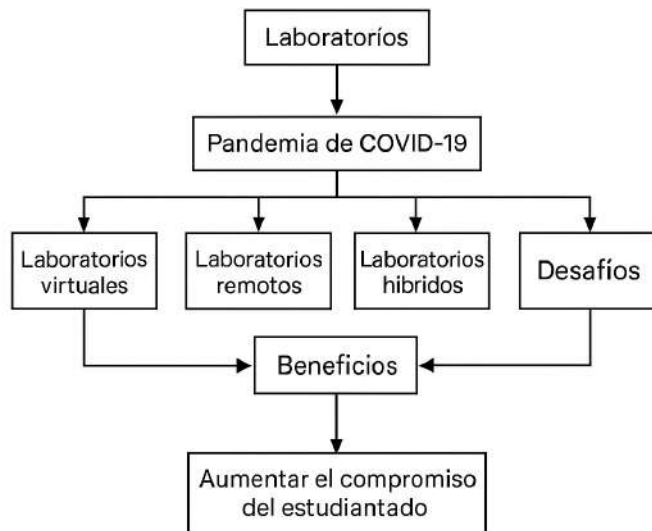


Figura 2.1: Concepto de laboratorios remotos

No obstante, se ha demostrado que plantear desafíos abiertos y ofrecer cierto grado de autonomía puede ser una estrategia efectiva para aumentar el compromiso de los estudiantes con su propio proceso de aprendizaje [45].

Por ejemplo, la Open University ha combinado diferentes tipos de prácticas, como kits caseros, experimentos virtuales y actividades presenciales. Sin embargo, también ha identificado limitaciones, especialmente en lo relacionado con el acceso a equipos costosos o laboratorios físicos.

Para hacer frente a estos retos, se desarrolló el proyecto PEARL, un sistema que permite realizar experimentos reales de forma remota desde el ordenador del estudiante, utilizando cámaras, micrófonos y herramientas de colaboración en línea.

Este enfoque no solo amplía el acceso, sino que también permite a múltiples universidades compartir recursos, reducir costos y fomentar una enseñanza más flexible e inclusiva en las áreas de ciencia e ingeniería [46].

La ingeniería se basa en trabajar con materiales, energía e información para crear soluciones que beneficien a la sociedad. Tradicionalmente, su enseñanza era

eminentemente práctica, donde los estudiantes aprendían diseñando y construyendo. En la actualidad, el aprendizaje se divide entre la teoría impartida en el aula y la práctica realizada en el laboratorio.

Si bien es relativamente sencillo ofrecer la teoría en línea mediante herramientas digitales, trasladar las actividades prácticas a un entorno virtual es más complejo. Existen dos principales alternativas: las simulaciones y los laboratorios remotos. Las simulaciones son útiles para comprender conceptos, pero no permiten experimentar con sistemas reales.

Por su parte, los laboratorios remotos posibilitan el manejo de equipos reales desde cualquier ubicación, aunque no siempre logran replicar la experiencia inmersiva de un laboratorio presencial. Para que la educación a distancia sea efectiva, es fundamental que las prácticas tengan objetivos claramente definidos; de lo contrario, resulta difícil innovar y asegurar el aprendizaje significativo [47].

Por otro lado, la automatización y las nuevas tecnologías han permitido ampliar el alcance educativo a más estudiantes en diversas ubicaciones, pero también han provocado la pérdida de cierta espontaneidad propia del laboratorio tradicional. Las universidades enfrentan así un dilema: reducir costos y ampliar cobertura sin comprometer la calidad del aprendizaje práctico.

Existen posturas encontradas: algunos autores consideran que las nuevas tecnologías potencian el aprendizaje, mientras que otros opinan que limitan las experiencias que los estudiantes realmente necesitan para desarrollarse como profesionales. Este desacuerdo se debe, en parte, a la falta de objetivos educativos estandarizados para evaluar cada tipo de laboratorio. Además, la escasa coordinación entre instituciones, la percepción de "presencia" en el laboratorio y la diversidad tecnológica contribuyen a que el debate permanezca abierto.

Finalmente, los investigadores concluyen que es necesario continuar explorando cómo las tecnologías emergentes pueden integrarse para fortalecer el aprendizaje práctico, sin sustituirlo de forma incompleta [48].

2.3. El Internet de las Cosas (IoT) en la educación

La tecnología del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ha despertado un creciente interés entre investigadores de diversas disciplinas, tanto científicas como humanísticas, debido a su impacto en múltiples ámbitos de la vida cotidiana.

En particular, su aplicación en el sector educativo ha cobrado relevancia por los beneficios que ofrece a las instituciones, docentes y estudiantes.

Diversos estudios han recopilado percepciones y experiencias sobre el uso del IoT en entornos educativos. Los resultados indican que esta tecnología contribuye a resolver problemáticas del ámbito académico, especialmente en contextos de crisis sanitaria, además de mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje mediante la implementación de recursos como aulas inteligentes y plataformas digitales [49].

El IoT no se limita a reemplazar metodologías pedagógicas tradicionales, sino que las complementa y amplía, permitiendo nuevas dinámicas de interacción, acceso a contenidos en tiempo real y automatización de tareas administrativas y académicas. Esta transformación incide tanto en la infraestructura educativa como en los modelos didácticos.

En términos prácticos, el IoT facilita que los estudiantes accedan a contenidos mediante imágenes, videos, objetos interactivos y materiales remotos, utilizando dispositivos como teléfonos inteligentes, computadoras portátiles y tabletas. Asimismo, promueve entornos de aprendizaje dinámicos, donde se optimiza el intercambio de información, la entrega de actividades y la evaluación en línea.

Adicionalmente, las plataformas de gestión del aprendizaje (LMS, por sus siglas en inglés), integradas con sensores y dispositivos IoT, permiten la recopilación y análisis de datos, la gestión automatizada de cursos y la generación de reportes académicos en tiempo real [50].

Actualmente, el IoT se aplica ampliamente en sectores como la medicina, el comercio, la atención al cliente, los hogares inteligentes y el monitoreo ambiental. En el ámbito educativo, su uso está en constante expansión debido a su capacidad para generar entornos de aprendizaje más eficientes, seguros e interactivos.

Escuelas e instituciones de distintos niveles están adoptando soluciones basadas en IoT con el fin de mejorar la experiencia educativa de estudiantes, docentes y personal administrativo. Estas tecnologías se están implementando tanto en clases presenciales como en entornos virtuales y laboratorios remotos, adaptándose a diversas modalidades y necesidades pedagógicas [51].

La relación de IoT con la educación se muestra en la Figura 2.2 para después explicar sus conceptos:

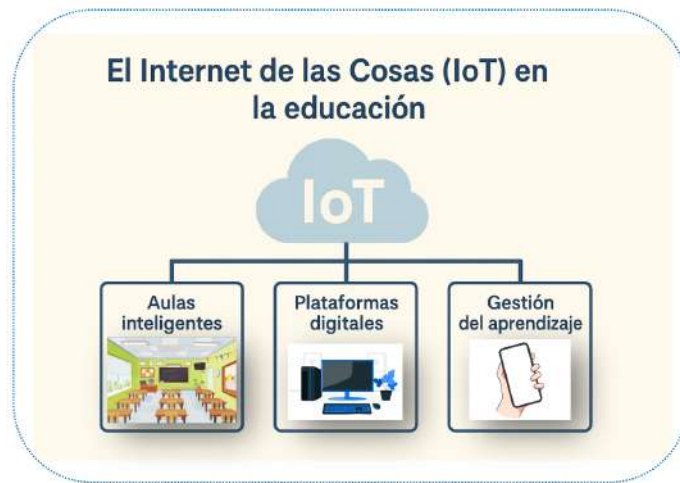


Figura 2.2: Aplicaciones del IoT en el ámbito educativo

- **Acceso remoto a equipos:** Gracias a la incorporación del IoT, los estudiantes pueden manipular y controlar dispositivos físicos de forma remota desde cualquier lugar, lo que les permite llevar a cabo prácticas y experimentos sin necesidad de asistir presencialmente al laboratorio.
- **Monitoreo en tiempo real:** Los sensores habilitados por IoT permiten la supervisión y el registro instantáneo de datos durante los experimentos, mejorando la experiencia práctica y profundizando el entendimiento de los conceptos técnicos.
- **Automatización y control:** La tecnología IoT permite automatizar diversas tareas en los laboratorios educativos, facilitando la creación de prácticas más sofisticadas y seguras a través de plataformas digitales.

2.4. Ventajas y desafíos de los laboratorios remotos

La expansión de la educación virtual, impulsada por la globalización y acelerada por la pandemia de COVID-19, ha motivado a las universidades a buscar alternativas para reducir costos y facilitar el acceso a la enseñanza. No obstante, uno de los principales retos ha sido ofrecer formación experimental de calidad en áreas como ciencia, ingeniería y tecnología, ya que la experimentación es clave en estos campos y ha demostrado tener un impacto significativo en el aprendizaje.

Ante estas limitaciones, han surgido los laboratorios remotos y virtuales como una respuesta tecnológica a los desafíos educativos. Los laboratorios remotos permiten el acceso a equipos reales a través de internet, mientras que los virtuales recrean entornos experimentales mediante simulaciones. Ambos modelos ofrecen ventajas como la disminución de costos, mayor cobertura geográfica, ahorro de tiempo en traslados y adaptación a la educación a distancia [52].

Ventajas de los Laboratorios Remotos

- **Reducción de costos operativos:** Los laboratorios remotos permiten disminuir los gastos asociados al mantenimiento, reparación y actualización de equipos físicos, así como los relacionados con la gestión de instalaciones. Esta optimización de recursos posibilita que las instituciones educativas redirijan fondos hacia áreas estratégicas de desarrollo [53].
- **Fomento de la colaboración interinstitucional:** Al permitir el acceso remoto a equipos especializados, los laboratorios remotos facilitan el intercambio de conocimientos y la cooperación entre distintas entidades académicas y científicas. Esta colaboración fortalece tanto los procesos educativos como los proyectos de investigación conjuntos [54].
- **Acceso ampliado a recursos:** La posibilidad de compartir recursos mediante laboratorios remotos no solo facilita la colaboración académica, sino que también amplía las oportunidades para que más estudiantes y profesionales interactúen con tecnologías avanzadas, sin la necesidad de poseer físicamente los equipos [55].

Desafíos Asociados a los Laboratorios Remotos

- **Limitaciones en la interacción práctica:** Aunque los laboratorios remotos ofrecen acceso a equipos y experimentos, pueden presentar desafíos en la replicación de la experiencia práctica y sensorial que se obtiene en un laboratorio físico.
- **Requerimientos tecnológicos:** La implementación efectiva de laboratorios remotos depende de una infraestructura tecnológica robusta, incluyendo una conexión a internet confiable y dispositivos adecuados, lo cual puede ser una barrera en ciertas regiones o instituciones.

- **Necesidad de capacitación:** Tanto docentes como estudiantes requieren formación específica para utilizar eficazmente las plataformas y herramientas asociadas a los laboratorios remotos, lo que implica una inversión adicional en tiempo y recursos.

En resumen, los laboratorios remotos representan una herramienta valiosa para la educación superior, ofreciendo beneficios significativos en términos de costos y colaboración. Sin embargo, es esencial abordar los desafíos asociados para maximizar su efectividad y garantizar una experiencia educativa integral.

2.5. Problemas de Diseño e Implementación para Laboratorios Remotos Modernos

La educación moderna, especialmente en ingeniería, enfrenta retos significativos debido a la necesidad de integrar tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Uno de los desafíos principales es ofrecer experiencias prácticas que tradicionalmente se realizan en laboratorios físicos, pero que ahora se buscan adaptar a entornos remotos para facilitar el acceso, reducir costos y flexibilizar el aprendizaje.

Los laboratorios remotos surgen como una solución efectiva, ya que permiten la ejecución de experimentos reales a distancia. Esta modalidad es especialmente útil para suplir la falta de acceso físico al laboratorio, aumentar la disponibilidad de horarios y facilitar el aprendizaje en contextos donde el acceso presencial es difícil [56].

El diseño e implementación de laboratorios virtuales se presenta como una alternativa viable y sostenible. La incorporación de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) ha permitido el desarrollo de entornos interactivos donde los estudiantes pueden realizar experimentos simulados que emulan las condiciones reales de un laboratorio físico. Este tipo de entornos, al estar disponibles en línea y ser accesibles desde cualquier lugar y en cualquier momento, resuelven varios de los problemas asociados a los laboratorios tradicionales: la limitación de espacio, la disponibilidad de materiales, el número de supervisores y la obsolescencia del equipo.

Sin embargo, la implementación de laboratorios virtuales también implica una serie de desafíos. Desde el punto de vista técnico, se requiere una plataforma estable que permita la integración de simulaciones científicas en entornos de aprendizaje como Moodle, tal como se hizo en el proyecto EXPERES, desarrollado entre universidades marroquíes y socios europeos. Este proyecto utilizó el lenguaje de programación JavaScript para desarrollar actividades prácticas virtuales alineadas con el currículo de física, aplicando un enfoque metodológico basado en el modelo instruccional ADDIE (Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación) [57].

Uno de los principales motivos que impulsaron su adopción fue la necesidad de garantizar la continuidad de la formación práctica en ingeniería durante la pandemia de Covid-19, sin comprometer la seguridad sanitaria. En este contexto, se desarrollaron plataformas que permiten a los estudiantes programar y controlar microcontroladores de manera remota, observando en tiempo real el comportamiento del hardware físico ubicado en laboratorios universitarios.

Este enfoque, aunque efectivo, plantea diversos desafíos. Desde el punto de vista técnico, es necesario asegurar una interfaz accesible y estable, normalmente basada en navegadores web, que permita la comunicación entre el usuario remoto y el equipo físico. Además, se requiere una arquitectura robusta que gestione múltiples conexiones y permita la ejecución segura de código sobre microcontroladores reales, sin comprometer el funcionamiento del sistema general ni dañar el hardware [58].

2.6. Beneficios de los Laboratorios Remotos

La crisis sanitaria provocada por la pandemia de COVID-19 obligó a muchos países a cerrar temporalmente sus instituciones educativas, afectando a más del 91 % del estudiantado a nivel global. Ante este escenario, el aprendizaje en línea se convirtió en la única vía efectiva para asegurar la continuidad educativa. Los laboratorios remotos surgieron como una solución clave para suplir la ausencia de prácticas presenciales, especialmente en áreas científicas y de ingeniería.

Un estudio realizado en la Universidad Imam Abdulrahman Bin Faisal evaluó los beneficios esperados del aprendizaje virtual, utilizando el modelo teórico

Push-Pull-Mooring (PPM) y la *Teoría de la Motivación de Protección* (PMT). Estos marcos conceptuales permitieron analizar cómo factores externos (como la amenaza ambiental y el riesgo sanitario), motivaciones internas (interés por el *e-learning*, percepción de seguridad, intercambio de información) y variables personales (como la confianza en la tecnología) influyen en la percepción positiva del aprendizaje virtual [59].

Los beneficios de los laboratorios remotos son:

- **Accesibilidad continua:** los estudiantes pueden realizar prácticas desde cualquier lugar y en cualquier momento.
- **Reducción de riesgos sanitarios:** se evita la interacción física en entornos potencialmente riesgosos.
- **Inclusión educativa:** se mitiga la exclusión por falta de infraestructura física en instituciones con recursos limitados.
- **Autonomía del aprendizaje:** se fomenta la responsabilidad del estudiante al permitirle trabajar a su propio ritmo.
- **Sostenibilidad:** al no requerir equipos físicos, los laboratorios remotos son una alternativa ecológica y de bajo costo.

El uso de tecnologías como robótica autónoma, simulación, realidad aumentada, manufactura aditiva, Internet de las Cosas (IoT), ciberseguridad, analítica de datos y computación en la nube permite a los estudiantes interactuar con entornos industriales virtuales desde cualquier ubicación. Estos laboratorios, además de replicar condiciones reales de trabajo, fomentan competencias críticas para la I4, como la programación, el análisis de datos, el diseño digital y la toma de decisiones en tiempo real.

Las universidades líderes en ingeniería ya están incorporando estos recursos en sus planes de estudio para cerrar la brecha entre la formación académica y las necesidades de la industria moderna. A través de simulaciones, sistemas integrados, y plataformas colaborativas en la nube, los estudiantes desarrollan habilidades prácticas sin necesidad de estar presentes en una planta física [60].

Tabla 2.1: Resumen de ventajas, desafíos y beneficios de los laboratorios remotos

Ventajas	Desafíos	Beneficios esperados
Reducción de costos operativos	Limitaciones en la interacción práctica	Accesibilidad continua desde cualquier lugar
Colaboración inter-institucional	Requerimientos tecnológicos elevados	Reducción de riesgos sanitarios
Acceso ampliado a recursos especializados	Necesidad de capacitación docente y estudiantil	Inclusión educativa en zonas con infraestructura limitada
Flexibilidad de horarios y acceso remoto	Complejidad técnica en el diseño de plataformas	Aprendizaje autónomo y personalizado
Disponibilidad 24/7 de recursos experimentales	Seguridad y robustez de la arquitectura remota	Alternativa ecológica y sostenible
Adaptabilidad a escenarios de crisis	Integración con plataformas de gestión educativa	Desarrollo de habilidades clave para la Industria 4.0

2.7. Internet de las Cosas (IoT)

El concepto de Internet de las Cosas no cuenta con una definición única, sino que existen múltiples interpretaciones del término. Su origen se remonta a 1999, cuando Kevin Ashton, ingeniero que en ese momento trabajaba en Procter and Gamble en Estados Unidos, presentó la idea durante una conferencia. En ella propuso el uso de etiquetas RFID (identificación por radiofrecuencia) para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro y superar las limitaciones de los códigos de barras.

Años más tarde, el 12 de julio de 2009, Ashton formalizó el concepto en un artículo publicado en RFID Journal, donde explicó que el IoT consiste en conectar objetos del entorno para identificarlos, rastrear su ubicación en tiempo real y obtener información relevante sobre su contexto [61].

Si tuviésemos computadores que fuesen capaces de saber todo lo que pudiese saberse de cualquier cosa (‘las cosas’) –usando datos recolectados sin intervención humana – seríamos capaces de hacer seguimiento detallado de todo, y poder reducir de forma importante los costes y malos usos. Sabríamos cuando las cosas necesitan ser reparadas, cambia-

das o recuperadas, incluso si están frescas o pasadas de fecha. El Internet de las cosas tiene el potencial de cambiar el mundo como ya lo hizo Internet. O incluso más.

El Internet de las Cosas (IoT) se destaca por su gran impacto en la vida diaria y en el comportamiento humano. Para los usuarios particulares, sus efectos más evidentes se notarán tanto en el hogar como en el trabajo, con aplicaciones en áreas como la domótica, la asistencia en la vida diaria, la salud digital y la educación. En el ámbito empresarial, el IoT influirá principalmente en la automatización, la producción industrial, la logística, la gestión organizacional y el transporte inteligente de personas y productos, como se muestra en la Figura 2.3 [62].

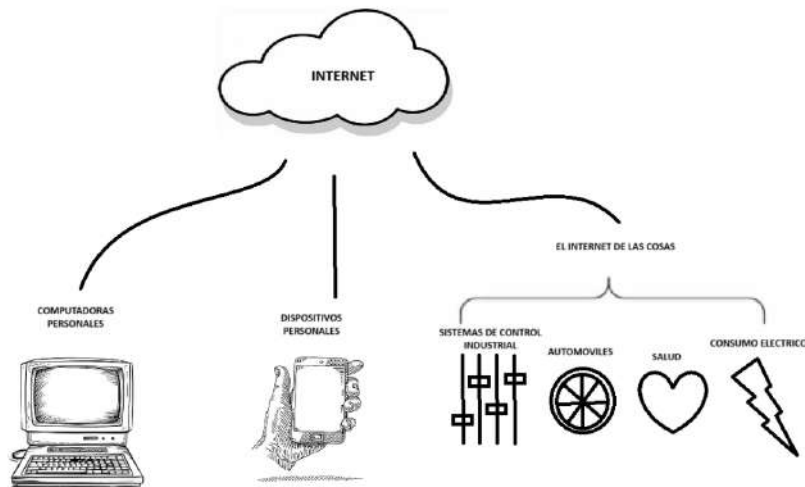


Figura 2.3: Interacción de dispositivos con el Internet de las Cosas

2.7.1. Arquitectura del Internet de las Cosas

La arquitectura tradicional de Internet y de las redes de telecomunicaciones no se adapta completamente al Internet de las Cosas (IoT), aunque comparten algunas similitudes. Por ello, se ha propuesto una nueva arquitectura específica para IoT, que combina elementos de ambas tecnologías junto con características propias del IoT [63]. Esta arquitectura se divide en cinco capas:

- **Capa de Percepción:** Encargada de detectar las características físicas de los objetos (como temperatura o posición) mediante sensores como RFID, códigos de barras o GPS. Su función principal es recolectar datos y convertirlos en señales digitales.
- **Capa de Transporte:** Se ocupa de transmitir los datos desde la capa de percepción hasta los centros de procesamiento utilizando redes como Local Area Network (LAN), FTTx, 3G, Wifi, Bluetooth, Zigbee, UWB, tecnología infrarroja. Protocolos como IPv6 son clave en esta capa.
- **Capa de Procesamiento:** Almacena, analiza y procesa la gran cantidad de datos recibidos. Utiliza tecnologías como computación en la nube y computación ubicua. Esta capa es esencial para el crecimiento del IoT.
- **Capa de Aplicación:** Transforma los datos procesados en aplicaciones prácticas como transporte inteligente, logística, salud, seguridad, etc. Es clave para la expansión del IoT en distintos sectores.
- **Capa de Negocio:** Administra las aplicaciones, modelos de negocio, estrategias financieras y aspectos como la privacidad del usuario. Esta capa garantiza que el IoT sea sostenible, rentable e innovador.
- **Local Area Network (LAN):** Red de área local que conecta dispositivos dentro de una ubicación geográfica limitada, como una casa, escuela o edificio.
- **FTTx (Fiber to the x):** Familia de tecnologías que utilizan fibra óptica para proporcionar acceso a Internet, donde "x" puede representar distintos puntos finales como hogares (FTTH), edificios (FTTB) o aceras (FTTC).
- **3G:** Tercera generación de tecnología de comunicación móvil que permite la transmisión de datos y acceso a Internet a mayor velocidad que sus predecesoras.
- **WiFi:** Tecnología inalámbrica que permite la conexión de dispositivos a una red local y a Internet mediante ondas de radio.
- **Bluetooth:** Tecnología inalámbrica de corto alcance utilizada para la transmisión de datos entre dispositivos como teléfonos, computadoras y periféricos.

- **Zigbee:** Protocolo de comunicación inalámbrica de bajo consumo, usado principalmente en aplicaciones de automatización del hogar y sistemas de sensores.
- **UMB (Ultra Mobile Broadband):** Tecnología propuesta como evolución del 3G para ofrecer mayores velocidades de transmisión, aunque fue descontinuada en favor de LTE.
- **Tecnología infrarroja:** Sistema de transmisión de datos a través de luz infrarroja, útil en distancias cortas y con línea de visión directa, como controles remotos.

Tabla 2.2: Capas de la arquitectura del Internet de las Cosas (IoT)

Capa	Función principal	Tecnologías asociadas
Percepción	Detectar y recolectar datos físicos del entorno mediante sensores.	RFID, códigos de barras, GPS, sensores de temperatura, sensores de posición.
Transporte	Transmitir los datos desde los sensores hasta los centros de procesamiento.	LAN, FTTx, 3G, WiFi, Bluetooth, Zigbee, UMB, infrarrojo, IPv6.
Procesamiento	Almacenar, analizar y procesar los datos recibidos.	Computación en la nube, computación ubicua, servidores centrales.
Aplicación	Convertir datos procesados en soluciones prácticas para distintos sectores.	Transporte inteligente, salud, logística, seguridad, automatización.
Negocio	Gestionar modelos de negocio, privacidad y sostenibilidad del sistema.	Estrategias financieras, análisis de rendimiento, administración de datos.

El Internet de las Cosas (IoT) gira en torno a dispositivos físicos como sensores y actuadores que se comunican entre sí y con plataformas externas, usualmente a través de un servidor central. Los sensores permiten recopilar información del entorno —como la calidad del aire—, mientras que los actuadores pueden ejecutar acciones —como encender un sistema de ventilación— en respuesta a las decisiones de los usuarios o a reglas previamente configuradas. Esta interacción entre usuarios y dispositivos físicos, junto con el desarrollo de aplicaciones inteligentes

que permiten analizar, predecir o controlar procesos, es fundamental en los sistemas IoT.

En cuanto a su arquitectura en la Figura 2.4 se muestra como se divide, actualmente no existe un estándar universalmente adoptado. La diversidad de tecnologías utilizadas en dispositivos y plataformas obliga a los usuarios a integrar distintas soluciones, lo cual puede ser complejo y tardado. Para reducir esta dificultad, diversas organizaciones han trabajado en la creación de marcos técnicos estandarizados [64].

Arquitectura del Internet de las Cosas

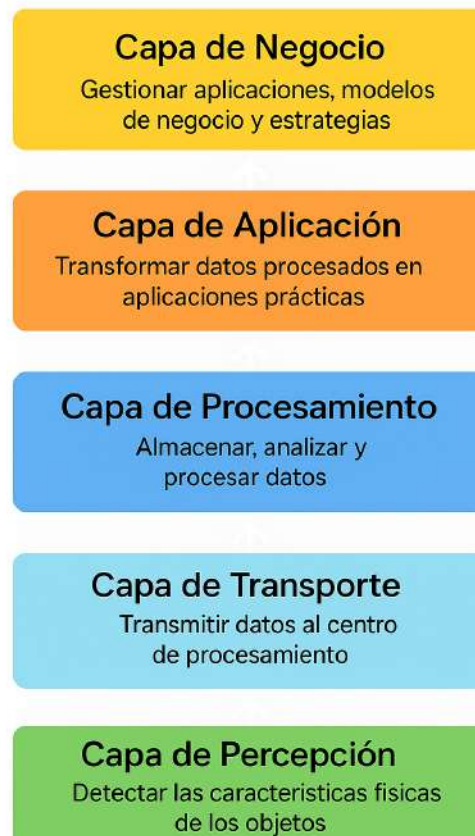


Figura 2.4: Arquitectura de el Internet de las Cosas

2.7.2. Protocolos de comunicación y amenazas de seguridad

La seguridad es una de las principales preocupaciones del Internet de las Cosas (IoT), ya que esta tecnología se aplica en sectores críticos como la economía y la seguridad nacional. Debido a la diversidad de estándares y especificaciones utilizadas, es esencial minimizar los riesgos y reducir las posibles vulnerabilidades.

Un ejemplo real ocurrió en abril de 2021, cuando investigadores de Microsoft detectaron fallos graves en la asignación de memoria de ciertos dispositivos IoT, los cuales podrían ser aprovechados para ejecutar código malicioso o generar fallos del sistema.

Además de los ciberataques, las redes IoT heterogéneas y de gran escala deben construirse sobre arquitecturas robustas que puedan gestionar correctamente aspectos como confiabilidad, calidad del servicio, privacidad, interoperabilidad y compatibilidad entre hardware y software.

Analizando las amenazas desde la perspectiva del modelo de tres capas (percepción, red y aplicación), se pueden identificar diferentes tipos de ataques y su impacto en los tres pilares de la seguridad informática: confidencialidad, integridad y disponibilidad. La mayoría de los ataques afectan la integridad y disponibilidad de los datos, aunque algunos comprometen seriamente la confidencialidad [65].

- **WPAN (Wireless Personal Area Network):** Según IEEE, las WPAN conectan dispositivos cercanos al cuerpo humano. Estas redes requieren bajo consumo de energía, tamaño reducido, bajo costo y facilidad de uso, ideales para dispositivos portátiles y vestibles.
- **NFC y RFID:** Tecnologías de corto alcance utilizadas para identificación. NFC se destaca por su simplicidad y amplia adopción en móviles. RFID usa etiquetas (tags) activadas por ondas de radio emitidas por lectores, clasificándose en:
 - PRAT: Lector pasivo, etiqueta activa.
 - ARPT: Lector activo, etiqueta pasiva.
 - ARAT: Ambos activos.

ISO/IEC 14443 define estándares para estas tecnologías.

- **Bluetooth IEEE 802.15.1:** Tecnología global en la banda de 2.4 GHz. Maneja comunicaciones asíncronas (ACL) y síncronas (SCO) a través de capas como L2CAP y LMP.
- **Bluetooth Low Energy (BLE):** Variante de bajo consumo de Bluetooth. Solo permite topología en estrella, donde la comunicación entre dispositivos esclavos debe pasar por el maestro. No es compatible directamente con Bluetooth clásico.
- **IEEE 802.15.4:** Protocolo de bajo costo y bajo consumo para redes personales. Soporta capas físicas y de acceso al medio para ZigBee y 6LoWPAN. Muy usado en aplicaciones cercanas al cuerpo humano.
- **Wireless-HART:** Variante de IEEE 802.15.4 orientada a aplicaciones industriales. Utiliza TDMA en su capa MAC para mejorar la confiabilidad y la seguridad en ambientes industriales.
- **Z-Wave:** Tecnología inalámbrica orientada a domótica. Usa topología en malla y permite controlar iluminación, temperatura y seguridad desde dispositivos móviles.
- **Weightless:** Conjunto de protocolos LP-WAN (bajo consumo y gran cobertura) con variantes (P, N, W). Usa topología en estrella con estaciones base y nodos finales (EDs), ideal para redes IoT de largo alcance.
- **IEEE 802.11 (a/b/g/n/ah):** Conjunto de estándares para redes Wi-Fi. Utiliza topologías ad hoc o en estrella con puntos de acceso (APs) y estaciones (STAs). Puede formar redes extendidas (ESS) interconectando varios APs.
- **Protocolos LP-WAN (Largo Alcance):** Superan limitaciones de LANs y redes móviles convencionales. Incluyen tecnologías como:
 - **NB-IoT:** Opera en banda estrecha (180 kHz) para bajo consumo y amplia cobertura. Puede implementarse dentro de GSM o LTE.
 - **LTE eMTC (CAT-M):** Versión mejorada de LTE para IoT, reduce complejidad y mantiene seguridad y cobertura, ideal para dispositivos M2M.

- **LoRa:** Tecnología física de largo alcance y bajo consumo. Usa espectro expandido (CSS) y modulación FSK, incluso con señal bajo el nivel de ruido.
- **SigFox:** Protocolo LP-WAN propietario, diseñado para transmitir pequeñas cantidades de datos a largas distancias con mínimo consumo de energía.

Tabla 2.3: Protocolos de comunicación en IoT y sus características

Protocolo / Tecnología	Características clave	Ámbitos de aplicación
WPAN (IEEE 802.15)	Redes personales de corto alcance, bajo consumo, tamaño reducido	Dispositivos portátiles y vestibles
NFC / RFID	Identificación por radiofrecuencia; corto alcance; RFID puede ser pasiva o activa	Pagos móviles, control de acceso, inventario
Bluetooth / BLE	Conectividad inalámbrica en 2.4 GHz; BLE es de bajo consumo y topología estrella	Interacción entre dispositivos personales, IoT doméstico
IEEE 802.15.4	Bajo costo y consumo; soporte para ZigBee y 6LoWPAN	Automatización del hogar, monitoreo cercano al cuerpo
Wireless-HART	Variante de IEEE 802.15.4 con TDMA; mayor fiabilidad en entornos industriales	Automatización industrial
Z-Wave	Comunicación en malla; control desde móviles	Domótica, iluminación, seguridad doméstica
Weightless (P/N/W)	Protocolo LP-WAN con topología estrella y gran cobertura	Redes IoT urbanas o rurales de largo alcance
IEEE 802.11 (WiFi)	Alta velocidad; topología estrella o ad hoc; redes extendidas (ESS)	Ambientes de alta conectividad y ancho de banda
NB-IoT	Banda estrecha, alta penetración y cobertura; bajo consumo	Medidores inteligentes, sensores en ciudades inteligentes
LTE-M (eMTC / CAT-M)	Versión simplificada de LTE para IoT; alta seguridad y cobertura	Dispositivos M2M, movilidad controlada
LoRa	Tecnología de espectro ensanchado (CSS); señales bajo el ruido	Agricultura inteligente, monitoreo ambiental
SigFox	Tecnología LP-WAN propietaria; datos pequeños a larga distancia	Sensores remotos con consumo ultra bajo

Estas tecnologías resultan fundamentales para optimizar la implementación del Internet de las Cosas (IoT) en sectores variados, tales como la automatización industrial y las soluciones para ciudades inteligentes. La eficiencia en el consumo energético es un factor clave en la elección del protocolo de comunicación.

La selección del protocolo más adecuado para una red de Internet de las Cosas (IoT) depende directamente de los requerimientos específicos de cada aplicación. En términos generales las WPAN (Wireless Personal Area Networks) conectan dispositivos cercanos al cuerpo humano, destacándose por su bajo consumo, tamaño reducido y facilidad de uso. Tecnologías como NFC y RFID permiten la identificación a corto alcance, mientras que Bluetooth (clásico y BLE) ofrece conectividad eficiente en 2.4 GHz con distintas topologías. Protocolos como IEEE 802.15.4, Wireless-HART y Z-Wave se enfocan en aplicaciones de bajo consumo para entornos personales, industriales y domótica. Para comunicaciones de largo alcance y baja energía, las tecnologías LP-WAN como NB-IoT, LTE-M, LoRa y SigFox brindan cobertura extendida, complementadas por estándares Wi-Fi (IEEE 802.11) para conexiones más rápidas y flexibles [66].

2.7.3. Tecnologías Habilitadoras del Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) se ha convertido en una tecnología fundamental en la transformación digital de diversos sectores, desde la salud hasta la industria. Para su funcionamiento, el IoT depende de un conjunto de tecnologías habilitadoras que permiten la conectividad, el procesamiento eficiente de datos, la escalabilidad, la seguridad y la adaptabilidad a diferentes entornos.

A continuación, se describen las principales tecnologías habilitadoras del IoT en el periodo 2019–2025:

- **Computación en el Borde y en la Niebla (Edge/Fog Computing):** Esta arquitectura distribuye el procesamiento de datos hacia el borde de la red, reduciendo la latencia y el consumo de ancho de banda, lo cual es esencial en aplicaciones como la salud, el transporte autónomo y la industria 4.0 [67].
- **Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN):** Tecnologías como LoRa-WAN, NB-IoT y Sigfox permiten la comunicación eficiente entre dispositivos a largas distancias con bajo consumo de energía, lo que las hace ideales para aplicaciones de monitoreo en ciudades inteligentes y agricultura de precisión [68].
- **Aprendizaje Federado (Federated Learning):** Permite entrenar modelos de inteligencia artificial de forma descentralizada, protegiendo la privacidad de

los datos en los dispositivos IoT y reduciendo la congestión en la red. Es una técnica clave en entornos sensibles como la salud y la seguridad [69].

- **Redes Celulares 5G y Futuras Redes 6G:** Las redes 5G y sus sucesoras ofrecen conectividad masiva, alta velocidad y baja latencia, características esenciales para soportar millones de dispositivos IoT en tiempo real, especialmente en entornos urbanos e industriales [70].
- **Integración de Sensado y Comunicación (ISAC):** Esta tecnología combina funciones de sensado y comunicación en un solo sistema, permitiendo una utilización más eficiente del espectro y reducción en el consumo energético, lo que es útil en dispositivos embebidos IoT [71].
- **Tecnologías de Seguridad y Blockchain:** La implementación de algoritmos criptográficos ligeros, así como el uso de blockchain, mejora la seguridad, integridad y trazabilidad de los datos generados por dispositivos IoT, especialmente en aplicaciones como salud, banca y logística.
- **Protocolos de Comunicación Avanzados:** Protocolos como MQTT, CoAP y DDS optimizan la transmisión de datos en redes IoT al ser ligeros, eficientes y diseñados para dispositivos con recursos limitados [72].

Tabla 2.4: Tecnologías habilitadoras del Internet de las Cosas (IoT)

Tecnología	Descripción	Aplicaciones principales
Computación en el Borde y la Niebla (Edge/Fog)	Procesamiento distribuido cerca del origen de los datos, reduce latencia y carga de red.	Salud, transporte autónomo, industria 4.0
Redes LPWAN	Comunicación de largo alcance con bajo consumo energético. Incluye LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox.	Ciudades inteligentes, agricultura de precisión
Aprendizaje Federado	Entrenamiento descentralizado de modelos de IA preservando la privacidad.	Salud, seguridad, dispositivos con datos sensibles
Redes 5G y 6G	Alta velocidad, baja latencia, gran capacidad de conexión simultánea.	Entornos urbanos densos, automatización industrial
Integración de Sensado y Comunicación (ISAC)	Sistemas que combinan sensado y transmisión de datos eficientemente.	Dispositivos embebidos, sensores IoT
Tecnologías de Seguridad y Blockchain	Criptografía ligera y blockchain para asegurar trazabilidad y protección de datos.	Logística, banca, salud, ciberseguridad
Protocolos de Comunicación Avanzados	Protocolos eficientes como MQTT, CoAP y DDS para entornos con recursos limitados.	Redes IoT ligeras, automatización, sensores distribuidos

Estas tecnologías, al integrarse de manera conjunta, establecen la infraestructura esencial sobre la cual se diseñan y despliegan las soluciones y aplicaciones modernas del Internet de las Cosas. Su implementación garantiza no solo un desempeño eficiente y una alta confiabilidad, sino también la sostenibilidad operativa necesaria para adaptarse a distintos entornos y demandas. De este modo, facilitan la optimización de recursos, la mejora en la comunicación entre dispositivos y la capacidad de respuesta en tiempo real, aspectos clave para el éxito y la evolución continua de los sistemas IoT en diversos sectores industriales, comerciales y sociales.

2.8. Plataformas IoT

Las plataformas IoT constituyen entornos de software diseñados para simplificar la gestión, el control y el monitoreo de dispositivos interconectados dentro de una red. Estas plataformas ofrecen un conjunto integral de herramientas que permiten la integración eficiente de sensores, el procesamiento y análisis de datos en tiempo real, así como la comunicación fluida entre los dispositivos y los usuarios finales. Mediante el uso de interfaces de programación de aplicaciones (APIs) y servicios especializados, los desarrolladores pueden construir soluciones adaptadas a necesidades específicas en múltiples sectores, tales como aplicaciones industriales, residenciales y comerciales, facilitando la automatización y optimización de procesos.

Entre las plataformas IoT más utilizadas actualmente destacan:

- **Amazon Web Services (AWS) IoT:** Plataforma en la nube que ofrece escalabilidad, soporte para múltiples protocolos y avanzadas funciones de seguridad. AWS IoT facilita la conexión y administración de millones de dispositivos, integrando análisis y aprendizaje automático [73].
- **Microsoft Azure IoT:** Ofrece un conjunto de servicios para la recopilación, almacenamiento y análisis de datos IoT. Azure destaca por su integración con herramientas de inteligencia artificial y soporte para arquitecturas híbridas [74].
- **Google Cloud IoT:** Plataforma orientada a la gestión segura y en tiempo real de dispositivos conectados. Se distingue por su compatibilidad con protocolos abiertos y la integración con Big Data [75].
- **IBM Watson IoT:** Enfocada en soluciones empresariales, esta plataforma incorpora capacidades cognitivas para el análisis avanzado de datos y soporte a decisiones inteligentes [76].
- **ThingsBoard:** Plataforma open-source que permite la visualización de datos, gestión de dispositivos y reglas de negocio personalizables. Es popular para aplicaciones educativas y proyectos a pequeña escala [77].

Tabla 2.5: Principales plataformas IoT y sus características

Plataforma IoT	Características clave	Aplicaciones típicas
Amazon Web Services (AWS) IoT	Plataforma en la nube escalable, soporte para múltiples protocolos, integración con análisis y machine learning.	Automatización industrial, ciudades inteligentes, salud conectada
Microsoft Azure IoT	Servicios completos para recopilación, almacenamiento y análisis de datos. Integración con IA y arquitecturas híbridas.	Manufactura, transporte, monitoreo energético
Google Cloud IoT	Gestión segura y en tiempo real de dispositivos conectados. Compatibilidad con protocolos abiertos e integración con Big Data.	Agricultura inteligente, logística, rastreo de activos
IBM Watson IoT	Soluciones empresariales con capacidades cognitivas e inteligencia para toma de decisiones.	Mantenimiento predictivo, robótica, monitoreo industrial
ThingsBoard	Plataforma open-source con gestión de dispositivos, visualización de datos y reglas de negocio personalizables.	Educación, prototipos, laboratorios remotos

Las plataformas IoT difieren considerablemente en cuanto a su arquitectura interna, los protocolos de comunicación que soportan, los lenguajes de programación con los que son compatibles, así como en las funcionalidades relacionadas con la seguridad y la privacidad que ofrecen. La selección de la plataforma más adecuada está condicionada por el ámbito de aplicación, la escala y complejidad de la red de dispositivos, y los requerimientos particulares de cada proyecto, incluyendo aspectos técnicos, económicos y de seguridad.

Es fundamental destacar que, a pesar de que cada plataforma IoT presenta características y beneficios específicos, todas comparten desafíos significativos en aspectos como la interoperabilidad entre dispositivos y sistemas heterogéneos, la gestión efectiva y segura de grandes volúmenes de datos, así como la implementación de mecanismos robustos para protegerse contra diversas vulnerabilidades y amenazas de seguridad [78].

2.8.1. Seguridad y Privacidad del IoT

El Internet de las Cosas (*IoT, por sus siglas en inglés*) es una red global de objetos físicos interconectados a través de Internet. Estos dispositivos, como sensores, electrodomésticos, vehículos y sistemas industriales, están equipados con capacidades de computación y comunicación, permitiéndoles recopilar, procesar e intercambiar datos de forma autónoma sin intervención humana directa.

Esta tecnología se apoya en sistemas embebidos, RFID, redes de sensores inalámbricos (WSN), y otros mecanismos que habilitan nuevas aplicaciones en áreas como la salud, el transporte inteligente, las ciudades inteligentes y la automatización industrial.

El crecimiento del IoT ha sido exponencial; se estima que para 2020 más de 30 mil millones de dispositivos estuvieron conectados a Internet, generando ingresos superiores a los 700 mil millones de euros [79]. Sin embargo, esta conectividad masiva trae consigo desafíos significativos en cuanto a seguridad y privacidad.

A medida que aumenta la cantidad de datos generados y compartidos, también lo hacen las vulnerabilidades del sistema. En ausencia de mecanismos de protección adecuados, estos sistemas podrían ser blanco de ataques que comprometan la integridad de los datos o la privacidad del usuario [80].

Diseñar esquemas de seguridad para el IoT resulta especialmente complejo debido a que muchos de estos dispositivos tienen recursos limitados: poca capacidad de procesamiento, almacenamiento reducido y bajo consumo energético.

Por tanto, se requieren soluciones innovadoras que equilibren la eficiencia energética con la robustez frente a ataques, garantizando confidencialidad, integridad, autenticación y disponibilidad [81].

Diversas arquitecturas se han propuesto para estructurar los sistemas IoT:

- **Arquitectura de tres capas:** consta de una capa de percepción (sensado del entorno), una capa de red (transmisión de datos) y una capa de aplicación (servicios al usuario). Es básica, pero limitada para aplicaciones emergentes.
- **Basada en middleware:** añade capas como la de tecnología de borde, pasarelas de acceso y un middleware que facilita la interoperabilidad y el control entre dispositivos y aplicaciones.

- **Arquitectura SOA (orientada a servicios):** cada objeto ofrece funciones específicas y se accede a través de servicios web, permitiendo composiciones dinámicas de servicios [82].
- **Arquitectura de cinco capas:** incluye las anteriores y agrega la capa de negocios, que se encarga de la gestión de las aplicaciones y su viabilidad económica.
- **Arquitectura basada en la nube y la niebla:** el procesamiento de datos se reparte entre la nube y dispositivos de borde, permitiendo análisis cercanos a la fuente de datos, con capas dedicadas al monitoreo, almacenamiento y seguridad [83].
- **Social IoT (SIoT):** modela relaciones sociales entre dispositivos, facilitando tareas colaborativas complejas mediante redes de confianza entre objetos [84].

Tabla 2.6: Resumen de arquitecturas comunes en sistemas IoT

Arquitectura	Descripción
Arquitectura de tres capas	Consiste en una capa de percepción (sensado del entorno), una capa de red (transmisión de datos) y una capa de aplicación (servicios al usuario). Es básica y adecuada para aplicaciones simples.
Basada en middleware	Agrega capas como tecnología de borde, pasarelas de acceso y un middleware que permite la interoperabilidad y el control entre dispositivos y aplicaciones.
Arquitectura SOA (orientada a servicios)	Cada objeto ofrece funciones específicas accesibles mediante servicios web, permitiendo la composición dinámica de servicios.
Arquitectura de cinco capas	Extiende la arquitectura de tres capas con una capa de gestión (middleware) y una capa de negocios, responsable de la gestión de las aplicaciones y su viabilidad económica.
Arquitectura basada en la nube y la niebla	Distribuye el procesamiento entre la nube y los dispositivos de borde, permitiendo análisis cercanos a la fuente de datos y mejorando la eficiencia y la seguridad.
Social IoT (SIoT)	Modela relaciones sociales entre dispositivos, facilitando la colaboración entre ellos a través de redes de confianza.

Las aplicaciones del IoT abarcan múltiples sectores: salud (dispositivos portátiles, monitoreo remoto), transporte (vehículos autónomos, logística), industria (mantenimiento predictivo), agricultura (riego inteligente) y medio ambiente (monitoreo climático).

A pesar de sus beneficios, el IoT presenta retos técnicos y éticos en cuanto a privacidad de los datos y seguridad. La creciente dependencia de estos sistemas exige arquitecturas resilientes y políticas de protección a largo plazo. En este contexto, las investigaciones actuales se centran en diseñar protocolos ligeros y escalables, capaces de operar en dispositivos con restricciones severas, sin comprometer la protección de la información ni la confianza del usuario [85].

2.8.2. Gestión de Datos en IoT

La gestión de datos en el Internet de las Cosas (IoT) es un factor fundamen-

tal para asegurar la eficacia y el rendimiento de las soluciones basadas en esta tecnología. Los dispositivos IoT generan continuamente grandes cantidades de información, lo que implica diversos retos relacionados con la recolección, almacenamiento, procesamiento y análisis de dichos datos [86]. Estos desafíos se vuelven aún más críticos en aplicaciones que requieren respuestas en tiempo real.

Los datos pueden ser estructurados o no estructurados, siendo estos últimos más complejos de manejar y requiriendo técnicas como inteligencia artificial para su análisis. Los sistemas de gestión de bases de datos (DBMS) modernos se adaptan para soportar el volumen, velocidad y variedad del IoT [87].

El procesamiento puede realizarse en el borde (*edge computing*) o en la nube. El análisis en el borde mejora la latencia y es clave en aplicaciones críticas como la automatización industrial [88]. La nube, por su parte, ofrece escalabilidad para almacenar grandes volúmenes y realizar análisis avanzados [89].

La integración de datos de múltiples fuentes es un reto debido a la heterogeneidad de dispositivos y protocolos. Las plataformas IoT abordan este problema al unificar y centralizar los datos [90].

Por último, la seguridad y privacidad en la gestión de datos IoT requieren medidas como cifrado, autenticación robusta y cumplimiento normativo, incluyendo el GDPR y la CCPA [91, 92].

Tabla 2.7: Aspectos clave en la gestión de datos en IoT

Elemento	Descripción
Recolección y almacenamiento	Captura continua de datos desde sensores y dispositivos. Uso de bases de datos relacionales y no relacionales para almacenar la información.
Procesamiento y análisis	Análisis de datos en tiempo real o diferido. Uso de inteligencia artificial para interpretar datos estructurados y no estructurados.
Edge computing o nube	El análisis puede hacerse en el borde (para baja latencia) o en la nube (para escalabilidad y almacenamiento masivo).
Integración de múltiples fuentes	Consolidación de datos provenientes de distintos fabricantes, protocolos o plataformas.
Seguridad y privacidad	Cifrado, autenticación de dispositivos, y cumplimiento con normativas como GDPR y CCPA.

2.8.3. Aplicaciones del IoT

El Internet de las Cosas (IoT) ha transformado diversos sectores mediante la conexión e interacción entre dispositivos físicos, optimizando procesos y facilitando decisiones informadas basadas en datos en tiempo real. Esta tecnología presenta aplicaciones destacadas en múltiples ámbitos:

- **Ciudades Inteligentes:** El IoT facilita la creación de ciudades más eficientes y sostenibles mediante la integración de sensores para gestionar el tráfico, el alumbrado, la recolección de residuos y el monitoreo ambiental. Estas implementaciones permiten optimizar recursos públicos y mejorar la calidad de vida urbana [93].
- **Agricultura Inteligente:** La agricultura ha adoptado soluciones basadas en IoT para monitorear condiciones del suelo, clima, humedad y fertilización en tiempo real. Esto ha incrementado la precisión en la toma de decisiones agrícolas, reduciendo el uso de agua y mejorando el rendimiento de los cultivos [94].
- **Industria 4.0:** En entornos industriales, el IoT desempeña un papel crucial en la automatización de procesos, la supervisión remota de maquinaria y la implementación de mantenimiento predictivo. Estas capacidades han mejorado la eficiencia operativa y reducido costos en sistemas ciberfísicos conectados [95].
- **Salud y Bienestar:** La integración de dispositivos médicos conectados permite monitorear parámetros fisiológicos de los pacientes en tiempo real. Esto ha revolucionado la atención sanitaria, favoreciendo diagnósticos más tempranos, tratamientos personalizados y una mayor continuidad en el seguimiento clínico [96].
- **Transporte y Logística:** El IoT se aplica en la trazabilidad de productos, la optimización de rutas y la supervisión de condiciones de transporte (como temperatura o humedad). Su incorporación en la gestión de cadenas de suministro mejora significativamente la eficiencia, visibilidad y sostenibilidad de las operaciones logísticas [97].

El Internet de las Cosas (IoT) se aplica en múltiples sectores clave, ofreciendo soluciones tecnológicas que mejoran la eficiencia operativa, la automatización y la toma de decisiones basada en datos. En la Figura 2.5 se ilustran algunas de las aplicaciones más relevantes del IoT.

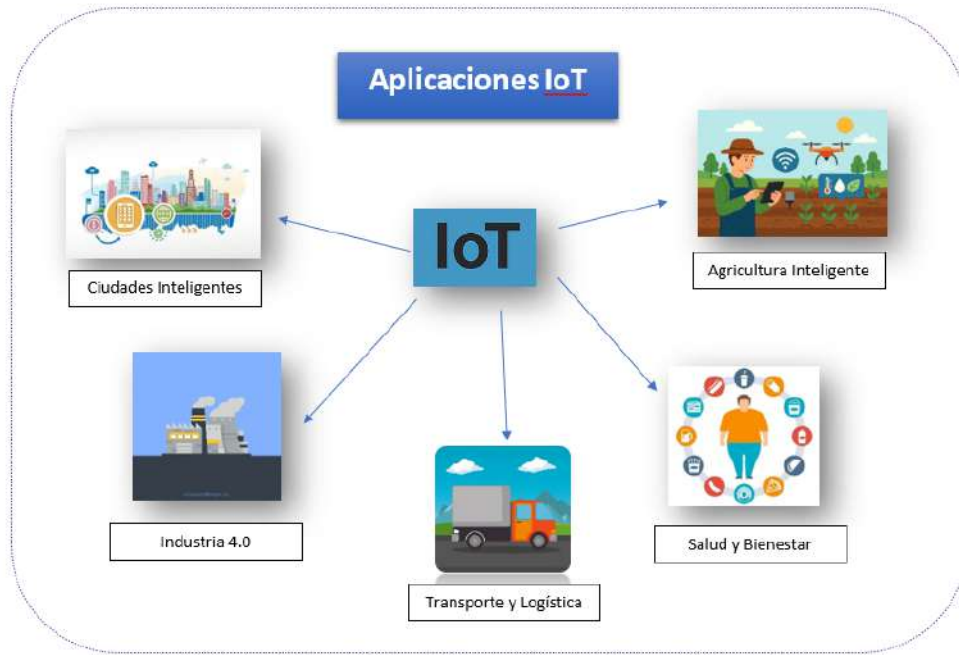


Figura 2.5: Aplicaciones IoT

2.8.4. Desafíos y Limitaciones del IoT

El Internet de las Cosas (IoT) ha emergido como una tecnología transformadora con aplicaciones en diversos sectores. No obstante, su adopción a gran escala enfrenta múltiples desafíos. Uno de los más críticos es la seguridad y la privacidad. A medida que aumenta el número de dispositivos conectados, también se incrementan las superficies de ataque potenciales, elevando el riesgo de ciberamenazas. Muchos de estos dispositivos carecen de mecanismos de seguridad adecuados, lo que compromete tanto la integridad de los datos como la privacidad de los usuarios. Además, la gran cantidad de información personal generada plantea retos significativos en términos de protección de datos sensibles, requiriendo soluciones innovadoras y robustas para garantizar un entorno seguro [98].



Figura 2.6: Resumen visual de los principales desafíos del IoT: ciberseguridad, gestión de datos, consumo energético, falta de estándares e impacto ambiental.

Como se observa en la Figura 2.6, los desafíos del IoT abarcan tanto aspectos técnicos como sociales y medioambientales, reflejando la necesidad de un enfoque integral y multidisciplinario para su desarrollo seguro y sostenible.

Otro desafío importante en la adopción del IoT es la escalabilidad y la gestión eficiente de los datos. Los dispositivos IoT generan volúmenes masivos de información que deben ser procesados y almacenados con rapidez y eficacia. Sin embargo, las limitaciones actuales en la infraestructura de red dificultan el manejo de este flujo continuo de datos, lo que puede provocar congestión y retrasos en la transmisión. A esto se suma la falta de interoperabilidad entre distintos disposi-

tivos y plataformas, ya que muchos utilizan protocolos propietarios que impiden una integración fluida entre sistemas heterogéneos [99].

Las limitaciones en términos de energía y hardware también son factores determinantes. Muchos dispositivos IoT operan con recursos limitados en cuanto a capacidad de procesamiento, memoria y energía. Estas restricciones dificultan la implementación de funciones avanzadas, como algoritmos de seguridad complejos o procesamiento en tiempo real. Además, la duración de las baterías en estos dispositivos suele ser limitada, lo que requiere reemplazos frecuentes y aumenta los costos operativos [100].

Otro reto crucial es la falta de estándares y regulaciones uniformes. La amplia variedad de protocolos empleados en el entorno IoT genera una falta de homogeneidad en la comunicación y operación de los dispositivos dentro de una red. Esta situación dificulta el establecimiento de marcos regulatorios claros que garanticen la seguridad y eficiencia en las implementaciones, y además retrasa la adopción global de esta tecnología [101].

Finalmente, la proliferación de dispositivos IoT plantea importantes preocupaciones medioambientales. El aumento en la fabricación y el desecho de estos dispositivos genera una cantidad considerable de residuos electrónicos, los cuales pueden tener consecuencias negativas para el entorno. En este contexto, resulta esencial que los fabricantes adopten un enfoque de diseño sostenible, orientado a la minimización de desechos y a la optimización de los procesos de reciclaje [102, 103].

2.8.5. Futuro del IoT y Tendencias Emergentes

El Internet de las Cosas (IoT) continúa evolucionando, impulsado por avances tecnológicos que prometen transformar diversos sectores. A continuación, se destacan algunas tendencias clave que definirán su futuro:

1. Convergencia de IoT con Inteligencia Artificial (IA): La integración de IA y aprendizaje automático en sistemas IoT permite un análisis más eficiente y en tiempo real de los datos recopilados, facilitando respuestas autónomas y mejorando la toma de decisiones en aplicaciones críticas [104].

2. Implementación de redes 5G: La adopción de la tecnología 5G proporciona velocidades de transmisión más altas y menor latencia, características esenciales

para aplicaciones IoT que requieren comunicaciones en tiempo real, como vehículos autónomos y gestión de infraestructuras críticas [105].

3. Computación en el borde (Edge Computing): Esta tecnología permite el procesamiento de datos cerca de la fuente de generación, reduciendo la latencia y el uso del ancho de banda. Es especialmente útil en aplicaciones que demandan respuestas inmediatas, como el control de procesos industriales y la automatización del hogar [106].

4. Enfoque en sostenibilidad: El crecimiento del IoT plantea desafíos en términos de consumo energético y generación de residuos electrónicos. Se están desarrollando soluciones que buscan mejorar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental de los dispositivos conectados [107].

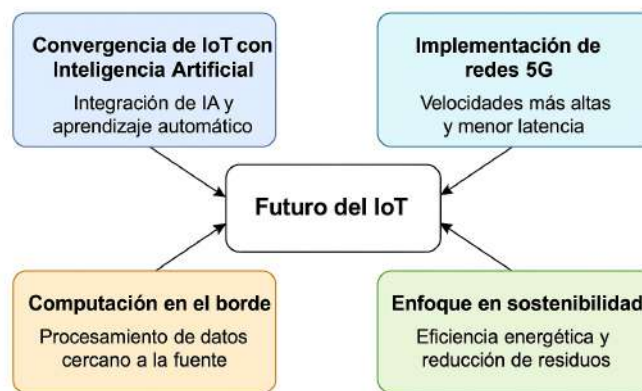


Figura 2.7: Diagrama de arquitectura con las tendencias emergentes del IoT.

Como se muestra en la Figura 2.7, estas tendencias representan el rumbo que tomará el Internet de las Cosas en los próximos años, destacando una mayor inteligencia distribuida, conectividad avanzada y compromiso con el medio ambiente.

Estas tendencias indican que el futuro del IoT estará marcado por una mayor inteligencia, conectividad y responsabilidad ambiental, facilitando su integración en la vida diaria y en diversos entornos industriales.

2.9. Integración de los Laboratorios Remotos con IoT

El éxito de los laboratorios remotos radica en la integración de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la computación en la nube (CC) y plataformas

web, que permiten el control y la supervisión remota de los equipos de laboratorio, facilitando así una experiencia educativa interactiva y efectiva. La adopción de estas tecnologías ha impulsado el uso de laboratorios remotos, especialmente en áreas de ingeniería que involucran el uso de FPGA (Field-Programmable Gate Arrays). Tradicionalmente, los estudiantes debían instalar software especializado y conectar físicamente una placa FPGA, lo cual resultaba costoso y poco escalable. Los laboratorios remotos han optimizado este proceso al ofrecer acceso en línea a dichos dispositivos, eliminando la necesidad de instalaciones locales y promoviendo un aprendizaje práctico más accesible.

La arquitectura típica de un laboratorio remoto con FPGA incluye un servidor central que integra herramientas de diseño de circuitos, sistemas de gestión de accesos, tarjetas FPGA, cámaras para la monitorización en tiempo real de los circuitos y servidores remotos para emular periféricos. Este modelo no solo mejora el acceso a la formación en FPGA, sino que también permite una gestión modular y escalable de los recursos, optimizando el aprendizaje en ingeniería [108].

La incorporación del Internet de las Cosas (IoT) en el ámbito educativo está revolucionando las experiencias de laboratorio en las universidades, al permitir la realización de experimentos prácticos de manera remota. Los laboratorios virtuales orientados a la ingeniería se benefician de arquitecturas flexibles y escalables, lo que posibilita que los estudiantes interactúen con entornos de física mecánica sin la necesidad de presencia física. Esta tecnología no solo mejora el acceso a equipos y recursos educativos, sino que también impulsa métodos de enseñanza innovadores e inclusivos. Gracias a esta integración, se incrementa la participación estudiantil y se fortalece la conexión entre la teoría y la práctica en contextos reales [109].

Además, el diseño y desarrollo de laboratorios IoT remotos han demostrado ser efectivos para mejorar las clases prácticas, equilibrando el aprendizaje práctico con una menor presencia física y dando forma al futuro de la educación superior. Este enfoque destaca el potencial de la enseñanza en línea y los modelos de laboratorio híbridos, enfatizando la integración de la experiencia práctica con el aprendizaje teórico [110].

Finalmente, la implementación de laboratorios remotos basados en IoT ha permitido a las instituciones educativas ofrecer experiencias de laboratorio más accesibles y flexibles, adaptándose a las necesidades de los estudiantes y superando

las limitaciones geográficas y temporales. Esta evolución en la educación práctica es fundamental para preparar a los estudiantes para los desafíos del entorno tecnológico actual.

2.9.1. Modelos de Implementación de Laboratorios Remotos en la Educación

Los laboratorios remotos permiten a los estudiantes desarrollar habilidades prácticas como el manejo de instrumentos, el diseño experimental y la toma de decisiones en tiempo real, accediendo a dispositivos físicos desde ubicaciones remotas. Gracias a tecnologías de virtualización y control remoto, estos entornos facilitan la supervisión segura de experimentos mediante sistemas automatizados, incluso en contextos con recursos limitados [111].

Por otro lado, los laboratorios virtuales ofrecen simulaciones digitales interactivas que permiten modelar una amplia gama de fenómenos físicos sin necesidad de equipamiento real. Esta modalidad ha demostrado ser útil para el refuerzo teórico y el entrenamiento en escenarios de riesgo controlado, además de permitir una escalabilidad significativa al eliminar restricciones físicas [112].

No obstante, ambos enfoques presentan limitaciones. Los laboratorios remotos requieren mantenimiento de hardware y supervisión humana, mientras que los virtuales, si bien accesibles, no desarrollan habilidades físicas como el cableado, montaje o resolución de problemas técnicos reales [113].

Los modelos híbridos han emergido como una solución viable, combinando la inmediatez de los laboratorios virtuales con la interacción real de los entornos remotos. Tecnologías como IoT, 5G y plataformas basadas en la nube han permitido el desarrollo de laboratorios más flexibles, accesibles y sostenibles, facilitando su implementación en universidades con diversidad geográfica [114].

2.9.2. Estándares y Protocolos para Laboratorios Remotos

Los laboratorios remotos han emergido como una solución eficaz para facilitar el acceso a prácticas experimentales a distancia, permitiendo a estudiantes y profesionales interactuar con equipos físicos reales mediante interfaces digitales. Para garantizar su funcionamiento óptimo y seguro, es esencial la adopción de

estándares internacionales que aseguren la calidad, seguridad y confiabilidad de estos entornos.

- **Normas de Calidad y Competencia:** La norma ISO/IEC 17025 establece los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, asegurando la validez y precisión de los resultados experimentales. Su implementación en laboratorios remotos garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos y facilita la cooperación internacional [115].
- **Seguridad de Aplicaciones:** ISO/IEC 27034 proporciona directrices para integrar la seguridad en las aplicaciones utilizadas en laboratorios remotos, abordando aspectos críticos como la protección de datos y la integridad de los sistemas, especialmente relevantes cuando se manejan datos sensibles o se realizan experimentos en tiempo real [116].
- **Protocolos de Comunicación:** El estándar CLSI AUTO09-A define un marco para el acceso remoto y la recolección de datos en dispositivos médicos y de diagnóstico clínico, facilitando la transmisión segura y eficiente de datos en tiempo real [117].
- **Infraestructura y Desarrollo:** La implementación de laboratorios remotos requiere una infraestructura robusta y escalable. El uso de tecnologías basadas en la nube y APIs facilita la conexión remota y el control de los experimentos, permitiendo una gestión eficiente de los recursos y el acceso simultáneo de múltiples usuarios desde diversas ubicaciones geográficas [118].

Es fundamental que los laboratorios remotos no solo cumplan con criterios técnicos, sino que también sean accesibles y pedagógicamente efectivos. Su diseño debe considerar modelos educativos que promuevan el aprendizaje significativo, permitiendo a los estudiantes desarrollar competencias prácticas en entornos virtuales que replican condiciones reales.

2.9.3. Impacto de los Laboratorios Remotos en el Aprendizaje y la Enseñanza

Los laboratorios remotos han transformado la enseñanza práctica en disciplinas como la ingeniería, permitiendo a los estudiantes realizar experimentos en tiempo

real desde cualquier ubicación. Esta modalidad elimina barreras físicas y amplía las oportunidades de aprendizaje, facilitando el acceso a prácticas experimentales y promoviendo una comprensión más profunda de los principios científicos [119].

Además, los laboratorios remotos ofrecen un entorno seguro para que los estudiantes desarrollen habilidades prácticas sin los riesgos asociados al manejo físico de equipos, lo cual es especialmente relevante en experimentos que involucran altas tensiones o maquinaria compleja [120].

Desde la perspectiva docente, estos laboratorios permiten una supervisión en tiempo real y el seguimiento del progreso de los estudiantes mediante plataformas digitales, facilitando la retroalimentación inmediata y la corrección de errores durante las prácticas [121].

Una ventaja significativa es la escalabilidad; los laboratorios remotos pueden ser accedidos por múltiples estudiantes simultáneamente, optimizando los recursos y aumentando la participación en prácticas experimentales [122].

No obstante, existen desafíos, como la limitada interacción física con los equipos, que es fundamental para desarrollar ciertas competencias prácticas. Aunque la interfaz digital permite la manipulación y el control de dispositivos, el montaje y ajuste físico de componentes siguen siendo habilidades difíciles de adquirir exclusivamente mediante laboratorios remotos.

A pesar de estas limitaciones, los laboratorios remotos se consolidan como una herramienta complementaria valiosa en la educación moderna. Su implementación, junto con prácticas presenciales y laboratorios virtuales, permite un enfoque de aprendizaje híbrido que optimiza la adquisición de competencias tanto teóricas como prácticas.

2.9.4. Tecnologías Emergentes en Laboratorios Remotos

La evolución de los laboratorios remotos ha estado marcada por la incorporación de tecnologías emergentes que han optimizado tanto su operación como su accesibilidad. Entre estas tecnologías destacan el Internet de las Cosas (IoT), la realidad aumentada (AR), la inteligencia artificial (IA) y la conectividad avanzada mediante redes 5G, las cuales han ampliado las capacidades de los entornos de aprendizaje en línea, permitiendo una interacción más fluida y en tiempo real con dispositivos físicos.

El Internet de las Cosas (IoT) permite que múltiples sensores y actuadores se conecten a través de redes seguras, facilitando el monitoreo y control remoto de experimentos. Esto permite a los estudiantes acceder a datos en tiempo real, supervisar condiciones ambientales y manipular variables experimentales desde cualquier ubicación geográfica. La integración de IoT en laboratorios remotos no solo incrementa la accesibilidad, sino que también habilita una mayor recolección de datos para el análisis posterior [123].

Por su parte, la realidad aumentada (AR) ha emergido como una herramienta poderosa para mejorar la comprensión de conceptos complejos. A través de entornos visuales interactivos, los estudiantes pueden visualizar experimentos en 3D, identificar componentes internos de dispositivos y explorar configuraciones experimentales sin la necesidad de un contacto físico directo. Esto permite una experiencia inmersiva que complementa el aprendizaje práctico, mejorando la interpretación de datos y el análisis crítico [124].

La inteligencia artificial (IA) también ha encontrado un espacio relevante en los laboratorios remotos. Mediante algoritmos de aprendizaje automático, es posible optimizar procesos experimentales, detectar errores en tiempo real y ofrecer retroalimentación personalizada a los estudiantes. Adicionalmente, la IA facilita la predicción de resultados experimentales en función de datos históricos, lo cual enriquece el proceso de aprendizaje [125].

Finalmente, la implementación de redes 5G ha potenciado la capacidad de transmisión de datos en tiempo real, reduciendo significativamente la latencia y permitiendo una interacción prácticamente instantánea con los dispositivos remotos. Esto resulta fundamental para experimentos que requieren alta precisión y una respuesta rápida del sistema, como el control de robots, drones o maquinaria industrial a distancia [126].

La incorporación de estas tecnologías emergentes ha impulsado una evolución significativa en los laboratorios remotos, transformando el enfoque tradicional de la educación práctica. Esto ha permitido un acceso más amplio, una interacción más dinámica y un entorno de aprendizaje más seguro para estudiantes de distintas partes del mundo.

Capítulo 3

Materiales y métodos

3.1. Arquitectura del Sistema de Laboratorio Remoto

El presente capítulo tiene como propósito detallar el proceso de diseño, desarrollo y optimización de un sistema de laboratorio remoto, basado en una plataforma funcional preexistente. Este trabajo surge como respuesta a la necesidad de contar con herramientas educativas más accesibles, eficientes y adaptadas a los modelos actuales de enseñanza-aprendizaje, especialmente en contextos donde el acceso físico a laboratorios puede ser limitado.

Durante la etapa inicial del proyecto, se realizó una revisión de literatura científica y tecnológica relacionada con laboratorios remotos. Esta exploración permitió identificar las arquitecturas más utilizadas, tecnologías IoT aplicables, herramientas de integración en la nube, así como distintos enfoques en el diseño de interfaces gráficas de usuario. El análisis del estado del arte fue fundamental para guiar el desarrollo del sistema hacia una solución moderna, interoperable y alineada con las exigencias de los entornos académicos contemporáneos.

Uno de los principales desafíos abordados fue la interoperabilidad entre dispositivos con distintas características técnicas. En los entornos heterogéneos propios del Internet de las Cosas (IoT), la comunicación entre múltiples dispositivos, cada uno con protocolos y capacidades diferentes, representa una limitación recurrente. Para resolver esta problemática, se implementó una arquitectura basada en servicios en la nube, la cual permitió integrar componentes diversos bajo un mismo sistema, sin requerir compatibilidad estricta en las capas física, de transporte o aplicación.

La interacción con el sistema se realiza a través de una interfaz gráfica de usuario intuitiva, la cual facilita el control remoto de los distintos dispositivos integrados. Asimismo, toda la información generada es recolectada y almacenada para su posterior análisis, con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema, realizar ajustes técnicos y enriquecer la experiencia formativa de los usuarios.

En cuanto a los elementos físicos y tecnológicos empleados, se destacan varios componentes clave: una placa FPGA Basys 3, utilizada para el manejo preciso de señales digitales; una Raspberry Pi 5, que funcionó como unidad central de procesamiento y servidor principal del sistema; una estructura física modelada en *SolidWorks*, que permitió montar todos los elementos de forma ordenada y accesible; y finalmente, una tarjeta de circuito impreso (PCB) desarrollada y mejorada específicamente para gestionar y monitorear diversos tipos de motores, aportando flexibilidad y capacidad de expansión al sistema.

La arquitectura general del sistema, representada en la Figura 3.1, resume gráficamente el flujo de información y control entre los distintos módulos: desde la generación del archivo .bit en el entorno de desarrollo VHDL, pasando por su despliegue en la FPGA mediante la Raspberry Pi, hasta la ejecución del control motor a través de señales digitales. La plataforma web UAZ Labs y los servicios de Firebase permiten gestionar usuarios, monitorear el estado del sistema y transmitir video en tiempo real.

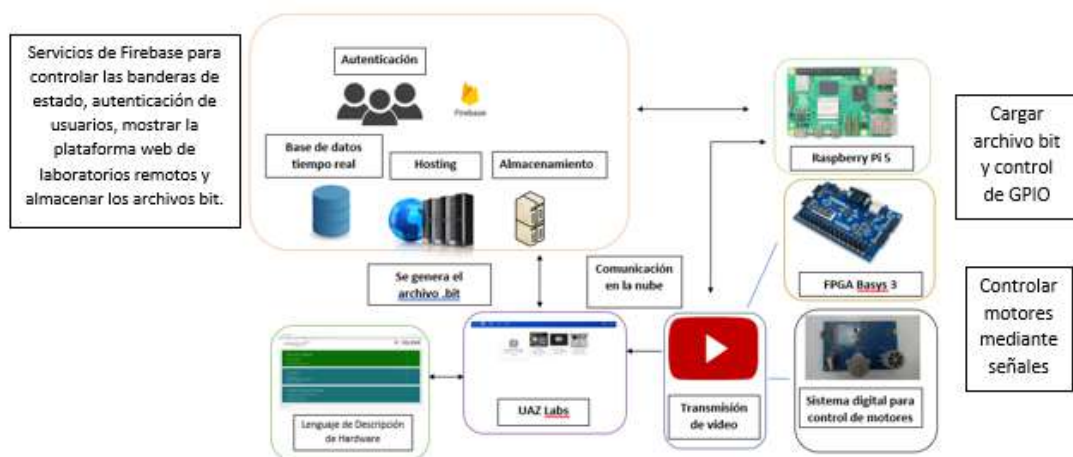


Figura 3.1: Arquitectura general del sistema de laboratorio remoto desarrollado.

3.2. Herramientas y Tecnologías Utilizadas en el Desarrollo Web

3.2.1. Estado de la plataforma existente

Antes de iniciar con el rediseño e implementación del nuevo sistema de laboratorio remoto, fue necesario analizar a fondo la plataforma anterior para identificar sus características, limitaciones y oportunidades de mejora. Esta evaluación proporcionó el punto de partida para establecer los lineamientos del nuevo desarrollo.

En la Figura 3.2 se presenta la versión anterior de la plataforma consistía en una página web básica con una interfaz gráfica limitada, tanto en diseño como en funcionalidad. Visualmente, contaba con una presentación sencilla: un encabezado azul con los logotipos institucionales, acompañado de secciones como “Home”, “About Us”, “Sign Up” y “Login”. El contenido principal ofrecía acceso a tres categorías: “Laboratories”, “Distance Learning” y “General Learning”, con breves descripciones en inglés. Sin embargo, no existía una integración real entre la interfaz y los sistemas de laboratorio remoto. Las imágenes eran estáticas y no reflejaban interacción directa con dispositivos reales.

Entre las principales limitaciones detectadas en esta versión se encuentran:

Interfaz visual estática y poco intuitiva: La navegación era simple pero no brindaba una experiencia dinámica al usuario. No se ofrecían herramientas visuales avanzadas ni interacción con los sistemas físicos del laboratorio.

Ausencia de conexión funcional con hardware: Aunque se mostraban categorías relacionadas con laboratorios, la plataforma carecía de comunicación directa con los dispositivos físicos como motores, sensores o tarjetas electrónicas.

Falta de backend estructurado: No existía una arquitectura robusta de servidor que permitiera administrar sesiones de usuario, almacenar datos o coordinar la operación remota del hardware.

Limitaciones en escalabilidad y mantenimiento: La estructura del sitio web dificultaba su actualización, integración con nuevas tecnologías y expansión para incluir más laboratorios o módulos educativos.

Esta evaluación detallada permitió establecer con claridad las áreas clave que debían mejorarse: la experiencia de usuario, la conectividad con hardware real, el diseño web responsivo y el desarrollo de una arquitectura cliente-servidor robusta.

A partir de este diagnóstico se definió la necesidad de una plataforma más moderna, funcional y alineada con las necesidades actuales de la enseñanza remota y la ingeniería práctica.

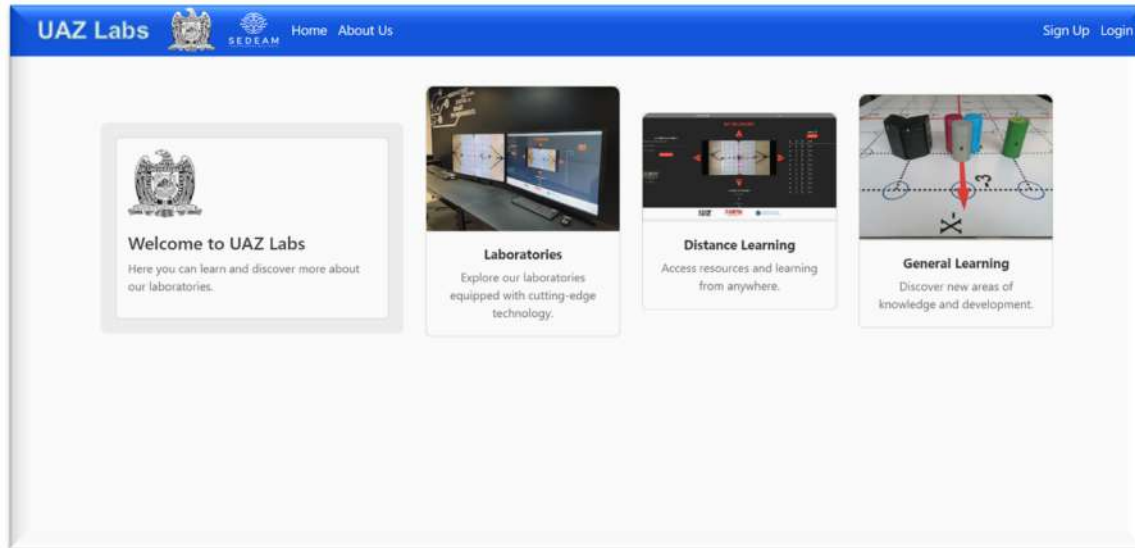


Figura 3.2: Plataforma anterior UAZ LABS

3.2.2. Entorno de desarrollo y herramientas empleadas

Para llevar a cabo el diseño y la implementación de la plataforma web del sistema de laboratorio remoto, se seleccionó *Visual Studio Code* como el entorno de desarrollo principal. Esta herramienta fue elegida por su alto grado de personalización, su compatibilidad con múltiples lenguajes de programación y la disponibilidad de extensiones que facilitan el desarrollo de aplicaciones modernas. Al ser un editor ligero pero potente, permitió mantener un flujo de trabajo eficiente durante todas las etapas del proyecto, desde la escritura de código hasta la depuración y prueba de funcionalidades en la Figura 3.3 se muestran los lenguajes utilizados.

Una de las principales ventajas de Visual Studio Code radica en su soporte integrado para trabajar con tecnologías web como HTML, CSS, JavaScript y frameworks backend, lo cual fue clave para el desarrollo modular y organizado del sistema. El entorno permitió dividir el proyecto en secciones claramente diferenciadas —frontend, backend, configuración de base de datos, entre otras— lo que facilitó su mantenimiento y escalabilidad.

Asimismo, se aprovechó la integración con terminales de consola dentro del propio entorno, lo que permitió compilar, ejecutar scripts, instalar dependencias y realizar pruebas locales sin la necesidad de salir del editor. Esto redujo significativamente el tiempo de desarrollo y permitió mantener una supervisión constante del comportamiento del sistema. A lo largo del proceso también se emplearon herramientas complementarias del navegador, como la consola de desarrollador, el depurador de JavaScript y el inspector de elementos. Estas herramientas resultaron fundamentales para analizar el rendimiento de la página, verificar la carga correcta de los estilos, monitorear eventos y depurar errores en tiempo real.

Además del entorno principal, se hizo uso de herramientas auxiliares para la gestión del flujo de trabajo, como extensiones para la integración con sistemas de control de versiones (Git), análisis de código estático, resaltado de sintaxis y control de errores. Esto permitió un desarrollo más limpio y ordenado, reduciendo la posibilidad de errores durante la implementación.

En conjunto, el uso de un entorno de desarrollo bien estructurado, potenciado por herramientas modernas y funcionales, fue un elemento decisivo para lograr una implementación sólida del sistema. Gracias a ello, se garantizó una plataforma estable, eficiente y alineada con las buenas prácticas en el desarrollo de software web contemporáneo.



Figura 3.3: Herramientas utilizadas para el desarrollo web

3.2.3. Control de versiones con SourceTree y Git

Durante el desarrollo del sistema, fue fundamental contar con una estrategia eficiente de control de versiones que permitiera mantener un registro estructurado y seguro de los cambios realizados en el código fuente. Para cumplir con este propósito se utilizó el sistema de control de versiones Git, ampliamente reconocido por su capacidad de manejar proyectos de manera distribuida y su fiabilidad en entornos colaborativos.

Como complemento a Git, se empleó *SourceTree*, una interfaz gráfica que facilita la gestión visual del repositorio. Esta herramienta permitió supervisar de forma intuitiva el historial de versiones, observar las ramas activas y controlar el flujo de trabajo mediante operaciones como *commit*, *push*, *pull* y *merge*, sin necesidad de interactuar directamente con la línea de comandos. Esto resultó especialmente útil para visualizar la evolución del proyecto, identificar los puntos de integración y revertir cambios en caso de errores.

El uso de ramas independientes para distintas funcionalidades o etapas del desarrollo —como el frontend, backend o pruebas experimentales— permitió trabajar en paralelo sin comprometer la integridad del código principal. Posteriormente, estas ramas eran fusionadas al repositorio principal una vez validadas, siguiendo buenas prácticas de integración continua. Esta metodología favoreció un desarrollo más ordenado y colaborativo, reduciendo el riesgo de conflictos y facilitando la documentación del avance.

Además, cada cambio realizado en el código fue debidamente registrado mediante *commits* descriptivos, lo que no solo contribuyó a la trazabilidad del proyecto, sino que también facilitó la comprensión de su evolución técnica. Gracias a esta estructura, fue posible mantener copias de seguridad frecuentes, restaurar versiones anteriores en caso de errores, y realizar pruebas sin afectar el funcionamiento del sistema en producción.

En resumen, la combinación de Git con SourceTree proporcionó una base sólida para el control del código, garantizando una gestión eficiente del desarrollo, mejorando la organización del trabajo y asegurando la estabilidad del proyecto a lo largo de todas sus fases.

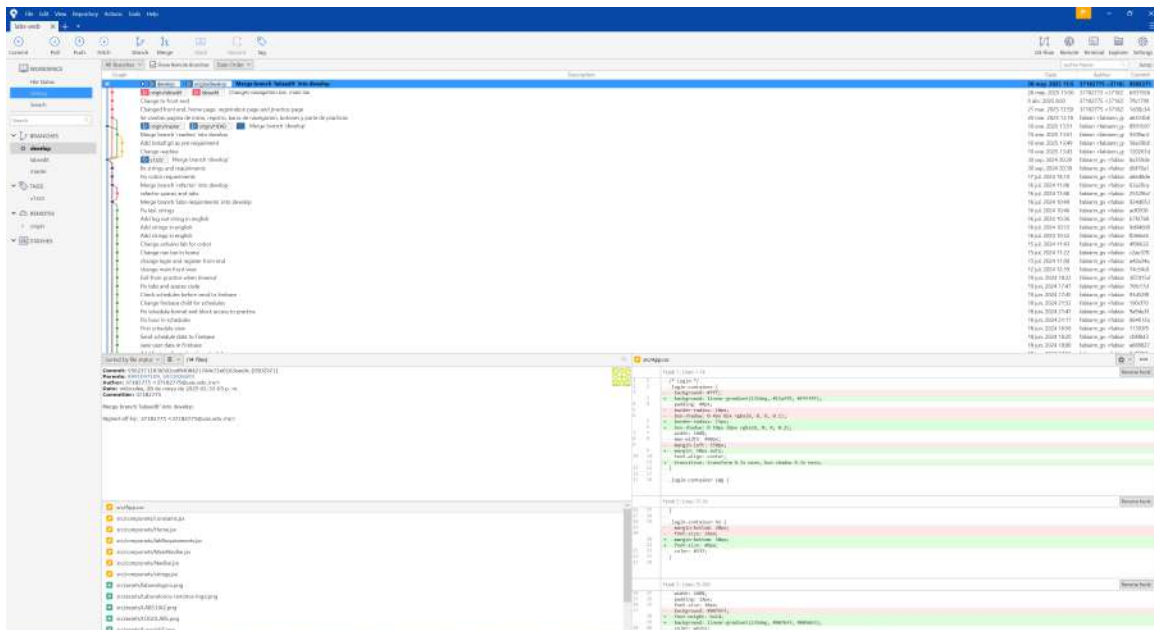


Figura 3.4: Interfaz de SOURCETREE

3.2.4. Desarrollo del front-end

La construcción de la interfaz gráfica de usuario (GUI) fue una de las partes fundamentales del sistema, ya que constituye el punto de interacción entre el usuario y el entorno de laboratorio remoto. Para su desarrollo se emplearon tecnologías web ampliamente consolidadas: *HTML5*, *CSS3* y *JavaScript*, cada una con un rol específico en la estructura, presentación y comportamiento dinámico de la plataforma en la .

El lenguaje *HTML5* se utilizó para definir la estructura semántica del contenido, organizando los elementos visuales de manera jerárquica y accesible. Por su parte, *CSS3* fue responsable de la apariencia visual, permitiendo aplicar estilos personalizados que definieron colores, fuentes, distribuciones en pantalla y elementos responsivos. De este modo, se garantizó una presentación clara y estética, alineada con los principios de diseño centrado en el usuario.

En lo que respecta a la interacción dinámica, se integró *JavaScript* como lenguaje principal para controlar la lógica del cliente. Este permitió la implementación de comportamientos reactivos, como la validación de formularios, la navegación entre secciones sin recarga completa de página, y la gestión de eventos asociados a botones, menús y formularios. Además, facilitó la comunicación con el backend mediante solicitudes asíncronas (*AJAX/fetch*), lo que mejoró notablemente la fluidez de la experiencia del usuario.

Se adoptó un enfoque de diseño responsivo (*responsive design*), con el objetivo de asegurar que la interfaz se adaptara correctamente a diferentes dispositivos y tamaños de pantalla, desde computadoras de escritorio hasta tablets y teléfonos móviles. Esta adaptabilidad fue especialmente relevante en el contexto de accesibilidad remota, donde los usuarios pueden interactuar con el sistema desde distintos entornos y plataformas.

Durante el desarrollo se hizo énfasis en la simplicidad y la funcionalidad. Se priorizó una navegación intuitiva y directa, minimizando la curva de aprendizaje para los estudiantes y permitiendo el acceso rápido a las funciones clave del sistema, como la selección de laboratorios, el control de dispositivos y la visualización de datos.

En conjunto, el frontend desarrollado no solo ofrece una interfaz moderna y funcional, sino que también cumple con los principios de usabilidad, accesibili-

dad y compatibilidad multiplataforma, fundamentales para entornos educativos remotos.

3.2.5. Uso de JavaScript para interacción dinámica

Con el propósito de enriquecer la experiencia del usuario e incrementar la funcionalidad del sistema desde el lado del cliente, se utilizó el lenguaje de programación *JavaScript* como herramienta principal para implementar interacciones dinámicas dentro de la plataforma. Su incorporación fue fundamental para lograr una interfaz más fluida, reactiva y capaz de responder en tiempo real a las acciones del usuario.

Uno de los principales usos de JavaScript en este proyecto fue la manipulación del *DOM* (Document Object Model), lo cual permitió modificar dinámicamente el contenido de la página sin necesidad de recargarla. Esto incluyó la actualización de secciones específicas de la interfaz, la aparición o desaparición de elementos según el contexto de uso, y la modificación de estilos de manera programada en respuesta a eventos definidos por el usuario.

Asimismo, se implementó una gestión eficiente de eventos mediante la utilización de *event listeners*, lo cual posibilitó la captura de acciones como clics, envíos de formularios, cambios de selección y desplazamientos. Estas interacciones fueron esenciales para guiar el flujo de uso del sistema, validar entradas en tiempo real y proporcionar retroalimentación inmediata al usuario, mejorando así la usabilidad general de la plataforma.

Otra característica clave fue la incorporación de funciones asincrónicas que permitieron establecer comunicación con el backend sin interrumpir la experiencia de navegación. Mediante el uso de funciones como `fetch()` o técnicas *AJAX*, se realizaron solicitudes HTTP que enviaban y recibían datos del servidor, lo cual fue fundamental para cargar contenido dinámico, autenticar usuarios, recuperar información desde Firebase y actualizar estados del sistema sin realizar recargas completas de la página.

Gracias a estas capacidades, JavaScript permitió desarrollar una interfaz más eficiente y profesional, ofreciendo una interacción continua y responsiva con los distintos módulos del sistema. Esta dinámica de comunicación cliente-servidor en tiempo real fue esencial para lograr un entorno de laboratorio remoto que no solo fuera funcional, sino también accesible y amigable para el usuario final.

3.2.6. Desarrollo del back-end

El desarrollo del backend constituyó una parte esencial del sistema, ya que fue el encargado de gestionar la lógica interna, procesar las solicitudes provenientes del cliente y coordinar la comunicación con los diferentes recursos del sistema. Su función principal fue establecer un puente entre el frontend y los componentes físicos y virtuales, permitiendo una operación estructurada, eficiente y segura.

El backend se diseñó siguiendo el modelo arquitectónico cliente-servidor, en el cual el navegador del usuario (cliente) realiza peticiones que son procesadas por el servidor, el cual a su vez responde con los datos solicitados o ejecuta las acciones correspondientes. Esta separación de responsabilidades permitió una organización modular del sistema, facilitando su mantenimiento, escalabilidad y futuras extensiones.

Entre las tareas más relevantes del backend se encuentran la validación de datos introducidos por el usuario, la gestión de sesiones de autenticación, el control de acceso a funcionalidades específicas y la coordinación con la base de datos y otros servicios asociados. Se desarrollaron rutas específicas para atender diferentes tipos de solicitudes, como el inicio de sesión, la lectura y escritura de datos, y la interacción con los dispositivos del laboratorio remoto.

Asimismo, el backend fue responsable de establecer la lógica que conecta con el hardware a través de la Raspberry Pi, permitiendo que las instrucciones recibidas desde la interfaz gráfica se traduzcan en acciones físicas, como el encendido de motores o la adquisición de señales. Esta interacción fue posible gracias a la implementación de scripts y controladores que actuaban como intermediarios entre el software web y los componentes electrónicos del sistema.

Se puso especial atención en mantener una arquitectura robusta y segura, que incluyera manejo de errores, validación de entradas y protección contra accesos no autorizados. Esto garantizó la integridad del sistema y su correcto funcionamiento incluso ante usos simultáneos o imprevistos.

En conjunto, el backend proporcionó la base lógica y estructural sobre la cual se construyó la funcionalidad completa de la plataforma, permitiendo una interacción confiable entre los usuarios, la interfaz web y el entorno físico del laboratorio remoto.

3.2.7. Almacenamiento y autenticación con Firebase

Para gestionar de manera eficiente tanto el almacenamiento de datos como el control de acceso de usuarios, se optó por integrar la plataforma *Firebase*, un servicio en la nube ofrecido por Google que proporciona herramientas escalables, seguras y de fácil implementación. Esta elección se basó en la necesidad de contar con una solución que facilitara la sincronización de datos en tiempo real, permitiera gestionar usuarios de forma segura y redujera la complejidad en el desarrollo del backend.

En particular, se empleó *Firebase Authentication* para implementar un sistema de autenticación robusto mediante el uso de correo electrónico y contraseña. Esta herramienta permitió crear y administrar cuentas de usuario de manera sencilla, además de ofrecer funciones integradas como la verificación por correo, recuperación de contraseñas, detección de accesos sospechosos y control de sesiones activas. Todo esto contribuyó a reforzar la seguridad del sistema sin requerir la programación manual de algoritmos de autenticación desde cero.

Para el almacenamiento de la información, se utilizó *Cloud Firestore*, una base de datos NoSQL alojada en la nube, que ofrece alta disponibilidad y actualización automática en tiempo real. Su estructura basada en colecciones y documentos permitió organizar los datos de forma jerárquica y flexible, facilitando el registro de interacciones, la trazabilidad de eventos dentro del sistema y la posterior consulta para análisis académico o técnico. Además, Firestore proporciona reglas de seguridad configurables que permiten definir permisos de lectura y escritura según el rol del usuario, añadiendo una capa adicional de protección a la integridad de los datos.

El uso de Firebase permitió reducir significativamente los tiempos de desarrollo, ya que sus herramientas están diseñadas para integrarse fácilmente con entornos web modernos. La disponibilidad de bibliotecas y documentación detallada también facilitó su implementación dentro de la lógica general del sistema, tanto en el frontend como en el backend.

En conjunto, Firebase representó una solución efectiva y confiable para las necesidades del proyecto, permitiendo implementar funcionalidades críticas como la autenticación segura y el almacenamiento dinámico de datos con mínima complejidad, pero con altos estándares de estabilidad y escalabilidad.

3.2.8. Optimización de la plataforma web UAZ Labs con React y Firebase

Una parte fundamental de la optimización del sistema fue el rediseño completo de la plataforma web UAZ Labs, que actúa como interfaz principal de interacción entre los estudiantes y el laboratorio remoto. Con el objetivo de ofrecer una experiencia de usuario más moderna, responsiva y funcional, se reimplementó la interfaz gráfica utilizando la librería *React*, en conjunto con el entorno de desarrollo Vite, logrando un frontend modular, escalable y altamente eficiente.

React permitió estructurar la aplicación en componentes reutilizables, facilitando el mantenimiento del código y la adición de nuevas funcionalidades. Esta arquitectura basada en componentes también permitió separar de forma lógica las diferentes secciones de la plataforma, mejorando la organización visual y reduciendo la curva de aprendizaje para los estudiantes.

Entre las mejoras más destacadas en la interfaz se encuentran:

- **Autenticación institucional:** Se integró el sistema de autenticación de Firebase Authentication, restringido a correos institucionales con dominio @uaz.edu.mx, lo que garantiza un acceso seguro, controlado y exclusivo para estudiantes y docentes autorizados.
- **Navegación intuitiva:** La estructura de navegación fue reorganizada por laboratorios, permitiendo a los usuarios elegir entre diferentes módulos (FPGA LAB, COBOT LAB, ROBOT OMNIDIRECCIONAL LAB Y ELECTRONICA DIGITAL LAB), cada uno con sus propias secciones: teoría, tutorial, programación de prácticas y acceso al laboratorio remoto.
- **Recursos educativos integrados:** Se añadieron secciones con material complementario como guías teóricas, videos tutoriales y documentación técnica. Estos recursos están disponibles directamente desde la plataforma, lo que favorece un aprendizaje autónomo y contextualizado.
- **Programación de prácticas:** Se habilitó un sistema de reservas en tiempo real donde los estudiantes pueden agendar sesiones para el uso del laboratorio. Esta funcionalidad se conecta con la base de datos en Firebase, actualizando automáticamente la disponibilidad de horarios en función de las reservas realizadas.

- **Gestión de archivos .bit:** La plataforma permite a los estudiantes cargar sus archivos .bit (resultantes del diseño en Vivado) a través de una interfaz amigable. Estos archivos se almacenan de manera segura en Firebase Storage y, una vez cargados, se actualizan las banderas correspondientes en la base de datos para que el Raspberry Pi inicie la carga del diseño al FPGA de forma automática.
- **Sincronización en tiempo real:** Gracias a Firebase Realtime Database, se implementó una sincronización dinámica del estado del sistema, incluyendo confirmación de conexión, actualizaciones de bitstream, URL de transmisión en vivo y estado de los controladores. Esto garantiza una experiencia fluida y con retroalimentación inmediata para el usuario.

En conjunto, estas mejoras transformaron la plataforma web en una herramienta completa, accesible y alineada con los principios de la Educación 4.0. El rediseño no solo mejoró la usabilidad y la accesibilidad de la plataforma, sino que también la dotó de robustez y flexibilidad para integrar futuras ampliaciones, como nuevos laboratorios o prácticas adicionales. Asimismo, se sentaron las bases para su despliegue en otras facultades o instituciones, gracias a la escalabilidad de la arquitectura y el uso de tecnologías web modernas.

3.2.9. Integración del sistema completo

Una vez desarrollados e implementados los distintos módulos del sistema —frontend, backend, almacenamiento y control de hardware—, se procedió a su integración para conformar una plataforma funcional, coherente y completamente operativa. Esta etapa tuvo como objetivo asegurar la interoperabilidad de todos los componentes, garantizando que el flujo de información entre ellos se realizara de forma estable, segura y en tiempo real.

El módulo de interfaz gráfica, desarrollado en tecnologías web, se encarga de capturar las acciones del usuario y generar solicitudes HTTP dirigidas al servidor backend. Estas solicitudes incluyen operaciones como el inicio de sesión, el envío de comandos para el control de dispositivos, la consulta de datos almacenados o la interacción con formularios y menús dinámicos. La arquitectura basada en el modelo cliente-servidor permite que estas interacciones sean procesadas de manera eficiente y organizada.

Por su parte, el backend actúa como núcleo lógico del sistema. Este módulo recibe las peticiones del cliente, valida la información recibida y ejecuta las acciones correspondientes, ya sea mediante el acceso a la base de datos en la nube —mediante Firebase— o mediante el envío de instrucciones a los componentes físicos conectados, como motores y sensores. Esta capa intermedia es responsable de coordinar y regular el comportamiento del sistema en función de los parámetros definidos en tiempo de desarrollo.

La integración con Firebase permite que el backend gestione tanto la autenticación de los usuarios como el almacenamiento persistente de información. A través de Firebase Authentication se verifica la identidad de los usuarios, mientras que Firestore se utiliza para registrar eventos, guardar configuraciones o almacenar datos generados durante la operación remota del laboratorio.

Finalmente, el sistema se conecta con el hardware físico —a través de una Raspberry Pi o microcontroladores intermedios— para ejecutar las acciones solicitadas desde la interfaz, como el encendido de motores o la lectura de sensores. De esta forma, se cierra el ciclo de interacción remota entre el usuario y el entorno experimental real.

La correcta integración de todos estos componentes garantiza una experiencia de uso fluida, robusta y accesible, permitiendo a estudiantes e investigadores interactuar con laboratorios físicos reales desde ubicaciones remotas, todo a través de una plataforma moderna, segura y fácil de utilizar.

3.3. Desarrollo y Optimización del Laboratorio Remoto

3.3.1. Diseño General del Sistema

El sistema optimizado está conformado por múltiples componentes de hardware y software, integrados de forma funcional para permitir el control remoto de tres tipos de motores: DC, servomotor y paso a paso. Entre los principales dispositivos utilizados se encuentran:

Tabla 3.1: Componentes principales del sistema de laboratorio remoto

Componente	Descripción
FPGA Basys 3	Dispositivo central utilizado para implementar y ejecutar diseños digitales programables por los estudiantes.
Raspberry Pi 5	Microcomputadora encargada de gestionar la comunicación con la nube y transferir los archivos .bit a la FPGA. También controla la lógica de conexión del sistema.
Firebase	Plataforma en la nube utilizada para almacenamiento de archivos, autenticación de usuarios y sincronización en tiempo real entre los módulos del sistema.
Plataforma Web UAZ Labs	Interfaz web interactiva desarrollada con React y Vite que permite a los estudiantes subir archivos, agendar prácticas y controlar el sistema remotamente.
Placa de control de motores	PCB personalizada que permite la conexión y control de motores DC, servo y paso a paso desde la FPGA.
Cámara + YouTube Streaming	Sistema de video en tiempo real que permite visualizar la ejecución de prácticas a través de una transmisión en vivo desde la plataforma.

3.3.2. Rediseño de la estructura física en SolidWorks

Una de las contribuciones clave al sistema fue el rediseño completo de la estructura física que alberga los distintos componentes del laboratorio remoto. Para ello, se utilizó el software de diseño asistido por computadora SolidWorks, lo cual permitió modelar en 3D una estructura. Este diseño fue fundamental para organizar de manera compacta y segura todos los dispositivos involucrados, mejorando tanto la operatividad del sistema como su presentación profesional.

El diseño incluye una base robusta ensamblada con perfiles de aluminio extruido de 2020, lo cual garantiza resistencia mecánica, estabilidad y facilidad de montaje. Sobre esta base se instalaron plataformas y soportes específicamente diseñados para alojar los siguientes elementos:

- **FPGA Basys 3:** Se diseñó una carcasa que protege los puertos y conexiones, al mismo tiempo que permite acceso directo a los pines GPIO utilizados en la práctica de control de motores.

- **Raspberry Pi 5:** Se desarrolló una carcasa con anclajes para sujetar firmemente la tarjeta, acompañado de un case impreso en 3D que incorpora ventilación activa, lo cual mantiene temperaturas estables durante sesiones prolongadas de operación y transmisión de video.
- **Placa PCB de control de motores:** La PCB personalizada para control de motores DC, servo y paso a paso fue montada sobre una carcasa que permite visualizar los motores, con espacio para conexiones seguras de alimentación y señales desde la FPGA. Esto previene cortocircuitos y mejora la seguridad operativa.
- **Cámara USB para monitoreo:** Se diseñó un soporte móvil para posicionar la cámara sobre el área de prácticas, permitiendo ajustar el ángulo y enfoque fácilmente. Este montaje mejora la visualización de los motores en movimiento durante las sesiones remotas.

Adicionalmente, se incorporaron canales para el guiado de cables, evitando enredos y facilitando el mantenimiento, así como espacio reservado para el SSD NVMe de la Raspberry Pi, protegiéndolo del polvo y vibraciones.

Esta nueva estructura física no solo mejora la estética del sistema y la ergonomía del mantenimiento, sino que también cumple un papel esencial en la estandarización del prototipo para su posible replicación en otras instituciones. La modularidad del diseño facilita su adaptación a nuevos módulos o sensores, permitiendo así la evolución del laboratorio hacia nuevas prácticas o asignaturas.

3.3.3. Raspberry Pi 5

Para garantizar la comunicación eficiente entre la plataforma web, la nube y el hardware local, se implementó un sistema de automatización en la Raspberry Pi 5 utilizando el lenguaje de programación *Python 3*. Este sistema tiene como objetivo central reducir la latencia en la detección y descarga de archivos .bit desde Firebase, y mejorar el control de los 16 GPIOs que envían señales digitales a la FPGA Basys 3.

3.3.3.1. Acceso a Firebase

Se empleó la biblioteca `firebase-admin` para establecer una conexión persistente con la base de datos en tiempo real. Esta conexión permite monitorear los cambios en las banderas de estado relacionadas con la carga de archivos y señales de control. Mediante el uso de *listeners* y llamadas asincrónicas, se eliminó la necesidad de hacer consultas periódicas (*polling*), disminuyendo la latencia de respuesta del sistema.

3.3.3.2. Programación automática de la FPGA

Una vez detectado un nuevo archivo `.bit` en el almacenamiento de Firebase, se procede automáticamente a su descarga en el sistema de archivos local. Posteriormente, se ejecuta la herramienta `OpenFPGALoader` mediante el módulo `subprocess` de Python. Este proceso automatizado permite:

- Detectar el dispositivo FPGA conectado vía USB.
- Cargar el archivo `.bit` al hardware sin intervención del usuario.
- Registrar en la base de datos el éxito o fallo de la operación.

3.3.3.3. Control digital con 16 GPIOs

La Raspberry Pi 5 también se encarga de enviar señales digitales a la FPGA a través de 16 pines GPIO configurados como salidas. Estas señales representan instrucciones de control para las prácticas con motores DC, servos y motores paso a paso. Para ello, se utilizó la biblioteca `RPi.GPIO`, gestionando el mapeo de pines y la escritura sincronizada de valores digitales desde la información recibida en tiempo real de Firebase.

3.3.3.4. Manejo de errores y estabilidad del sistema

Se implementaron rutinas de manejo de excepciones que verifican:

- La conectividad con Firebase y la red local.
- La validez e integridad del archivo `.bit` antes de su programación.

- La correcta escritura de señales GPIO.

En caso de fallos, el sistema reporta automáticamente los errores a Firebase, permitiendo que la plataforma web informe al usuario y evite comportamientos no deseados.

3.3.3.5. Modularidad del código

Con el fin de asegurar un desarrollo ordenado y flexible, la programación implementada en la Raspberry Pi 5 fue dividida en módulos independientes, cada uno encargado de una tarea específica: detección de archivos en la nube, descarga automática, carga del bitstream a la FPGA y control digital de los GPIO. Esta organización modular no solo facilita el mantenimiento y la depuración del sistema, sino que también permite su adaptación a futuros laboratorios remotos con diferentes configuraciones. La Figura 3.5 muestra el flujo general de este proceso de automatización.

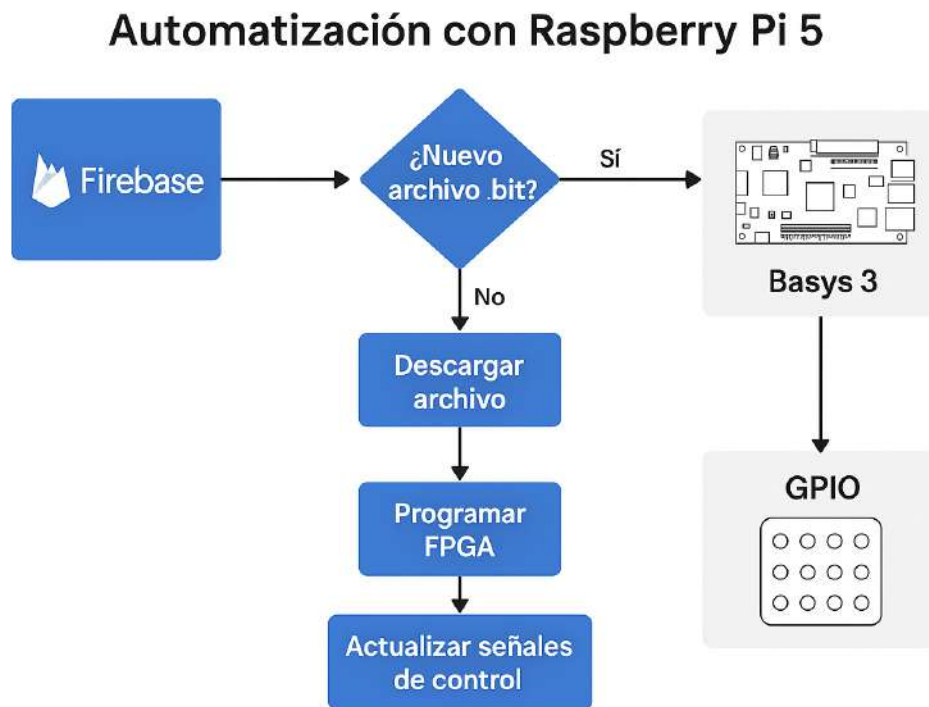


Figura 3.5: Diagrama de flujo del proceso de automatización y control con Raspberry Pi 5

3.3.4. Streaming en Tiempo Real

Uno de los elementos fundamentales para garantizar la transparencia y eficacia en las prácticas remotas fue la implementación de un sistema de transmisión en vivo que permitiera a los estudiantes observar en tiempo real el comportamiento del hardware. Para ello, se integró un flujo de video de baja latencia mediante la combinación de herramientas como *OpenCV*, *FFmpeg* y la API de *YouTube Live*, lo cual permitió ofrecer una experiencia audiovisual fluida y accesible directamente desde la plataforma web.

Para mejorar la velocidad de escritura, almacenamiento temporal y estabilidad del sistema de transmisión, se incorporó una unidad de estado sólido (SSD) NVMe de 512 GB en la Raspberry Pi 5. Esta mejora permitió soportar de forma eficiente el procesamiento de video, la codificación en tiempo real y la gestión de buffers, evitando interrupciones o congelamientos durante sesiones prolongadas.

La cámara conectada a la Raspberry Pi transmite la señal a través de *OpenCV*, que actúa como capturador y preprocesador del flujo de imágenes. Luego, *FFmpeg* se encarga de comprimir y transmitir este flujo a los servidores de YouTube, habilitando una vista pública (o privada) que puede ser incrustada en la plataforma web UAZ Labs en la Figura 3.6. . Esta transmisión se sincroniza automáticamente con las sesiones activas, permitiendo iniciar y detener la emisión en función del estado registrado en la base de datos de Firebase.

El sistema también permite registrar la URL de la transmisión en tiempo real en la base de datos, de modo que los usuarios autorizados pueden acceder fácilmente al video desde la interfaz gráfica, sin necesidad de salir del entorno de trabajo. Esta integración garantiza una experiencia continua y contextualizada para el estudiante, que puede observar los resultados físicos de su programación en el momento preciso en que se ejecutan.

En conjunto, este esquema de transmisión ofrece una solución robusta, escalable y automatizada para el monitoreo remoto, eliminando la necesidad de supervisión presencial y favoreciendo la implementación de un laboratorio remoto completamente autónomo y accesible desde cualquier dispositivo con conexión a internet.

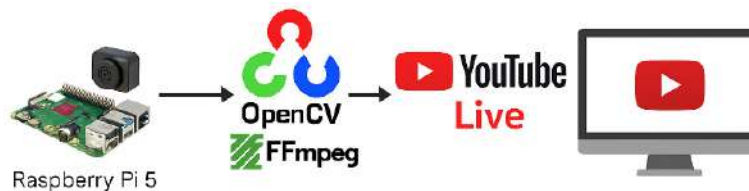


Figura 3.6: Diagrama esquemático de Streaming de Video

3.4. Diseño y Funcionalidad de la PCB

Como parte del desarrollo del sistema de laboratorio remoto, se diseñó una tarjeta de circuito impreso (PCB) personalizada que permite controlar y monitorear tres tipos distintos de motores: DC, paso a paso y servomotor. Esta placa fue creada en el entorno de diseño *Altium Designer*, integrando tanto el diagrama esquemático como el diseño físico en 2D y 3D.

3.4.1. Estructura esquemática del sistema

La estructura lógica de la PCB fue organizada en múltiples documentos esquemáticos que describen cada subsistema: alimentación, conectores, control del motor DC y control del motor paso a paso. La interconexión entre estos módulos se realizó mediante la hoja principal *FPGA Lab Main Schematic*, donde se integran todos los bloques funcionales, como se muestra en la Figura 3.7.

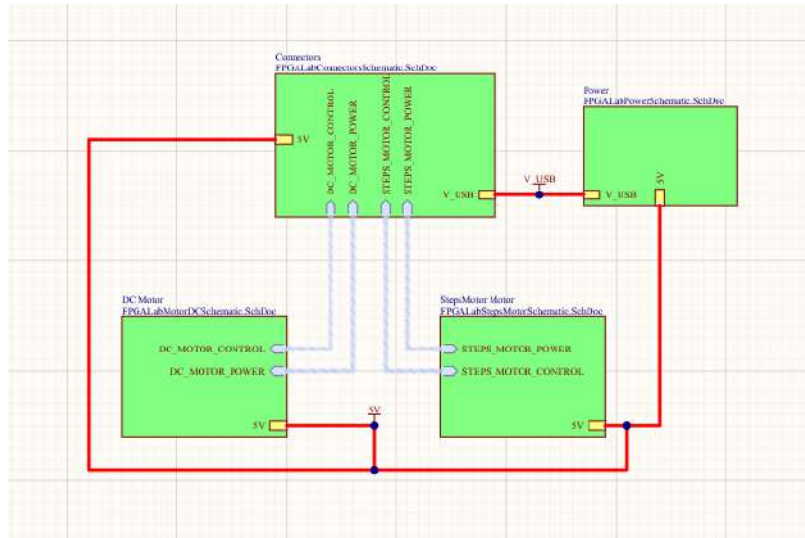


Figura 3.7: Diagrama esquemático principal del sistema de control de motores

Este diseño permite mantener separados los bloques de potencia y de control, reduciendo así el ruido eléctrico entre secciones. El sistema de alimentación se basa en la línea de 5V, distribuida a través de buses comunes hacia cada uno de los controladores de motor.

3.4.2. Diseño físico de la PCB

La Figura 3.8 muestra el diseño tridimensional de la tarjeta en Altium Designer, donde se aprecian las pistas, conectores y posiciones finales de los componentes, incluyendo los motores.

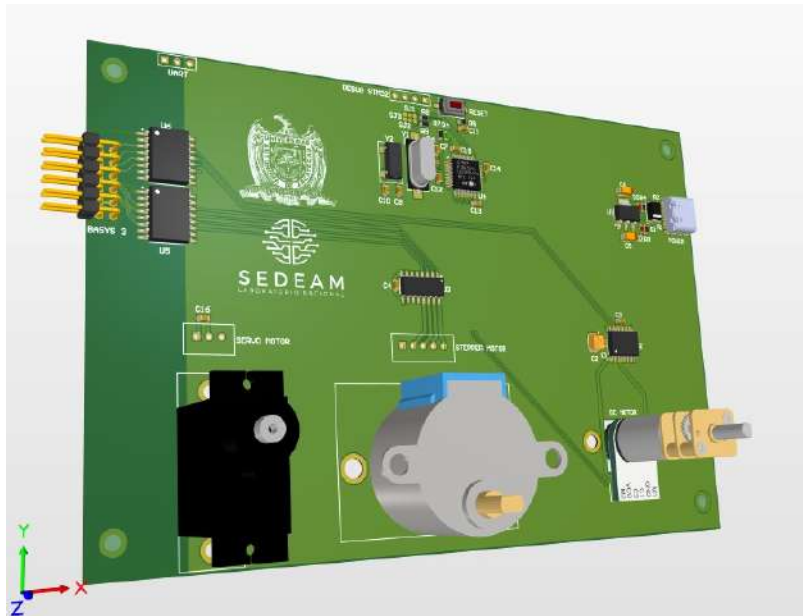


Figura 3.8: Vista 3D del diseño físico de la PCB con motores integrados

El diseño contempla:

- Conectores hembra tipo *pin header* para señales desde la FPGA.
- Zócalos dedicados para cada tipo de motor.
- Regulación de voltaje mediante entrada USB y línea de 5V distribuida.
- Ruteo limpio y diferenciado para señales de control y potencia.
- Compatibilidad mecánica con estructura impresa en 3D.

3.4.3. Integración con FPGA y controladores

Cada motor recibe señales digitales desde la FPGA Basys 3, las cuales se interpretan en la PCB para energizar los dispositivos de forma segura. La placa permite:

- Control PWM para servomotores.
- Control de pasos (A , B , $\overline{A}$, $\overline{B}$) para motores paso a paso.
- Control ON/OFF y dirección para motores DC mediante transistores y puentes H.

La modularidad del diseño permite modificar fácilmente los componentes o ampliar la cantidad de motores en futuras versiones del laboratorio remoto.

3.4.4. Comparación entre la PCB anterior y la nueva versión mejorada

Como parte del proceso de mejora continua del sistema de laboratorio remoto, se realizó un rediseño completo de la PCB. En la Figura 3.9 se muestra una comparación visual entre ambas versiones.

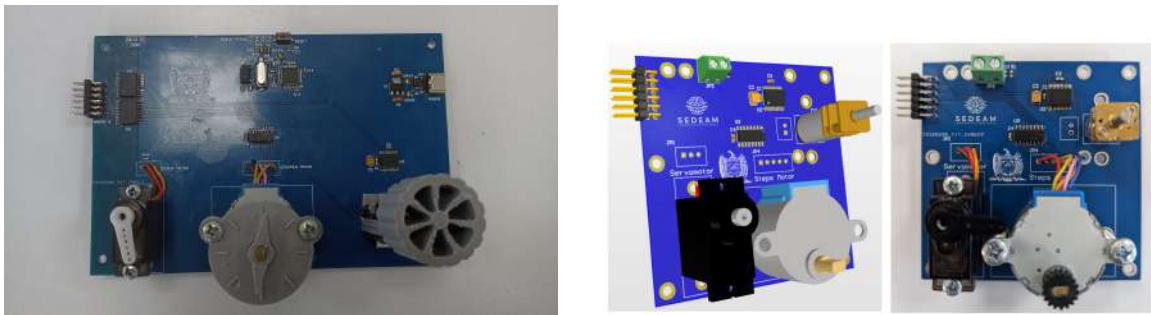


Figura 3.9: Izquierda: Nueva PCB ensamblada. Derecha: Versión anterior del diseño con motores conectados.

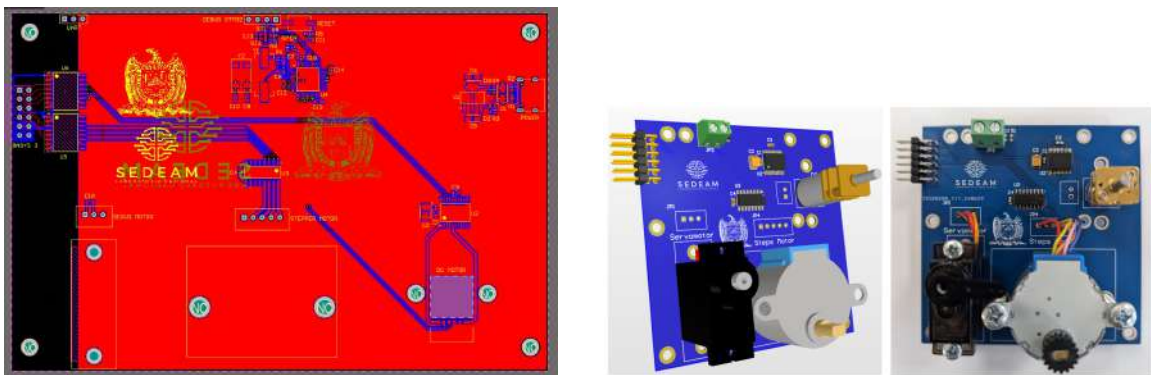


Figura 3.10: Izquierda: Vista superior del nuevo diseño físico. Derecha: Render 3D de la PCB anterior.

Las mejoras implementadas se pueden resumir en los siguientes puntos:

- **Rediseño del ruteo:** Pistas optimizadas para señales digitales y de potencia.
- **STM32 integrado:** Posibilita futuras extensiones con microcontrolador.

- **Distribución ordenada:** Mejora el cableado y evita interferencias.
- **Anclajes y guías mecánicas:** Facilitan el montaje seguro de motores.
- **Estética profesional:** Incluye logotipos institucionales y serigrafía de alta calidad.

Este rediseño no solo representa una mejora técnica, sino también una apuesta por la estandarización y aplicabilidad de los laboratorios remotos en otras instituciones educativas.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo presenta los principales resultados obtenidos durante la optimización del laboratorio remoto. Se documentan los avances logrados en tres ejes fundamentales: el diseño y despliegue de la plataforma web *UAZ Labs*, la construcción física del entorno experimental mediante modelado e impresión 3D, y el diseño final de la tarjeta de circuito impreso (PCB) utilizada para el control y monitoreo de motores.

4.1. Desarrollo de la Plataforma Web: Labs Web

En la Figura 4.1 se muestra la vista general de la página de inicio de la plataforma, donde se integran los accesos a prácticas, recursos y sesiones activas.

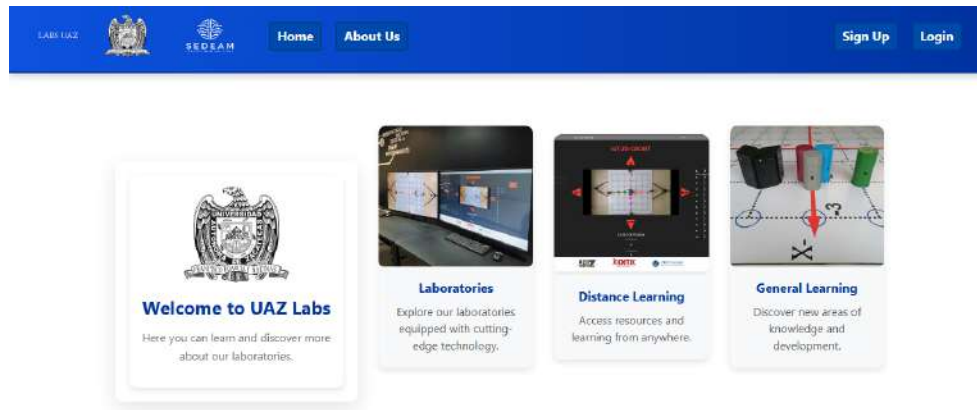


Figura 4.1: Interfaz principal de la plataforma Labs Web desarrollada para acceso remoto al laboratorio.

Uno de los principales resultados obtenidos fue la implementación funcional de la plataforma web **Labs UAZ**, la cual permite el acceso remoto a diferentes laboratorios educativos enfocados en electrónica, control y sistemas digitales. Esta plataforma fue diseñada para ofrecer una experiencia interactiva, segura y amigable, integrando servicios como registro y autenticación de usuarios, selección de laboratorios, programación de sesiones, carga de archivos y control en tiempo real del hardware conectado.

4.1.1. Interfaz de Usuario y Autenticación

En las Figuras 4.2 y 4.3, se muestran las pantallas de inicio de sesión y registro de usuarios. El sistema de autenticación fue integrado mediante Firebase y permite la gestión de credenciales con soporte para múltiples roles (alumno, docente o administrador).

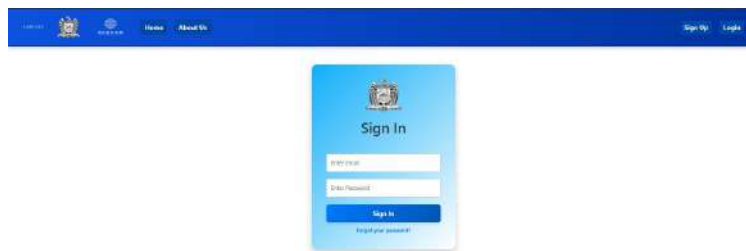


Figura 4.2: Interfaz de inicio de sesión para acceso a Labs UAZ.

The image shows a web browser window with a blue header bar. On the left of the header are links for 'LABS UAZ', 'TEOSAM', 'Home', and 'About Us'. On the right are 'Sign Up' and 'Login' links. In the center of the page is a 'UAZ Labs Registration' form. The form includes input fields for 'Enter email', 'Enter password', and 'Confirm password'. It also has a text input for 'Institution Name' and a dropdown menu labeled 'Select role'. At the bottom of the form is a blue 'Register' button.

Figura 4.3: Formulario de registro con campos para correo, institución y rol del usuario.

4.1.2. Navegación y Selección de Laboratorios

Una vez autenticado, el usuario accede a una vista general de los laboratorios disponibles, como se muestra en la Figura 4.4. Entre ellos se incluyen el *FPGA Lab*, *Cobot Lab* y *Analog Lab*. Cada módulo cuenta con acceso directo a teoría, tutoriales, programación de sesiones y control práctico.



Figura 4.4: Vista de selección de laboratorios dentro de la plataforma.

4.1.3. Control de Laboratorio y Transmisión

El sistema permite programar una sesión y controlarla en tiempo real, como se muestra en las Figuras 4.5 y 4.6. Los usuarios pueden cargar archivos binarios (.bit), controlar las señales digitales directamente y observar en vivo el funcionamiento físico del sistema gracias a la transmisión integrada mediante YouTube Live. Esta funcionalidad se sincroniza con Firebase para determinar si la sesión está activa y habilita el panel de control automáticamente.

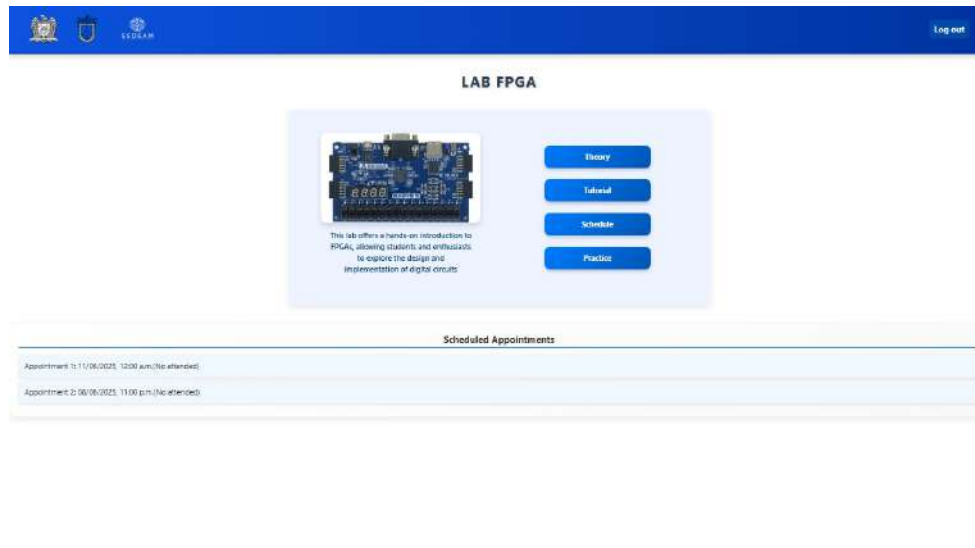


Figura 4.5: Módulo FPGA Lab con botones de navegación, sesiones programadas y contenido estructurado.

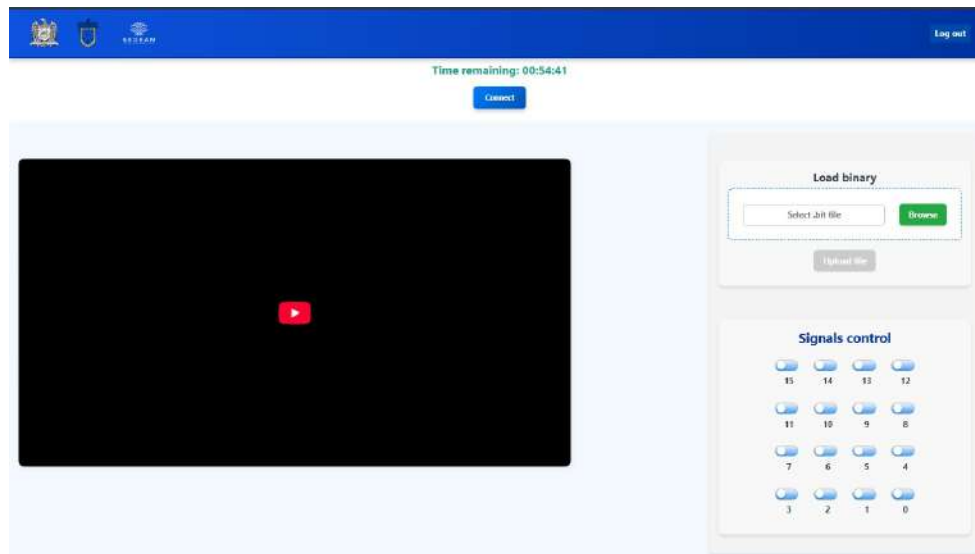


Figura 4.6: Interfaz de control remoto: transmisión en vivo y tablero para cargar archivos .bit y activar señales digitales.

4.1.4. Página Institucional y Misión Educativa

El sitio también cuenta con una sección informativa (*About Us*) donde se presenta la visión del proyecto y su enfoque en educación tecnológica inclusiva, como se observa en la Figura 4.7.



Figura 4.7: Sección informativa de la plataforma Labs UAZ.

La implementación de *Labs Web* demuestra la viabilidad de conectar recursos físicos de laboratorio con interfaces digitales modernas, ofreciendo una alternativa accesible, funcional y escalable para entornos educativos remotos.

4.2. Estructura Física y Montaje del Laboratorio

Para asegurar la estabilidad, portabilidad y organización del sistema, se diseñó una estructura modular utilizando *SolidWorks*, la cual fue fabricada mediante impresión 3D. Esta estructura está pensada para alojar adecuadamente la Raspberry Pi 5, la FPGA Basys 3 y una PCB personalizada para el control de motores.

En la Figura 4.8 se muestra el diseño final de la estructura tridimensional, donde se emplearon perfiles de aluminio y coples impresos para formar un marco cúbico resistente.

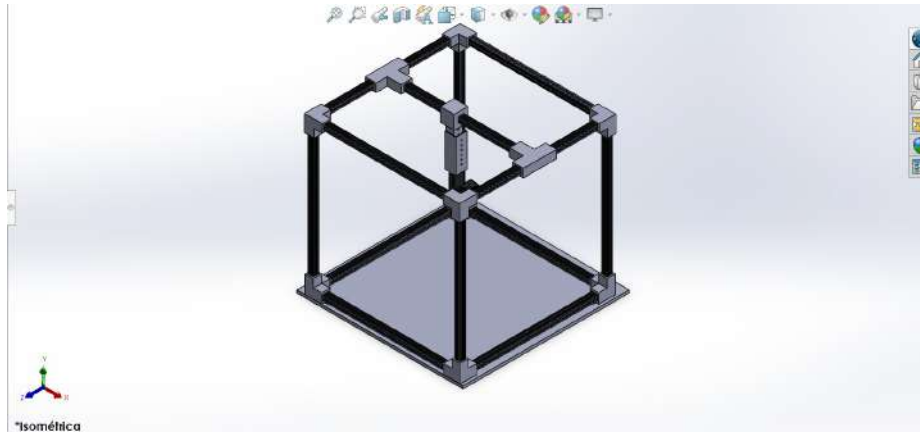


Figura 4.8: Modelo 3D actualizado del laboratorio remoto diseñado en SolidWorks.

La fabricación de las piezas fue realizada con filamento PLA utilizando una impresora 3D Creality Ender 3. Se diseñaron e imprimieron distintos componentes como soportes, acoples, carcasas para los módulos electrónicos y elementos de fijación. En la Figura 4.9 se observa el proceso de impresión de una de las carcasas sobre la cama de impresión.

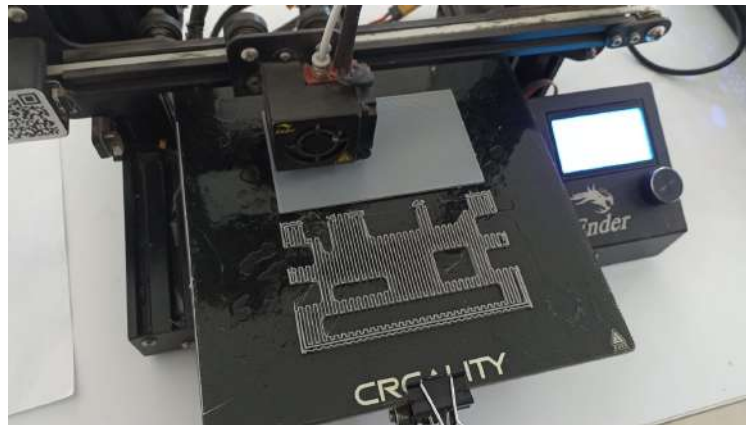


Figura 4.9: Proceso de impresión 3D de una carcasa en Creality Ender 3.

El sistema también incluye elementos impresos específicamente diseñados para proteger los módulos electrónicos. Las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 muestran las carcasas utilizadas para la Raspberry Pi, la Basys 3 y el motor a pasos, respectivamente.

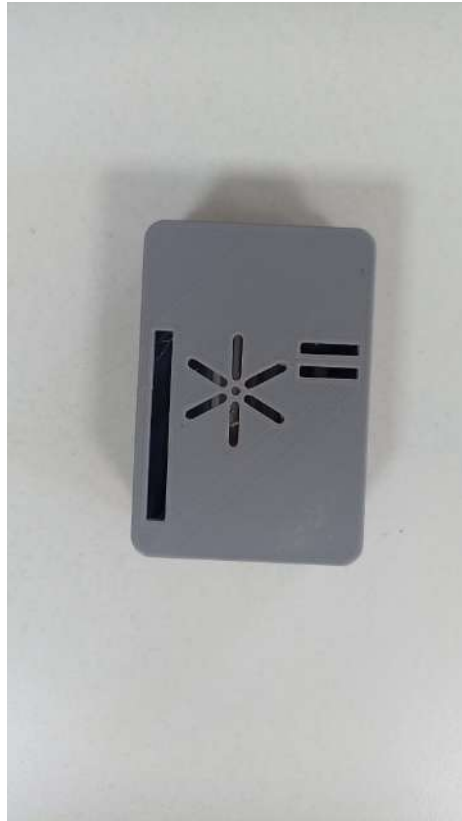


Figura 4.10: Caja protectora impresa para la Raspberry Pi 5.



Figura 4.11: Carcasa impresa para el módulo conjunto de Basys 3 y PCB.

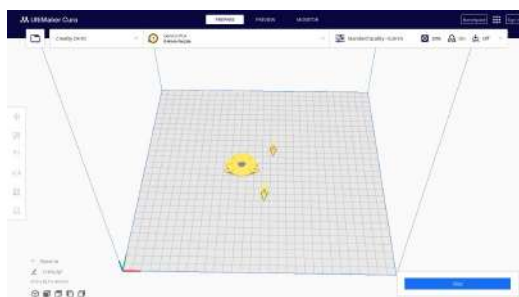


Figura 4.12: Caja impresa para el módulo de control del motor a pasos.

En la Figura 4.13 se aprecia el sistema completamente ensamblado, con los elementos electrónicos ya montados dentro de la estructura. La cámara integrada permite el monitoreo en tiempo real de las prácticas.



Figura 4.13: Vista general del laboratorio ensamblado con Raspberry Pi, Basys 3 y cámara.

Para la unión estructural, se desarrollaron piezas personalizadas como los coples superiores e inferiores (Figuras 4.14 y 4.15), y los soportes móviles para la cámara (Figura 4.16).



Figura 4.14: Coples superiores impresos para ensamblaje modular.



Figura 4.15: Coples inferiores impresos para unión de perfiles.



Figura 4.16: Soporte ajustable impreso para la cámara de observación.

Adicionalmente, se incorporaron piezas impresas como el eje acoplador (Figura 4.17) diseñado para prácticas con el motor N20.



Figura 4.17: Eje impreso para el motor N20.

En conjunto, el rediseño estructural permitió la consolidación de un laboratorio remoto compacto, funcional y replicable, optimizado tanto para la experiencia educativa como para la facilidad de mantenimiento.

4.3. Optimizacion de PCB

Con la finalidad de validar la funcionalidad del laboratorio remoto propuesto, se llevaron a cabo una serie de pruebas que permitieron verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los subsistemas: tarjeta de control de motores, transmisión de video, estructura física impresa y plataforma web para prácticas.

El proceso de validación comenzó con la revisión de la primera versión de la PCB, en la que se detectaron problemas de distribución de pines y fallos en el ruteo. Esta versión preliminar se muestra en la Figura 4.18.



Figura 4.18: Primera versión de la PCB: distribución preliminar de componentes.

A partir de esta versión inicial, se realizaron ajustes y se diseñó una nueva PCB optimizada, la cual fue ensamblada y probada con éxito. La Figura 4.19 muestra el proceso de soldadura de componentes en la versión final.

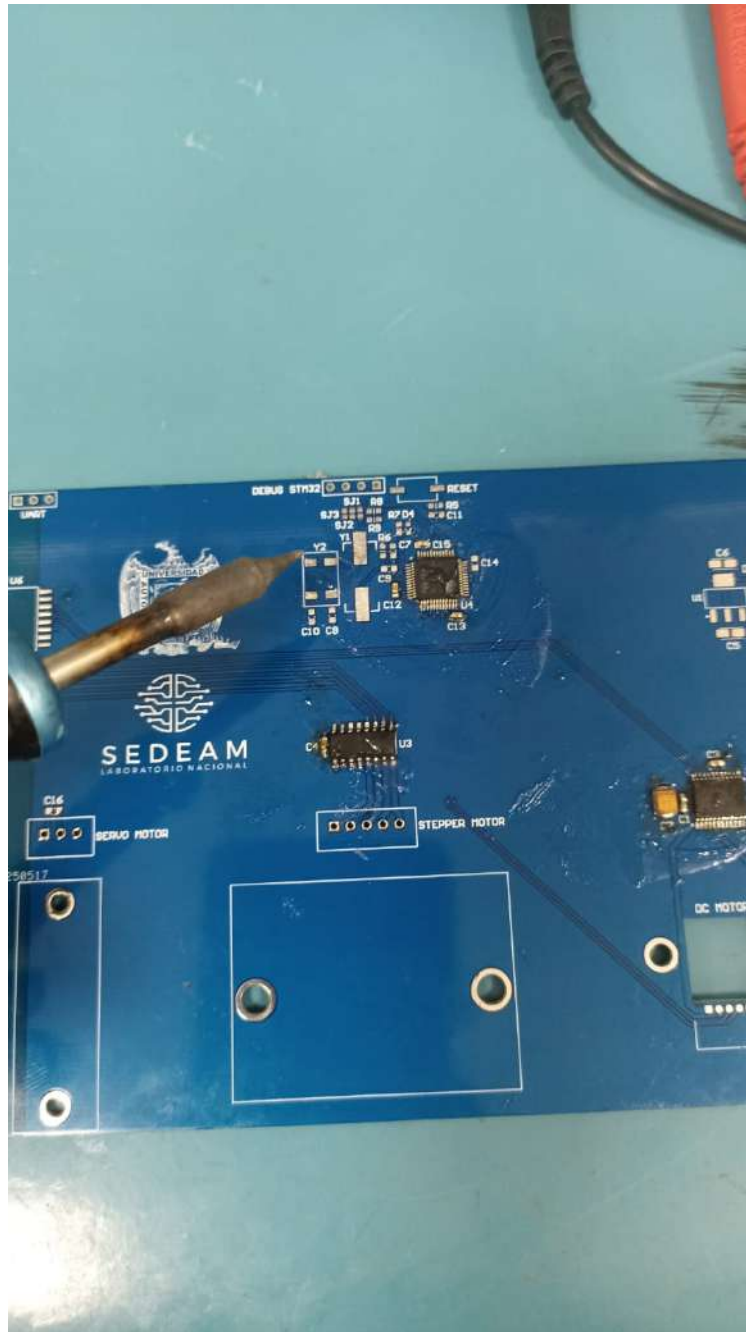


Figura 4.19: Proceso de soldadura de componentes SMD en la tarjeta final.

Posteriormente, se ensambló toda la electrónica en su respectiva carcasa impresa en 3D y se conectó a la estructura física. La Figura 4.20 muestra la PCB montada dentro de su caja protectora personalizada.

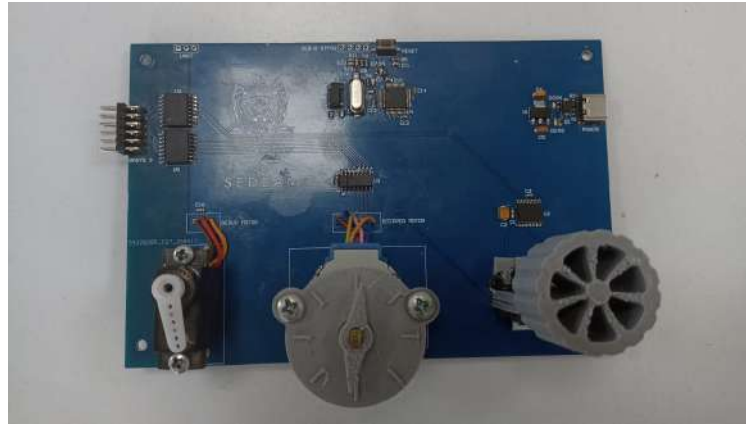


Figura 4.20: PCB ensamblada con motores y protegida por carcasa impresa.

Finalmente, se realizaron pruebas completas del sistema, conectando la FPGA Basys 3 y la Raspberry Pi 5 a la tarjeta y ejecutando las rutinas de control remotamente desde la plataforma web. La Figura 4.21 muestra el sistema en operación, validando el funcionamiento de la estructura, la cámara y el entorno digital.



Figura 4.21: Prueba funcional del laboratorio remoto con visualización desde la computadora del usuario.

Los resultados obtenidos demostraron que el sistema es capaz de ejecutar prácticas de control de motores de forma remota, con tiempos de respuesta aceptables y alta estabilidad en las sesiones. Esta validación permitió comprobar la viabilidad técnica y didáctica de la propuesta, sentando las bases para su futura implementación en ambientes educativos reales.

4.3.1. Prueba de Interacción Web-Hardware

Se llevó a cabo una secuencia de pruebas en las que el usuario, desde la plataforma *UAZ Labs*, seleccionó prácticas específicas de control de motores. Estas prácticas incluían movimientos de rotación, inversión de dirección, control PWM y secuencias de paso a paso. La plataforma envió los comandos a través de Firebase, los cuales fueron recibidos por la Raspberry Pi 5, retransmitidos a la FPGA Basys 3, y ejecutados en la PCB.

Los resultados mostraron una respuesta inmediata (latencia menor a 200 ms), sin interrupciones ni pérdidas de datos durante el control. En la se muestra una secuencia de imágenes capturadas del sistema durante una prueba real.

4.3.2. Transmisión en Tiempo Real

La transmisión de video fue validada en sesiones de hasta 1 hora continua, sin interrupciones visibles. Gracias a la codificación con *FFmpeg* y la integración con YouTube Live, se logró mantener una calidad aceptable (480p fluida) con bajo uso de CPU en la Raspberry Pi, apoyada por la unidad SSD NVMe.

4.3.3. Usabilidad y Experiencia del Usuario

Para evaluar el impacto y la experiencia del usuario con la plataforma *UAZ Labs*, se aplicó una encuesta a 18 estudiantes de Ingeniería en Robótica y Mecatrónica, abarcando diversos semestres (7° al 10°), como se muestra en la Figura 4.22. La mayoría de los participantes (61.1 %) pertenecen al octavo semestre, seguidos por estudiantes de noveno (33.3 %).

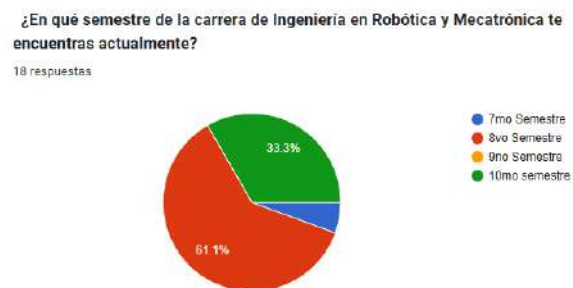


Figura 4.22: Semestre actual de los participantes

Respecto a la utilidad de la plataforma, el 94.4 % de los encuestados la consideró útil para complementar sus prácticas en sistemas digitales o electrónica (Figura 4.23). Este resultado valida la pertinencia del proyecto como herramienta formativa real.



Figura 4.23: ¿Consideras útil esta plataforma para complementar tus prácticas?

Sobre la capacidad de carga de archivos .bit y control del hardware, el 94.4 % logró completar el proceso satisfactoriamente, lo cual demuestra la robustez del sistema automatizado de programación remota con Raspberry Pi y FPGA (Figura 4.24).

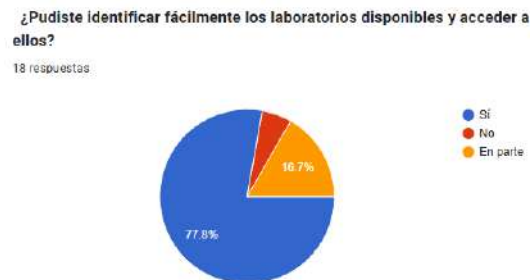


Figura 4.24: ¿Pudiste cargar el archivo .bit y controlar el hardware sin problemas?

En cuanto a la transmisión en vivo, el 72.2 % reportó haber experimentado un ligero retraso, mientras que el 27.8 % indicó que fue fluida y sin desfases (Figura 4.25). Este aspecto fue uno de los principales retos técnicos identificados para mejorar.

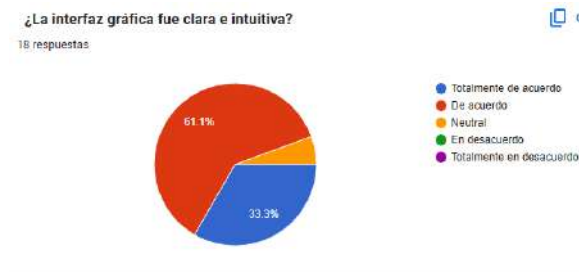


Figura 4.25: ¿La transmisión en vivo fue clara y sincronizada con tus acciones?

Respecto a la respuesta del hardware, el 38.9 % la consideró totalmente fluida, mientras que el 55.6 % percibió pequeños retrasos, sin afectar significativamente la práctica (Figura 4.26).



Figura 4.26: ¿La respuesta del hardware fue inmediata y sin interrupciones?

En términos de accesibilidad, el 77.8 % pudo identificar y acceder fácilmente a los laboratorios disponibles (Figura 4.27), reflejando una interfaz suficientemente clara.

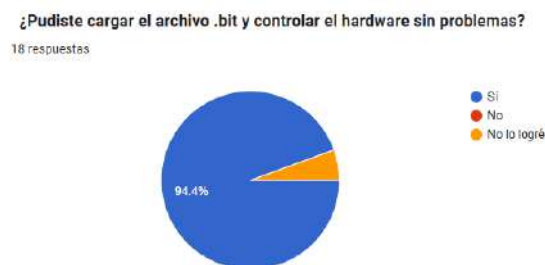


Figura 4.27: ¿Pudiste identificar fácilmente los laboratorios disponibles?

Sobre la interfaz gráfica, el 94.4 % la calificó como clara e intuitiva (Figura 4.28), aunque se sugieren mejoras menores en términos estéticos y navegación.



Figura 4.28: ¿La interfaz gráfica fue clara e intuitiva?

En cuanto a la facilidad de uso general de la plataforma, el 83.4 % consideró que navegar fue fácil o muy fácil (Figura 4.29).

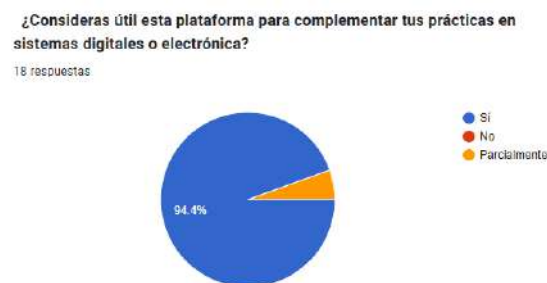


Figura 4.29: ¿Qué tan fácil te pareció navegar por la plataforma UAZ Labs?

Además, el 72.2 % de los estudiantes ya había tenido experiencia previa con laboratorios remotos (Figura 4.30), lo que valida aún más la aceptación del sistema en contextos académicos modernos.



Figura 4.30: ¿Has utilizado antes un laboratorio remoto?

Finalmente, las sugerencias de mejora recibidas (Figura 4.31) se centran en aspectos como mejorar la conectividad, la estética de la interfaz y ampliar el número de

laboratorios disponibles. Estas observaciones serán consideradas para iteraciones futuras del sistema.

¿Has utilizado antes un laboratorio remoto?

18 respuestas

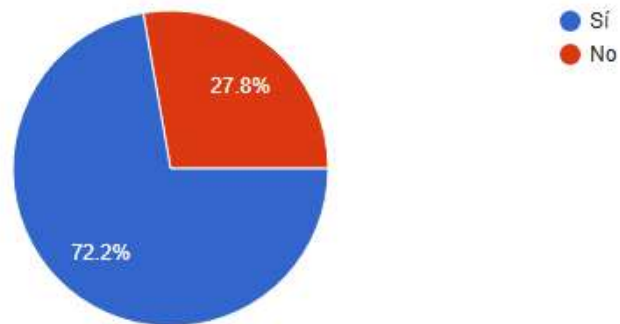


Figura 4.31: Respuestas abiertas a la pregunta: ¿Qué mejoras sugerirías para la plataforma?

En síntesis, los resultados obtenidos indican una alta aceptación del sistema, con una experiencia positiva por parte de los usuarios, validando su funcionalidad, accesibilidad y potencial para democratizar el acceso a laboratorios educativos reales desde entornos remotos.

Capítulo 5

Conclusiones

El presente trabajo logró la optimización y re diseño de una plataforma funcional preexistente, integrando mejoras sustanciales en su arquitectura física, electrónica y digital. Se consiguió un sistema de laboratorio remoto más robusto, intuitivo y escalable, centrado en el control de motores mediante una FPGA y gestionado desde una plataforma web interactiva. Esta solución responde a las necesidades actuales de enseñanza práctica a distancia, y además contribuye activamente a la democratización del acceso a laboratorios educativos, especialmente en contextos con recursos limitados.

Entre los principales logros alcanzados se destacan los siguientes:

- Se re diseñó y optimizó una plataforma web moderna, desarrollada con *React* y respaldada por *Firebase*, que permite la autenticación de usuarios, gestión de sesiones, carga remota de archivos *.bit* y sincronización en tiempo real con el sistema físico.
- Se desarrolló una nueva PCB personalizada que permite el control de motores DC, servomotores y motores paso a paso, con una distribución más ordenada, segura y modular, en comparación con versiones anteriores.
- Se automatizó completamente el proceso de carga de archivos *.bit* en la FPGA Basys 3 utilizando una Raspberry Pi 5 como intermediario, eliminando la necesidad de intervención técnica directa y mejorando la experiencia remota del estudiante.
- Se diseñó una nueva estructura física mediante modelado 3D en *SolidWorks* y se imprimió en 3D para alojar de forma compacta y ordenada todos los

elementos del sistema, lo cual facilita el mantenimiento, la visualización y la operación del laboratorio.

- Se integró un sistema de transmisión de video en tiempo real, permitiendo al usuario observar directamente la ejecución de sus prácticas, fomentando una experiencia inmersiva y accesible desde cualquier ubicación geográfica.
- Se incorporó una unidad STM32 como módulo de monitoreo para retroalimentar en tiempo real el estado de cada uno de los motores utilizados. Este microcontrolador permite captar información clave sobre el comportamiento del sistema, como activación de señales, tiempos de respuesta y posibles fallas, enviando estos datos a través de UART para ser visualizados desde la plataforma. Esta característica amplía la funcionalidad del laboratorio al añadir capacidad de diagnóstico, trazabilidad y verificación de resultados prácticos, enriqueciendo el proceso formativo del estudiante.

A diferencia del sistema original, esta nueva versión optimizada está diseñada para facilitar su reproducción, adaptación y expansión por otras instituciones educativas. Su arquitectura modular, basada en herramientas de código abierto y servicios en la nube, facilita la incorporación de nuevos módulos, sensores o prácticas experimentales, promoviendo una visión educativa más inclusiva, sostenible y tecnológica.

En conclusión, este proyecto no solo cumple con los objetivos académicos y técnicos planteados, sino que se consolida como una propuesta que impulsa el acceso equitativo a la educación práctica de calidad. Representa un avance significativo hacia la transformación digital de los laboratorios en entornos educativos y refuerza la importancia de la innovación tecnológica con sentido social.

Bibliografía

- [1] M. A. López Peña, *DevOps Aplicado a Sistemas IoT: Definición e Implementación de Procesos Continuos de Monitorización y Retroalimentación*. PhD thesis, ETSI_Sistemas_Infor, 2021.
- [2] J. Vargas, J. Cuero, and C. Torres, “Laboratorios remotos e iot una oportunidad para la formación en ciencias e ingeniería en tiempos del covid-19,” *Revista espacios*, vol. 41, no. 42, pp. 188–198, 2020.
- [3] A. Azad, “Design and development of remote laboratories with internet of things setting,” *Advances in Internet of Things*, vol. 11, pp. 95–112, 2021.
- [4] D. Reid, J. Burrridge, D. B. Lowe, and T. D. Drysdale, “Open-source remote laboratory experiments for controls engineering education,” *International Journal of Mechanical Engineering Education*, vol. 50, no. 4, pp. 828–848, 2022.
- [5] N. Kadham, P. Krishna, and K. Ravi, “Iot-based remote monitoring as a distance (online) laboratory for applied learning,” *SN Computer Science*, vol. 6, 2025.
- [6] A. Magyari and Y. Chen, “Fpga remote laboratory using iot approaches,” *Electronics*, vol. 10, no. 18, p. 2229, 2021.
- [7] J. Álvarez Ariza, “Can in-home laboratories foster learning, self-efficacy, and motivation during the covid-19 pandemic?,” *arXiv preprint arXiv:2203.16465*, 2022.
- [8] K. S. e. a. Viswanadh, “Engineering end-to-end remote labs using iot-based retrofitting,” *arXiv preprint arXiv:2402.05466*, 2024.

- [9] M. Abdulla and W. Ma, "Remote teaching and learning in applied engineering: A post-pandemic perspective," *arXiv preprint arXiv:2108.02714*, 2021.
- [10] S. e. a. Asgari, "An observational study of engineering online education during the covid-19 pandemic," *arXiv preprint arXiv:2010.01427*, 2020.
- [11] H. e. a. Callaghan, "Paradigms in remote experimentation," *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, vol. 3, no. 4, 2007.
- [12] S. e. a. Amador Nelke, "Enhancing lessons on the internet of things in science, technology, engineering, and medical education with a remote lab," *Sensors*, vol. 24, no. 19, p. 6424, 2024.
- [13] A. e. a. Van den Beemt, "Remote labs in higher engineering education: Engaging students with active learning pedagogy," *Journal of Computing in Higher Education*, vol. 35, no. 2, pp. 320–340, 2023.
- [14] C. F. e. a. Ordoñez Urbano, "Remote laboratories for physics education: A proposal toward interactive learning for engineering students," *IEEE RITA*, vol. 18, no. 3, pp. 305–312, 2023.
- [15] K. S. e. a. Viswanadh, "Engineering end-to-end remote labs using iot-based retrofitting," *arXiv preprint arXiv:2402.05466*, 2024.
- [16] R. e. a. Gil Vera, "A flexible framework for the deployment of stem real remote laboratories in digital electronics and control systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 14563–14579, 2024.
- [17] G. Castañeda Garza, "Remote labs for engineering students," *Observatory - Institute for the Future of Education*, 2021.
- [18] Z. H. Khan and S. Mekid, "Designing remote labs in outcome-based education using digital twin and metaverse," *IEEE Teaching Excellence Hub*, 2024.
- [19] A. e. a. Mohammed, "Remote controlled laboratory experiments for engineering education in the post-covid-19 era," in *Proceedings of NILES2020*, 2020.
- [20] A. Ozadowicz, "Modified blended learning in engineering higher education during the covid-19 lockdown," *Education Sciences*, vol. 10, no. 10, p. 292, 2021.

- [21] L. S. e. a. Post, "Effects of remote labs on learning outcomes in higher education," *Computers & Education*, vol. 140, p. 103596, 2019.
- [22] D. N. Perkins and G. Salomon, "Learning transfer and its implications for education in the digital age," *Journal of Engineering Education*, vol. 110, no. 4, pp. 725–737, 2021.
- [23] O. Ziaee and M. Hamed, "Augmented reality applications in manufacturing and its future scope in industry 4.0," 2021.
- [24] J. Solleiro, "La industria 4.0 y los cambios en la política industrial," *Ciencia*, vol. 74, pp. 56–61, 04 2023.
- [25] V. Roel, "La tercera revolución industrial y la era del conocimiento," *Lima, Universidad Editorial Mayor de San Marcos, Fondo Editorial*, 1998.
- [26] R. V. Cantor, "La tercera revolución industrial," *Universitas humanística*, vol. 39, no. 39, 1994.
- [27] J. M. Lastra Lastra, "Rifkin, jeremy, la tercera revolución industrial," *Boletín mexicano de derecho comparado*, vol. 50, no. 150, pp. 1457–1462, 2017.
- [28] G. B. López and L. E. VELASTEGUÍ, "Automatización de procesos industriales mediante industria 4.0," *Alfapublicaciones*, vol. 3, no. 3.1, pp. 98–115, 2021.
- [29] G. Spöttl and L. Windelband, "The 4th industrial revolution—its impact on vocational skills," *Journal of Education and Work*, vol. 34, no. 1, pp. 29–52, 2021.
- [30] P. Papadopoulos and D. Aikaterini, "Adapting engineering education for on-line learning environments during the covid-19 pandemic," *IEEE Transactions on Education*, vol. 63, no. 3, pp. 226–234, 2020.
- [31] J. Herrington and L. Kervin, "Digital pedagogies and the future of engineering education: Challenges and opportunities," *Research in Engineering Education Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 12–23, 2021.
- [32] P. Sun and X. Chen, "Remote laboratories and their impact on engineering education: A review of recent advances," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 7634–7643, 2020.

- [33] T. Hristova, K. Gabrovska-Evstatieva, and B. Evstatiev, "Prediction of engineering students' virtual lab understanding and implementation rates using svm classification," *Journal of e-Learning and Knowledge Society*, vol. 17, no. 1, pp. 62–71, 2021.
- [34] W. Kularatne, L. Dissawa, T. Ekanayake, and J. Ekanayake, "Developing and delivering a remote experiment based on the experiential learning framework during covid-19 pandemic," *arXiv e-prints*, 2021.
- [35] N. Slamnik-Kriještorac, R. V. den Langenbergh, T. Huybrechts, S. Gutiérrez, M. Gil, and J. Márquez-Barja, "Cloud-based virtual labs vs. low-cost physical labs: what engineering students think," *2021 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pp. 637–644, 2021.
- [36] J. Álvarez Ariza, "Can in-home laboratories foster learning, self-efficacy, and motivation during the covid-19 pandemic? – a case study in two engineering programs," *arXiv e-prints*, 2022.
- [37] Ámbar Pérez García and J. F. L. Feliciano, "Impact of covid-19 on education: Evolution of virtual laboratories," *7th IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE)*, 2023.
- [38] M. Gunasekaran, T. Maddumapatabandi, and K. Gamage, "Remote lab activities in a digital age: insights into current practices and future potentials," *Journal of Education*, 2021.
- [39] A. Ramírez, L. Villamagua, R. Rivera, and J. Riera, "The impact of remote labs on acquiring significant learning in engineering students," *Physics Education*, vol. 59, no. 1, p. 015010, 2024.
- [40] A. Mohammed, H. Zoghby, and M. Elmesalawy, "Remote controlled laboratory experiments for engineering education in the post-covid-19 era: Concept and example," *Proceedings of NILES2020: 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference*, 2020.
- [41] D. Vergara, P. Fernández-Arias, J. Extremera, L. P. Dávila, and M. P. Rubio, "Educational trends post covid-19 in engineering: Virtual laboratories," *Materials Today: Proceedings*, vol. 49, no. 5, pp. 155–160, 2021.

- [42] R. Sanchis and M. Fernández, "Remote laboratories: A solution to practical learning challenges in engineering education," *MDPI Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6424, 2021.
- [43] H. Zhang, W. Liu, and J. Li, "Enhancing engineering education with remote laboratory systems and iot technologies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23902–23911, 2020.
- [44] V. J. Bhute, P. Inguva, U. Shah, and C. Brechtelsbauer, "Transforming traditional teaching laboratories for effective remote delivery—a review," *Education for Chemical Engineers*, vol. 35, pp. 96–104, 2021.
- [45] A. Van den beemt, S. Groothuijsen, L. Ozkan, and W. Hendrix, "Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy," *Journal of Computing in Higher Education*, vol. 35, pp. 1–21, 08 2022.
- [46] C. Colwell, E. Scanlon, and M. Cooper, "Using remote laboratories to extend access to science and engineering," *Computers & Education*, vol. 38, pp. 65–76, 04 2002.
- [47] B. Balamuralithara and P. C. Woods, "Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 17, no. 1, pp. 108–118, 2009.
- [48] J. Ma and J. Nickerson, "Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review," *ACM Comput. Surv.*, vol. 38, 09 2006.
- [49] S. H. H. Al-Taai, H. A. Kanber, and W. A. M. Al-Dulaimi, "The importance of using the internet of things in education.," *Int. J. Emerg. Technol. Learn.*, vol. 18, no. 1, pp. 19–39, 2023.
- [50] R. S. Abd-Ali, S. A. Radhi, and Z. I. Rasool, "A survey: the role of the internet of things in the development of education," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 1, pp. 215–221, 2020.
- [51] M. Kassab, J. DeFranco, and P. Laplante, "A systematic literature review on internet of things in education: Benefits and challenges," *Journal of computer Assisted learning*, vol. 36, no. 2, pp. 115–127, 2020.

- [52] K. N. T. Ortiz, D. C. H. Muñoz, and W. N. M. Mendoza, "Importancia de los laboratorios remotos y virtuales en la educación superior," *Documentos De Trabajo ECBTI*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [53] E. Fabregas, G. Farias, S. Dormido-Canto, S. Dormido, and F. Esquembre, "Developing a remote laboratory for engineering education," *Computers & Education*, vol. 57, no. 2, pp. 1686–1697, 2011.
- [54] J. Grodotzki, T. Ortelt, and A. Tekkaya, "Remote and virtual labs for engineering education 4.0," *Procedia Manufacturing*, vol. 26, pp. 1349–1360, 01 2018.
- [55] A. F. Almarshoud, "The advancement in using remote laboratories in electrical engineering education: a review," *European Journal of Engineering Education*, vol. 36, no. 5, pp. 425–433, 2011.
- [56] A. Rojko, M. Debevc, and D. Hercog, "Implementation, effectiveness and experience with remote laboratory in engineering education," *Organizacija*, vol. 42, pp. 23–33, 03 2009.
- [57] K. El Kharki, K. Berrada, and D. Burgos, "Design and implementation of a virtual laboratory for physics subjects in moroccan universities," *Sustainability*, vol. 13, no. 7, p. 3711, 2021.
- [58] L. Gonzalez, A. Flores, A. Quirino, P. Leyva, H. Miranda-Vidales, and A. Contreras, "Diseño y desarrollo de un laboratorio remoto de microcontroladores de bajo costo," 07 2021.
- [59] R. A. Abumalloh, S. Asadi, M. Nilashi, B. Minaei-Bidgoli, F. K. Nayer, S. Samad, S. Mohd, and O. Ibrahim, "The impact of coronavirus pandemic (covid-19) on education: The role of virtual and remote laboratories in education," *Technology in Society*, vol. 67, p. 101728, 2021.
- [60] M. Hernandez-de Menendez, C. A. Escobar Díaz, and R. Morales-Menendez, "Engineering education for smart 4.0 technology: a review," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 14, pp. 789–803, September 2020.
- [61] L. J. Aguilar, *Internet de las cosas: Un futuro hiperconectado: 5G, inteligencia artificial, Big Data, Cloud, Blockchain, Ciberseguridad*. Alpha Editorial, 2021.

- [62] D. S. R. Supe, E. d. I. M. Z. Meza, and F. J. G. Silva, "Analizando internet de las cosas y la nube informática," *Revista Odigos*, vol. 3, no. 1, pp. 89–103, 2022.
- [63] A. Goyal, A. Jain, and A. Barjatya, "The architecture of internet of things," 05 2025.
- [64] T. Domínguez-Bolaño, O. Campos, V. Barral, C. J. Escudero, and J. A. García-Naya, "An overview of iot architectures, technologies, and existing open-source projects," *Internet of Things*, vol. 20, p. 100626, 2022.
- [65] A. Gerodimos, L. Maglaras, M. A. Ferrag, N. Ayres, and I. Kantzavelou, "Iot: Communication protocols and security threats," *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 3, pp. 1–13, 2023.
- [66] S. Singh, V. Tiwari, D. Kirti, and V. Vadi, "Protocols for the internet of things," *IJARCCCE*, vol. 13, pp. 1062–1067, 04 2024.
- [67] A. Cavallini and G. Marrocco, "Lora-based communication in smart cities: A review and future challenges," *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 273, 2023.
- [68] V. K. Prasad, P. Bhattacharya, D. Maru, S. Tanwar, A. Verma, A. Singh, A. K. Tiwari, R. Sharma, A. Alkhayyat, F.-E. Țurcanu, and M. S. Raboaca, "Federated learning for the internet-of-medical-things: A survey," *Mathematics*, vol. 11, no. 1, 2023.
- [69] M. Vaezi, A. Azari, S. R. Khosravirad, M. Shirvanimoghaddam, M. M. Azari, D. Chasaki, and P. Popovski, "Cellular, wide-area, and non-terrestrial iot: A survey on 5g advances and the road toward 6g," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 1117–1174, 2022.
- [70] F. Liu, Y. Cui, C. Masouros, J. Xu, T. X. Han, Y. C. Eldar, and S. Buzzi, "Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6g and beyond," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 6, pp. 1728–1767, 2022.
- [71] A. Reyna, C. Martín, J. Chen, E. Soler, and M. Díaz, "On blockchain and its integration with iot. challenges and opportunities," *Future Generation Computer Systems*, vol. 88, pp. 173–190, 2018.

- [72] V. Seoane, C. Garcia-Rubio, F. Almenares, and C. Campo, "Performance evaluation of coap and mqtt with security support for iot environments," *Computer Networks*, vol. 197, p. 108338, 2021.
- [73] S. Lucero *et al.*, "Iot platforms: enabling the internet of things," *White paper*, 2016.
- [74] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [75] M. Almutairi and F. T. Sheldon, "Iot–cloud integration security: A survey of challenges, solutions, and directions," *Electronics*, vol. 14, no. 7, 2025.
- [76] L. Babun, K. Denney, Z. B. Celik, P. McDaniel, and A. S. Uluagac, "A survey on iot platforms: Communication, security, and privacy perspectives," *Computer Networks*, vol. 192, p. 108040, 2021.
- [77] M. M. Ogonji, G. Okeyo, and J. M. Wafula, "A survey on privacy and security of internet of things," *Computer Science Review*, vol. 38, p. 100312, 2020.
- [78] P. Sun, Y. Wan, Z. Wu, Z. Fang, and Q. Li, "A survey on privacy and security issues in iot-based environments: Technologies, protection measures and future directions," *Computers & Security*, vol. 148, p. 104097, 2025.
- [79] Statista, "Number of connected devices worldwide 2015–2025," *Statista Research Department*, 2020.
- [80] L. Farhan, S. T. Shukur, A. E. Alissa, M. Alrweg, U. Raza, and R. Kharel, "A survey on the challenges and opportunities of the internet of things (iot)," in *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, pp. 1–5, 2017.
- [81] M. Farooq, M. Waseem, S. Mazhar, A. Khairi, and T. Kamal, "A review on internet of things (iot)," *International Journal of Computer Applications*, vol. 113, pp. 1–7, 03 2015.

- [82] P. Sethi and S. R. Sarangi, "Internet of things: Architectures, protocols, and applications," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, pp. 1–25, 2017. Review Article, Academic Editor: Rajesh Khanna.
- [83] N. Mohammad, R. Khatoon, S. I. Nilima, J. Akter, M. Kamruzzaman, and H. M. Sozib, "Ensuring security and privacy in the internet of things: Challenges and solutions," *Journal of Computer and Communications*, vol. 12, no. 8, pp. 257–277, 2024.
- [84] L. Atzori, A. Iera, G. Morabito, and M. Nitti, "The social internet of things (siot) – when social networks meet the internet of things: Concept, architecture and network characterization," *Computer Networks*, vol. 56, no. 16, pp. 3594–3608, 2012.
- [85] Y. Lu, "Security and privacy of internet of things: A review of challenges and solutions," *Journal of Cyber Security and Mobility*, vol. 12, pp. 813–844, November 2023.
- [86] B. Diène, J. J. Rodrigues, O. Diallo, E. H. M. Ndoeye, and V. V. Korotaev, "Data management techniques for internet of things," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 138, p. 106564, 2020.
- [87] S. K. Dash, S. K. Shakyawar, M. Sharma, and S. K. Kaushik, "Big data in healthcare: Management, analysis and future prospects," *Journal of Big Data*, vol. 6, no. 1, p. 54, 2019.
- [88] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, "Fog computing and its role in the internet of things," in *Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, MCC '12, (New York, NY, USA), p. 13–16, Association for Computing Machinery, 2012.
- [89] K. Nagorny, P. Lima-Monteiro, J. Barata, and A. W. Colombo, "Big data analysis in smart manufacturing: A review," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 10, no. 3, pp. 31–58, 2017.
- [90] W. Ding, X. Jing, Z. Yan, and L. T. Yang, "A survey on data fusion in internet of things: Towards secure and privacy-preserving fusion," *Information Fusion*, vol. 51, pp. 129–144, 2019.

- [91] F. A. Alaba, M. Othman, I. A. T. Hashem, and F. Alotaibi, "Internet of things security: A survey," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 88, pp. 10–28, 2017.
- [92] P. R. M. Rao, S. M. Krishna, and A. P. S. Kumar, "Privacy preservation techniques in big data analytics: A survey," *Journal of Big Data*, vol. 5, no. 1, p. 33, 2018.
- [93] A. S. Syed, D. Sierra-Sosa, A. Kumar, and A. Elmaghraby, "Iot in smart cities: A survey of technologies, practices and challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 2, pp. 429–475, 2021.
- [94] J. Xu, B. Gu, and G. Tian, "Review of agricultural iot technology," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 6, pp. 10–22, 2022.
- [95] W. Khan, M. Rehman, H. Zangoti, M. Afzal, N. Armi, and K. Salah, "Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 81, p. 106522, 2020.
- [96] G. Rajkumar, T. Gayathri Devi, and A. Srinivasan, "Heart disease prediction using iot based framework and improved deep learning approach: Medical application," *Medical Engineering & Physics*, vol. 111, p. 103937, 2023.
- [97] S. Taj, A. S. Imran, Z. Kastrati, S. M. Daudpota, R. A. Memon, and J. Ahmed, "Iot-based supply chain management: A systematic literature review," *Internet of Things*, vol. 24, p. 100982, 2023.
- [98] N. Alhalafi and P. Veeraraghavan, "Privacy and security challenges and solutions in iot: A review," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 322, p. 012013, aug 2019.
- [99] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge computing: Vision and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, 2016.
- [100] M. Roth, A. Luppold, and H. Falk, "Measuring and modeling energy consumption of embedded systems for optimizing compilers," in *Proceedings of the 21st International Workshop on Software and Compilers for Embedded Systems, SCOPES '18*, (New York, NY, USA), p. 86–89, Association for Computing Machinery, 2018.

- [101] J. Saleem, M. Hammoudeh, U. Raza, B. Adebisi, and R. Ande, "Iot standardisation: challenges, perspectives and solution," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems, ICFNDS '18*, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2018.
- [102] K. Finley, "The internet of trash: Iot has a looming e-waste problem," *IEEE Spectrum*, 2018.
- [103] A. K. M. Bahalul Haque, M. Oahiduzzaman Mondol Zihad, and M. Rifat Hasan, *5G and Internet of Things—Integration Trends, Opportunities, and Future Research Avenues*, pp. 217–245. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.
- [104] M. Khuntia, D. Singh, and S. Sahoo, "Impact of internet of things (iot) on 5g," in *Internet of Things and Secure Smart Environments*, pp. 125–136, Springer, 2021.
- [105] Q.-V. Pham, F. Fang, V. N. Ha, M. J. Piran, M. Le, L. B. Le, W.-J. Hwang, and Z. Ding, "A survey of multi-access edge computing in 5g and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116974–117017, 2020.
- [106] M. Ratnakar and A. Kumar, "5g with iot: Progressive trends in energy efficiency integration," *International Journal of Information Science and Computing*, vol. 11, pp. 95–109, 12 2024.
- [107] R. Navas-González, Oballe-Peinado, J. Castellanos-Ramos, D. Rosas-Cervantes, and J. A. Sánchez-Durán, "Practice projects for an fpga-based remote laboratory to teach and learn digital electronics," *Information*, vol. 14, no. 10, 2023.
- [108] R. M V, G. Purushothama, and P. Ramamurthy, "Design and implementation of iot based remote laboratory for sensor experiments," *International Journal of Interactive Mobile Technologies (ijIM)*, vol. 14, p. 227, 06 2020.
- [109] S. Amador Nelke, M. Khomyakov, S. Mhmad, M. Winokur, and A. Benis, "Designing and developing a remote iot lab for enhanced lab classes: Pedagogical study," in *Proceedings of the 2023 Pre-ICIS SIGDSA Symposium*, Association for Information Systems, Dec. 2023. Disponible en ResearchGate.

- [110] C. Quiroga, C. Flores, J. Gaete, and C. San Martín, "Remote laboratories as a tool to teach electrical circuits during the covid-19 pandemic: Analysis and student perceptions," *International Journal of Electrical Engineering & Education*, vol. 58, no. 4, pp. 873–891, 2021.
- [111] J. Li and W. Liang, "Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis," *PLOS ONE*, vol. 19, no. 12, p. e0316269, 2024.
- [112] M. A. Prada, J. J. Fuertes, S. Alonso, S. García, and M. Domínguez, "Challenges and solutions in remote laboratories. application to a remote laboratory of an electro-pneumatic classification cell," *Computers Education*, vol. 85, pp. 180–190, 2015.
- [113] A. K. M. Azad, "Design and development of remote laboratories with internet of things setting," *Advances in Internet of Things*, vol. 11, no. 3, pp. 95–112, 2021.
- [114] International Organization for Standardization, "Iso/iec 17025 — testing and calibration laboratories." <https://www.iso.org/ISO-IEC-17025-testing-and-calibration-laboratories.html>, 2017. Accessed: 2025-06-04.
- [115] International Organization for Standardization, "Iso/iec 27034-1:2011 - security techniques — application security — part 1: Overview and concepts." <https://www.iso.org/standard/44378.html>, 2011. Accessed: 2025-06-04.
- [116] Clinical and Laboratory Standards Institute, "Clsi auto09-a - remote access to clinical laboratory diagnostic devices via the internet; approved standard." <https://clsi.org/shop/standards/auto09/>, 2006. Accessed: 2025-06-04.
- [117] T. Scientist, "How cloud labs and remote research shape science." <https://www.the-scientist.com/how-cloud-labs-and-remote-research-shape-science-71734>, 2023. Accessed: 2025-06-04.
- [118] J. Li and W. Liang, "Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis," *PLOS ONE*, vol. 19, no. 12, p. e0316269, 2024.

- [119] D. Fadda, C. Salis, and G. Vivanet, "About the efficacy of virtual and remote laboratories in stem education in secondary school: A second-order systematic review," *Journal of Educational, Cultural and Psychological Studies (ECPS Journal)*, vol. 0, 12 2022.
- [120] M. C.-P. Poo, Y.-y. Lau, and Q. Chen, "Are virtual laboratories and remote laboratories enhancing the quality of sustainability education?," *Education Sciences*, vol. 13, no. 11, 2023.
- [121] L. Rassudov and A. Korunets, "Virtual labs: an effective engineering education tool for remote learning and not only," in *2022 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED)*, pp. 1–4, 2022.
- [122] L. Prasetya, A. Rofiudin, and H. Wahyu, "Implementation of internet of things (iot) in education: A systematic literature review," *Journal of Education and Computer Applications*, vol. 2, pp. 1–45, 05 2025.
- [123] S. Thangavel, S. K, and S. K, "Revolutionizing education through augmented reality (ar) and virtual reality (vr): Innovations, challenges and future prospects," *Asian Journal of Interdisciplinary Research*, pp. 1–28, 03 2025.
- [124] S. Wang, F. Wang, Z. Zhu, J. Wang, T. Tran, and Z. Du, "Artificial intelligence in education: A systematic literature review," *Expert Systems with Applications*, vol. 252, p. 124167, 2024.
- [125] G. Haus, L. Ludovico, E. Pagani, and N. Scarabottolo, "5g technology and its application to e-learning," in *Proceedings of the 11th International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN19)*, pp. 3457–3466, July 2019.
- [126] B. Kizilkaya and et al., "5genabled education4.0: Enabling technologies, challenges, and solutions," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166962–166967, 2021. Incluye prototipo de laboratorio remoto de circuitos controlado vía 5G en University of Glasgow.